

· 专题研究 ·

# 西藏驱龙矿区中新世侵入岩锆石微量和 Hf-O 同位素研究

李秋耘<sup>1,2</sup>, 杨志明<sup>1,3</sup>, 王 瑞<sup>4</sup>, 孙茂好<sup>1,2</sup>, 曲焕春<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 3. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083)

**摘要:** 碰撞环境下超大型矿床的形成通常经历了多期岩浆作用, 但不同期次岩浆之间的成因关系以及成矿斑岩岩浆的形成机制尚未得到有效约束。位于青藏高原腹地的驱龙超大型斑岩铜矿床发育多套中新世岩浆岩, 包括成矿前的花岗闪长岩(又称荣木错拉岩体)、成矿期二长花岗斑岩(简称P斑岩)和晚期二长花岗斑岩(简称X斑岩), 以及成矿后的高镁闪长玢岩, 且在花岗闪长岩中发现有闪长质包体。如此丰富的岩浆岩组合为系统研究碰撞环境下斑岩矿床成矿岩浆的形成机制提供了契机。本文系统分析了驱龙矿区各类岩浆岩中的锆石微量元素及 Hf-O 同位素组成, 并估算了驱龙矿区中新世岩浆氧化还原状态, 约束了岩浆起源及演化过程, 特别是成矿斑岩的形成过程。研究结果显示荣木错拉岩体及闪长质包体中锆石具有高的 Ce/Ce\* 值(平均值分别为 111、117)和相似的 Hf-O 同位素组成, 其  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值主要变化于 +7~+10 及 +7~+9 之间,  $\delta^{18}\text{O}$  值主要变化于 +5.6‰~+7.1‰ 和 +4.7‰~+7.0‰ 之间; 而 P 斑岩中锆石具有类似的  $\delta^{18}\text{O}$  值(+4.6‰~+6.4‰), 但 Ce/Ce\* 值(29~405, 平均值 149)及  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(+5~+10)变化范围明显偏大; 高镁闪长玢岩的锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值与 P 斑岩类似(+5.2‰~+6.3‰), 但  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(+3~+7)明显偏低, 不过, 其锆石 Ce/Ce\* 值(34~252, 平均值 159)也显示较大的变化范围。荣木错拉岩体及闪长岩包体正  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值、中等偏高的  $\delta^{18}\text{O}$  值表明其起源于新生下地壳; 高镁闪长玢岩较低的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  及  $\delta^{18}\text{O}$  值显示其起源于 Hf 同位素组分已被强烈改造的地幔, 而 P 斑岩变化、且整体介于荣木错拉岩体和高镁闪长玢岩之间的锆石 Hf 同位素组成表明其为荣木错拉岩体所代表的壳源岩浆与高镁闪长玢岩所代表的幔源岩浆混合的产物。驱龙中新世岩浆岩中高镁闪长玢岩中的锆石 Ce/Ce\* 值最高, 表明高镁闪长玢岩所代表的岩浆氧逸度也最高, 因此, P 斑岩形成过程中幔源物质的加入不仅可以提供水, 也可以抬升岩浆的氧逸度, 促使饱和的硫化物发生分解进而被利用, 这是 P 斑岩能够成矿的关键之一。

**关键词:** 斑岩铜矿; 氧逸度; 地幔熔体; 锆石微量元素; Hf-O 同位素

**中图分类号:** P588.12; P595

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2021)06-1023-26

## Zircon trace elemental and Hf-O isotopic compositions of the Miocene magmatic suite in the giant Qulong porphyry copper deposit, southern Tibet

LI Qiu-yun<sup>1,2</sup>, YANG Zhi-ming<sup>1,3</sup>, WANG Rui<sup>4</sup>, SUN Mao-yu<sup>1,2</sup> and QU Huan-chun<sup>1</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The formation of giant deposits in the collisional environment usually undergoes multiple stages of magmatism,

收稿日期: 2020-04-24; 接受日期: 2020-07-24; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600300); 国家自然科学基金面上项目(41973037)

作者简介: 李秋耘(1986-), 女, 汉族, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: qiuyunli@pku.edu.cn; 通讯作者: 杨志明(1978-), 男, 汉族, 博士, 研究员, 从事大陆碰撞成矿作用研究, E-mail: zm.yang@hotmail.com。

but the genetic relationship between different stages of magmas and the formation mechanism of ore-forming porphyry magma has not been effectively restricted. The giant Qulong porphyry copper deposit, located in the hinterland of Qinghai-Tibet Plateau, has several stages of Miocene magmas, including pre-ore granodiorite (also known as RMCL pluton), ore-forming granite porphyry (P and X porphyry), and post-ore high-Mg diorite porphyry (HMD), and diorite enclaves are found in the granodiorite. Such abundant magmatic sequence provides a good opportunity for the systematic study of the formation mechanism of ore-forming magma of porphyry deposits in collisional environment. This paper systematically analyzed the zircon trace elemental and Hf-O isotopic compositions of various types of magmatic rocks in Qulong and estimates the redox state of Miocene magmas in the Qulong mining area, which constrain the origin and evolution of the magma, especially the formation process of ore-forming porphyry.

The results show that the zircons in the RMCL pluton and the diorite enclaves before mineralization have high  $Ce/Ce^*$  ratios (average values of 111 and 117, respectively) and similar Hf-O isotopic compositions, with the value of  $\varepsilon Hf(t)$  of  $+7 \sim +10$  and  $+7 \sim +9$  respectively, and the value of  $\delta^{18}O$  of  $+5.6\text{‰} \sim +7.1\text{‰}$  and  $+4.7\text{‰} \sim +7.0\text{‰}$  respectively. Whereas zircons from the ore-forming P porphyry have similar  $\delta^{18}O$  values ( $+4.6\text{‰} \sim +6.4\text{‰}$ ), but the  $Ce/Ce^*$  ratios (29~405, with an average of 149) and the values of  $\varepsilon Hf(t)$  ( $+5 \sim +10$ ) change variably. Zircons from the post-ore high-Mg diorite porphyry (HMD) have similar  $\delta^{18}O$  values ( $+5.2\text{‰} \sim +6.3\text{‰}$ ) with the P porphyry, but lower  $\varepsilon Hf(t)$  values ( $+3 \sim +7$ ) and changeable  $Ce/Ce^*$  ratios (34~252, with an average of 159).

The positive  $\varepsilon Hf(t)$  value and moderate-high  $\delta^{18}O$  value of the RMCL pluton and diorite enclaves indicate that they were originated from the juvenile lower crust. The low  $\varepsilon Hf(t)$  and  $\delta^{18}O$  values of the HMD show that it was formed from the evolved mantle with a strongly altered Hf isotopic composition. The zircon Hf isotopic composition of the P porphyry, varies between the RMCL pluton and the HMD, showing that it was originated from magma mixing between the crust-derived magma (represented by RMCL pluton) and the mantle-derived magma (represented by HMD). Among the Qulong Miocene magmatic rocks, the zircon  $Ce/Ce^*$  ratio from the HMD is the highest, indicating that the magma represented by the diorite porphyry also has the highest oxygen fugacity. Therefore, the addition of mantle-derived material during the formation of the P porphyry can provide water and raise the oxygen fugacity of the magma, which promotes the decomposition of saturated sulfides. The whole process is one of the keys to the mineralization of the P porphyry.

**Key words:** porphyry copper deposit; oxygen fugacity; mantle melt; zircon trace elements; Hf-O isotopes

**Fund support:** National Key Research and Development Program of China (2016YFC0600300); National Natural Science Foundation of China (41973037)

斑岩铜矿可以产于弧环境,也可以产于大陆碰撞环境。弧环境斑岩矿床的形成过程比较清楚,一般认为成矿岩浆起源于地幔楔的部分熔融,由大洋板片的俯冲脱水诱发,岩浆相富水富S并具有较高氧逸度( $\Delta FMQ = +1 \sim +2$ ),岩浆高氧逸度的性质会抑制硫化物的过早饱和,进而促使Cu、Au随着岩浆一起上升到浅部,最终因流体饱和出溶而成矿(Richards, 2003)。由于缺乏活动的大洋俯冲,大陆碰撞环境下斑岩铜矿的形成很难用经典的斑岩铜矿理论解释。前人通过近20年的研究,提出了俯冲改造下地壳+幔源岩浆注入熔融模型,强调含矿斑岩岩浆来自于俯冲改造下地壳与部分幔源碱性岩浆的

混合,成矿金属Cu和S主要来自于下地壳,成矿流体来自下地壳角闪石分解及幔源岩浆混合注入,基本解释了成矿斑岩岩浆及主要成矿物质来源的问题(Hou *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015, 2016)。不过,碰撞环境下超大型矿床的形成通常经历了多期岩浆作用,如驱龙、甲玛、朱诺等矿床均发育多期岩浆作用,但不同期次岩浆之间的成因关系,以及成矿斑岩岩浆的形成机制尚未得到有效约束。

冈底斯巨型斑岩成矿带( $Cu > 45 \text{ Mt}$ )是全球知名的后碰撞斑岩成矿带,该带矿床主要形成于20~14 Ma之间,晚于印度-欧亚大陆碰撞近40~50 Ma(Hou *et al.*, 2004, 2015)。驱龙矿床是该带目前发

现的最大的斑岩铜矿床 (Yang *et al.*, 2009), 矿区岩浆岩较为发育, 且具有明显的多期性, 含矿斑岩中普遍发育闪长质包体, 成矿后期有高镁闪长玢岩侵位, 这些都为系统的研究后碰撞带成矿岩浆水和氧逸度的来源和演化提供了很好的契机 (杨志明, 2008; Yang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016, 2018)。

由于锆石封闭温度高、不易受蚀变影响, 以及锆石中变价元素 (如 Eu、Ce) 与岩浆氧化状态和水含量密切相关的特征, 常常联合锆石 Ti 温度计 (Ferry and Watson, 2007), 利用锆石的 Eu 异常、Ce 异常、Ce(IV)/Ce(III) 值等参数, 来指示岩浆的氧化还原状态 (Ballard *et al.*, 2002; Trail *et al.*, 2012) 和水含量 (Lu *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018), 进而评估岩浆成矿潜力 (Liang *et al.*, 2006; 辛洪波等, 2008; Burnham, 2012; Qiu *et al.*, 2013, 2014; Wang *et al.*, 2014a; Zhang *et al.*, 2017; Aibai *et al.*, 2019)。但最近, 一些研究发现锆石中的 Eu 异常并不单纯与氧逸度相关, 还会受到岩浆中榍石等矿物分离结晶作用的强烈影响 (榍石结晶导致同组分熔体中结晶的锆石 Eu/Eu\* 值趋向正异常) (Loader *et al.*, 2017); 而对于 Ce(IV)/Ce(III) 值指示岩浆的相对氧逸度也存在一些问题: ① 锆石的 LREE 含量较低且难以测准, 导致 Ce(III) 的分配系数的推算结果变化 2~3 个数量级, 从而导致最终的 Ce(IV)/Ce(III) 值变化范围很大; ② 由于矿物结晶过程中 (如榍石先于锆石结晶, 或同时结晶) 熔体 REE 含量的动态

变化, 将全岩 REE 含量直接假定为熔体 REE 含量是存在疑问的 (Lu *et al.*, 2016; Loader *et al.*, 2017)。故 Loader 等 (2017) 提出 Ce 异常的另一种计算方法:  $Ce/Ce^* = Ce_N / (Nd_N^2 / Sm_N)$  (排除 La、Pr 极低含量的影响), 或是用 Ce/Nd 值代替 Ce 异常 (Lu *et al.*, 2016)。另外, 锆石的 Hf-O 同位素也可以反映岩浆的源区 (Valley, 2003; Wu *et al.*, 2006)。

为此, 本文系统研究了驱龙矿床中新世岩浆岩锆石微量及 Hf-O 同位素组成, 通过各期岩浆岩锆石微量元素特征和 Hf-O 同位素的系统对比, 约束了岩浆性质、岩浆源区及成矿斑岩形成机制。

## 1 地质背景与侵入岩特征

冈底斯岩浆带主体为雅鲁藏布江缝合带所代表的新特提斯洋北向俯冲的产物, 该俯冲起始于晚三叠世, 一直持续到古新世, 随印度-欧亚板块碰撞而结束。冈底斯带后碰撞阶段发育大量中新世的小型酸性侵入岩体, 主要位于东冈底斯带; 同期也伴有超钾质岩发育, 主体位于西冈底斯带 (Zhao *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2018)。这些中酸性侵入岩体具有高 Sr/Y 和 La/Yb 值的埃达克质特征, 普遍伴随斑岩铜矿化 (Yang *et al.*, 2009, 2016; Wang *et al.*, 2018), 其中, 在驱龙地区形成了超大型矿床 (杨志明, 2008) (图 1)。

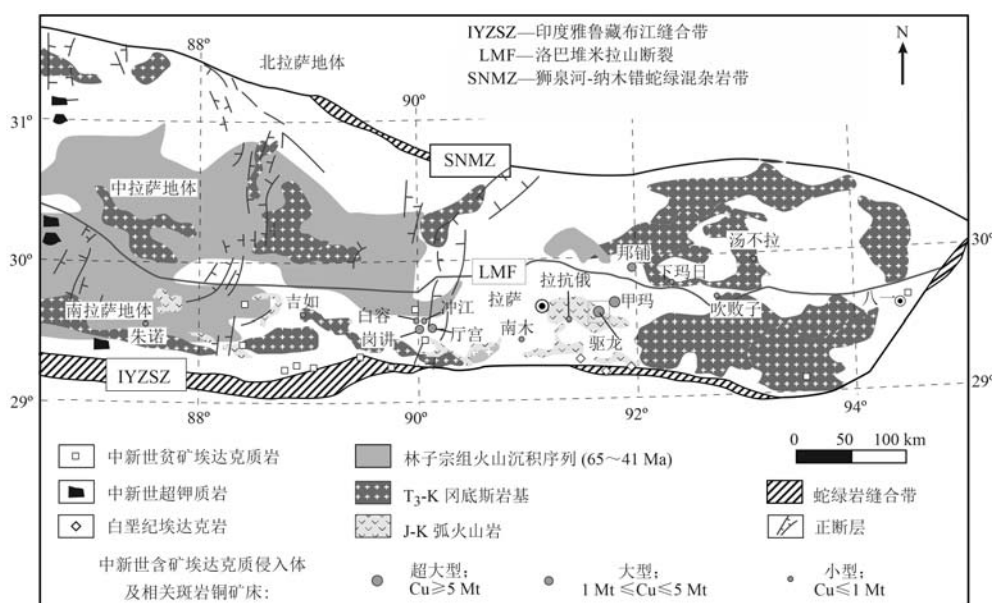


图 1 冈底斯带中东段岩浆岩及矿床分布地质图 (底图据 Yang *et al.*, 2015)

Fig. 1 Geological map of magmatism and ore deposits in the middle east segment of the Gangdise belt (after Yang *et al.*, 2015)

驱龙斑岩铜钼矿床南距雅鲁藏布江缝合带约 50 km, 是该带、乃至中国目前最大的斑岩铜矿床, 其铜资源量达~11.0 Mt (Cu 平均品位为 0.5%), 钼资源量~0.5 Mt (Mo 平均品位 0.03%) (孟祥金等, 2003; Yang and Cooke, 2019)。

驱龙矿区主要由早中侏罗世和中新世的岩石单元组成, 分别为:

(1) 早中侏罗世叶巴组火山岩, 为矿区内地层主体, 呈近 EW 向产出, 主要由中酸性火山岩、火山碎屑岩组成, 夹少量沉积岩夹层, 厚度近 3 km, 覆盖矿区面积约达 60% (杨志明, 2008) (图 2a)。在区域上, 叶巴组是一套火山-沉积序列, 年龄为 190~174 Ma (Zhu *et al.*, 2008)。地球化学特征上与弧火山岩相似, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti, 具有正  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  值, 被认为是新特提斯洋片向北俯冲的产物 (耿全如等, 2005; 董彦辉等,

2006; Zhu *et al.*, 2008)。

(2) 早侏罗世花岗斑岩 ( $182.3 \pm 1.5$  Ma), 产于矿区中西部, 故也称为“西部斑岩”, 出露面积约 1.5 km<sup>2</sup> (杨志明, 2008) (图 2a)。地球化学特征为高钾钙碱性系列, 具有明显 Eu 负异常, 富集大离子亲石元素、亏损高场强元素, 但不亏损 Ta, 不同于叶巴组同时代的火山岩 (杨志明等, 2008)。也有学者将此套岩石识别为叶巴组流纹斑岩, 并获得锆石 U-Pb 年龄为  $160.7 \pm 2.0$  Ma 和  $159.8 \pm 2.9$  Ma, 认为叶巴组火山活动持续~30 Ma (秦克章, 2014; Zhao *et al.*, 2015)。

(3) 中新世荣木错拉复式侵入岩, 位于矿区中部, 出露面积约 10 km<sup>2</sup>; 呈近 EW 向展布, 侵位于叶巴组第一段晶屑凝灰岩中, 造成围岩强烈角岩化 (杨志明, 2008) (图 2b, 2c)。该复式岩体岩在矿区东部以中粗粒花岗结构为主, 矿区西部则以斑状结

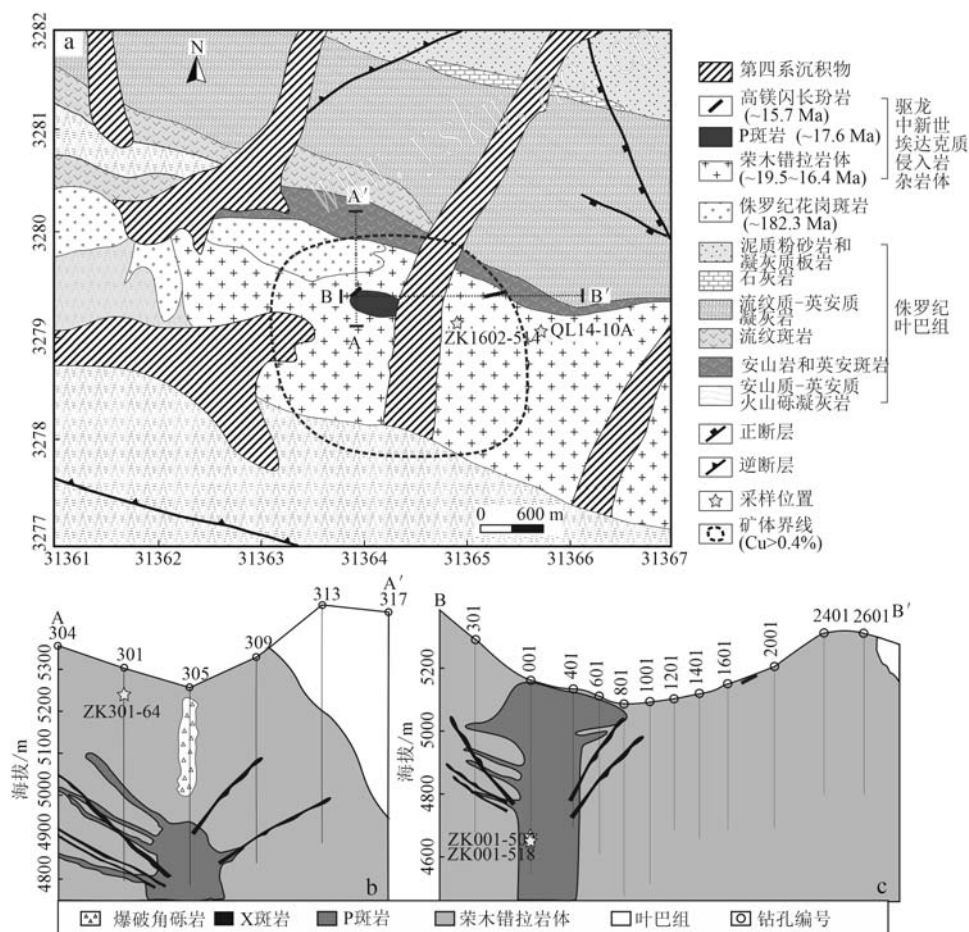


图 2 驱龙斑岩矿床地质图(a)、典型剖面图(b, c)及采样位置 (据 Yang *et al.*, 2009, 2015)

Fig. 2 Geological map of the Qulong porphyry Cu deposit (a), section A-A' (b) and B-B' (c) with sampling location (after Yang *et al.*, 2009, 2015)

构为主, 岩相组成变化于黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩之间, 主体为花岗闪长岩(图 3a)。岩石呈灰白色, 中粗粒花岗结构, 主要矿物有斜长石、钾长石、石英、黑云母和少量角闪石(5%~10%); 副矿物主要是榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿和金红石。锆石 U-Pb 年龄为  $19.5 \pm 0.4$  Ma~ $16.4 \pm 0.4$  Ma, 代表了从边缘相到中间相的结晶时限(王亮亮等, 2006; 杨志明, 2008; Hu *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2015)。受后期成矿斑岩岩浆侵位的影响, 靠近斑岩的荣木错拉岩体大多发生强烈蚀变和大量矿化。据统计, 该岩体容纳了驱龙超过 70% 的铜钼矿体, 是最主要的含矿岩石。远离成矿斑岩的部分蚀变以绢云母化、粘土化较为普遍。

闪长质包体: 常见于荣木错拉岩体中, 大小从 1~20 cm 不等。样品呈灰色, 近椭球状, 大小约

12 cm×15 cm(图 3b)。具有岩浆结构, 包体矿物组成主要为角闪石和斜长石, 含有一定的黑云母(图 3e, 3f)。角闪石呈自形柱状和针状两类, 大小为 0.2~1 mm 不等。斜长石中含有大量针状磷灰石和其他矿物的包裹体。黑云母有两类, 浅棕色具解理的自形黑云母, 以及深棕色呈粒状或补丁状的黑云母, 大小 0.2~1.5 mm 不等。局部可见角闪石被黑云母交代。副矿物主要为磷灰石、磁铁矿以及少量的榍石、锆石、金红石等。

(4) P 斑岩、X 斑岩及高镁闪长玢岩: 分布于矿区中东部, 是与成矿关系密切的二长花岗斑岩, 是矿区的成矿母岩(图 2)。根据切穿关系, 明显分为两期, 即早期东部斑岩(以下简称 P 斑岩)和晚期东部斑岩(以下简称 X 斑岩)。① P 斑岩, 侵位于荣木错拉复式岩体之中, 呈岩株状产出, 出露面积约

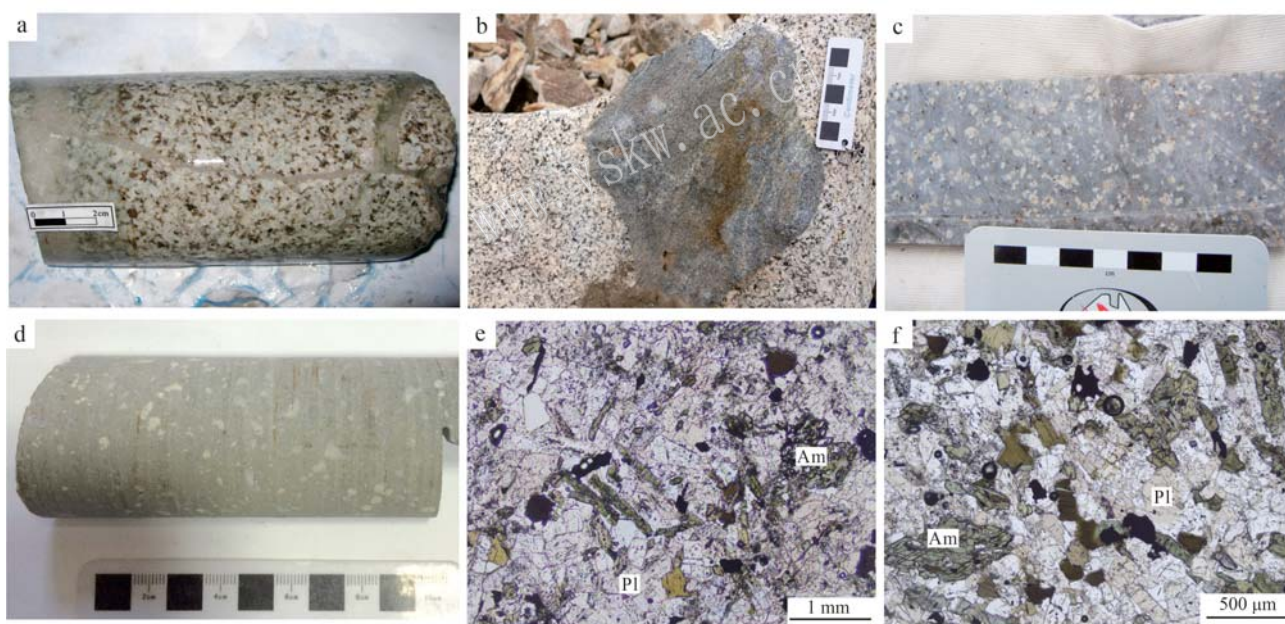


图 3 驱龙中新世岩体及包体手标本照片和包体镜下照片

Fig. 3 Hand-specimen photographs and photomicrographs of pluton and enclaves in the Qulong Miocene magmatic sequences

a—荣木错拉岩体, 岩性为黑云母二长花岗岩(样品 ZK301-64, 301 钻孔 64 m), 岩石具有黑云母化、硅化蚀变, 可见两组脉体, 其中石英+伊利石脉(~1 cm)切穿早期石英+黄铜矿脉(3 mm); b—荣木错拉岩体中常见的闪长质包体(样品 QL14-10), 大小约为 12 cm×15 cm 的椭圆状; c—P 斑岩(样品 ZK001-518, 001 钻孔 518 m), 斑晶主要为斜长石、石英, 约占 60%; d—高镁闪长玢岩(样品 ZK1602-514, 1602 钻孔 514 m), 呈灰黑色, 斑状结构, 斑晶以斜长石为主; e, f—闪长质包体显微照片(单偏光); Am—角闪石; Pl—斜长石

a—the Rongmucuo pluton is biotite monzogranite (sample ZK301-64, drill 301 in 64m). The sample shows biotite and silicified alteration, and two sets of veins can be seen, in which the quartz + illite vein (~1 cm) cuts through the early quartz + chalcopyrite vein (3 mm); b—the diorite inclusions (sample QL14-10) are common in the Rongmucuo pluton, and the size is about 12 cm×15 cm; c—P porphyry (sample ZK001-518, drill 001 in 518 m) is composed of feldspar and quartz phenocryst (accounting for about 60%); d—the high-Mg diorite porphyry (sample ZK1602-514, drill 1602 in 514 m) with grayish black and with porphyritic structure, and the phenocryst is dominated by plagioclase; e, f—photomicrographs of the diorite enclave (single polarized light); Am—amphibole; Pl—plagioclase

为  $0.2 \text{ km}^2$  (矿区出露面积最大), 被识别为致矿岩体 (causative intrusion) (图 2)。岩石为浅灰白色, 斑状结构 (图 3c), 斑晶主要为斜长石、石英、钾长石及少量黑云母, 斑晶总量约为 25%, 基质以石英和钾长石为主, 定名为二长花岗斑岩。锆石 U-Pb 年龄为  $17.6 \pm 0.7 \text{ Ma} \sim 16.2 \pm 0.3 \text{ Ma}$  (芮宗瑶等, 2003; Zhao *et al.*, 2015)。副矿物有磷灰石、金红石、锆石等。

② X 斑岩, 呈细小岩枝产出, 地表未见出露, 勘探工程揭示其切穿了荣木错拉岩体, 详细的脉体切穿关系显示, 该斑岩晚于主成矿事件的 P 斑岩 (图 2b, 2c)。锆石 U-Pb 年龄为  $17.7 \pm 0.3 \text{ Ma} \sim 15.9 \pm 0.3 \text{ Ma}$  (杨志明, 2008; Zhao *et al.*, 2015)。岩石呈浅灰色, 斑状结构, 斑晶主要是斜长石及少量钾长石、石英和黑云母, 斑晶总量约 15%~20%。在 P 斑岩、X 斑岩与荣木错拉复式岩体接触的部位, 均发现具有单向固结结构 (unidirectional solidification texture, UST) 的石英, 是岩浆出溶的地质记录 (杨志明, 2008; Qu *et al.*, 2017)。

③ 细晶岩, P 斑岩呈细小岩枝侵入荣木错拉岩体时常发生淬火, 形成细晶岩。岩石呈灰白色, 细晶结构, 主要矿物为细粒他形石英和钾长石。

④ 高镁闪长玢岩, 是目前矿区发现的最晚一期岩浆单元, 呈岩脉状产于东部斑岩附近, 切穿荣木错拉岩体及东部斑岩。岩石呈灰黑色, 斑状结构, 斑晶主要是斜长石及少量石英、角闪石和黑云母, 斑晶总量为 7%~8%, 基质以斜长石和角闪石为主 (图 3d)。锆石 U-Pb 年龄为  $15.7 \pm 0.2 \text{ Ma} \sim 15.3 \pm 0.2 \text{ Ma}$  (Yang *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2015)。

## 2 样品及测试方法

本次研究的对象包括: 成矿前的花岗闪长岩 (样品 ZK301-64) 及其闪长质包体 (样品 QL14-10A)、成矿期的 P 斑岩 (样品 ZK001-518 和 ZK001-502)、成矿后期的高镁闪长玢岩 (样品 ZK1602-514)。除闪长质包体样品采自地表 (坐标为  $29^{\circ}36'39''\text{N}$ ,  $91^{\circ}36'53''\text{E}$ ), 其余 4 件代表性岩石样品均来自岩芯, 具体采样位置如图 2 所示。X 斑岩由于产出体量较小或受蚀变影响等因素, 故未进行采样分析。

### 2.1 锆石 U-Pb 定年及微量元素测定

锆石 U-Pb 定年测试在中国科学技术大学激光剥蚀电感耦合等离子体质谱实验室 (LA-ICP-MS) 完成, 剥蚀束斑直径为  $32 \mu\text{m}$ , 剥蚀方式为每测试 4

个未知样品点时测试一次标准锆石 91500, 每测试 8 个未知样品点时测试一次 NIST610。数据处理与分析采用中国科学技术大学 LA-ICP-MS 实验室的 LaDating@Zrn 软件, 加权平均年龄计算与谐和图的绘制由 Isoplot 4.15 完成, 普通铅校正使用的是 ComPbCorr#3-I18。

锆石微区原位微量元素分析在同一实验室进行, 运用同一套仪器, 高纯氦气作为载气, 激光剥蚀时氦气流速为  $0.3 \text{ L/min}$ , 频率为  $10 \text{ Hz}$ , 激光束能量为  $11 \text{ J/cm}^2$ , 剥蚀直径为  $32 \mu\text{m}$ 。测定时用国际标准物质 NIST610 作为外标, 由于  $\text{SiO}_2$  在锆石中的含量较恒定, 选择 Si 作为内标来消除激光能量在点分析过程中以及分析点之间的漂移。样品分析结果采用 LaTEcal 软件进行处理。

### 2.2 锆石原位 O 同位素分析

锆石微区原位氧同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室的 Cameca IMS-1280 型双离子源多接收器二次离子质谱仪上进行。用强度为  $\sim 2 \text{ nA}$  的一次  $^{133}\text{Cs}^+$  离子束通过  $10 \text{ kV}$  加速电压轰击样品表面, 一次离子束斑直径约为  $20 \mu\text{m}$ 。仪器质量分馏 (IMF) 校正采用标准锆石 Penglai ( $^{18}\text{O} = 5.31\text{‰} \pm 0.10\text{‰}$ ), 标准锆石 Qinghu ( $^{18}\text{O} = 5.41\text{‰} \pm 0.44\text{‰}$ ) 用于监控测试结果的准确度 (Li *et al.*, 2010; 李献华等, 2013)。详细分析过程参考文献李献华等 (2009)。

### 2.3 LA-MC-ICP-MS 锆石原位 Lu-Hf 同位素测试

锆石 Hf 同位素的分析是在前述锆石 U-Pb 同位素基础上完成的, 测试在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学重点实验室 Neptune Plus 型多接受等离子质谱和 GeoLasPro 193 nm 激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上进行, 实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 剥蚀直径采用  $44 \mu\text{m}$ , 测定时使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考物质。相关仪器运行条件及详细分析流程见文献 (侯可军等, 2007)。分析过程中锆石标准 GJ-1 的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  测试加权平均值为  $0.282\,007 \pm 0.000\,025 (2\sigma)$ 。计算初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  时, Lu 的衰变常数采用  $1.865 \times 10^{-11} / \text{a}$  (Scherer, 2001),  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  值的计算采用球粒陨石 Hf 同位素值  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.033\,6$ ,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\,785$  (Bouvier *et al.*, 2008)。在 Hf 的地幔模式年龄计算中, 亏损地幔  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  现在值采用  $0.283\,25$ ,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  采用  $0.038\,4$  (Griffin *et al.*, 2000), 地壳模式年龄计算时采用平均地壳的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$

(Griffin *et al.*, 2002)。

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石 U-Pb 年龄

对于驱龙矿床的侵入岩年龄及成矿作用时限,

前人已经开展了大量详尽的年代学研究(芮宗瑶等, 2003; 孟祥金等, 2003; 王亮亮等, 2006; 杨志明, 2008; Zhao *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016), 厘清了岩浆侵位序列及成矿作用时代, 与本文分析锆石 Hf-O 同位素获得的配套年龄结果(表1), 微量元素比值特征等参数(表2)一并总结于表4。

表1 驱龙矿床侵入岩及其包体锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP MS zircon U-Pb isotopic data of each intrusive rocks and the diorite enclave in Qulong deposit

| 样品名称及点号     | $w_{\text{B}}/10^{-6}$ |     | Th/U | 同位素比值                            |                  |                                  |                  | 年龄/Ma                            |                  |
|-------------|------------------------|-----|------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|
|             | U                      | Th  |      | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $\pm 2\text{SE}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $\pm 2\text{SE}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $\pm 2\text{SE}$ |
| 荣木错拉岩体      |                        |     |      |                                  |                  |                                  |                  |                                  |                  |
| ZK301-64-1  | 191                    | 97  | 0.5  | 0.026 1                          | 0.007 8          | 0.003 1                          | 0.000 3          | 19.9                             | 1.8              |
| ZK301-64-2  | 159                    | 59  | 0.4  | 0.016 1                          | 0.007 4          | 0.002 9                          | 0.000 3          | 18.4                             | 1.8              |
| ZK301-64-3  | 178                    | 90  | 0.5  | 0.022 5                          | 0.008 7          | 0.002 5                          | 0.000 3          | 16.3                             | 1.6              |
| ZK301-64-4  | 198                    | 147 | 0.7  | 0.024 5                          | 0.009 2          | 0.002 8                          | 0.000 3          | 18.0                             | 1.8              |
| ZK301-64-5  | 224                    | 137 | 0.6  | 0.018 6                          | 0.007 1          | 0.002 8                          | 0.000 3          | 18.3                             | 1.7              |
| ZK301-64-6  | 199                    | 100 | 0.5  | 0.030 2                          | 0.009 7          | 0.002 8                          | 0.000 2          | 18.2                             | 1.6              |
| ZK301-64-7  | 290                    | 148 | 0.5  | 0.025 3                          | 0.006 7          | 0.002 8                          | 0.000 2          | 17.7                             | 1.3              |
| ZK301-64-8  | 271                    | 90  | 0.3  | 0.013 6                          | 0.006 1          | 0.002 9                          | 0.000 3          | 18.7                             | 1.7              |
| ZK301-64-9  | 256                    | 136 | 0.5  | 0.012 8                          | 0.006 4          | 0.002 5                          | 0.000 2          | 16.0                             | 1.6              |
| ZK301-64-10 | 257                    | 125 | 0.5  | 0.015 7                          | 0.006 7          | 0.002 7                          | 0.000 2          | 17.6                             | 1.4              |
| ZK301-64-11 | 183                    | 65  | 0.4  | 0.014 2                          | 0.006 7          | 0.002 5                          | 0.000 3          | 16.2                             | 1.6              |
| ZK301-64-12 | 302                    | 171 | 0.6  | 0.018 9                          | 0.006 1          | 0.002 7                          | 0.000 2          | 17.1                             | 1.3              |
| ZK301-64-13 | 217                    | 90  | 0.4  | 0.018 6                          | 0.006 9          | 0.002 4                          | 0.000 2          | 15.2                             | 1.3              |
| ZK301-64-14 | 197                    | 98  | 0.5  | 0.019 9                          | 0.008 0          | 0.002 6                          | 0.000 3          | 16.9                             | 1.6              |
| ZK301-64-15 | 206                    | 95  | 0.5  | 0.012 4                          | 0.006 1          | 0.002 8                          | 0.000 3          | 17.8                             | 1.7              |
| ZK301-64-16 | 206                    | 109 | 0.5  | 0.022 7                          | 0.007 0          | 0.002 7                          | 0.000 2          | 17.4                             | 1.2              |
| ZK301-64-17 | 160                    | 70  | 0.4  | 0.009 8                          | 0.004 9          | 0.002 6                          | 0.000 2          | 16.5                             | 1.5              |
| ZK301-64-18 | 172                    | 86  | 0.5  | 0.014 1                          | 0.005 6          | 0.002 7                          | 0.000 2          | 17.4                             | 1.3              |
| ZK301-64-19 | 263                    | 128 | 0.5  | 0.019 3                          | 0.009 2          | 0.002 7                          | 0.000 3          | 17.2                             | 2.2              |
| ZK301-64-20 | 328                    | 110 | 0.3  | 0.019 1                          | 0.005 6          | 0.002 6                          | 0.000 2          | 17.0                             | 1.1              |
| ZK301-64-21 | 193                    | 102 | 0.5  | 0.018 6                          | 0.008 2          | 0.002 7                          | 0.000 3          | 17.6                             | 1.8              |
| ZK301-64-22 | 203                    | 88  | 0.4  | 0.016 2                          | 0.006 6          | 0.002 8                          | 0.000 2          | 17.7                             | 1.4              |
| ZK301-64-23 | 585                    | 369 | 0.6  | 0.011 8                          | 0.003 1          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.8                             | 0.8              |
| ZK301-64-24 | 716                    | 449 | 0.6  | 0.015 3                          | 0.003 3          | 0.002 7                          | 0.000 1          | 17.4                             | 0.8              |
| ZK301-64-25 | 505                    | 263 | 0.5  | 0.016 9                          | 0.004 2          | 0.002 9                          | 0.000 2          | 18.4                             | 1.0              |
| ZK301-64-26 | 400                    | 181 | 0.5  | 0.012 5                          | 0.003 7          | 0.002 5                          | 0.000 2          | 16.3                             | 1.1              |
| ZK301-64-27 | 206                    | 119 | 0.6  | 0.038 0                          | 0.010 0          | 0.002 8                          | 0.000 2          | 18.0                             | 1.6              |
| ZK301-64-28 | 362                    | 172 | 0.5  | 0.017 5                          | 0.005 3          | 0.002 7                          | 0.000 2          | 17.6                             | 1.1              |
| ZK301-64-29 | 370                    | 145 | 0.4  | 0.015 6                          | 0.005 4          | 0.002 7                          | 0.000 2          | 17.1                             | 1.4              |
| ZK301-64-30 | 256                    | 139 | 0.5  | 0.012 6                          | 0.005 7          | 0.002 7                          | 0.000 2          | 17.2                             | 1.4              |
| 闪长质包体       |                        |     |      |                                  |                  |                                  |                  |                                  |                  |
| QL14-10A-04 | 301                    | 153 | 0.5  | 0.024 3                          | 0.006 9          | 0.002 4                          | 0.000 2          | 15.6                             | 1.5              |
| QL14-10A-08 | 207                    | 96  | 0.5  | 0.024 9                          | 0.008 2          | 0.002 5                          | 0.000 3          | 16.0                             | 1.8              |
| QL14-10A-10 | 247                    | 108 | 0.4  | 0.020 1                          | 0.007 1          | 0.002 6                          | 0.000 3          | 16.9                             | 1.8              |
| QL14-10A-11 | 320                    | 185 | 0.6  | 0.017 3                          | 0.005 3          | 0.003 1                          | 0.000 3          | 19.8                             | 1.8              |
| QL14-10A-13 | 337                    | 166 | 0.5  | 0.023 5                          | 0.005 8          | 0.002 4                          | 0.000 2          | 15.3                             | 1.5              |
| QL14-10A-17 | 186                    | 85  | 0.5  | 0.017 2                          | 0.008 1          | 0.002 5                          | 0.000 3          | 16.1                             | 1.9              |
| QL14-10A-22 | 216                    | 124 | 0.6  | 0.028 0                          | 0.009 1          | 0.002 8                          | 0.000 3          | 18.3                             | 1.8              |
| QL14-10A-24 | 280                    | 156 | 0.6  | 0.023 4                          | 0.006 8          | 0.002 6                          | 0.000 3          | 16.4                             | 1.6              |
| QL14-10A-28 | 562                    | 376 | 0.7  | 0.016 4                          | 0.004 0          | 0.002 5                          | 0.000 2          | 16.2                             | 1.2              |
| QL14-10A-29 | 351                    | 231 | 0.7  | 0.023 1                          | 0.007 3          | 0.002 3                          | 0.000 2          | 14.9                             | 1.3              |
| QL14-10A-31 | 349                    | 181 | 0.5  | 0.016 7                          | 0.005 1          | 0.002 5                          | 0.000 2          | 15.9                             | 1.3              |
| QL14-10A-35 | 268                    | 124 | 0.5  | 0.007 1                          | 0.004 1          | 0.002 5                          | 0.000 2          | 16.2                             | 1.5              |
| QL14-10A-36 | 295                    | 175 | 0.6  | 0.019 4                          | 0.006 3          | 0.002 6                          | 0.000 2          | 16.5                             | 1.5              |

续表 1-1  
Continued Table 1-1

| 样品名称及点号      | $w_B/10^{-6}$ |       | Th/U | 同位素比值                            |                  |                                  |                  | 年龄/Ma                            |                  |
|--------------|---------------|-------|------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|
|              | U             | Th    |      | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $\pm 2\text{SE}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $\pm 2\text{SE}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $\pm 2\text{SE}$ |
| P 斑岩         |               |       |      |                                  |                  |                                  |                  |                                  |                  |
| ZK001-518-1  | 3 690         | 1 189 | 0.3  | 0.014 2                          | 0.001 5          | 0.002 2                          | 0.000 1          | 14.3                             | 0.4              |
| ZK001-518-2  | 363           | 273   | 0.8  | 0.028 7                          | 0.006 9          | 0.002 6                          | 0.000 2          | 16.5                             | 1.1              |
| ZK001-518-3  | 2 480         | 1 285 | 0.5  | 0.039 9                          | 0.004 5          | 0.002 5                          | 0.000 1          | 16.4                             | 0.5              |
| ZK001-518-4  | 3 430         | 1 533 | 0.4  | 0.015 2                          | 0.001 5          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.6                             | 0.3              |
| ZK001-518-5  | 2 210         | 676   | 0.3  | 0.030 9                          | 0.004 1          | 0.002 7                          | 0.000 1          | 17.4                             | 0.5              |
| ZK001-518-6  | 453           | 361   | 0.8  | 0.015 4                          | 0.004 2          | 0.002 6                          | 0.000 2          | 16.5                             | 1.1              |
| ZK001-518-7  | 325           | 273   | 0.8  | 0.013 6                          | 0.005 3          | 0.002 6                          | 0.000 2          | 16.5                             | 1.4              |
| ZK001-518-8  | 5 170         | 1 458 | 0.3  | 0.017 3                          | 0.002 3          | 0.002 2                          | 0.000 0          | 14.4                             | 0.3              |
| ZK001-518-9  | 2 940         | 741   | 0.3  | 0.014 7                          | 0.001 8          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.8                             | 0.4              |
| ZK001-518-10 | 1 450         | 691   | 0.5  | 0.014 3                          | 0.002 4          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 15.1                             | 0.6              |
| ZK001-518-11 | 554           | 841   | 1.5  | 0.017 7                          | 0.004 4          | 0.002 5                          | 0.000 1          | 16.0                             | 0.9              |
| ZK001-518-12 | 454           | 399   | 0.9  | 0.016 7                          | 0.004 0          | 0.002 3                          | 0.000 2          | 16.0                             | 1.0              |
| ZK001-518-13 | 4 300         | 1 499 | 0.3  | 0.015 3                          | 0.001 5          | 0.002 3                          | 0.000 0          | 14.8                             | 0.3              |
| ZK001-518-14 | 2 170         | 562   | 0.3  | 0.018 0                          | 0.003 3          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 15.1                             | 0.5              |
| ZK001-518-15 | 574           | 351   | 0.6  | 0.015 4                          | 0.003 3          | 0.002 6                          | 0.000 1          | 16.5                             | 0.8              |
| ZK001-518-16 | 519           | 529   | 1.0  | 0.032 1                          | 0.006 7          | 0.002 9                          | 0.000 2          | 18.8                             | 1.1              |
| ZK001-518-17 | 585           | 614   | 1.0  | 0.018 6                          | 0.003 8          | 0.002 5                          | 0.000 1          | 16.2                             | 0.8              |
| ZK001-518-18 | 1 209         | 1 294 | 1.1  | 0.016 5                          | 0.002 7          | 0.002 4                          | 0.000 1          | 15.2                             | 0.6              |
| ZK001-518-19 | 3 326         | 1 609 | 0.5  | 0.021 2                          | 0.002 3          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.7                             | 0.4              |
| ZK001-518-20 | 641           | 1 481 | 2.3  | 0.036 6                          | 0.006 2          | 0.002 6                          | 0.000 1          | 16.5                             | 0.8              |
| ZK001-518-21 | 974           | 645   | 0.7  | 0.027 1                          | 0.004 2          | 0.002 2                          | 0.000 1          | 14.4                             | 0.6              |
| ZK001-518-22 | 1 780         | 749   | 0.4  | 0.014 9                          | 0.003 7          | 0.002 4                          | 0.000 1          | 15.3                             | 0.4              |
| ZK001-518-23 | 330           | 554   | 1.7  | 0.020 0                          | 0.004 9          | 0.002 5                          | 0.000 2          | 15.9                             | 1.0              |
| ZK001-518-24 | 902           | 958   | 1.1  | 0.029 2                          | 0.004 1          | 0.002 6                          | 0.000 1          | 16.8                             | 0.8              |
| ZK001-518-25 | 1 020         | 2 010 | 2.0  | 0.236 0                          | 0.014 0          | 0.004 2                          | 0.000 1          | 27.2                             | 0.9              |
| P 斑岩         |               |       |      |                                  |                  |                                  |                  |                                  |                  |
| ZK001-502-1  | 621           | 563   | 0.9  | 0.020 0                          | 0.007 3          | 0.002 5                          | 0.000 2          | 16.4                             | 1.8              |
| ZK001-502-2  | 580           | 860   | 1.5  | 0.015 6                          | 0.007 1          | 0.002 6                          | 0.000 3          | 16.7                             | 1.9              |
| ZK001-502-3  | 3 050         | 1 020 | 0.3  | 0.014 7                          | 0.003 2          | 0.002 4                          | 0.000 1          | 15.6                             | 0.8              |
| ZK001-502-4  | 3 000         | 2 980 | 1.0  | 0.010 6                          | 0.002 5          | 0.002 5                          | 0.000 1          | 16.3                             | 0.9              |
| ZK001-502-5  | 372           | 230   | 0.6  | 0.027 0                          | 0.011 0          | 0.002 6                          | 0.000 4          | 17.0                             | 2.6              |
| ZK001-502-6  | 396           | 246   | 0.6  | 0.020 2                          | 0.008 8          | 0.002 6                          | 0.000 4          | 16.5                             | 2.4              |
| ZK001-502-7  | 327           | 608   | 1.9  | 0.026 0                          | 0.012 0          | 0.002 4                          | 0.000 4          | 15.3                             | 2.5              |
| ZK001-502-8  | 1 070         | 376   | 0.4  | 0.019 1                          | 0.006 5          | 0.002 5                          | 0.000 2          | 16.1                             | 1.5              |
| ZK001-502-9  | 760           | 834   | 1.1  | 0.024 5                          | 0.007 3          | 0.002 6                          | 0.000 3          | 16.7                             | 1.6              |
| ZK001-502-10 | 257           | 107   | 0.4  | 0.090 0                          | 0.025 0          | 0.008 7                          | 0.001 4          | 55.8                             | 8.8              |
| ZK001-502-11 | 1 430         | 1 310 | 0.9  | 0.017 9                          | 0.004 7          | 0.002 4                          | 0.000 2          | 15.2                             | 1.2              |
| ZK001-502-12 | 283           | 231   | 0.8  | 0.029 0                          | 0.014 0          | 0.002 5                          | 0.000 4          | 16.1                             | 2.8              |
| ZK001-502-13 | 3 200         | 977   | 0.3  | 0.016 4                          | 0.003 3          | 0.002 5                          | 0.000 1          | 15.8                             | 0.7              |
| ZK001-502-14 | 311           | 179   | 0.6  | 0.175 0                          | 0.055 0          | 0.003 7                          | 0.000 7          | 23.9                             | 4.5              |
| ZK001-502-15 | 1 920         | 701   | 0.4  | 0.019 2                          | 0.004 9          | 0.002 4                          | 0.000 2          | 15.7                             | 1.2              |
| ZK001-502-16 | 376           | 321   | 0.9  | 0.021 0                          | 0.010 0          | 0.002 2                          | 0.000 3          | 14.1                             | 2.2              |
| ZK001-502-17 | 195           | 118   | 0.6  | 0.015 0                          | 0.011 0          | 0.002 6                          | 0.000 5          | 16.8                             | 3.2              |
| ZK001-502-18 | 1 910         | 304   | 0.2  | 0.018 1                          | 0.003 9          | 0.002 3                          | 0.000 2          | 15.0                             | 1.0              |
| ZK001-502-19 | 1 700         | 1 840 | 1.1  | 0.150 0                          | 0.017 0          | 0.021 3                          | 0.000 7          | 135.5                            | 4.4              |
| ZK001-502-20 | 561           | 530   | 0.9  | 0.014 5                          | 0.006 1          | 0.002 5                          | 0.000 3          | 16.0                             | 1.8              |
| ZK001-502-21 | 65            | 58    | 0.9  | 0.009 0                          | 0.014 0          | 0.001 4                          | 0.000 5          | 9.2                              | 3.5              |
| ZK001-502-22 | 320           | 293   | 0.9  | 0.031 0                          | 0.012 0          | 0.002 0                          | 0.000 4          | 13.0                             | 2.3              |
| ZK001-502-23 | 660           | 796   | 1.2  | 0.017 0                          | 0.004 7          | 0.002 4                          | 0.000 2          | 15.3                             | 1.1              |
| ZK001-502-24 | 400           | 219   | 0.5  | 0.014 1                          | 0.005 3          | 0.002 8                          | 0.000 3          | 17.9                             | 1.7              |
| ZK001-502-25 | 1 909         | 3 930 | 2.1  | 0.040 9                          | 0.008 2          | 0.002 7                          | 0.000 1          | 17.5                             | 0.8              |
| ZK001-502-26 | 611           | 419   | 0.7  | 0.018 0                          | 0.005 1          | 0.002 6                          | 0.000 2          | 16.9                             | 1.3              |
| ZK001-502-27 | 3 270         | 1 670 | 0.5  | 0.016 4                          | 0.002 1          | 0.002 5                          | 0.000 1          | 16.1                             | 0.6              |
| ZK001-502-28 | 874           | 547   | 0.6  | 0.057 0                          | 0.011 0          | 0.002 8                          | 0.000 2          | 17.9                             | 1.2              |
| ZK001-502-29 | 1 094         | 629   | 0.6  | 0.015 8                          | 0.003 6          | 0.002 6                          | 0.000 2          | 16.5                             | 1.0              |
| ZK001-502-30 | 960           | 696   | 0.7  | 0.032 0                          | 0.011 0          | 0.003 0                          | 0.000 3          | 19.3                             | 1.7              |

续表 1-2  
Continued Table 1-2

| 样品名称及点号       | $w_{\text{B}}/10^{-6}$ |       | Th/U | 同位素比值                            |                  |                                  |                  | 年龄/Ma                            |                  |
|---------------|------------------------|-------|------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|
|               | U                      | Th    |      | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $\pm 2\text{SE}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $\pm 2\text{SE}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $\pm 2\text{SE}$ |
| 高镁闪长玢岩        |                        |       |      |                                  |                  |                                  |                  |                                  |                  |
| ZK1602-514-1  | 2 653                  | 6 297 | 2.4  | 0.014 5                          | 0.002 1          | 0.002 2                          | 0.000 1          | 14.3                             | 0.6              |
| ZK1602-514-2  | 908                    | 716   | 0.8  | 0.019 2                          | 0.004 2          | 0.002 4                          | 0.000 1          | 15.2                             | 0.9              |
| ZK1602-514-3  | 1 900                  | 888   | 0.5  | 0.016 2                          | 0.002 3          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 15.0                             | 0.6              |
| ZK1602-514-4  | 1 335                  | 531   | 0.4  | 0.018 2                          | 0.003 3          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.9                             | 0.7              |
| ZK1602-514-5  | 976                    | 882   | 0.9  | 0.014 4                          | 0.003 0          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.9                             | 0.8              |
| ZK1602-514-7  | 679                    | 560   | 0.8  | 0.056 0                          | 0.014 0          | 0.002 7                          | 0.000 2          | 17.2                             | 1.3              |
| ZK1602-514-8  | 1 570                  | 2 360 | 1.5  | 0.013 2                          | 0.002 6          | 0.002 4                          | 0.000 1          | 15.3                             | 0.7              |
| ZK1602-514-9  | 927                    | 736   | 0.8  | 0.015 2                          | 0.002 8          | 0.002 2                          | 0.000 1          | 14.7                             | 0.9              |
| ZK1602-514-10 | 1 033                  | 525   | 0.5  | 0.028 6                          | 0.005 7          | 0.002 4                          | 0.000 2          | 15.4                             | 1.1              |
| ZK1602-514-11 | 679                    | 789   | 1.2  | 0.025 4                          | 0.004 7          | 0.002 4                          | 0.000 2          | 15.5                             | 1.1              |
| ZK1602-514-12 | 990                    | 1 630 | 1.6  | 0.059 0                          | 0.012 0          | 0.002 8                          | 0.000 2          | 18.1                             | 1.2              |
| ZK1602-514-13 | 1 130                  | 1 150 | 1.0  | 0.034 9                          | 0.009 8          | 0.002 6                          | 0.000 2          | 17.0                             | 1.2              |
| ZK1602-514-14 | 1 656                  | 1 370 | 0.8  | 0.014 2                          | 0.002 0          | 0.002 1                          | 0.000 1          | 13.7                             | 0.6              |
| ZK1602-514-15 | 985                    | 471   | 0.5  | 0.015 5                          | 0.003 1          | 0.002 5                          | 0.000 1          | 16.2                             | 0.8              |
| ZK1602-514-17 | 1 380                  | 1 000 | 0.7  | 0.015 2                          | 0.002 9          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.9                             | 0.8              |
| ZK1602-514-19 | 1 063                  | 567   | 0.5  | 0.017 5                          | 0.003 0          | 0.002 4                          | 0.000 1          | 15.5                             | 0.7              |
| ZK1602-514-20 | 751                    | 1 190 | 1.6  | 0.015 3                          | 0.003 9          | 0.002 5                          | 0.000 2          | 16.3                             | 1.2              |
| ZK1602-514-21 | 1 970                  | 4 790 | 2.4  | 0.022 1                          | 0.002 8          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 15.1                             | 0.7              |
| ZK1602-514-22 | 1 290                  | 990   | 0.8  | 0.015 5                          | 0.002 9          | 0.002 4                          | 0.000 1          | 15.2                             | 0.7              |
| ZK1602-514-23 | 1 381                  | 771   | 0.6  | 0.018 4                          | 0.002 8          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.9                             | 0.7              |
| ZK1602-514-24 | 1 240                  | 731   | 0.6  | 0.019 1                          | 0.003 5          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.7                             | 0.7              |
| ZK1602-514-25 | 995                    | 484   | 0.5  | 0.016 8                          | 0.003 6          | 0.002 5                          | 0.000 1          | 16.3                             | 0.9              |
| ZK1602-514-26 | 1 097                  | 498   | 0.5  | 0.016 0                          | 0.002 7          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 15.0                             | 0.7              |
| ZK1602-514-27 | 1 287                  | 750   | 0.6  | 0.016 1                          | 0.002 5          | 0.002 5                          | 0.000 1          | 16.2                             | 0.8              |
| ZK1602-514-28 | 1 014                  | 615   | 0.6  | 0.020 1                          | 0.003 7          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.9                             | 0.9              |
| ZK1602-514-29 | 1 075                  | 879   | 0.8  | 0.015 6                          | 0.003 1          | 0.002 2                          | 0.000 1          | 14.0                             | 0.8              |
| ZK1602-514-30 | 2 150                  | 1 710 | 0.8  | 0.019 3                          | 0.002 4          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.8                             | 0.6              |
| ZK1602-514-31 | 1 185                  | 538   | 0.5  | 0.015 4                          | 0.002 9          | 0.002 2                          | 0.000 1          | 14.4                             | 0.7              |
| ZK1602-514-32 | 619                    | 388   | 0.6  | 0.013 7                          | 0.004 0          | 0.002 4                          | 0.000 2          | 15.1                             | 1.1              |
| ZK1602-514-33 | 1 449                  | 803   | 0.6  | 0.014 5                          | 0.002 9          | 0.002 3                          | 0.000 1          | 14.5                             | 0.8              |

表 2 驱龙矿床侵入岩及其包体锆石微量测试结果

 $w_B/10^{-6}$ 

Table 2 Zircon trace elements data of each intrusive rocks and the diorite enclave in Qulong deposit

| 样品名称及点号     | 年龄/Ma | La   | Ce    | Pr   | Nd   | Sm   | Eu   | Gd    | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb  | Lu   | $\Sigma \text{REE}$ |
|-------------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-----|------|---------------------|
| 荣木错拉岩体      |       |      |       |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |     |      |                     |
| ZK301-64-01 | 19.9  | 0.01 | 16.56 | 0.03 | 0.60 | 1.38 | 0.58 | 6.92  | 2.30 | 27.7 | 10.4 | 52.8 | 13.6 | 169 | 29.2 | 332                 |
| ZK301-64-02 | 18.4  | 0.34 | 11.11 | 0.13 | 1.02 | 0.63 | 0.33 | 4.01  | 1.25 | 16.0 | 6.5  | 35.8 | 9.6  | 134 | 25.7 | 247                 |
| ZK301-64-04 | 18.0  | 0.08 | 18.62 | 0.12 | 2.30 | 3.81 | 1.33 | 17.01 | 4.14 | 45.8 | 15.6 | 73.2 | 17.3 | 203 | 33.8 | 436                 |
| ZK301-64-05 | 18.3  | 0.01 | 18.41 | 0.04 | 0.77 | 1.53 | 0.59 | 7.64  | 2.24 | 28.9 | 10.3 | 52.3 | 13.0 | 158 | 27.5 | 321                 |
| ZK301-64-06 | 18.2  | 0.03 | 16.51 | 0.06 | 1.21 | 2.33 | 0.96 | 10.94 | 3.01 | 37.5 | 13.3 | 68.2 | 16.0 | 196 | 34.1 | 401                 |
| ZK301-64-08 | 18.7  | 0.02 | 15.52 | 0.03 | 0.53 | 1.43 | 0.64 | 7.67  | 2.33 | 30.9 | 12.4 | 63.6 | 16.2 | 209 | 38.6 | 399                 |
| ZK301-64-09 | 16.0  | 0.05 | 14.68 | 0.11 | 1.56 | 2.35 | 0.92 | 10.12 | 2.88 | 32.5 | 11.8 | 60.8 | 14.9 | 182 | 34.6 | 370                 |
| ZK301-64-13 | 15.2  | 0.03 | 10.91 | 0.04 | 0.67 | 1.45 | 0.55 | 6.62  | 1.73 | 23.6 | 8.5  | 45.1 | 11.5 | 154 | 30.6 | 295                 |
| ZK301-64-14 | 16.9  | 0.02 | 15.33 | 0.03 | 0.81 | 1.61 | 0.55 | 7.72  | 2.16 | 28.2 | 10.5 | 54.2 | 13.4 | 165 | 30.0 | 330                 |
| ZK301-64-15 | 17.8  | 0.01 | 17.57 | 0.14 | 2.34 | 4.28 | 1.30 | 16.05 | 4.35 | 51.1 | 18.2 | 87.0 | 20.1 | 236 | 40.8 | 499                 |
| ZK301-64-16 | 17.4  | 0.08 | 21.85 | 0.04 | 0.94 | 1.64 | 0.66 | 8.85  | 2.81 | 35.0 | 13.5 | 69.8 | 17.1 | 210 | 37.6 | 420                 |
| ZK301-64-17 | 16.5  | 0.04 | 16.55 | 0.03 | 0.63 | 2.17 | 0.52 | 8.59  | 2.79 | 34.8 | 13.5 | 70.4 | 17.4 | 214 | 39.1 | 421                 |
| ZK301-64-18 | 17.4  | 0.04 | 17.00 | 0.06 | 0.78 | 1.43 | 0.64 | 7.60  | 2.32 | 29.2 | 11.2 | 58.9 | 14.6 | 186 | 32.8 | 362                 |
| ZK301-64-19 | 17.2  | 0.01 | 17.39 | 0.03 | 0.65 | 1.34 | 0.51 | 7.11  | 2.40 | 28.9 | 12.1 | 65.8 | 17.4 | 216 | 38.6 | 408                 |
| ZK301-64-20 | 17.0  | 0.94 | 14.58 | 0.22 | 1.19 | 1.08 | 0.54 | 4.85  | 1.53 | 20.0 | 8.1  | 46.7 | 12.4 | 174 | 37.3 | 323                 |

续表 2-1  
Continued Table 2-1

| 样品名称及点号       | 年龄/Ma | La   | Ce     | Pr   | Nd    | Sm    | Eu    | Gd     | Tb    | Dy     | Ho    | Er    | Tm    | Yb    | Lu    | Σ REE |
|---------------|-------|------|--------|------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ZK301-64-21   | 17.6  | 0.01 | 20.41  | 0.03 | 0.72  | 1.39  | 0.61  | 7.38   | 2.47  | 30.3   | 11.9  | 62.9  | 15.2  | 187   | 35.2  | 376   |
| ZK301-64-23   | 14.8  | 0.01 | 24.23  | 0.03 | 0.66  | 1.23  | 0.80  | 7.49   | 2.26  | 27.8   | 11.3  | 60.0  | 14.6  | 186   | 40.5  | 376   |
| ZK301-64-24   | 17.4  | 0.02 | 29.65  | 0.03 | 0.67  | 1.61  | 0.70  | 9.24   | 2.70  | 33.9   | 14.4  | 81.5  | 19.9  | 258   | 56.8  | 509   |
| ZK301-64-25   | 18.4  | 0.01 | 18.88  | 0.03 | 0.44  | 0.90  | 0.65  | 6.09   | 1.90  | 24.5   | 10.5  | 58.2  | 14.3  | 181   | 39.2  | 357   |
| ZK301-64-29   | 17.1  | 0.10 | 12.88  | 0.02 | 0.39  | 0.75  | 0.46  | 4.92   | 1.56  | 20.4   | 8.6   | 47.2  | 12.2  | 166   | 38.3  | 313   |
| P 斑岩          |       |      |        |      |       |       |       |        |       |        |       |       |       |       |       |       |
| ZK001-502-01  | 16.4  | 0.04 | 42.62  | 0.13 | 1.55  | 5.43  | 1.18  | 15.12  | 4.84  | 53.7   | 20.3  | 97.3  | 24.9  | 280   | 57.7  | 605   |
| ZK001-502-02  | 16.7  | 0.01 | 70.25  | 0.27 | 4.77  | 10.28 | 2.52  | 42.53  | 14.21 | 173.7  | 68.3  | 297.5 | 72.5  | 712   | 122.9 | 1 592 |
| ZK001-502-04  | 16.3  | 0.02 | 39.19  | 0.20 | 3.63  | 17.77 | 2.32  | 86.68  | 41.44 | 559.8  | 206.1 | 862.8 | 216.5 | 1 940 | 319.9 | 4 296 |
| ZK001-502-05  | 17.0  | 0.01 | 32.12  | 0.08 | 1.15  | 2.95  | 1.03  | 10.53  | 3.93  | 44.7   | 18.1  | 81.3  | 23.3  | 252   | 52.6  | 523   |
| ZK001-502-06  | 16.5  | 0.02 | 25.73  | 0.05 | 0.72  | 2.72  | 1.06  | 9.90   | 2.88  | 37.1   | 15.0  | 69.8  | 19.0  | 209   | 46.1  | 439   |
| ZK001-502-07  | 15.3  | 0.05 | 47.26  | 0.33 | 5.50  | 10.45 | 2.98  | 35.21  | 10.30 | 124.2  | 49.0  | 203.0 | 51.4  | 535   | 98.6  | 1 173 |
| ZK001-502-08  | 16.1  | 0.05 | 21.32  | 0.13 | 1.44  | 4.69  | 1.13  | 23.30  | 12.67 | 189.6  | 81.4  | 392.3 | 100.1 | 1 054 | 184.6 | 2 067 |
| ZK001-502-09  | 16.7  | 0.72 | 50.66  | 0.35 | 3.37  | 5.35  | 1.55  | 17.03  | 4.83  | 54.1   | 19.7  | 82.2  | 19.9  | 206   | 40.9  | 507   |
| ZK001-502-11  | 15.2  | 0.45 | 51.62  | 0.23 | 1.70  | 6.91  | 1.54  | 30.43  | 12.85 | 164.8  | 66.2  | 280.0 | 72.1  | 697   | 117.6 | 1 503 |
| ZK001-502-12  | 16.1  | 0.09 | 28.74  | 0.17 | 1.83  | 5.42  | 1.56  | 17.13  | 6.83  | 77.7   | 30.1  | 140.7 | 37.3  | 365   | 65.9  | 778   |
| ZK001-502-15  | 15.7  | 0.29 | 18.16  | 0.15 | 1.32  | 6.35  | 0.91  | 30.75  | 17.66 | 263.6  | 112.7 | 530.4 | 140.7 | 1 375 | 232.5 | 2 730 |
| ZK001-502-18  | 15.0  | 0.15 | 15.69  | 0.05 | 0.39  | 0.91  | 0.36  | 2.90   | 1.07  | 18.0   | 8.0   | 52.9  | 18.8  | 288   | 83.3  | 491   |
| ZK001-502-20  | 16.0  | 0.01 | 33.77  | 0.07 | 1.49  | 3.62  | 1.07  | 11.23  | 2.83  | 32.0   | 11.3  | 50.3  | 13.8  | 148   | 30.3  | 340   |
| ZK001-502-22  | 13.0  | 0.01 | 35.93  | 0.11 | 1.64  | 5.40  | 1.19  | 14.24  | 5.52  | 58.5   | 23.2  | 103.2 | 26.2  | 256   | 47.0  | 578   |
| ZK001-502-23  | 15.3  | 0.08 | 257.02 | 0.91 | 17.52 | 44.30 | 11.77 | 136.32 | 37.02 | 363.7  | 111.9 | 396.1 | 84.0  | 698   | 108.4 | 2 267 |
| ZK001-502-25  | 17.5  | 0.01 | 17.93  | 0.07 | 2.03  | 9.98  | 0.80  | 61.33  | 31.39 | 449.9  | 174.5 | 744.7 | 186.6 | 1750  | 283.1 | 3 712 |
| ZK001-502-26  | 16.9  | 0.22 | 41.35  | 0.17 | 2.05  | 6.21  | 0.98  | 24.03  | 10.33 | 151.6  | 63.1  | 307.0 | 81.6  | 850   | 149.4 | 1 688 |
| ZK001-502-27  | 16.1  | 0.36 | 42.62  | 0.21 | 1.70  | 5.68  | 1.03  | 25.41  | 11.88 | 160.3  | 65.0  | 298.4 | 77.3  | 766   | 132.9 | 1 589 |
| ZK001-502-28  | 17.9  | 0.02 | 38.15  | 0.08 | 1.70  | 6.48  | 1.36  | 26.97  | 13.40 | 185.1  | 75.1  | 343.0 | 87.0  | 857   | 144.0 | 1 780 |
| ZK001-502-29  | 16.5  | 0.01 | 32.08  | 0.10 | 0.89  | 3.83  | 1.18  | 11.52  | 3.48  | 40.7   | 15.3  | 72.7  | 19.8  | 233   | 52.0  | 487   |
| ZK001-518-01  | 14.3  | 0.01 | 16.46  | 0.02 | 0.64  | 4.27  | 0.88  | 35.17  | 18.24 | 275.6  | 109.3 | 541.3 | 129.6 | 1 518 | 197.6 | 2 847 |
| ZK001-518-02  | 16.5  | 0.05 | 21.50  | 0.07 | 1.23  | 2.70  | 1.24  | 16.01  | 6.04  | 80.4   | 29.2  | 149.0 | 36.0  | 421   | 65.8  | 830   |
| ZK001-518-03  | 16.4  | 0.05 | 28.39  | 0.04 | 1.44  | 4.56  | 1.32  | 32.81  | 13.68 | 201.9  | 74.5  | 370.7 | 87.7  | 982   | 139.4 | 1 938 |
| ZK001-518-05  | 17.4  | 0.10 | 10.34  | 0.06 | 0.71  | 2.88  | 0.57  | 29.81  | 15.63 | 248.3  | 100.0 | 512.9 | 124.6 | 1395  | 195.7 | 2 636 |
| ZK001-518-07  | 16.5  | 0.01 | 30.50  | 0.06 | 1.18  | 3.69  | 1.17  | 20.49  | 7.73  | 104.4  | 39.9  | 197.8 | 45.3  | 519   | 83.0  | 1 055 |
| ZK001-518-08  | 14.4  | 0.12 | 17.19  | 0.12 | 1.17  | 5.30  | 0.91  | 47.99  | 26.04 | 400.2  | 158.3 | 798.2 | 189.9 | 2 145 | 297.7 | 4 088 |
| ZK001-518-10  | 15.1  | 0.25 | 26.61  | 0.11 | 1.81  | 5.94  | 1.30  | 42.94  | 20.03 | 286.7  | 111.9 | 538.6 | 121.6 | 1 315 | 190.5 | 2 663 |
| ZK001-518-11  | 16.0  | 0.02 | 60.14  | 0.23 | 4.43  | 9.12  | 3.83  | 43.73  | 13.66 | 165.5  | 60.6  | 277.1 | 62.6  | 706   | 111.0 | 1 518 |
| ZK001-518-16  | 18.8  | 0.01 | 43.75  | 0.15 | 3.05  | 6.77  | 2.41  | 35.13  | 11.94 | 152.7  | 55.9  | 266.0 | 59.0  | 637   | 104.7 | 1 379 |
| ZK001-518-18  | 15.2  | 0.03 | 49.84  | 0.06 | 1.91  | 6.15  | 2.22  | 39.63  | 14.78 | 202.0  | 77.1  | 380.5 | 86.3  | 949   | 147.6 | 1 957 |
| ZK001-518-19  | 14.7  | 0.14 | 18.22  | 0.23 | 2.43  | 8.25  | 1.37  | 59.78  | 29.59 | 449.5  | 176.9 | 896.6 | 202.8 | 2 178 | 339.3 | 4 363 |
| ZK001-518-21  | 14.4  | 0.55 | 56.48  | 0.54 | 7.48  | 12.46 | 4.08  | 54.32  | 16.51 | 198.4  | 70.7  | 335.6 | 73.9  | 814   | 142.1 | 1 787 |
| ZK001-518-23  | 15.9  | 0.13 | 47.31  | 0.20 | 3.14  | 6.40  | 3.14  | 38.12  | 12.27 | 150.5  | 55.1  | 256.1 | 54.6  | 580   | 100.6 | 1 308 |
| ZK001-518-24  | 16.8  | 0.05 | 53.73  | 0.20 | 3.85  | 9.32  | 3.58  | 60.28  | 22.36 | 297.6  | 110.8 | 536.6 | 115.4 | 1 230 | 197.0 | 2 641 |
| 闪长质包体         |       |      |        |      |       |       |       |        |       |        |       |       |       |       |       |       |
| QL14-10A-08   | 16.0  | 0.06 | 20.80  | 0.06 | 1.03  | 2.70  | 0.55  | 9.30   | 2.87  | 36.0   | 14.2  | 72.0  | 20.1  | 207   | 42.0  | 428   |
| QL14-10A-24   | 16.4  | 0.04 | 24.10  | 0.05 | 1.09  | 2.69  | 0.54  | 8.60   | 2.94  | 32.8   | 12.9  | 59.0  | 14.9  | 155   | 29.9  | 345   |
| QL14-10A-28   | 16.2  | 0.02 | 25.90  | 0.06 | 0.88  | 1.91  | 0.72  | 9.10   | 2.59  | 33.1   | 14.4  | 72.0  | 20.6  | 237   | 54.0  | 472   |
| QL14-10A-29   | 14.9  | 0.63 | 26.80  | 0.21 | 1.57  | 2.72  | 0.67  | 10.30  | 3.30  | 38.0   | 14.8  | 69.0  | 17.8  | 186   | 37.0  | 408   |
| 高镁闪长玢岩        |       |      |        |      |       |       |       |        |       |        |       |       |       |       |       |       |
| ZK1602-514-01 | 15.5  | 0.06 | 37.06  | 0.07 | 0.79  | 1.62  | 0.60  | 7.12   | 2.25  | 24.36  | 9.9   | 51.4  | 13.2  | 163   | 42.1  | 354   |
| ZK1602-514-02 | 16.2  | 0.13 | 35.34  | 0.07 | 1.04  | 1.79  | 0.66  | 7.92   | 2.57  | 29.67  | 12.3  | 62.7  | 15.9  | 189   | 45.5  | 405   |
| ZK1602-514-03 | 15.2  | 0.62 | 50.63  | 0.21 | 1.61  | 2.48  | 0.86  | 9.76   | 3.2   | 37.95  | 15.6  | 81.0  | 20.9  | 252   | 62.3  | 540   |
| ZK1602-514-06 | 14.7  | 0.02 | 58.80  | 0.08 | 1.37  | 3.45  | 1.22  | 14.73  | 4.87  | 58.23  | 22.9  | 111.6 | 26.8  | 286   | 64.5  | 655   |
| ZK1602-514-07 | 17.2  | 0.02 | 37.49  | 0.10 | 1.65  | 3.15  | 1.19  | 12.73  | 3.95  | 42.12  | 15.4  | 68.3  | 15.1  | 156   | 32.1  | 390   |
| ZK1602-514-09 | 16.3  | 0.26 | 32.99  | 0.09 | 0.83  | 1.21  | 0.41  | 5.24   | 1.68  | 20.27  | 8.6   | 46.3  | 12.6  | 161   | 42.1  | 334   |
| ZK1602-514-10 | 13.7  | 0.09 | 97.50  | 0.55 | 9.50  | 13.39 | 4.89  | 48.82  | 13.79 | 138.30 | 46.49 | 196.3 | 41.0  | 404   | 79.9  | 1 095 |
| ZK1602-514-11 | 14.3  | 0.01 | 28.62  | 0.04 | 0.57  | 1.24  | 0.47  | 4.83   | 1.56  | 17.80  | 7.48  | 38.9  | 10.3  | 128   | 32.3  | 272   |
| ZK1602-514-13 | 15.4  | 0.03 | 30.62  | 0.05 | 0.72  | 1.23  | 0.51  | 5.47   | 1.73  | 19.62  | 8.02  | 39.5  | 10.5  | 133   | 32.4  | 283   |
| ZK1602-514-14 | 14.9  | 0.01 | 25.60  | 0.04 | 0.60  | 1.04  | 0.35  | 4.63   | 1.46  | 17.70  | 7.62  | 41.2  | 11.0  | 141   | 36.2  | 288   |
| ZK1602-514-15 | 15.0  | 0.01 | 40.15  | 0.05 | 0.89  | 1.58  | 0.66  | 7.29   | 2.46  | 29.79  | 12.93 | 71.0  | 19.5  | 251   | 62.4  | 499   |
| ZK1602-514-16 | 14.9  | 0.17 | 28.04  | 0.07 | 0.64  | 1.00  | 0.47  | 4.57   | 1.51  | 17.02  | 7.32  | 40.5  | 11.0  | 139   | 36.5  | 288   |
| ZK1602-514-18 | 15.5  | 0.19 | 32.56  | 0.07 | 0.71  | 1.40  | 0.53  | 7.02   | 2.34  | 28.98  | 12.61 | 68.5  | 17.8  | 215   | 51.5  | 439   |
| ZK1602-514-19 | 18.1  | 0.08 | 91.20  | 0.19 | 3.65  | 5.52  | 1.66  | 19.75  | 5.75  | 60.76  | 22.40 | 104.8 | 24.1  | 270   | 61.6  | 671   |

续表 2-2

Continued Table 2-2

| 样品名称及点号      | Y     | Ta   | Pb    | Hf     | U     | Th    | Nb    | Ti    | t/°C | Th/U | Ce(Ⅳ)/<br>Ce(Ⅲ) | Dy/Yb | Eu/Eu * | Ce/Ce * | (Ce/Nd)<br>/Y |
|--------------|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|-----------------|-------|---------|---------|---------------|
| 荣木错拉岩体       |       |      |       |        |       |       |       |       |      |      |                 |       |         |         |               |
| ZK301-64-01  | 369   | 0.23 | 2.30  | 9 258  | 170   | 81    | 0.51  | 2.76  | 638  | 0.48 | 640             | 0.16  | 0.58    | 148.5   | 0.07          |
| ZK301-64-02  | 246   | 0.14 | 1.17  | 9 056  | 168   | 55    | 0.37  | 2.13  | 619  | 0.33 | 425             | 0.12  | 0.64    | 15.7    | 0.04          |
| ZK301-64-04  | 539   | 0.17 | 2.32  | 9 255  | 183   | 128   | 0.41  | 3.67  | 660  | 0.70 | 109             | 0.23  | 0.51    | 31.3    | 0.02          |
| ZK301-64-05  | 367   | 0.26 | 2.26  | 9 451  | 208   | 124   | 0.57  | 3.60  | 658  | 0.60 | 502             | 0.18  | 0.53    | 109.8   | 0.06          |
| ZK301-64-06  | 472   | 0.23 | 2.16  | 9 390  | 193   | 95    | 0.55  | 4.26  | 672  | 0.49 | 253             | 0.19  | 0.58    | 60.8    | 0.03          |
| ZK301-64-08  | 443   | 0.29 | 2.19  | 9 501  | 249   | 88    | 0.66  | 2.92  | 642  | 0.36 | 761             | 0.15  | 0.59    | 184.3   | 0.07          |
| ZK301-64-09  | 434   | 0.15 | 5.04  | 10 059 | 245   | 129   | 0.35  | 5.10  | 686  | 0.53 | 179             | 0.18  | 0.58    | 33.2    | 0.02          |
| ZK301-64-13  | 320   | 0.11 | 1.89  | 9 809  | 220   | 86    | 0.33  | 2.58  | 633  | 0.39 | 368             | 0.15  | 0.54    | 80.7    | 0.05          |
| ZK301-64-14  | 375   | 0.23 | 2.02  | 9 656  | 160   | 80    | 0.53  | 2.58  | 633  | 0.50 | 413             | 0.17  | 0.48    | 88.9    | 0.05          |
| ZK301-64-15  | 631   | 0.22 | 2.62  | 9 470  | 220   | 132   | 0.43  | 3.88  | 664  | 0.60 | 111             | 0.22  | 0.48    | 32.1    | 0.01          |
| ZK301-64-16  | 488   | 0.37 | 2.40  | 9 601  | 231   | 122   | 0.86  | 3.06  | 646  | 0.53 | 578             | 0.17  | 0.53    | 95.1    | 0.05          |
| ZK301-64-17  | 475   | 0.26 | 2.16  | 9 309  | 215   | 100   | 0.60  | 2.59  | 633  | 0.46 | 548             | 0.16  | 0.37    | 210.6   | 0.06          |
| ZK301-64-18  | 396   | 0.26 | 1.93  | 9 340  | 202   | 92    | 0.72  | 3.62  | 659  | 0.46 | 542             | 0.16  | 0.59    | 94.1    | 0.06          |
| ZK301-64-19  | 443   | 0.80 | 3.62  | 9 737  | 257   | 91    | 1.50  | 2.80  | 639  | 0.36 | 772             | 0.13  | 0.51    | 127.2   | 0.06          |
| ZK301-64-20  | 331   | 0.05 | 3.02  | 9 449  | 400   | 138   | 0.28  | 1.37  | 588  | 0.35 | 432             | 0.11  | 0.71    | 25.8    | 0.04          |
| ZK301-64-21  | 441   | 0.26 | 2.01  | 10 237 | 190   | 98    | 0.66  | 2.29  | 624  | 0.52 | 735             | 0.16  | 0.58    | 129.2   | 0.06          |
| ZK301-64-23  | 430   | 0.18 | 6.33  | 10 356 | 598   | 386   | 0.52  | 2.71  | 637  | 0.64 | 1 038           | 0.15  | 0.81    | 160.5   | 0.09          |
| ZK301-64-24  | 572   | 0.18 | 6.74  | 10 304 | 680   | 423   | 0.83  | 3.27  | 651  | 0.62 | 1 302           | 0.13  | 0.55    | 244.5   | 0.08          |
| ZK301-64-25  | 403   | 0.20 | 4.15  | 10 581 | 437   | 222   | 0.49  | 2.74  | 637  | 0.51 | 1 444           | 0.14  | 0.84    | 207.5   | 0.11          |
| ZK301-64-29  | 340   | 0.09 | 2.37  | 10 518 | 301   | 121   | 0.31  | 2.96  | 643  | 0.40 | 1 203           | 0.12  | 0.74    | 146.8   | 0.10          |
| P 斑岩         |       |      |       |        |       |       |       |       |      |      |                 |       |         |         |               |
| ZK001-502-01 | 685   | 0.49 | 10.27 | 10 542 | 699   | 587   | 1.84  | 2.65  | 675  | 0.84 | 270             | 0.19  | 0.40    | 223.5   | 0.04          |
| ZK001-502-02 | 1 954 | 1.16 | 8.11  | 9 679  | 546   | 778   | 5.77  | 3.93  | 708  | 1.43 | 165             | 0.24  | 0.37    | 73.9    | 0.01          |
| ZK001-502-04 | 6 230 | 3.03 | 23.27 | 12 818 | 2 466 | 2 280 | 25.23 | 3.32  | 693  | 0.92 | 139             | 0.29  | 0.18    | 123.2   | 0.00          |
| ZK001-502-05 | 586   | 0.42 | 7.37  | 10 648 | 369   | 231   | 1.43  | 2.68  | 675  | 0.63 | 383             | 0.18  | 0.57    | 167.7   | 0.05          |
| ZK001-502-06 | 487   | 0.24 | 4.02  | 10 469 | 347   | 206   | 0.84  | 1.75  | 642  | 0.59 | 448             | 0.18  | 0.63    | 314.3   | 0.07          |
| ZK001-502-07 | 1 413 | 0.55 | 4.85  | 8 230  | 306   | 527   | 2.55  | 10.27 | 799  | 1.72 | 84              | 0.23  | 0.47    | 38.0    | 0.01          |
| ZK001-502-08 | 2 520 | 2.87 | 7.88  | 12 952 | 1 050 | 338   | 8.84  | 3.43  | 696  | 0.32 | 347             | 0.18  | 0.33    | 112.7   | 0.01          |
| ZK001-502-09 | 590   | 0.48 | 12.46 | 10 840 | 738   | 791   | 1.57  | 3.30  | 693  | 1.07 | 127             | 0.26  | 0.50    | 55.7    | 0.03          |
| ZK001-502-11 | 1 934 | 2.77 | 15.60 | 11 257 | 1 359 | 1 205 | 9.72  | 3.05  | 686  | 0.89 | 396             | 0.24  | 0.32    | 286.7   | 0.02          |
| ZK001-502-12 | 953   | 0.83 | 2.78  | 10 102 | 274   | 214   | 3.04  | 3.79  | 704  | 0.78 | 180             | 0.21  | 0.50    | 108.8   | 0.02          |
| ZK001-502-15 | 3 526 | 4.06 | 11.74 | 13 967 | 1 888 | 650   | 13.81 | 2.51  | 670  | 0.34 | 299             | 0.19  | 0.20    | 153.3   | 0.00          |
| ZK001-502-18 | 365   | 0.77 | 11.02 | 18 484 | 1 931 | 308   | 2.53  | 0.00  |      | 0.16 | 1 670           | 0.06  | 0.67    | 219.2   | 0.11          |
| ZK001-502-20 | 377   | 0.34 | 8.09  | 10 959 | 544   | 510   | 1.16  | 4.11  | 712  | 0.94 | 192             | 0.22  | 0.51    | 127.7   | 0.06          |
| ZK001-502-22 | 694   | 0.55 | 4.17  | 10 020 | 333   | 300   | 1.85  | 1.55  | 633  | 0.90 | 203             | 0.23  | 0.42    | 167.2   | 0.03          |
| ZK001-502-23 | 3 179 | 0.96 | 31.51 | 10 314 | 1 326 | 2 471 | 5.71  | 5.96  | 745  | 1.86 | 57              | 0.52  | 0.46    | 86.3    | 0.01          |
| ZK001-502-25 | 5 224 | 5.81 | 20.69 | 17 318 | 3 103 | 1 563 | 17.53 | 2.89  | 682  | 0.50 | 148             | 0.26  | 0.10    | 100.9   | 0.00          |
| ZK001-502-26 | 1 996 | 3.13 | 9.92  | 12 438 | 848   | 383   | 11.88 | 3.32  | 693  | 0.45 | 366             | 0.18  | 0.25    | 141.8   | 0.01          |
| ZK001-502-27 | 1 968 | 3.30 | 8.68  | 13 303 | 1 248 | 651   | 9.78  | 3.38  | 695  | 0.52 | 418             | 0.21  | 0.26    | 195.7   | 0.01          |
| ZK001-502-28 | 2 281 | 2.87 | 9.20  | 12 200 | 1 336 | 719   | 9.89  | 2.74  | 677  | 0.54 | 367             | 0.22  | 0.31    | 199.4   | 0.01          |
| ZK001-502-29 | 523   | 0.25 | 6.07  | 11 872 | 492   | 407   | 1.05  | 1.90  | 648  | 0.83 | 389             | 0.17  | 0.54    | 365.0   | 0.07          |
| ZK001-518-01 | 3 943 | 4.49 | 21.33 | 12 370 | 3 439 | 1 054 | 12.97 | 1.91  | 611  | 0.31 | 582             | 0.18  | 0.22    | 405.3   | 0.0           |
| ZK001-518-02 | 975   | 0.41 | 5.55  | 8 380  | 313   | 224   | 1.50  | 3.48  | 697  | 0.72 | 294             | 0.19  | 0.57    | 88.7    | 0.02          |
| ZK001-518-03 | 2 713 | 2.81 | 31.04 | 11 378 | 2 050 | 1 026 | 8.56  | 4.62  | 722  | 0.50 | 370             | 0.21  | 0.33    | 146.1   | 0.01          |
| ZK001-518-05 | 3 791 | 3.01 | 18.06 | 13 852 | 1 863 | 532   | 9.92  | 12.32 | 818  | 0.29 | 424             | 0.18  | 0.19    | 138.3   | 0.00          |
| ZK001-518-07 | 1 338 | 0.58 | 4.66  | 8 334  | 353   | 289   | 2.16  | 2.57  | 672  | 0.82 | 402             | 0.20  | 0.41    | 189.3   | 0.02          |
| ZK001-518-08 | 5 844 | 6.20 | 26.36 | 13 362 | 4 449 | 1 206 | 18.92 | 3.62  | 701  | 0.27 | 380             | 0.19  | 0.17    | 155.2   | 0.00          |
| ZK001-518-10 | 4 015 | 3.12 | 12.66 | 11 172 | 1 546 | 643   | 10.19 | 9.28  | 789  | 0.42 | 281             | 0.22  | 0.25    | 111.9   | 0.00          |
| ZK001-518-11 | 2 002 | 0.58 | 10.95 | 7 284  | 482   | 699   | 1.95  | 4.97  | 729  | 1.45 | 149             | 0.23  | 0.59    | 65.2    | 0.01          |
| ZK001-518-16 | 1 960 | 0.72 | 9.95  | 9 770  | 482   | 473   | 2.73  | 4.69  | 723  | 0.98 | 180             | 0.24  | 0.48    | 74.1    | 0.01          |

续表 2-3

Continued Table 2-3

| 样品名称及点号       | Y     | Ta   | Pb    | Hf     | U     | Th    | Nb    | Ti    | t/°C | Th/U | Ce(Ⅳ)/<br>Ce(Ⅲ) | Dy/Yb | Eu/Eu* | Ce/Ce* | (Ce/Nd)<br>/Y |
|---------------|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|-----------------|-------|--------|--------|---------------|
| ZK001-518-18  | 2 846 | 2.15 | 18.14 | 11 592 | 1 191 | 1 210 | 6.51  | 3.89  | 707  | 1.02 | 412             | 0.21  | 0.43   | 196.1  | 0.01          |
| ZK001-518-19  | 6 917 | 3.99 | 38.71 | 13 389 | 3 834 | 1 846 | 12.50 | 23.72 | 894  | 0.48 | 166             | 0.21  | 0.19   | 59.1   | 0.00          |
| ZK001-518-21  | 2 453 | 3.60 | 13.28 | 9 404  | 947   | 675   | 5.89  | 45.06 | 979  | 0.71 | 80              | 0.24  | 0.48   | 29.3   | 0.00          |
| ZK001-518-23  | 1798  | 0.59 | 8.24  | 9 109  | 370   | 559   | 2.11  | 8.94  | 785  | 1.51 | 180             | 0.26  | 0.61   | 71.5   | 0.01          |
| ZK001-518-24  | 4107  | 1.25 | 20.15 | 11 759 | 991   | 980   | 4.66  | 6.82  | 758  | 0.99 | 205             | 0.24  | 0.46   | 78.8   | 0.00          |
| 闪长质包体         |       |      |       |        |       |       |       |       |      |      |                 |       |        |        |               |
| QL14-10A-08   | 463   | 0.34 | 2.07  | 10 457 | 221   | 101   | 0.89  | 2.78  | 678  | 0.46 | 400             | 0.17  | 0.33   | 123.7  | 0.04          |
| QL14-10A-24   | 402   | 0.27 | 1.35  | 10 507 | 303   | 172   | 0.84  | 2.71  | 676  | 0.57 | 352             | 0.21  | 0.34   | 126.4  | 0.05          |
| QL14-10A-28   | 484   | 0.14 | 2.40  | 10 641 | 631   | 417   | 0.72  | 2.68  | 675  | 0.66 | 790             | 0.14  | 0.53   | 150.5  | 0.06          |
| QL14-10A-29   | 466   | 0.35 | 1.53  | 10 293 | 342   | 220   | 0.91  | 3.47  | 697  | 0.64 | 309             | 0.20  | 0.39   | 69.2   | 0.04          |
| 高镁闪长玢岩        |       |      |       |        |       |       |       |       |      |      |                 |       |        |        |               |
| ZK1602-514-01 | 367   | 0.34 | 4.78  | 10 288 | 1 611 | 899   | 1.58  | 1.58  | 634  | 0.56 | 1 342           | 0.15  | 0.54   | 224.1  | 0.13          |
| ZK1602-514-02 | 431   | 0.38 | 3.44  | 9 972  | 1 071 | 788   | 1.61  | 1.67  | 638  | 0.74 | 1 022           | 0.16  | 0.54   | 136.2  | 0.08          |
| ZK1602-514-03 | 561   | 0.49 | 4.61  | 10 031 | 1 377 | 1 120 | 2.20  | 2.47  | 669  | 0.81 | 977             | 0.15  | 0.53   | 112.8  | 0.06          |
| ZK1602-514-06 | 754   | 0.56 | 3.20  | 9 255  | 971   | 891   | 2.70  | 2.55  | 671  | 0.92 | 1 037           | 0.20  | 0.52   | 251.7  | 0.06          |
| ZK1602-514-07 | 472   | 0.38 | 1.86  | 8 677  | 546   | 581   | 1.42  | 4.57  | 721  | 1.06 | 381             | 0.27  | 0.57   | 101.0  | 0.05          |
| ZK1602-514-09 | 329   | 0.33 | 4.14  | 10 029 | 1 180 | 533   | 1.32  | 3.43  | 696  | 0.45 | 1 488           | 0.13  | 0.50   | 135.0  | 0.12          |
| ZK1602-514-10 | 1 406 | 0.57 | 3.92  | 7 150  | 969   | 1 704 | 3.25  | 5.66  | 740  | 1.76 | 127             | 0.34  | 0.58   | 33.7   | 0.01          |
| ZK1602-514-11 | 274   | 0.24 | 3.74  | 10 695 | 1 165 | 600   | 1.11  | 1.88  | 647  | 0.51 | 1 503           | 0.14  | 0.59   | 250.9  | 0.18          |
| ZK1602-514-13 | 279   | 0.29 | 3.42  | 10 825 | 1 123 | 595   | 1.21  | 1.71  | 640  | 0.53 | 1 279           | 0.15  | 0.60   | 169.2  | 0.15          |
| ZK1602-514-14 | 286   | 0.28 | 2.55  | 11 022 | 896   | 392   | 1.15  | 1.55  | 633  | 0.44 | 1 561           | 0.13  | 0.49   | 172.3  | 0.15          |
| ZK1602-514-15 | 495   | 0.43 | 4.80  | 10 785 | 1 582 | 1 159 | 2.07  | 2.01  | 653  | 0.73 | 1 804           | 0.12  | 0.60   | 186.5  | 0.09          |
| ZK1602-514-16 | 282   | 0.25 | 3.12  | 10 636 | 1 077 | 506   | 1.23  | 2.40  | 667  | 0.47 | 1 645           | 0.12  | 0.67   | 159.4  | 0.16          |
| ZK1602-514-18 | 480   | 0.49 | 5.01  | 10 618 | 1 620 | 947   | 2.29  | 4.17  | 713  | 0.58 | 1 728           | 0.13  | 0.52   | 210.6  | 0.10          |
| ZK1602-514-19 | 724   | 0.78 | 5.22  | 9 593  | 1 581 | 1 758 | 4.70  | 4.33  | 716  | 1.11 | 456             | 0.23  | 0.49   | 88.0   | 0.03          |

荣木错拉花岗闪长岩(ZK301-64): 锆石无色透明, 大小 100~200  $\mu\text{m}$ , 长宽比 1.5:1~3:1, 发育岩浆振荡环带。Th 含量  $59 \times 10^{-6} \sim 449 \times 10^{-6}$ , U 含量  $159 \times 10^{-6} \sim 716 \times 10^{-6}$ , Th/U 值 0.3~0.7(平均 0.5)。30 个测试点的年龄均分布在谐和线上,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $17.1 \pm 0.5 \text{ Ma}$  (MSWD=0.7)(图 4a, 4f; 表 1)。

闪长质包体(QL14-10A): 分析了 13 颗岩浆锆石, 发光灰白色-灰色, 具有典型振荡环带的岩浆锆石, 粒径大小 100~250  $\mu\text{m}$ , 长宽比 1.2:1~2:1(图 4f)。Th、U 含量范围接近荣木错拉花岗闪长岩(平均 Th 含量  $166 \times 10^{-6}$ , 平均 U 含量  $301 \times 10^{-6}$ ), Th/U 值 0.4~0.7(平均 0.5), 13 个点获得的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $16.3 \pm 0.7 \text{ Ma}$  (MSWD=2.4)。

P 斑岩(ZK001-502 和 ZK001-518): 锆石粒径大小 100~300  $\mu\text{m}$ , 长宽比 1.5:1~5:1; 阴极发光图像显示锆石具有一个发光灰白、宽大均一的中心, 部分锆石的边部是不发光的细密岩浆振荡环带, 对应更高的 Th、U 含量(图 4c, 4d, 4f; 表 1)。部分边

部年龄较为年轻, 约 14.5 Ma, 数据点偏离谐和线, 指向 Pb 丢失方向, 可能为边部高 U 含量造成的放射性损伤导致。整体 Th、U 含量范围高于荣木错拉岩体(平均 Th 含量  $839 \times 10^{-6}$ , 平均 U 含量  $1 351 \times 10^{-6}$ ), Th/U 值为 0.2~2.3(平均 0.6)。除去 4 颗捕获锆石(135.5、55.8、27.2、23.9 Ma)和较为不谐和的数据点, 两个样品获得  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄分别为  $15.9 \pm 0.3 \text{ Ma}$  ( $n=15$ , MSWD=0.9) 和  $16.0 \pm 0.4 \text{ Ma}$  ( $n=16$ , MSWD=1.3)(图 4c, 4d; 表 1)。

高镁闪长玢岩(ZK1602-514): 锆石粒径大小 80~250  $\mu\text{m}$ , 长宽比 1:1~3:1; 阴极发光较其他侵入岩锆石更为暗淡, 对应更高的 Th、U 含量, 具有岩浆振荡环带(图 4f)。Th、U 含量分别为  $388 \times 10^{-6} \sim 6 297 \times 10^{-6}$ ,  $619 \times 10^{-6} \sim 2 653 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.4~2.4(平均 0.9)。13 个数据点获得  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄分别为  $14.7 \pm 0.3 \text{ Ma}$  (MSWD=2.0)(图 4e, 4f; 表 1)。

### 3.2 锆石微量元素特征

由于镧系收缩, 离子半径较大的轻稀土元素(如

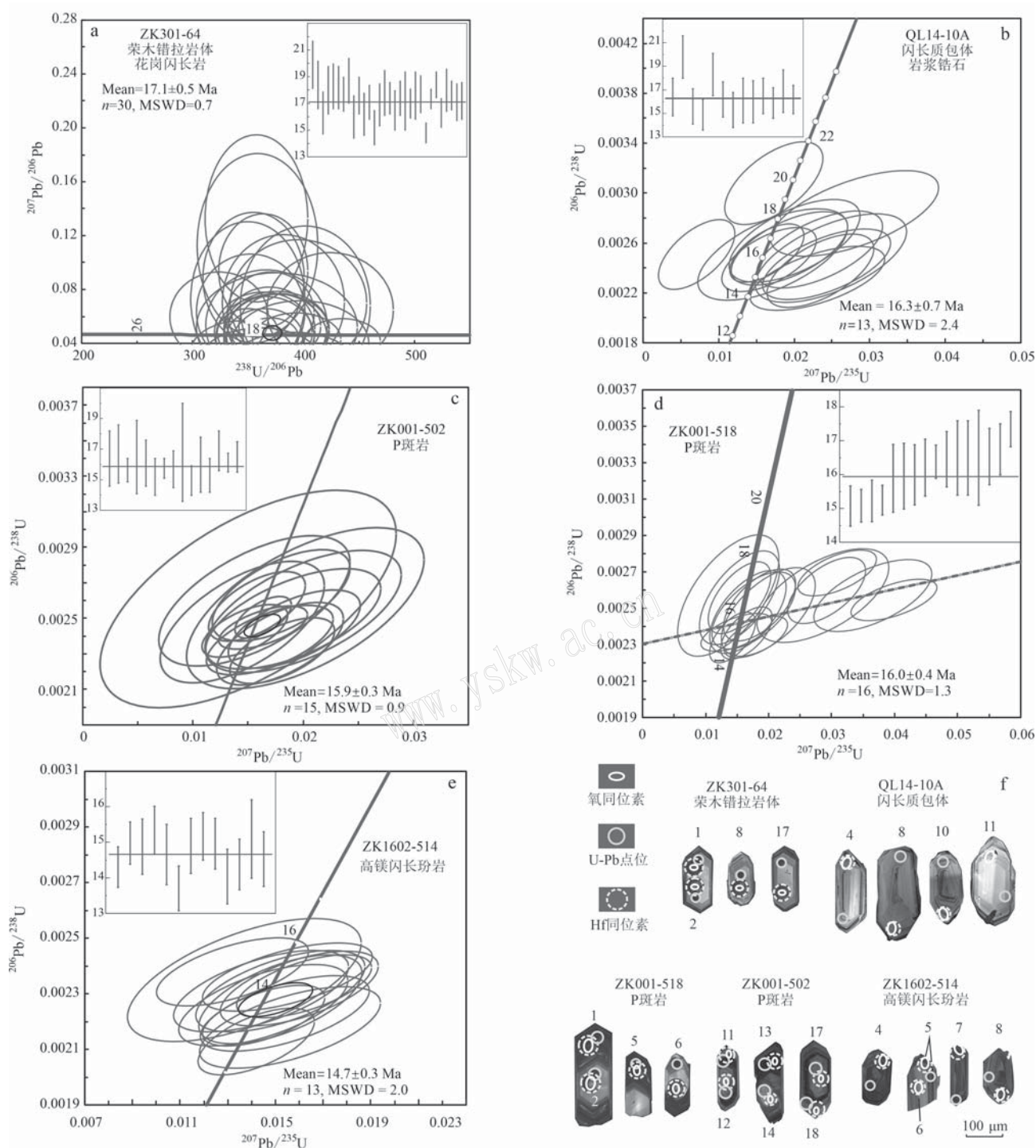


图4 驱龙矿床侵入岩、闪长质包体锆石 U-Pb 年龄谐和图及其锆石阴极发光图

Fig. 4 Zircon U-Pb age concordia diagrams and CL images for intrusive rocks and diorite enclave in the Qulong deposit

La、Pr) 在锆石中的绝对含量极低, 通常在  $10^{-6}$  及以下 (Hoskin and Schaltegger, 2003)。而在锆石的 LA-ICP-MS 测试中, 常出现矿物包裹体 (如磷灰石, LREE 含量高) 的污染, 所以在利用锆石 Ce 异常或锆石 REE 比值进行相对氧逸度研究时, 须对锆石微

量数据进行排查: 锆石微量元素含量  $\text{La} > 1 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ti} > 50 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Ba} > 8 \times 10^{-6}$ , 指示可能受到锆石中矿物包裹体磷灰石、Fe-Ti 氧化物以及流体包裹体或裂隙的影响 (Lu *et al.*, 2016)。排查后的锆石 REE 和微量元素比值、Ti 温度等数据见表 2。

荣木错拉花岗闪长岩(ZK301-64)锆石总体特征呈重稀土元素富集, Ce 正异常和 Eu 负异常。 $\Sigma\text{REE}$  为  $247 \times 10^{-6} \sim 509 \times 10^{-6}$  (平均为  $375 \times 10^{-6}$ ); 闪长质包体(QL14-10A)岩浆锆石  $\Sigma\text{REE}$  为  $345 \times 10^{-6} \sim 472 \times 10^{-6}$  (平均为  $413 \times 10^{-6}$ ); P 斑岩(ZK001-502 & 518)

锆石稀土总量为驱龙侵入岩锆石中最高,  $\Sigma\text{REE}$  为  $340 \times 10^{-6} \sim 4363 \times 10^{-6}$  (平均为  $1769 \times 10^{-6}$ ); 高镁闪长玢岩(ZK1602-514) 锆石  $\Sigma\text{REE}$  为  $272 \times 10^{-6} \sim 1095 \times 10^{-6}$  (平均为  $465 \times 10^{-6}$ ) (图 5, 表 2)。

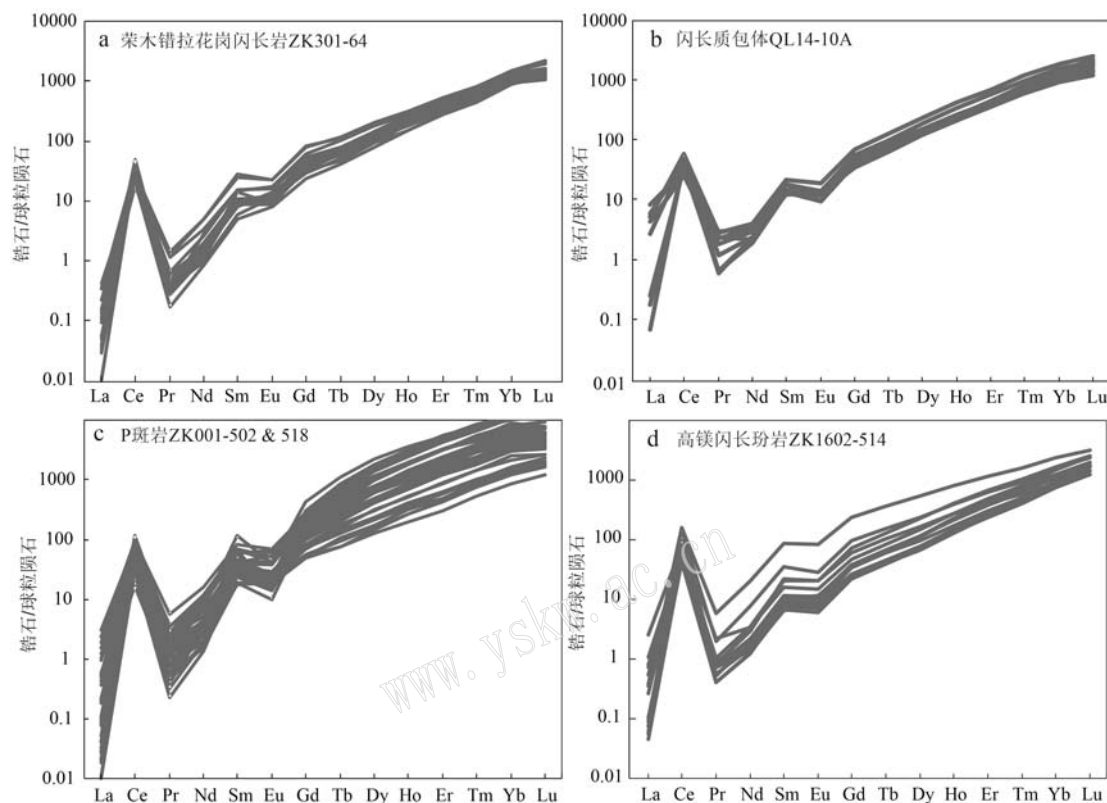


图 5 驱龙矿床各期侵入岩及闪长质包体锆石稀土元素球粒陨石标准化模式图解(球粒陨石标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 The normalized chondrite model for zircon rare earth elements in each intrusive rocks and diorite enclave of Qulong deposit (chondrite normalized data cited from Sun and McDonough, 1989)

### 3.3 锆石 Hf-O 同位素特征

荣木错拉花岗闪长岩(ZK301-64): 24 颗锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为  $0.282\,930 \sim 0.283\,039$ , 对应的  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  值为  $6.7 \sim 9.8$  (加权平均为  $8.7 \pm 0.4$ ,  $\text{MSWD} = 6.7$ ) [ $\varepsilon\text{Hf}(t)$  值基于其单点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄的计算, 或用其加权平均年龄, 下同]; 模式年龄为  $298 \sim 457$  Ma, 地壳模式年龄  $471 \sim 699$  Ma。 $\delta^{18}\text{O}$  为  $5.62\text{‰} \sim 7.12\text{‰}$  (加权平均为  $6.31 \pm 0.14\text{‰}$ ,  $\text{MSWD} = 5.4$ )。荣木错拉岩体的锆石  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  除去 2 个较低值(6.7 和 6.9)外, 其余值较为均一, 峰值为 9.0;  $\delta^{18}\text{O}$  不均一, 呈双峰式分布, 峰值分别为  $6.04\text{‰}$  和  $6.58\text{‰}$  (图 6, 表 3)。

闪长质包体(QL14-10A): 10 颗岩浆锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为  $0.282\,951 \sim 0.283\,043$ , 对应的  $\varepsilon\text{Hf}(t)$

值为  $6.7 \sim 9.4$  (加权平均为  $8.4 \pm 0.4$ ,  $\text{MSWD} = 5.0$ ); 模式年龄为  $322 \sim 431$  Ma, 地壳模式年龄  $497 \sim 670$  Ma。 $\delta^{18}\text{O}$  为  $4.56\text{‰} \sim 6.36\text{‰}$ 。 $\varepsilon\text{Hf}(t)$  的峰值为 8.5, 有 1 个较低值 6.7;  $\delta^{18}\text{O}$  的峰值为  $6.45\text{‰}$ , 有两个较低值  $4.70\text{‰}$  和  $4.97\text{‰}$  (图 6, 表 3)。

P 斑岩(ZK001-518 和 ZK001-502): 41 颗锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为  $0.282\,903 \sim 0.283\,032$ , 对应的  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  值为  $5.0 \sim 9.5$ ; 模式年龄为  $325 \sim 507$  Ma, 地壳模式年龄  $488 \sim 780$  Ma。P 斑岩的  $\delta^{18}\text{O}$  值区间范围最低, 为  $4.56\text{‰} \sim 6.36\text{‰}$ 。P 斑岩的锆石 Hf-O 同位素显示出均一的特点, 在概率密度图上均显示明显的双峰式分布(图 6a, 6b),  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  的 2 个峰值分别为 7.0 和 8.0, 以及 3 个较高的点 9.2、9.5 和 9.5;  $\delta^{18}\text{O}$  的 2 个峰值分别为  $5.27\text{‰}$  和  $5.85\text{‰}$  (图 6, 表 3)。

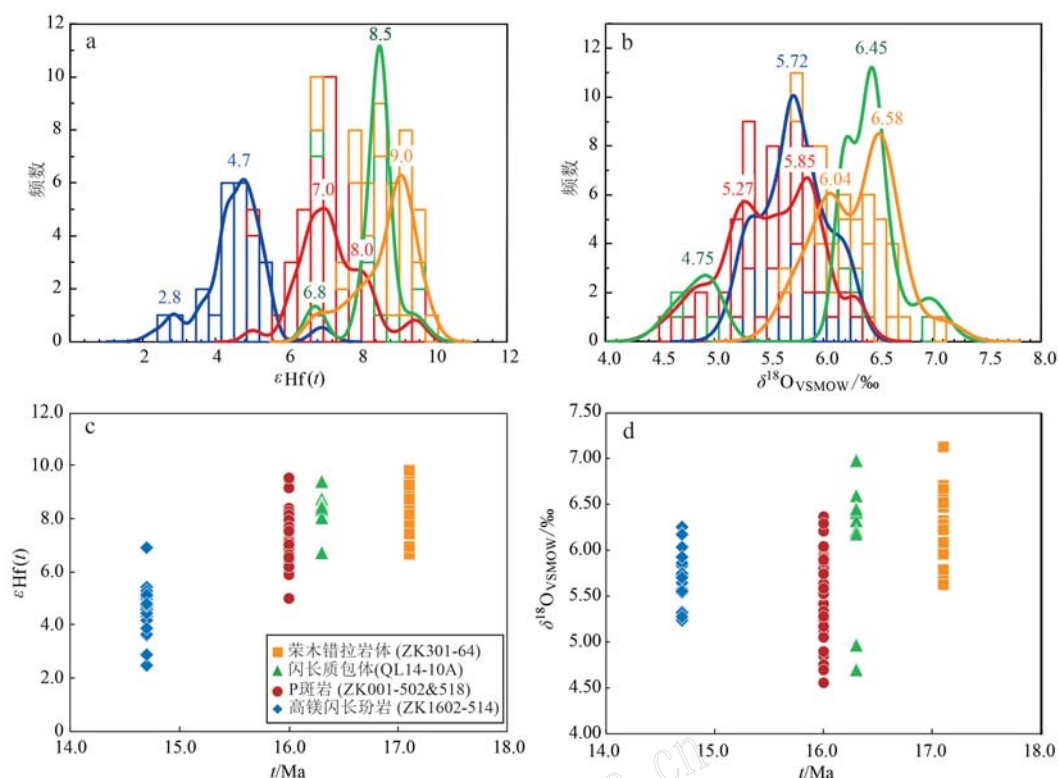


图6 驱龙矿床各期侵入岩及闪长质包体锆石原位 Hf-O 同位素分布频谱图(a, b)与年龄协变图(c, d)

Fig. 6 In-situ zircon Hf-O isotopes results (a, b) and their covariation diagrams with age (c, d) of zircons from each intrusive rocks and diorite enclave in Qulong deposit

高镁闪长玢岩 (ZK1602-514): 25 颗锆石  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.282 832 ~ 0.282 957, 对应的  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  值为 2.5 ~ 6.9, 是驱龙岩浆序列中最低的 Hf 同位素分布区间值; 具有较比其他几套岩浆更老的 Hf 模式年龄和地壳模式年龄, 分别为 428 ~ 601 Ma, 657 ~ 941 Ma。20 颗锆石的  $\delta^{18}\text{O}$  为 5.23‰ ~ 6.25‰ (加权平均值为  $5.72\text{‰} \pm 0.13\text{‰}$ , MSWD = 6.0)。高镁闪长玢岩的锆石 Hf-O 同位素并不均一,  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  的峰值分为 4.7, 有 2 个较低值 2.5 和 2.9;  $\delta^{18}\text{O}$  峰值为 5.72‰ (图 6, 表 3)。

### 3.4 驱龙矿床岩浆温度、氧化还原状态和水含量估算结果

柴木错拉岩体锆石  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  值为 0.37 ~ 0.84 (平均 0.59),  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  值为 16 ~ 245 (平均 111),  $\text{Ce}(\text{IV})/\text{Ce}(\text{III})$  值为 109 ~ 1 444 (平均 618),  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值 0.11 ~ 0.23 (平均 0.16),  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  值为 0.012 ~ 0.107 (平均 0.056), 锆石 Ti 温度为 588 ~ 686℃ (平均 643℃) (图 7 ~ 图 10; 表 2, 表 4)。

闪长质包体岩浆锆石  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  值为 0.33 ~ 0.53 (平均 0.40),  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  值为 69 ~ 151 (平均 117),  $\text{Ce}$

(IV)/Ce(III) 值为 309 ~ 790 (平均 463),  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值 0.14 ~ 0.21 (平均 0.18),  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  值为 0.037 ~ 0.061 (平均 0.049), 锆石 Ti 温度为 675 ~ 697℃ (平均 682℃) (图 7 ~ 图 10; 表 2, 表 4)。

成矿的 P 斑岩锆石  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  值为 0.20 ~ 0.67 (平均 0.42),  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  值为 29 ~ 405 (平均 149),  $\text{Ce}(\text{IV})/\text{Ce}(\text{III})$  值为 57 ~ 1 670 (平均 316),  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值 0.06 ~ 0.52 (平均 0.22),  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  值较低, 区间为 0.001 ~ 0.110 (平均 0.019), 锆石 Ti 温度是岩浆序列中最高的, 剔除 2 个异常高的离群值, 变化范围在 611 ~ 818℃ (平均 704℃) (图 7 ~ 图 10; 表 2, 表 4)。

高镁闪长玢岩锆石  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  值为 0.49 ~ 0.67 (平均 0.55),  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  值为 34 ~ 252 (平均 159),  $\text{Ce}(\text{IV})/\text{Ce}(\text{III})$  值为 127 ~ 1 804 (平均 1 168),  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值 0.12 ~ 0.34 (平均 0.17),  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  值较低, 区间为 0.007 ~ 0.182 (平均 0.097), 锆石 Ti 温度较高, 变化范围较大, 为 633 ~ 740℃ (平均 674℃) (图 7 ~ 图 10; 表 2, 表 4)。

表 3 驱龙矿床侵入岩及其包体锆石原位 Hf-O 同位素测试结果  
Table 3 In-situ zircon Hf-O isotopic composition for each intrusive rocks and the diorite enclave in Qulong deposit

| 样品名称及点号     | 年龄/Ma | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $2\sigma$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $2\sigma$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ | $\varepsilon\text{Hf}(t)$ | $2\sigma$ | $t_{\text{DM}}$ | $t_{\text{DM}}(\text{Hf})^{\text{c}}$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}/\text{‰}$ | $2\sigma$ |
|-------------|-------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|-----------|
| 柴木错拉岩体      |       |                                   |           |                                   |           |                                      |                           |           |                 |                                       |                    |                                               |           |
| ZK304-64-01 | 19.9  | 0.000 436                         | 0.000 007 | 0.283 013                         | 0.000 019 | 0.283 013                            | 8.9                       | 0.7       | 334             | 530                                   | -0.99              | 6.47                                          | 0.20      |
| ZK304-64-02 | 18.4  | 0.000 430                         | 0.000 011 | 0.282 994                         | 0.000 018 | 0.282 994                            | 8.2                       | 0.6       | 360             | 573                                   | -0.99              | 6.47                                          | 0.32      |
| ZK304-64-03 | 16.3  | 0.000 696                         | 0.000 009 | 0.283 013                         | 0.000 018 | 0.283 013                            | 8.9                       | 0.6       | 335             | 530                                   | -0.98              | 6.67                                          | 0.31      |
| ZK304-64-04 | 18.0  | 0.000 522                         | 0.000 002 | 0.283 033                         | 0.000 021 | 0.283 033                            | 9.6                       | 0.7       | 306             | 484                                   | -0.98              | 6.70                                          | 0.43      |
| ZK304-64-05 | 18.3  | 0.000 675                         | 0.000 005 | 0.282 980                         | 0.000 021 | 0.282 980                            | 7.7                       | 0.7       | 382             | 605                                   | -0.98              | 6.03                                          | 0.33      |
| ZK304-64-06 | 18.2  | 0.000 589                         | 0.000 007 | 0.283 027                         | 0.000 019 | 0.283 026                            | 9.4                       | 0.7       | 316             | 499                                   | -0.98              | 5.74                                          | 0.28      |
| ZK304-64-07 | 17.7  | 0.000 598                         | 0.000 002 | 0.283 030                         | 0.000 018 | 0.283 030                            | 9.5                       | 0.6       | 311             | 492                                   | -0.98              | 6.61                                          | 0.29      |
| ZK304-64-08 | 18.7  | 0.000 754                         | 0.000 030 | 0.283 016                         | 0.000 016 | 0.283 016                            | 9.1                       | 0.6       | 331             | 519                                   | -0.98              | 6.32                                          | 0.29      |
| ZK304-64-09 | 16.0  | 0.000 564                         | 0.000 011 | 0.282 982                         | 0.000 019 | 0.282 982                            | 7.8                       | 0.7       | 378             | 600                                   | -0.98              | 6.28                                          | 0.37      |
| ZK304-64-10 | 17.6  | 0.000 501                         | 0.000 014 | 0.282 971                         | 0.000 019 | 0.282 971                            | 7.4                       | 0.7       | 393             | 625                                   | -0.98              | 6.55                                          | 0.22      |
| ZK304-64-11 | 16.2  | 0.000 628                         | 0.000 008 | 0.283 018                         | 0.000 017 | 0.283 018                            | 9.1                       | 0.6       | 328             | 518                                   | -0.98              | 6.06                                          | 0.22      |
| ZK304-64-12 | 17.1  | 0.000 591                         | 0.000 014 | 0.283 001                         | 0.000 020 | 0.283 001                            | 8.5                       | 0.7       | 351             | 557                                   | -0.98              | 6.66                                          | 0.25      |
| ZK304-64-13 | 15.2  | 0.000 507                         | 0.000 004 | 0.283 024                         | 0.000 019 | 0.283 024                            | 9.3                       | 0.7       | 318             | 505                                   | -0.98              | 6.02                                          | 0.31      |
| ZK304-64-14 | 16.9  | 0.000 679                         | 0.000 004 | 0.282 992                         | 0.000 017 | 0.282 992                            | 8.2                       | 0.6       | 364             | 577                                   | -0.98              | 6.49                                          | 0.23      |
| ZK304-64-15 | 17.8  | 0.001 008                         | 0.000 036 | 0.283 022                         | 0.000 017 | 0.283 022                            | 9.2                       | 0.6       | 326             | 510                                   | -0.97              | 6.47                                          | 0.33      |
| ZK304-64-16 | 17.4  | 0.000 703                         | 0.000 009 | 0.283 004                         | 0.000 021 | 0.283 004                            | 8.6                       | 0.7       | 348             | 550                                   | -0.98              | 5.62                                          | 0.37      |
| ZK304-64-17 | 16.5  | 0.000 550                         | 0.000 009 | 0.283 015                         | 0.000 017 | 0.283 015                            | 9.0                       | 0.6       | 331             | 525                                   | -0.98              | 6.00                                          | 0.30      |
| ZK304-64-18 | 17.4  | 0.000 509                         | 0.000 001 | 0.283 021                         | 0.000 017 | 0.283 020                            | 9.2                       | 0.6       | 323             | 513                                   | -0.98              | 5.79                                          | 0.32      |
| ZK304-64-19 | 17.2  | 0.001 056                         | 0.000 023 | 0.282 930                         | 0.000 017 | 0.282 929                            | 6.7                       | 0.6       | 457             | 699                                   | -0.97              | 5.96                                          | 0.32      |
| ZK304-64-20 | 17.0  | 0.000 639                         | 0.000 014 | 0.283 039                         | 0.000 019 | 0.283 039                            | 9.8                       | 0.7       | 298             | 471                                   | -0.98              | 6.08                                          | 0.31      |
| ZK304-64-21 | 17.6  | 0.000 513                         | 0.000 003 | 0.282 958                         | 0.000 018 | 0.282 957                            | 6.9                       | 0.6       | 412             | 656                                   | -0.98              | 6.22                                          | 0.29      |
| ZK304-64-22 | 17.7  | 0.000 630                         | 0.000 003 | 0.283 014                         | 0.000 016 | 0.283 014                            | 9.0                       | 0.6       | 333             | 527                                   | -0.98              | 7.12                                          | 0.33      |
| ZK304-64-24 | 17.4  | 0.000 709                         | 0.000 003 | 0.283 009                         | 0.000 018 | 0.283 008                            | 8.7                       | 0.6       | 342             | 540                                   | -0.98              | 6.55                                          | 0.48      |
| ZK304-64-25 | 18.4  | 0.000 484                         | 0.000 003 | 0.283 023                         | 0.000 021 | 0.283 023                            | 9.3                       | 0.7       | 319             | 506                                   | -0.99              | 6.52                                          | 0.33      |
| 闪长质包体       |       |                                   |           |                                   |           |                                      |                           |           |                 |                                       |                    |                                               |           |
| QL14-10A-04 | 15.6  | 0.000 567                         | 0.000 014 | 0.283 010                         | 0.000 013 | 0.283 009                            | 8.7                       | 0.4       | 339             | 539                                   | -0.98              | 6.41                                          | 0.20      |
| QL14-10A-08 | 16.0  | 0.000 463                         | 0.000 003 | 0.283 005                         | 0.000 012 | 0.283 005                            | 8.6                       | 0.4       | 345             | 550                                   | -0.99              | 6.59                                          | 0.23      |
| QL14-10A-10 | 16.9  | 0.000 698                         | 0.000 021 | 0.282 999                         | 0.000 013 | 0.282 999                            | 8.4                       | 0.5       | 355             | 561                                   | -0.98              | 6.46                                          | 0.19      |
| QL14-10A-11 | 19.8  | 0.000 586                         | 0.000 005 | 0.282 998                         | 0.000 014 | 0.282 997                            | 8.4                       | 0.5       | 356             | 565                                   | -0.98              | 6.32                                          | 0.34      |
| QL14-10A-13 | 15.3  | 0.000 740                         | 0.000 006 | 0.283 003                         | 0.000 013 | 0.283 003                            | 8.5                       | 0.5       | 350             | 553                                   | -0.98              | 6.45                                          | 0.20      |
| QL14-10A-17 | 16.1  | 0.000 483                         | 0.000 007 | 0.282 989                         | 0.000 014 | 0.282 989                            | 8.0                       | 0.5       | 367             | 585                                   | -0.99              | 6.98                                          | 0.33      |
| QL14-10A-22 | 18.3  | 0.001 621                         | 0.000 015 | 0.283 028                         | 0.000 021 | 0.283 027                            | 9.4                       | 0.8       | 322             | 497                                   | -0.95              | 4.97                                          | 0.28      |
| QL14-10A-23 | 16.3  | 0.000 627                         | 0.000 002 | 0.283 002                         | 0.000 012 | 0.283 002                            | 8.5                       | 0.4       | 350             | 555                                   | -0.98              | 4.70                                          | 0.37      |
| QL14-10A-24 | 16.4  | 0.000 569                         | 0.000 002 | 0.283 000                         | 0.000 013 | 0.283 000                            | 8.4                       | 0.5       | 352             | 559                                   | -0.98              | 6.21                                          | 0.17      |
| QL14-10A-25 | 16.3  | 0.001 477                         | 0.000 010 | 0.282 952                         | 0.000 017 | 0.282 951                            | 6.7                       | 0.6       | 431             | 670                                   | -0.96              | 6.18                                          | 0.18      |

续表 3-1  
Continued Table 3-1

| 样品名称及点号      | 年龄/Ma | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $2\sigma$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $2\sigma$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ | $\varepsilon\text{Hf}(t)$ | $2\sigma$ | $t_{\text{DM}}$ | $t_{\text{DM}}(\text{Hf})^{\circ}\text{C}$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$ | $2\sigma$ |
|--------------|-------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------------|--------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------|-----------|
| P 斑岩         |       |                                   |           |                                   |           |                                      |                           |           |                 |                                            |                    |                                              |           |
| ZK001-502-01 | 16.4  | 0.000 817                         | 0.000 008 | 0.282 956                         | 0.000 014 | 0.282 956                            | 6.9                       | 0.5       | 417             | 660                                        | -0.98              | 5.75                                         | 0.29      |
| ZK001-502-02 | 16.7  | 0.001 953                         | 0.000 005 | 0.282 903                         | 0.000 014 | 0.282 903                            | 5.0                       | 0.5       | 507             | 780                                        | -0.94              | 5.89                                         | 0.27      |
| ZK001-502-03 | 15.6  | 0.001 841                         | 0.000 008 | 0.282 992                         | 0.000 014 | 0.282 992                            | 8.1                       | 0.5       | 376             | 580                                        | -0.94              | 5.33                                         | 0.24      |
| ZK001-502-04 | 16.3  | 0.002 601                         | 0.000 006 | 0.282 996                         | 0.000 013 | 0.282 995                            | 8.3                       | 0.5       | 379             | 570                                        | -0.92              | 5.58                                         | 0.20      |
| ZK001-502-05 | 17.0  | 0.000 791                         | 0.000 019 | 0.282 992                         | 0.000 016 | 0.282 991                            | 8.1                       | 0.6       | 367             | 579                                        | -0.98              | 6.02                                         | 0.29      |
| ZK001-502-06 | 16.5  | 0.000 563                         | 0.000 010 | 0.282 967                         | 0.000 014 | 0.282 966                            | 7.2                       | 0.5       | 400             | 636                                        | -0.98              | 6.21                                         | 0.25      |
| ZK001-502-07 | 15.3  | 0.001 213                         | 0.000 014 | 0.282 944                         | 0.000 017 | 0.282 944                            | 6.4                       | 0.6       | 439             | 688                                        | -0.96              | 5.80                                         | 0.24      |
| ZK001-502-08 | 16.1  | 0.002 481                         | 0.000 004 | 0.282 965                         | 0.000 012 | 0.282 964                            | 7.1                       | 0.4       | 424             | 642                                        | -0.93              | 5.91                                         | 0.21      |
| ZK001-502-09 | 16.7  | 0.000 996                         | 0.000 024 | 0.282 970                         | 0.000 013 | 0.282 970                            | 7.3                       | 0.5       | 400             | 629                                        | -0.97              | 6.28                                         | 0.35      |
| ZK001-502-10 | 55.8  | 0.000 962                         | 0.000 022 | 0.282 962                         | 0.000 013 | 0.282 961                            | 7.9                       | 0.5       | 410             | 622                                        | -0.97              | 6.36                                         | 0.24      |
| ZK001-502-11 | 15.2  | 0.002 070                         | 0.000 020 | 0.282 938                         | 0.000 015 | 0.282 937                            | 6.2                       | 0.5       | 459             | 703                                        | -0.94              | 5.25                                         | 0.22      |
| ZK001-502-12 | 16.1  | 0.001 787                         | 0.000 010 | 0.282 960                         | 0.000 016 | 0.282 960                            | 7.0                       | 0.6       | 422             | 651                                        | -0.95              | 5.74                                         | 0.18      |
| ZK001-502-13 | 15.8  | 0.003 028                         | 0.000 034 | 0.282 975                         | 0.000 012 | 0.282 974                            | 7.5                       | 0.4       | 415             | 620                                        | -0.91              | 5.17                                         | 0.21      |
| ZK001-502-14 | 23.9  | 0.001 590                         | 0.000 019 | 0.282 967                         | 0.000 017 | 0.282 966                            | 7.4                       | 0.6       | 410             | 632                                        | -0.95              | 5.94                                         | 0.17      |
| ZK001-502-15 | 15.7  | 0.001 852                         | 0.000 025 | 0.282 980                         | 0.000 013 | 0.282 980                            | 7.7                       | 0.5       | 394             | 606                                        | -0.94              | 5.28                                         | 0.26      |
| ZK001-502-16 | 14.1  | 0.001 493                         | 0.000 007 | 0.282 977                         | 0.000 016 | 0.282 976                            | 7.5                       | 0.6       | 395             | 615                                        | -0.96              | 5.87                                         | 0.17      |
| ZK001-502-17 | 16.8  | 0.000 614                         | 0.000 011 | 0.282 949                         | 0.000 012 | 0.282 949                            | 6.6                       | 0.4       | 425             | 676                                        | -0.98              | 6.29                                         | 0.18      |
| ZK001-502-18 | 15.0  | 0.000 427                         | 0.000 009 | 0.282 950                         | 0.000 010 | 0.282 950                            | 6.6                       | 0.4       | 421             | 673                                        | -0.99              | 5.89                                         | 0.16      |
| ZK001-502-19 | 135.5 | 0.000 997                         | 0.000 073 | 0.282 944                         | 0.000 012 | 0.282 941                            | 8.8                       | 0.4       | 437             | 621                                        | -0.97              | 5.70                                         | 0.21      |
| ZK001-502-20 | 16.0  | 0.000 540                         | 0.000 002 | 0.282 947                         | 0.000 012 | 0.282 947                            | 6.5                       | 0.4       | 427             | 681                                        | -0.98              | 6.04                                         | 0.14      |
| ZK001-518 01 | 14.3  | 0.002 639                         | 0.000 085 | 0.282 933                         | 0.000 013 | 0.282 933                            | 6.0                       | 0.5       | 472             | 714                                        | -0.92              | 5.94                                         | 0.25      |
| ZK001-518 02 | 16.5  | 0.001 199                         | 0.000 017 | 0.282 941                         | 0.000 016 | 0.282 941                            | 6.4                       | 0.6       | 443             | 694                                        | -0.96              | 5.63                                         | 0.30      |
| ZK001-518 03 | 16.4  | 0.001 621                         | 0.000 025 | 0.282 961                         | 0.000 015 | 0.282 960                            | 7.0                       | 0.5       | 419             | 650                                        | -0.95              | 5.42                                         | 0.38      |
| ZK001-518 04 | 14.6  | 0.001 996                         | 0.000 016 | 0.282 962                         | 0.000 015 | 0.282 961                            | 7.0                       | 0.5       | 422             | 649                                        | -0.94              | 4.85                                         | 0.25      |
| ZK001-518 05 | 17.4  | 0.003 374                         | 0.000 039 | 0.282 955                         | 0.000 014 | 0.282 954                            | 6.8                       | 0.5       | 450             | 665                                        | -0.90              | 5.54                                         | 0.27      |
| ZK001-518 06 | 16.5  | 0.001 293                         | 0.000 019 | 0.282 985                         | 0.000 017 | 0.282 985                            | 7.9                       | 0.6       | 381             | 594                                        | -0.96              | 5.33                                         | 0.32      |
| ZK001-518 07 | 16.5  | 0.002 511                         | 0.000 121 | 0.282 937                         | 0.000 016 | 0.282 936                            | 6.2                       | 0.6       | 465             | 705                                        | -0.92              | 4.90                                         | 0.26      |
| ZK001-518 08 | 14.4  | 0.002 836                         | 0.000 020 | 0.282 965                         | 0.000 014 | 0.282 965                            | 7.1                       | 0.5       | 427             | 641                                        | -0.91              | 5.52                                         | 0.26      |
| ZK001-518 09 | 14.8  | 0.002 893                         | 0.000 051 | 0.282 965                         | 0.000 014 | 0.282 965                            | 7.1                       | 0.5       | 428             | 642                                        | -0.91              | 5.29                                         | 0.31      |
| ZK001-518 10 | 15.1  | 0.002 436                         | 0.000 057 | 0.282 947                         | 0.000 016 | 0.282 946                            | 6.5                       | 0.6       | 450             | 683                                        | -0.93              | 5.19                                         | 0.31      |
| ZK001-518 11 | 16.0  | 0.002 240                         | 0.000 016 | 0.282 989                         | 0.000 020 | 0.282 988                            | 8.0                       | 0.7       | 386             | 587                                        | -0.93              | 5.81                                         | 0.46      |
| ZK001-518 12 | 16.0  | 0.001 879                         | 0.000 017 | 0.282 950                         | 0.000 017 | 0.282 949                            | 6.6                       | 0.6       | 438             | 675                                        | -0.94              | 5.85                                         | 0.24      |
| ZK001-518 13 | 14.8  | 0.002 747                         | 0.000 032 | 0.283 001                         | 0.000 015 | 0.283 000                            | 8.4                       | 0.5       | 373             | 560                                        | -0.92              | 5.28                                         | 0.33      |
| ZK001-518 14 | 15.1  | 0.003 951                         | 0.000 067 | 0.282 965                         | 0.000 015 | 0.282 964                            | 7.1                       | 0.5       | 441             | 642                                        | -0.88              | 5.12                                         | 0.37      |
| ZK001-518 15 | 16.5  | 0.001 506                         | 0.000 008 | 0.282 959                         | 0.000 019 | 0.282 958                            | 7.0                       | 0.7       | 421             | 654                                        | -0.95              | 5.77                                         | 0.28      |

续表 3-2  
Continued Table 3-2

| 样品名称及点号       | 年龄/Ma | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $2\sigma$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $2\sigma$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ | $\varepsilon\text{Hf}(t)$ | $2\sigma$ | $t_{\text{DM}}$ | $t_{\text{DM}}(\text{Hf})^c$ | $f_{\text{Hf}}^{\text{Hf}}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$ | $2\sigma$ |
|---------------|-------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|-----------|
| ZK001-518 16  | 18.8  | 0.003 310                         | 0.000 012 | 0.282 979                         | 0.000 016 | 0.282 978                            | 7.7                       | 0.6       | 412             | 608                          | -0.90                       | 5.05                                         | 0.38      |
| ZK001-518 17  | 16.2  | 0.001 670                         | 0.000 012 | 0.282 962                         | 0.000 019 | 0.282 961                            | 7.0                       | 0.7       | 419             | 648                          | -0.95                       | 5.29                                         | 0.30      |
| ZK001-518 18  | 15.2  | 0.002 044                         | 0.000 024 | 0.282 930                         | 0.000 026 | 0.282 929                            | 5.9                       | 0.9       | 470             | 722                          | -0.94                       | 5.55                                         | 0.21      |
| ZK001-518 19  | 14.7  | 0.003 058                         | 0.000 033 | 0.282 959                         | 0.000 016 | 0.282 958                            | 6.9                       | 0.6       | 439             | 655                          | -0.91                       | 5.53                                         | 0.43      |
| ZK001-518 20  | 16.5  | 0.002 499                         | 0.000 035 | 0.283 030                         | 0.000 020 | 0.283 029                            | 9.5                       | 0.7       | 327             | 493                          | -0.92                       | 5.25                                         | 0.40      |
| ZK001-518 21  | 14.4  | 0.002 044                         | 0.000 092 | 0.283 021                         | 0.000 024 | 0.283 021                            | 9.2                       | 0.8       | 336             | 513                          | -0.94                       | 5.75                                         | 0.28      |
| ZK001-518 22  | 15.3  | 0.002 730                         | 0.000 010 | 0.283 033                         | 0.000 015 | 0.283 032                            | 9.5                       | 0.5       | 325             | 488                          | -0.92                       | 4.56                                         | 0.33      |
| ZK001-518 23  | 15.9  | 0.002 353                         | 0.000 012 | 0.282 942                         | 0.000 019 | 0.282 942                            | 6.4                       | 0.7       | 455             | 692                          | -0.93                       | 4.75                                         | 0.32      |
| ZK001-518 24  | 16.8  | 0.003 182                         | 0.000 021 | 0.282 981                         | 0.000 027 | 0.282 980                            | 7.7                       | 1.0       | 408             | 605                          | -0.90                       | 4.70                                         | 0.36      |
| ZK001-518 25  | 27.2  | 0.003 167                         | 0.000 063 | 0.283 045                         | 0.000 025 | 0.283 043                            | 10.2                      | 0.9       | 311             | 454                          | -0.90                       | 4.95                                         | 0.26      |
| 高镁闪长玢岩        |       |                                   |           |                                   |           |                                      |                           |           |                 |                              |                             |                                              |           |
| ZK1602-514-1  | 14.3  | 0.000 234                         | 0.000 005 | 0.282 885                         | 0.000 014 | 0.282 885                            | 4.3                       | 0.5       | 510             | 823                          | -0.99                       | 5.23                                         | 0.31      |
| ZK1602-514-2  | 15.2  | 0.001 030                         | 0.000 034 | 0.282 903                         | 0.000 012 | 0.282 903                            | 5.0                       | 0.4       | 495             | 781                          | -0.97                       | 5.33                                         | 0.22      |
| ZK1602-514-3  | 15.0  | 0.000 772                         | 0.000 010 | 0.282 885                         | 0.000 011 | 0.282 884                            | 4.3                       | 0.4       | 518             | 823                          | -0.98                       | 5.32                                         | 0.21      |
| ZK1602-514-4  | 14.9  | 0.000 668                         | 0.000 008 | 0.282 882                         | 0.000 011 | 0.282 882                            | 4.2                       | 0.4       | 520             | 830                          | -0.98                       | 5.70                                         | 0.17      |
| ZK1602-514-5  | 14.9  | 0.000 835                         | 0.000 007 | 0.282 881                         | 0.000 012 | 0.282 881                            | 4.2                       | 0.4       | 524             | 832                          | -0.97                       | 5.54                                         | 0.18      |
| ZK1602-514-6  | 14.7  | 0.001 021                         | 0.000 025 | 0.282 888                         | 0.000 014 | 0.282 888                            | 4.5                       | 0.5       | 516             | 814                          | -0.97                       | 5.27                                         | 0.29      |
| ZK1602-514-7  | 17.2  | 0.000 816                         | 0.000 006 | 0.282 905                         | 0.000 013 | 0.282 905                            | 5.1                       | 0.5       | 489             | 776                          | -0.98                       | 5.57                                         | 0.24      |
| ZK1602-514-8  | 15.3  | 0.000 561                         | 0.000 006 | 0.282 897                         | 0.000 012 | 0.282 896                            | 4.7                       | 0.4       | 498             | 796                          | -0.98                       | 5.83                                         | 0.20      |
| ZK1602-514-9  | 14.7  | 0.000 601                         | 0.000 010 | 0.282 894                         | 0.000 014 | 0.282 894                            | 4.6                       | 0.5       | 502             | 802                          | -0.98                       | 5.92                                         | 0.26      |
| ZK1602-514-10 | 15.4  | 0.001 449                         | 0.000 031 | 0.282 833                         | 0.000 019 | 0.282 832                            | 2.5                       | 0.7       | 601             | 941                          | -0.96                       | 6.25                                         | 0.25      |
| ZK1602-514-11 | 15.5  | 0.001 968                         | 0.000 048 | 0.282 958                         | 0.000 017 | 0.282 957                            | 6.9                       | 0.6       | 428             | 657                          | -0.94                       | 5.86                                         | 0.21      |
| ZK1602-514-12 | 18.1  | 0.001 519                         | 0.000 017 | 0.282 864                         | 0.000 018 | 0.282 864                            | 3.6                       | 0.6       | 557             | 869                          | -0.95                       | 5.72                                         | 0.30      |
| ZK1602-514-13 | 17.0  | 0.000 855                         | 0.000 031 | 0.282 893                         | 0.000 013 | 0.282 893                            | 4.6                       | 0.4       | 506             | 804                          | -0.97                       | 5.64                                         | 0.27      |
| ZK1602-514-14 | 13.7  | 0.000 625                         | 0.000 004 | 0.282 915                         | 0.000 013 | 0.282 915                            | 5.4                       | 0.5       | 473             | 754                          | -0.98                       | 5.75                                         | 0.20      |
| ZK1602-514-15 | 16.2  | 0.001 182                         | 0.000 020 | 0.282 889                         | 0.000 012 | 0.282 888                            | 4.4                       | 0.4       | 517             | 814                          | -0.96                       | 6.17                                         | 0.26      |
| ZK1602-514-16 | 14.7  | 0.000 610                         | 0.000 020 | 0.282 905                         | 0.000 013 | 0.282 905                            | 5.1                       | 0.5       | 486             | 776                          | -0.98                       | 5.55                                         | 0.31      |
| ZK1602-514-17 | 14.9  | 0.000 488                         | 0.000 045 | 0.282 865                         | 0.000 016 | 0.282 865                            | 3.6                       | 0.6       | 541             | 867                          | -0.99                       | 6.03                                         | 0.26      |
| ZK1602-514-18 | 14.7  | 0.000 811                         | 0.000 013 | 0.282 916                         | 0.000 014 | 0.282 915                            | 5.4                       | 0.5       | 474             | 752                          | -0.98                       | 5.70                                         | 0.16      |
| ZK1602-514-19 | 15.5  | 0.001 167                         | 0.000 014 | 0.282 872                         | 0.000 016 | 0.282 872                            | 3.9                       | 0.6       | 541             | 851                          | -0.96                       | 6.17                                         | 0.24      |
| ZK1602-514-20 | 16.3  | 0.000 868                         | 0.000 007 | 0.282 844                         | 0.000 012 | 0.282 844                            | 2.9                       | 0.4       | 576             | 915                          | -0.97                       | 5.92                                         | 0.23      |
| ZK1602-514-21 | 15.1  | 0.000 720                         | 0.000 008 | 0.282 899                         | 0.000 013 | 0.282 899                            | 4.8                       | 0.4       | 496             | 790                          | -0.98                       |                                              |           |
| ZK1602-514-22 | 15.2  | 0.000 857                         | 0.000 018 | 0.282 911                         | 0.000 013 | 0.282 911                            | 5.3                       | 0.5       | 481             | 762                          | -0.97                       |                                              |           |
| ZK1602-514-23 | 14.9  | 0.000 883                         | 0.000 006 | 0.282 896                         | 0.000 012 | 0.282 896                            | 4.7                       | 0.4       | 503             | 796                          | -0.97                       |                                              |           |
| ZK1602-514-24 | 14.7  | 0.000 767                         | 0.000 010 | 0.282 907                         | 0.000 012 | 0.282 907                            | 5.1                       | 0.4       | 486             | 771                          | -0.98                       |                                              |           |
| ZK1602-514-25 | 16.3  | 0.000 689                         | 0.000 005 | 0.282 898                         | 0.000 012 | 0.282 898                            | 4.8                       | 0.4       | 497             | 792                          | -0.98                       |                                              |           |

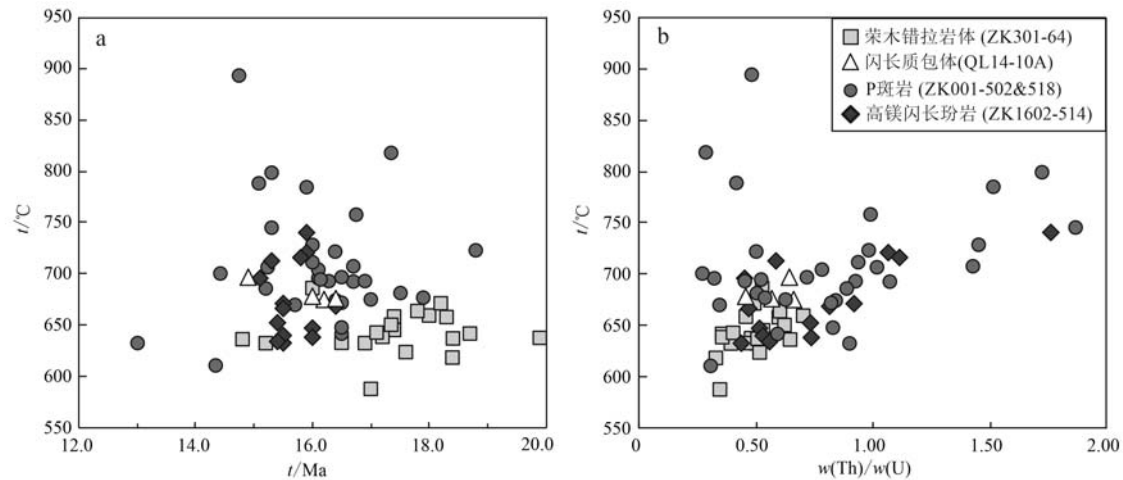


图7 驱龙矿床各期侵入岩及闪长质包体锆石年龄(a)、Th/U值(b)与Ti温度协变图

Fig. 7 Ti-in-zircon temperature vs. zircon U-Pb ages (a) and Th/U ratios (b) of each intrusive rocks and diorite enclave in the Qulong deposit

表4 驱龙矿床侵入岩及其包体岩石地球化学特征总结

Table 4 Summary of geochemical characteristics of each intrusive rocks and the diorite enclave in Qulong deposit

| 样品名称                                                              | 柴木错拉岩体              | 包体                  | P斑岩                 | X斑岩                 | 高镁闪长玢岩              |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 岩性                                                                | 花岗闪长岩               | 闪长质                 | 二长花岗斑岩              | 花岗闪长斑岩              | 闪长玢岩                |
| 成岩年龄/Ma <sup>[1][2]</sup>                                         | 17.1±0.5~19.5±0.4   | 16.3±0.7~22.2±0.5   | 15.9±0.4~17.6±0.7   | 17.7±0.3            | 14.7±0.3~15.7±0.2   |
| 辉钼矿 Re-Os 年龄/Ma <sup>[1]</sup>                                    | 15.8±0.2~16.9±0.2   |                     | 16.0±0.3~16.4±0.5   |                     |                     |
| SiO <sub>2</sub> / % <sup>[1]</sup>                               | 66.3~68.9           | 55~61.5             | 74.4~76.3           | 65.7~76.7           | 56.2~60.7           |
| Mg <sup>#</sup> <sup>[1]</sup>                                    | 52~47               | 69~44               | 65~52               | 58~42               | 66~63               |
| La/Yb <sup>[1]</sup>                                              | 24.5~33.6           | 16.6~25.3           | 19.6~45.3           | 25.7~35.9           | 33.7~35.6           |
| Sr/Y <sup>[1]</sup>                                               | 112.9~155.6         | 72~94.3             | 60.7~169.7          | 65.8~135.3          | 75.5~110.8          |
| ( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>i</sub> <sup>[1]</sup> | 0.704 839~0.705 237 | 0.704 873~0.705 062 | 0.705 222~0.705 322 | 0.704 987~0.705 260 | 0.706 666~0.707 198 |
| εNd(t) <sup>[1]</sup>                                             | 0.4~2.5             | 0.7~2.1             | -0.26~0.26          | -0.7~1.5            | -6.5~-4.9           |
| εHf(t) <sup>[2]</sup>                                             | 6.7~9.8             | 5.7~9.4             | 5.0~10.2            | 6.2~9.9             | 2.5~6.9             |
| δ <sup>18</sup> O <sup>[2]</sup>                                  | 5.62~7.12           | 4.70~6.98           | 4.56~6.36           | -                   | 5.23~6.25           |
| t <sub>Zr</sub> /°C <sup>[1]</sup>                                | 796~868             | 794~869             | 791~804             | 800~886             | 880~900             |
| t <sub>Ti-in-Zr</sub> /°C <sup>[2]</sup>                          | 588~686             | 675~697             | 611~979             | -                   | 633~740             |
| Zrn(Eu/Eu*) <sup>[2]</sup>                                        | 0.37~0.84           | 0.33~0.53           | 0.20~0.67           | -                   | 0.49~0.67           |
| Zrn(Ce/Nd)/Y <sup>[2]</sup>                                       | 0.012~0.107         | 0.003~0.061         | 0.001~0.110         | -                   | 0.004~0.13          |
| Zrn(Ce/Ce*) <sup>[2]</sup>                                        | 16~245              | 69~151              | 29~405              | -                   | 34~252              |
| ZrnCe(IV)/Ce(III) <sup>[2]</sup>                                  | 109~1 444           | 309~790             | 57~1670             | -                   | 127~1 804           |

注:[1]数据来源: 本文及芮宗瑶等, 2003; 孟祥金等, 2003; 王明亮等, 2006; 杨志明, 2008; 秦克章等, 2014; Zhao *et al.*, 2015; [2]数据来源: 本文; t<sub>Zr</sub>/°C指全岩锆饱和温度, 计算公式引自 Hanchar and Waston (2003); t<sub>Ti-in-Zr</sub>/°C指锆石 Ti 温度计, Ti 的活度根据该岩体的矿物组合得出, 计算公式引自 Ferry and Watson (2007); Zrn(Ce/Nd)/Y 指锆石微量元素 Ce、Nd、Y 含量的比值, 计算公式引自 Lu *et al.*, (2016); Zrn(Eu/Eu\*) = Eu<sub>N</sub> / √(Sm<sub>N</sub> × Gd<sub>N</sub>); Zrn(Ce/Ce\*) = Ce<sub>N</sub> / (Nd<sub>N</sub><sup>2</sup> / Sm<sub>N</sub>), 计算公式引自 Loader *et al.* (2017); ZrnCe(IV)/Ce(III)指锆石 Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup>, 计算公式参考来源 Ballard *et al.* (2002) 和 Qiu *et al.* (2013, 2014)。

## 4 讨论

### 4.1 驱龙矿床岩浆氧化还原状态和相对水含量演化

#### 4.1.1 氧化还原状态

在剔除了 La 含量低、测不准的干扰后, 获得的驱龙中新世岩浆岩锆石 Ce/Ce\* 和 Ce(IV)/Ce(III)

值见图 8。Ce/Ce\* 值显示, P 斑岩岩浆的氧逸度变化范围最大, 且具有最高的氧逸度, 高镁闪长玢岩与柴木错拉岩体具有类似的氧逸度, 闪长岩包体氧逸度变化范围最小。Ce(IV)/Ce(III) 值显示, 高镁闪长玢岩岩浆氧逸度变化范围最大, 且具有最高的氧逸度, 柴木错拉岩体次之, 而 P 斑岩岩浆的氧逸度相对较低, 与 Ce/Ce\* 值估算出的岩浆氧逸度结

果有较大差别。前已述及, 利用  $\text{Ce(IV)}/\text{Ce(III)}$  值估算岩浆氧逸度时, 常因 LREE 测不准、熔体组分难准确获取等原因, 常产生较大的误差。考虑到驱龙矿床中新世岩浆形成过程中发生了岩浆混合 (Yang

*et al.*, 2015), 用全岩含量代表熔体组分会存在更多的不确定性, 因此, 笔者认为本次利用  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  值估算出的岩浆氧逸度相对可靠一些 (图 8, 图 9, 表 4)。

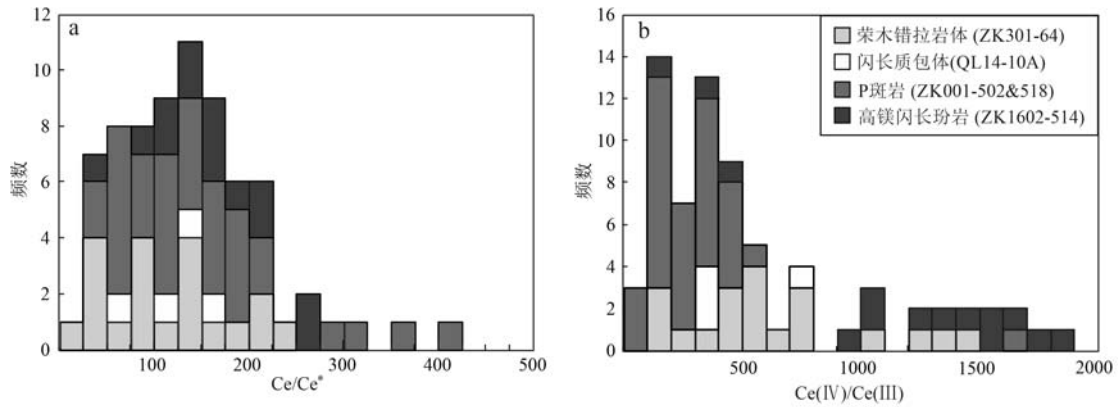


图 8 驱龙矿床各期侵入岩及闪长质包体锆石 Ce 异常、 $\text{Ce(IV)}/\text{Ce(III)}$  值频谱图

Fig. 8 Spectral patterns of Ce anomalies and  $\text{Ce(IV)}/\text{Ce(III)}$  ratios of zircons from intrusive rocks and diorite enclave in the Qulong deposit

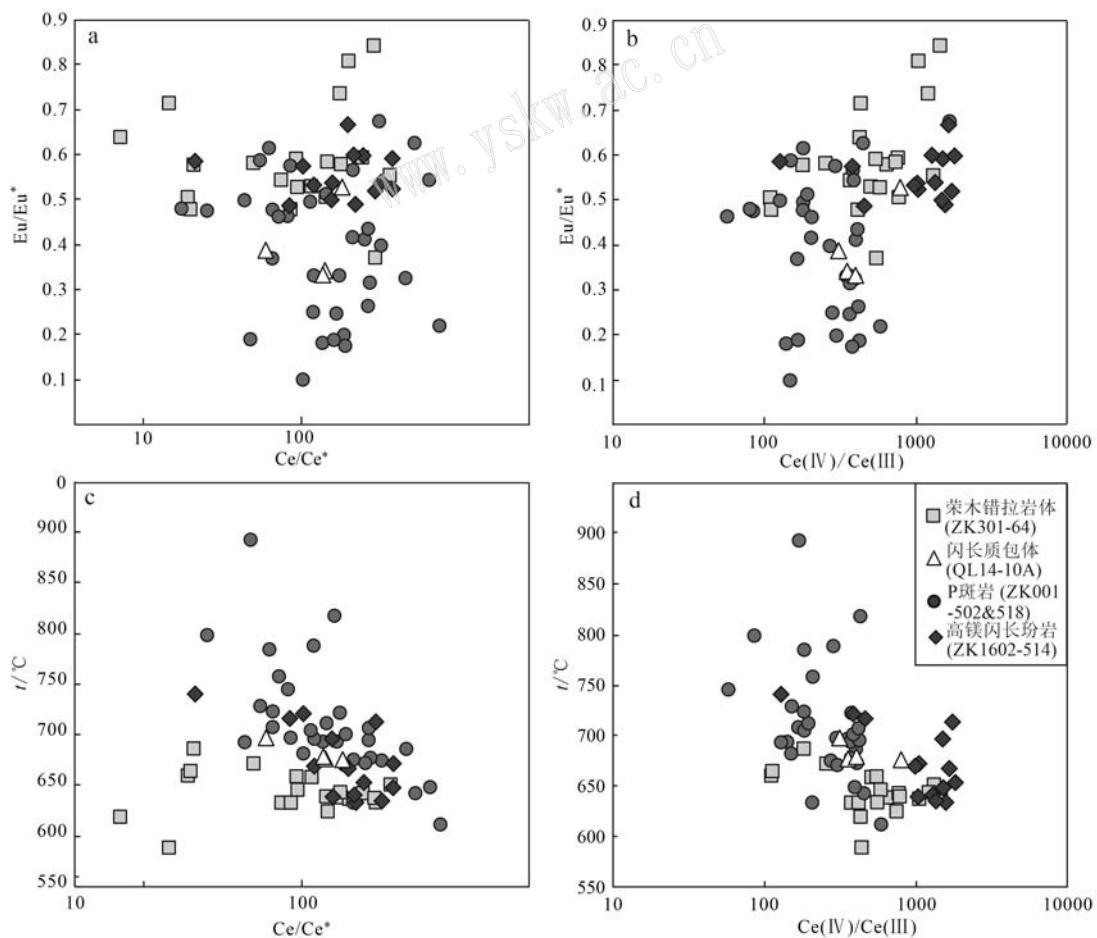


图 9 驱龙矿床各期侵入岩及闪长质包体锆石 Ti 温度、Eu 异常、Ce 异常、 $\text{Ce(IV)}/\text{Ce(III)}$  组图

Fig. 9 Eu anomaly vs. Ce anomaly (a) and  $\text{Ce(IV)}/\text{Ce(III)}$  ratios (b), and Ti-in-zircon temperature vs. Ce anomaly (c) and  $\text{Ce(IV)}/\text{Ce(III)}$  ratios (d) of zircons from intrusive rocks and diorite enclave of Qulong deposit

上述认识与地质事实及最新的结果较为一致。如 Xiao 等(2012)在 P 斑岩(二长花岗斑岩)较新鲜的斜长石中发现有岩浆硬石膏包裹体,推测岩浆氧逸度约为  $\Delta\text{FMQ}+2$ 。Loucks 等(2020)用改进的锆石氧逸度计算方法获得驱龙致矿斑岩(P 斑岩)的氧逸度平均值约为  $\Delta\text{FMQ}+2.5$ ,也表明 P 斑岩岩浆具有较高的氧逸度。通常,岩浆演化过程中钛铁矿的大量结晶分异,亦或还原性的流体的大量饱和出溶,会抬升残余岩浆的氧逸度(Li *et al.*, 2019)。不过,驱龙矿床的已有研究显示,荣木错拉及 P 斑岩演化过程中并没有上述现象的发生(Yang and Cooke, 2019)。笔者倾向于认为, P 斑岩岩浆氧逸度的突然升高可能是因高镁闪长玢岩所代表的超钾质岩浆混合注入所致。尽管本次分析结果显示高镁闪长玢岩中锆石  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  值比 P 斑岩高,但两者平均值基本是相似的。另外,最近 Li 等(2020)直接估算了冈底斯带超钾质岩浆氧逸度,结果显示演化到上地壳深度时,超钾质岩浆氧逸度在  $\Delta\text{FMQ}+2.5$  以上。如此高氧逸度的岩浆混合到 P 斑岩岩浆中,毫无疑问会导致 P 斑岩的氧逸度升高。

#### 4.1.2 相对水含量

Lu 等(2016)通过对全球含矿和贫矿的酸性岩浆锆石微量元素的研究,提出  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  与  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值可以指征岩浆的水含量。在富水岩浆中,角闪石结晶于岩浆演化的早期阶段,使得残余熔体中亏损 Y(安山质、英安质岩浆中, Y 在角闪石与熔体之间的分配系数为 2~6)。此外,角闪石还富集 MREE,角闪石在富水熔体结晶会导致残余熔体的  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值降低。上述特征也会体现在同组分结晶的锆石中,富水的成矿岩浆锆石(较贫矿岩浆的锆石)具有出更高的  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  值,以及更低的  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值。统计显示含矿岩浆的锆石  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y} > 0.01$ ,  $\text{Dy}/\text{Yb} < 0.3$ ,含水量较高(Wang *et al.*, 2014b, 2018; Lu *et al.*, 2016)。

驱龙矿床中新世岩浆序列的锆石除了成矿的 P 斑岩,  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  和  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值几乎都在该范围之内。其中,荣木错拉岩体(19~17 Ma)的锆石  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  值最高,  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值范围最低,这与角闪石只少量出现在花岗闪长岩中相符合。随温度降低,  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  值升高,  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值降低。角闪石、黑云母等含水矿物的结晶时会消耗岩浆中部分挥发分,岩浆中流体未达到饱和。随后基性岩浆注入(闪长质包体年龄~16.3 Ma),随温度的降低,闪长质包

体的  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值可观察到两个趋势:  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值不变,可能对应着闪长质包体中自形的角闪石(图 3f),形成于与荣木错拉花岗闪长岩岩浆混合之前的岩浆房中;  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值降低,可能对应针状角闪石(图 3e),岩浆混合时快速结晶而成。基性岩浆的注入,带来了大量的热和水,促使岩浆房中流体达到饱和,大量含矿岩浆流体从岩浆熔体出溶,造成岩浆房内压增大, P 斑岩岩浆快速上升侵位(~16 Ma)(对应 P 斑岩具有较高的锆石 Ti 温度)。伴随着 P 斑岩的就位,大量含矿岩浆流体上升,形成 UST、隐爆角砾岩和大规模的热液脉系、斑岩矿化与蚀变。P 斑岩较低的  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  值和较高的  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值,表明了此时岩浆已经发生了流体饱和、出溶及大规模排泄。在成矿后期的高镁闪长玢岩(~15 Ma),也观察到两种产状的角闪石(Yang *et al.*, 2015):自形筛状(显示再吸收作用)的角闪石和针状淬火的角闪石,对应了其较高的  $(\text{Ce}/\text{Nd})/\text{Y}$  值和较低的  $\text{Dy}/\text{Yb}$  值,表明高镁闪长玢岩岩浆具有较高的水含量(图 10)。Yang 等(2015)和 Lu 等(2015)的研究也证实由超钾质岩与埃达克岩混合成因的高镁闪长玢岩,其含水量极高(500 MPa 条件下,含水量质量分数可 >10%)。富水的高镁闪长玢岩岩浆混合到驱龙斑岩岩浆房中时,会抬升岩浆房的水含量,有利于流体的饱和和出溶。

#### 4.2 岩浆起源

荣木错拉岩体的锆石 Hf 同位素区间为岩浆序列中最高[ $\varepsilon\text{Hf}(t)$  峰值 9.0],而氧同位素分布区间为岩浆序列中最高(图 6),显示有地壳物质混染,这与荣木错拉复式岩体作为一个较大的岩基的地质事实相符,岩浆多期次侵位的过程中同化混染围岩,导致  $\delta^{18}\text{O}$  的轻微升高;而另一个  $\delta^{18}\text{O}$  的峰值(6.04‰)说明其岩浆源区有幔源物质的贡献。闪长质包体的锆石 Hf 同位素分布特征与荣木错拉岩体相似,显示较强的亏损地幔特征;而氧同位素除去相似的稍高的  $\delta^{18}\text{O}$  峰值(6.45‰),可能为岩浆混合时同化导致,另外两个接近地幔锆石  $\delta^{18}\text{O}$  下限的值(4.70‰),表明闪长质包体岩浆来自地幔源区。P 斑岩具有与地幔相似的锆石氧同位素特征也证实了岩浆房有大量幔源组分的贡献(图 11)。此外,在 P 斑岩中出现的代表岩浆流体出溶的 UST 石英,其  $\delta^{18}\text{O}_{\text{qtz}}$  为 6.2‰~7.6‰,换算成与之平衡的水的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$  为 4.6‰~6.0‰(Qu *et al.*, 2017),与 P 斑岩锆石氧同位素记录的特征一致。高镁闪长玢岩

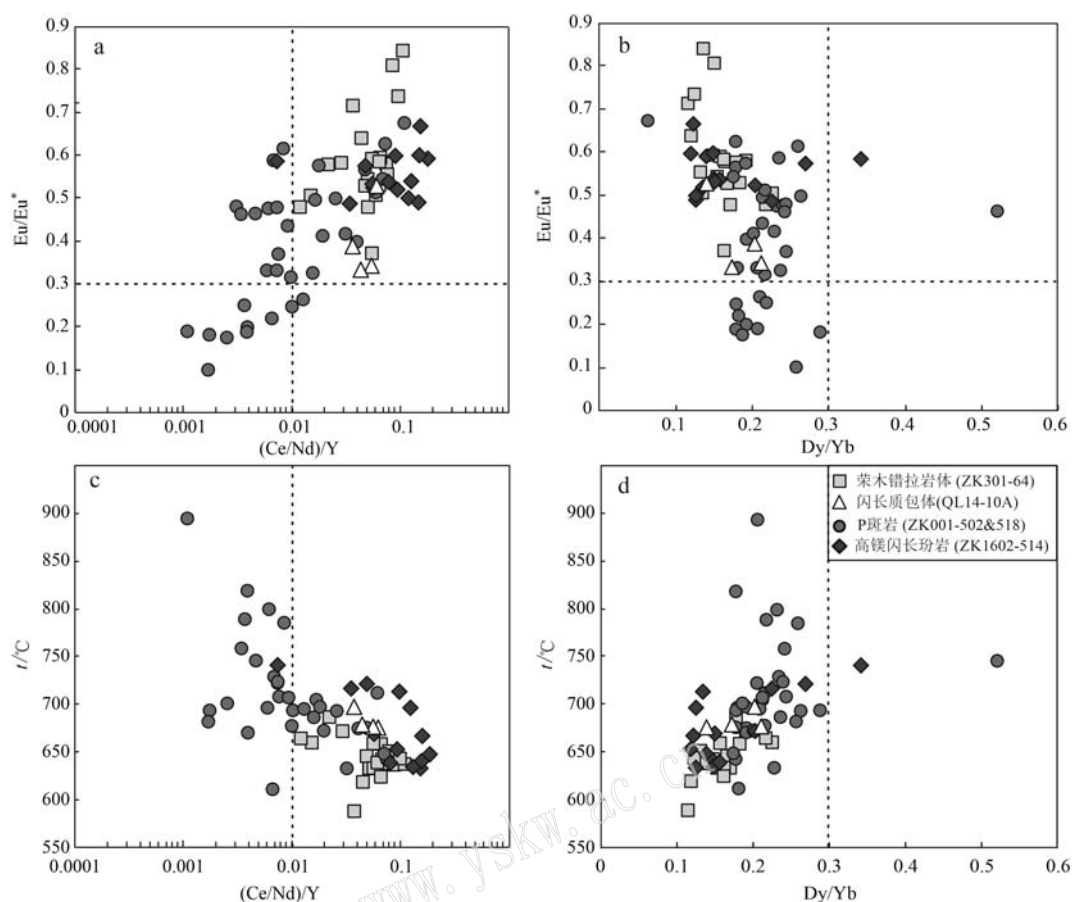


图 10 驱龙矿床各期侵入岩及闪长质包体锆石 Eu 异常、Ti 温度与  $(\text{Ce/Nd})/\text{Y}$ 、 $\text{Dy/Yb}$  组图  
Fig. 10 Eu anomaly vs.  $(\text{Ce/Nd})/\text{Y}$  (a) and  $\text{Dy/Yb}$  (b); and Ti-in-zircon temperature vs.  $(\text{Ce/Nd})/\text{Y}$  (c) and  $\text{Dy/Yb}$  (d) of zircons from each stage intrusive rocks and diorite enclaves in Qulong deposit

的 Hf 分布区间为岩浆序列中最低,可能是由于其形成于超钾质岩浆与埃达克质岩浆混合 (Yang *et al.*, 2015); 闪长玢岩的锆石氧同位素值也显示其岩浆来源于地幔,有地壳物质混染。驱龙矿床岩浆序列的锆石 Hf-O 总体反应出,有大量的幔源物质贡献参与成矿 (图 11)。

前人对冈底斯斑岩铜矿带含矿的埃达克质岩浆的成因模式有以下几种不同观点: ① 俯冲或残留洋壳的部分熔融 (Qu *et al.*, 2004); ② 经板片熔体/流体交代过的富集地幔楔的部分熔融 (Gao *et al.*, 2007, 2010); ③ 新生的加厚基性下地壳 ( $\geq 50$  km) 在富水的角闪榴辉岩相或石榴子石角闪岩相条件下的部分熔融,并有富集地幔和/或上地壳物质的加入 (Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004; Mo *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2011)。本次针对驱龙中新世岩浆岩中锆石微量及 Hf-O 同位素的研究结果,特别是柴木错拉岩体及闪长岩包体亏损的 Hf 同位素组成 [ $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于  $+7 \sim +10$  之间],

支持驱龙矿床中新世岩浆起源于新生下地壳部分熔融的观点 (Hou *et al.*, 2015)。不过, P 斑岩极低的  $\delta^{18}\text{O}$  值 ( $+4.5 \sim +6.3$ ), 表明其形成过程中有大量地幔组分加入。结合前人的认识 (Yang *et al.*, 2015), 认为 P 斑岩母岩浆是柴木错拉岩体所代表的埃达克质岩浆与高镁闪长玢岩所代表的镁质岩浆混合并发生分异的产物; 高氧逸度和水含量的高镁闪长玢岩岩浆的混合, 会抬升 P 斑岩岩浆的氧逸度和水含量, 特别是氧逸度的抬升, 会促使岩浆演化早期饱和和不混溶的硫化物熔体发生分解 (曲焕春, 2018), 转化成硫酸盐, 进而提升 P 斑岩岩浆中的金属含量, 并形成成矿斑岩。这一推论也得到其他研究的支持: 如 Hattori 等 (1993) 在菲律宾的皮纳图博火山观察到, 这类镁铁质熔体能够在底垫或者岩浆上升过程中释放大量的超临界流体 ( $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \text{CO}_2$ ) (Hattori, 1993; Wallace and Gerlach, 1994; Hattori and Keith, 2001), 从而形成含水条件, 使镁铁质下地壳发生注水熔融 (water-fluxed melting) (Sawyer,

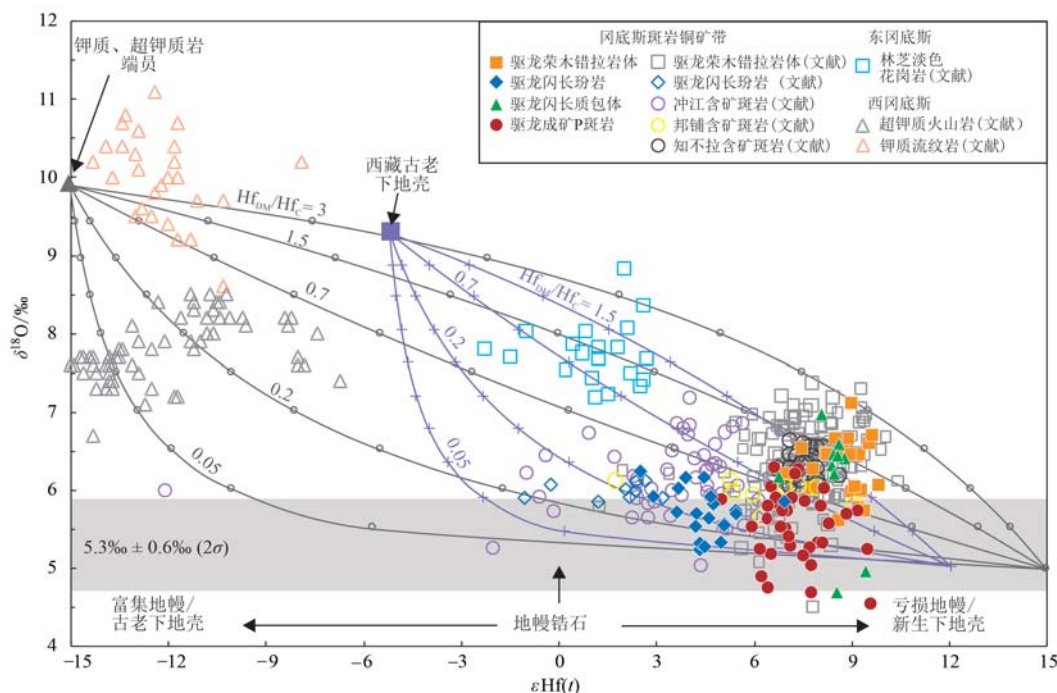


图 11 冈底斯带渐中新世含矿斑岩与贫矿岩石的锆石 Hf-O 同位素相关关系图

Fig. 11 Plot of  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  isotope vs. isotopes of zircons from the Oligocene to Miocene ore-bearing magmas and ore-barren magmas in the Gangdese porphyry copper belts

点线为地幔和下地壳来源岩浆的二元混合趋势线,  $\text{Hf}_{\text{DM}}/\text{Hf}_{\text{C}}$  代表幔源岩浆与下地壳来源岩浆的 Hf 浓度比, 线上空心点或“×”表示混合比例 (10% 间隔)。两组混合模拟分别是: ① 紫色混合线: 地幔端员锆石  $\varepsilon\text{Hf}(t) = 12$ ,  $\delta^{18}\text{O} = 5.3\text{‰}$  (Valley *et al.*, 1998); 西藏古老下地壳端员的锆石  $\varepsilon\text{Hf}(t) = -5.2$ ,  $\delta^{18}\text{O} = 9.4\text{‰}$  (参考 Zheng *et al.*, 2012 报道的继承锆石)。② 灰色混合线: 地幔端员锆石  $\varepsilon\text{Hf}(t) = 15$ ,  $\delta^{18}\text{O} = 5.3\text{‰}$ ; 西冈底斯钾质、超钾质岩的锆石  $\varepsilon\text{Hf}(t) = -15$ ,  $\delta^{18}\text{O} = 9.8\text{‰}$  (参考 Tian *et al.*, 2015)。数据来源: 西冈底斯钾质、超钾质火山岩 (Tian *et al.*, 2015), 冲江含矿斑岩 (Hu *et al.*, 2017), 知不拉含矿斑岩 (Xu *et al.*, 2016); 驱龙荣木错拉岩体 (Hu *et al.*, 2015); 驱龙高镁闪长玢岩和邦铺含矿斑岩 (Wang *et al.*, 2015a, 2015b); 东冈底斯渐新世林芝淡色花岗岩 (Zheng *et al.*, 2012)

the dotted lines denote the two-component mixing trends between the mantle- and crust-derived magmas.  $\text{Hf}_{\text{DM}}/\text{Hf}_{\text{C}}$  is the ratio of Hf concentration in the depleted mantle magma (DM) over crustal (C) melt indicated for each curve, and the empty dots and the cross mark “×” on the curves represent 10% mixing increments by assuming: ① the mantle zircon has  $\varepsilon\text{Hf}(t) = 15$  and  $\delta^{18}\text{O} = 5.3\text{‰}$  (Valley *et al.*, 1998); the Tibetan ancient lower crust zircon has  $\varepsilon\text{Hf}(t) = -5.2$  and  $\delta^{18}\text{O} = 9.4\text{‰}$  (refer to the inherited zircon reported by Zheng *et al.*, 2012) (the purple mixed line). ② the mantle end-member zircon  $\varepsilon\text{Hf}(t) = 15$ ,  $\delta^{18}\text{O} = 5.3\text{‰}$ ; Zircon  $\varepsilon\text{Hf}(t) = -15$ ,  $\delta^{18}\text{O} = 9.8\text{‰}$  (Tian *et al.*, 2015) (the grey mixed line). data sources: ultrapotassic-potassic volcanic rocks (Tian *et al.*, 2015), ore-forming granitoid of Chongjiang (He *et al.*, 2017), ore-forming granitoid of Zhibula (Xu *et al.*, 2016); RMCL pluton of Qulong (Hu *et al.*, 2015); high-Mg diorite porphyry of Qulong and ore-forming granitoid Bangpu (Wang *et al.*, 2015a, 2015b); Linzhi Oligocene leucogranite (Zheng *et al.*, 2012)

2010), 进而形成含水熔体。

## 5 结论

(1) 通过对驱龙矿床完整岩浆序列的锆石学研究发现, 随着岩浆演化进行和基性岩浆注入, 温度逐渐升高, 氧逸度和水含量呈现升高趋势, 且在成矿期和成矿后的岩浆表现为更宽泛的  $\text{Ce(IV)}/\text{Ce(III)}$ 、 $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  值以及 Hf-O 组成, 反映了幔源岩浆的混入。

(2) 通过锆石原位 Hf-O 同位素的研究, 进一步确定了 P 斑岩母岩浆是荣木错拉岩体所代表的埃达克质岩浆与高镁闪长玢岩所代表的幔源岩浆发生混

合的产物。

(3) 基于高镁闪长玢岩岩浆具有较高的氧逸度和水含量, 以及成矿的 P 斑岩混合成因的特征, 认为幔源物质加入可能为驱龙铜矿的形成提供了水, 并抬高了氧逸度促进成矿作用的发生。

## References

- Aibai A, Zhang Z C, Cheng Z G, *et al.* 2019. Highly differentiated juvenile crust-derived magmas linked with the Xilekuduke porphyry Mo (Cu) deposit in East Junggar, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 115: 103-103.

- Ballard J R, Palin M J and Campbell I H. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(3): 347~364.
- Bouvier A, Vervoor J D and Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1~2): 48~57.
- Burnham A D. 2012. Zircon as A Recorder of the Oxygen Fugacity of Magmas[D]. Imperial College London.
- Chung S L, Liu D, Ji J, *et al.* 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. *Geology*, 31: 1 021~1 024.
- Dong Yanhui, Xu Jifeng, Zeng Qinggao, *et al.* 2006. Is there a Neotethys's subduction record earlier than arc volcanic rocks in the Sangri Group? [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 661~668(in Chinese with English abstract).
- Ferry J M and Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429~437.
- Gao Y F, Hou Z Q, Kamber B S, *et al.* 2007. Adakite-like porphyries from the southern Tibetan continental collision zones: Evidence for slab melt metasomatism[J]. *Contribution to Mineral Petrology*, 153: 105~120.
- Gao Y F, Yang Z S, Santosh M, *et al.* 2010. Adakitic rocks from slab melt-modified mantle sources in the continental collision zone of southern Tibet[J]. *Lithos*, 119(3~4): 651~663.
- Geng Quanru, Pan Guitang, Jin Zhenmin, *et al.* 2005. Geochemistry and genesis of the Yeba volcanic rocks in the Gangdise magmatic arc, Tibet[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 747~760(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237~269.
- Hanchar J M and Watson E B. 2003. Zircon saturation thermometry[J]. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 89~112.
- Hattori K. 1993. High-sulfur magma, a product of fluid discharge from underlying mafic magma: Evidence from Mount Pinatubo, Philippines[J]. *Geology*, 21: 1 083~1 086.
- Hattori K and Keith J D. 2001. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: Evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 36: 799~806.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The Composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27~62.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595~2 604(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Duan L F, Lu Y J, *et al.* 2015. Lithospheric architectures of the Lhasa Terrane and its control on ore deposits in Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Economic Geology*, 110: 1 541~1 575.
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, *et al.* 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 139~155.
- Hu Y B, Liu J Q, Ling M X, *et al.* 2015. The formation of Qulong adakites and their relationship with porphyry copper deposit: Geochemical constraints[J]. *Lithos*, 220~223: 60~80.
- Hu Y B, Liu J Q, Ling M X, *et al.* 2017. Constraints on the origin of adakites and porphyry Cu-Mo mineralization in Chongjiang, Southern Gangdese, the Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 292.
- Li J X, Qin K Z, Li G M, *et al.* 2011. Post-collisional ore-bearing adakitic porphyries from Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet: Melting of thickened juvenile arc lower crust[J]. *Lithos*, 126(3~4): 265~277.
- Li W K, Yang Z, Chiaradia M, *et al.* 2020. Redox state of southern Tibetan upper mantle and ultrapotassic magmas[J]. *Geology*, 48(7): 733~736.
- Li W K, Yang Z M, Cao K, *et al.* 2019. Redox-controlled generation of the giant porphyry Cu-Au deposit at Pulang, southwest China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174(12): 1~34.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, *et al.* 2009. Role of mantle-derived magma in genesis of early Yanshanian granites in the Nanling Range, South China: In situ zircon Hf-O isotopic constraints[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 52(9): 1 262~1 278.
- Li X H, Long W G, Li Q L, *et al.* 2010. Penglai zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(2): 117~134.
- Li Y, Selby D, Feely M, *et al.* 2016. Fluid inclusion characteristics and molybdenite Re-Os geochronology of the Qulong porphyry copper-molybdenum deposit, Tibet[J]. *Mineralium Deposita*, 52(2): 137~158.
- Liang H Y, Campbell I H, Allen C, *et al.* 2006. Zircon Ce<sup>4+</sup>/Ce<sup>3+</sup> ratios

- and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet[J]. *Mineralium Deposita*, 41: 152~159.
- Loader M A, Wilkinson J J and Armstrong R N. 2017. The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 472: 107~119.
- Loucks R R, Fiorentini M L and Henríquez G J. 2020. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon[J]. *Journal of Petrology*, 61(3): 1~30.
- Lu Y J, Loucks R R, Fiorentini M, *et al.* 2015. Fluid flux melting generated postcollisional high Sr/Y copper ore-forming water-rich magmas in Tibet [J]. *Geology*, 43(7): 583~586.
- Lu Y J, Loucks R R, Fiorentini M, *et al.* 2016. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu±Mo±Au deposits[J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 19: 329~347.
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, *et al.* 2003. Development of porphyry copper-molybdenum-lead-zinc ore-forming system in East Gangdese Belt, Tibet: Evidence from Re-Os age of molybdenite in Bangpu copper polymetallic deposit[J]. *Mineral Deposits*, 22(3): 246~252(in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, *et al.* 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 96(1~2): 225~242.
- Qin Kezhang. 2014. Qulong Porphyry-Skarn Copper Molybdenum Deposit in Tibet[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Qiu J T, Li P, Santosh M, *et al.* 2014. Magma oxygen fugacities of granitoids in the Xiaolinling area, central China: Implications for regional tectonic setting[J]. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 191(3): 317~329.
- Qiu J T, Yu X Q, Santosh M, *et al.* 2013. Geochronology and magmatic oxygen fugacity of the Tongcun molybdenum deposit, northwest Zhejiang, SE China[J]. *Mineralium Deposita*, 48(5): 545~556.
- Qu Huanchun. 2018. Magmatic hydrothermal transition process: A case study from Qulong porphyry Copper deposit and Dahutang tungsten deposits[J]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, Postdoctoral research(in Chinese with English abstract).
- Qu H C, Sun M Y and Dong P. 2017. The  $\delta^{18}\text{O}$  of UST quartz in two porphyry deposits, China[J]. *Resource Geology*, 67(1): 109~115.
- Qu X M, Hou Z Q and Li Y G. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 74: 131~148.
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Economic Geology*, 98: 1 515~1 533.
- Rui Zongyao, Qu Xiaoming, Hou Zengqian, *et al.* 2003. Metallogenetic epoch of Gangdese porphyry copper belt and uplift of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Mineral Deposits*, 22(2): 217~225 (in Chinese with English abstract).
- Sawyer E W. 2010. Migmatites formed by water-fluxed partial melting of a leucogranodiorite protolith: Microstructures in the residual rocks and source of the fluid[J]. *Lithos*, 116(3~4): 273~286.
- Scherer E. 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock[J]. *Science*, 293(5 530): 683~687.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes, magmatism in Oceanic Basins[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tian S H, Yang Z S, Hou Z Q, *et al.* 2015. Subduction of the indian lower crust beneath southern tibet revealed by the post-collisional potassic and ultrapotassic rocks in SW Tibet[J]. *Gondwana Research*, 41(1): 29~50.
- Trail D, Bruce W E and Tailby N D. 2012. Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for the oxidation state of magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 97: 70~87.
- Valley J W. 2003. Oxygen isotopes in zircon[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53(1): 343~385.
- Valley J W, Kinny P D, Schulze D J, *et al.* 1998. Zircon megacrysts from kimberlite: Oxygen isotope variability among mantle melts[J]. *Contribution to Mineral Petrology*, 133: 1~11.
- Wallace P and Gerlach T M. 1994. Magmatic vapor source for sulfur dioxide released during volcanic eruptions: Evidence from Mount Pinatubo [J]. *Science*, 265: 497~499.
- Wang Liangliang, Mo Xuanxue, Li Bing, *et al.* 2006. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyry in Qulong Cu (Mo) ore deposit, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 1 001~1 008(in Chinese with English abstract).
- Wang R, Richards J P, Hou Z Q, *et al.* 2014a. Increasing magmatic oxidation state from Paleocene to Miocene in the Eastern Gangdese Belt, Tibet: Implication for collision-related porphyry Cu-Mo±Au mineralization[J]. *Economic Geology*, 109(7): 1 943~1 965.
- Wang R, Richards J P, Zhou L M, *et al.* 2014b. The role of Indian and Tibetan lithosphere in spatial distribution of Cenozoic magmatism and porphyry Cu-Mo deposits in the Gangdese belt, southern Tibet[J]. *Earth—Science Reviews*, 150: 68~94.
- Wang R, Collins W J, Weinberg R F, *et al.* 2016. Xenoliths in ultrapotassic volcanic rocks in the Lhasa block: Direct evidence for crust-mantle mixing and metamorphism in the deep crust[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171: 62.
- Wang R, Weinberg R F, Collins, W J, *et al.* 2018. Origin of postcolli-

- sional magmas and formation of porphyry Cu deposits in southern Tibet [J]. *Earth—Science Reviews*, 181: 122~143.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 234(1~2): 105~126.
- Xiao B, Qin K Z, Li G M, *et al.* 2012. Highly oxidized magma and fluid evolution of Miocene Qulong giant porphyry Cu-Mo deposit, southern Tibet, China [J]. *Resource Geology*, 62(1): 4~18.
- Xin Hongbo and Qu Xiaoming. 2008. Relative oxidation states of ore-bearing porphyries inferred from Ce(IV)/Ce(III) ratio in zircon: Application to the porphyry copper belt at Gangdese, Tibet [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 152~160 (in Chinese with English abstract).
- Xu J, Zheng Y Y, Sun X, *et al.* 2016. Geochronology and petrogenesis of Miocene granitic intrusions related to the Zhibula Cu skarn deposit in the Gangdese belt, southern Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120: 100~116.
- Yang Zhiming. 2008. The Qulong Giant Porphyry Copper Deposit in Tibet: Magmatism and Mineralization [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Xia Daixiang, *et al.* 2008. Relationship between western porphyry and mineralization in Qulong copper deposit of Tibet and its enlightenment to further exploration [J]. *Mineral Deposits*, 27(1): 28~36 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z M, Hou Z Q, White N C, *et al.* 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet [J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1~3): 133~159.
- Yang Z M, Lu Y J, Hou Z Q, *et al.* 2015. High-Mg diorite from Qulong in Southern Tibet: Implications for the genesis of adakite-like intrusions and associated porphyry Cu deposits in collisional orogens [J]. *Journal of Petrology*, 56(2): 227~254.
- Yang Z M, Goldfarb R J and Chang Z S. 2016. Generation of postcollisional porphyry copper deposits in southern Tibet triggered by subduction of the Indian continental plate [J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 19: 279~300.
- Yang Z M and Cooke D R. 2019. Porphyry copper deposits in China [J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 22: 133~187.
- Zhang C C, Sun W D, Wang J T, *et al.* 2017. Oxygen fugacity and porphyry mineralization: A zircon perspective of Dexing porphyry Cu deposit, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 206: 343~363.
- Zhao J X, Qin K Z, Xiao B, *et al.* 2015. Thermal history of the giant Qulong Cu-Mo deposit, Gangdese metallogenic belt, Tibet: Constraints on magmatic-hydrothermal evolution and exhumation [J]. *Gondwana Research*, 36: 390~409.
- Zheng Y C, Hou Z Q, Li Q Y, *et al.* 2012. Origin of late Oligocene adakitic intrusives in the southeastern Lhasa terrane: Evidence from in situ, zircon U-Pb dating, Hf-O isotopes, and whole-rock geochemistry [J]. *Lithos*, 148(3): 296~311.
- Zhu D C, Pan G T, Chung S L, *et al.* 2008. SHRIMP Zircon Age and Geochemical Constraints on the Origin of Lower Jurassic Volcanic Rocks from the Yeba Formation, Southern Gangdese, South Tibet [J]. *International Geology Review*, 50(5): 442~471.
- Zhao Z D, Mo X X, Dilek Y, *et al.* 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet [J]. *Lithos*, 113: 190~212.

## 附中文参考文献

- 董彦辉, 许继峰, 曾庆高, 等. 2006. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲记录么? [J]. *岩石学报*, 22(3): 661~668.
- 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 等. 2005. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因 [J]. *地球科学*, 30(6): 747~760.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用 [J]. *岩石学报*, 23(10): 2 595~2 604.
- 李献华, 李武显, 王选策, 等. 2009. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf-O 同位素制约 [J]. *中国科学 (D) 辑: 地球科学*, 39(7): 872~887.
- 李献华, 唐国强, 龚冰, 等. 2013. Qinghu (清湖) 锆石: 一个新的 U-Pb 年龄和 O, Hf 同位素微区分析工作标样 [J]. *科学通报*, 58(20): 1 954~1 961.
- 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 等. 2003. 西藏冈底斯东段斑岩铜钼铅锌成矿系统的发育时限: 帮浦铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄证据 [J]. *矿床地质*, 22(3): 246~252.
- 秦克章. 2014. 西藏驱龙斑岩-夕卡岩铜钼矿床 [M]. 北京: 科学出版社.
- 曲焕春. 2018. 岩浆热液过渡过程: 以驱龙铜矿和大湖塘钨矿为例 [D]. 北京: 中国地质科学院, 博士后出站报告.
- 芮宗瑶, 曲晓明, 侯增谦, 等. 2003. 冈底斯斑岩铜矿成矿时代及青藏高原隆升 [J]. *矿床地质*, 21(2): 217~225.
- 王亮亮, 莫宣学, 李冰, 等. 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿含矿斑岩的年代学与地球化学 [J]. *岩石学报*, 22(4): 1 001~1 008.
- 辛洪波, 曲晓明. 2008. 西藏冈底斯斑岩铜矿带含矿岩体的相对氧化状态: 来自锆石 Ce(IV)/Ce(III) 比值的约束 [J]. *矿物学报*, 28(2): 152~160.
- 杨志明. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床——岩浆作用与矿床成因 [D]. 北京: 中国地质科学院.
- 杨志明, 侯增谦, 夏代详, 等. 2008. 西藏驱龙铜矿西部斑岩与成矿关系的厘定: 对矿床未来勘探方向的重要启示 [J]. *矿床地质*, 27(1): 28~36.