

# 新疆东准噶尔琼河坝地区绿石沟早石炭世岩体 中基性岩墙群成因及其构造动力学背景

张建军<sup>1</sup>, 童英<sup>1</sup>, 王涛<sup>1, 2</sup>, 黄伟<sup>1</sup>, 赵建新<sup>1</sup>, 侯继尧<sup>1</sup>

(1. 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京离子探针中心, 北京 100037)

**摘要:** 基性岩墙群对探讨岩石圈伸展过程、时空演化及深部动力学等方面具有重要意义。为了厘定东准噶尔琼河坝地区岩墙群的形成时代、源区地幔性质、成岩构造背景、岩石成因及其与区域上的其他岩浆作用的成因关系, 揭示东准噶尔古生代的地球动力学背景, 对侵入到绿石沟岩体花岗岩中的暗色岩墙群进行了遥感卫星影像解译, 并从野外地质、岩石学、矿物学、年代学、锆石 Hf-O 同位素和地球化学等方面进行了系统研究。绿石沟岩体中岩墙存在闪长玢岩和辉绿玢岩岩墙的岩石组合, 它们的锆石 LA-ICP-MS 和 SHRIMP U-Pb 定年结果表明, 闪长玢岩、辉绿玢岩岩墙形成时代分别为  $346 \pm 1$  Ma 和  $\sim 332$  Ma。辉绿玢岩岩墙的锆石  $\epsilon\text{Hf}(t)$  值为  $+10.2 \sim +15.4$ , 对应的二阶段 Hf 模式年龄为  $0.35 \sim 0.67$  Ga, 其锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值主要变化范围为  $5.00\% \sim 6.41\%$ 。这些同位素特征表明其具有亏损地幔源区的物质组成。矿物学研究表明, 辉绿玢岩岩墙中的角闪石为浅闪石、铁浅闪石, 其结晶温度范围为  $896 \sim 984^\circ\text{C}$ , 压力为  $41 \sim 88$  MPa, 对应结晶深度约  $1.54 \sim 3.31$  km; 辉石为透辉石, 辉石-熔体平衡时的岩浆温度为  $1092 \sim 1099^\circ\text{C}$ , 压力为  $500 \sim 630$  MPa, 推测形成辉绿玢岩辉石岩浆房的存储深度为  $16.5 \sim 20.8$  km。东准噶尔琼河坝地区大量中基性岩墙构成的岩墙群可作为区域伸展构造的重要标志, 结合前人对该区构造背景认识, 认为琼河坝地区在早石炭世时可能处于后碰撞伸展拉张环境, 这为探讨东准噶尔乃至中亚造山带西段的古生代的地球动力学环境演变提供了新依据。

**关键词:** 岩墙群; 锆石 U-Pb 年龄; Hf-O 同位素; 辉绿玢岩; 东准噶尔

中图分类号: P597<sup>+</sup>.3; P588.12<sup>+</sup>4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)05-0606-25

## Petrogenesis and tectonic significance of Early Carboniferous dyke swarms in Lüshigou pluton of Qionghaba area, East Junggar, Xinjiang

ZHANG Jian-jun<sup>1</sup>, TONG Ying<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1, 2</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, ZHAO Jian-xin<sup>1</sup> and HOU Ji-yao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Paleozoic dyke swarms observed in the Qionghaba area of East Junggar are pivotal in understanding the tectonic evolution and setting of this area and even southwestern Central Asian orogenic belt; however, their genesis and tectonic setting are still unclear. In this paper, the authors present observations from outcrop scale to mineral scale, and new mineral chemistry, whole-rock chemistry, zircon U-Pb ages and in situ zircon Hf-O isotope data

收稿日期: 2019-05-16; 接受日期: 2019-08-26; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0603702); 国家自然科学基金资助项目(41830216, 41802074, U1403291); 中国地质调查局资助项目(DD20190001, DD20190370, DD20190685, DD20190397); 国际地学计划(IGCP662)

作者简介: 张建军(1985-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事岩石学相关研究, E-mail: jianjunzhang@live.cn; 通讯作者: 童英(1974-), 男, 研究员, 博士, 从事花岗岩地球动力学研究, E-mail: yingtong@cags.ac.cn。

from the dykes in the Lüshigou pluton of Qionghaba area, East Junggar. On the basis of the new obtained and previously published geochemical and isotopic data, the authors constrained magma sources and petrogenetic processes involved in the generation of these dyke swarms. The dykes in the Lüshigou pluton are composed of diorite-porphyrite and diabase porphyrite. The sensitive high-resolution LA-ICP-MS and SHRIMP U-Pb zircon ages determined for these dykes for the first time indicate that the diorite porphyrite and diabase porphyrite dykes were formed at  $346 \pm 1$  Ma and  $\sim 332$  Ma, respectively. Zircon  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  values of diabase porphyrite dyke in the Lüshigou pluton are from  $+10.2$  to  $+15.4$ , with the corresponding two-stage Hf model ages ranging from  $0.35$  to  $0.67$  Ga. Zircon  $\delta^{18}\text{O}$  values mainly vary from  $5.00\text{‰}$  to  $6.41\text{‰}$ . These isotope characteristics indicate a mantle source component. Thermobarometric results of amphiboles in the diabase porphyrite dyke indicate that the temperature range varies from  $896^\circ\text{C}$  to  $984^\circ\text{C}$ , and pressure range varies from  $41$  to  $88$  MPa, with corresponding crystallization depth from  $\sim 1.54$  to  $3.31$  km. In addition, the result of calculated clinopyroxene-liquid barometer shows that the magma temperature at pyroxene-melt equilibrium is  $1\,092^\circ\text{C}$  to  $1\,099^\circ\text{C}$  and the pressure is  $500$  to  $630$  MPa, so the storage depth of diabase porphyrite magma chamber should be at the depth from  $16.5$  to  $20.8$  km. Combined with previously published data, the authors hold that, in the Early Carboniferous, dyke swarms in the Qionghaba area of East Junggar were probably emplaced in a post-collisional setting.

**Key words:** dyke swarms; SHRIMP U-Pb age; Hf-O isotope; diabase porphyrite; East Junggar

**Fund support:** National Key Research and Development program of China (2018YFC0603702); National Natural Science Foundation of China (41830216, 41802074, U1403291); Geological Survey Projects of China Geological Survey (DD20190001, DD20190370, DD20190685, DD20190397); International Geoscience Programme (IGCP662)

作为一种特殊产状的岩浆岩,基性岩墙对探讨岩石圈伸展过程、时空演化及深部动力学等具有重要意义,它的岩石类型、岩石组合、产状和规模、时空分布特征、岩浆来源、侵位方式等蕴含着丰富的有关其产出构造背景、深部源区及成岩过程等方面的信息(Park *et al.*, 1995; Ernst *et al.*, 1995; Hou, 2012)。基性岩墙群是同一岩浆事件中侵位的一系列岩墙的组合,是地壳伸展体制下深源(地幔或下地壳)岩浆浅部就位的产物。镁铁质岩墙群常被认为是岩石圈(或地壳)伸展的标志(Ernst *et al.*, 1995; Hanski *et al.*, 2006; Goldberg, 2010; Hou, 2012; Chen *et al.*, 2014),也是探讨深部地幔性质、壳幔相互作用及深部动力学的纽带(Halls, 1982; Yin *et al.*, 2015)。

形成于造山带中的镁铁质岩墙群通常被认为处于造山后伸展环境和与弧后拉张有关的俯冲环境等(李宏博等, 2012; Torkian, 2019)。对镁铁质岩墙群的研究,不仅可以提高对地幔属性的认识,而且能够限定造山带构造体制转换时间,对恢复古构造环境有着至关重要的作用,因而对造山带中发育的镁铁质岩墙群成因深入研究十分重要。

中亚造山带常被认为是显生宙全球最大的增生

型造山带和陆壳生长区,其形成和演化过程中随古亚洲洋(约  $1.0$  Ga  $\sim 250$  Ma)洋盆闭合、板块汇聚、陆内造山和/或伴有地幔柱驱动等,均有大量地幔物质注入大陆地壳中,导致了显著的陆壳生长(Jahn *et al.*, 2000; Jahn, 2004; Hong *et al.*, 2004; Kovalenko *et al.*, 2004; Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2017; Tang *et al.*, 2017)。但也有观点认为,由于中亚造山带中的很多块体均具有古老的前寒武纪基底(Demoux *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2018),故显生宙时期的岩浆作用多表现为古老物质的再循环,显生宙地壳生长量是被高估了,形成的新生陆壳可能占很少的一部分(Kröner *et al.*, 2014, 2017)。可见,有关中亚造山带地壳生长问题仍未得到圆满解决,其中一个重要原因是由于中亚造山带复杂的构造演化和强烈的岩浆活动叠加,一定程度上限制了人们对中亚造山带引起地壳生长的地幔物质贡献量及其加入到地壳中的方式及地球动力学背景认识。值得注意的是,石炭纪—二叠纪是中亚造山带演化和成矿作用的一个关键时期,发育了大量的岩浆岩(以花岗质岩石大量产出,较少分布的基性、超基性岩为特征)和大量的与岩浆有关的金属矿产,但对这一关键时期的地球动力学背景仍然

存在争议(Xu *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2015; Liang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; Luo *et al.*, 2017a, 2017b; Mao *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018; Wali *et al.*, 2018)。

新疆东准噶尔地区位于阿尔泰、准噶尔和东天山等构造单元的结合部位,是研究中亚造山带石炭—二叠纪期间构造演化的关键地区。侵入到东准噶尔地区古生代花岗质岩石中的中基性岩墙为研究深部源区物质组成(特别是幔源物质贡献)和构造背景等提供了难得的机会。值得注意的是,东准噶尔东段的琼河坝地区也发育大量的中基性岩墙(冯乾文等, 2015)。琼河坝地区近年来因发现了丰富的金属矿床(严加永等, 2017; Wan *et al.*, 2017),如斑岩型铜矿(蒙西铜矿、琼河坝铜矿、桑南铜矿、铜华岭铜矿、尔赛铜矿)和矽卡岩型铁、铜矿(宝山铁矿、灰西沟铁矿、琼河坝铁矿、绿石沟铜矿、拉伊克勒克铜铁矿),得到人们的广泛关注。前人对琼河坝地区的花岗岩、火山岩及含矿岩石做了大量研究(杜世俊等, 2010; 汪传胜等, 2010; 张永等, 2010; Ju *et al.*, 2012; Su *et al.*, 2012; 李玮等, 2012; 毛翔等, 2012; Liu *et al.*, 2013)。然而,琼河坝发现的中基性岩墙群的研究还很薄弱,其形成时限、成因机制及形成构造动力学背景仍不很清楚。

本文对东准噶尔琼河坝地区侵入绿石沟岩体花岗岩中的暗色岩墙群进行了遥感卫星影像解译、岩石学、矿物学、地球化学、年代学和锆石 Hf-O 同位素等方面的详细研究,以期厘定琼河坝地区岩墙群的形成时代、物质源区、成因,为探讨东准噶尔乃至中亚地区古生代的岩石圈地幔性质及其深部动力学环境提供依据。

## 1 地质背景

琼河坝地区位于准噶尔盆地以东中蒙边界处,构造上属于古生代野马泉—琼河坝岛弧带,其南北两侧分别为卡拉麦里和阿尔曼太蛇绿岩带(图 1a)。区内岩浆活动较为强烈,古生代中酸性侵入岩广泛分布,岩石类型主要有花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩等,呈岩株、岩基状产出。除此之外,侵入体中还密集分布一些中基性岩墙,如闪长玢岩、辉绿(玢)岩脉和辉长岩脉,多数沿北西向和北东向分布,与两组断层方向大体一致。

绿石沟岩体在琼河坝大沟以西(图 1b),位于哈

密市伊吾县淖毛湖镇以北 35 km 处,呈岩基状产出,出露面积为 35 km<sup>2</sup>。岩体周围出露的地层主要有中上奥陶统荒草坡群(O<sub>2-3</sub>H)含化石的火山碎屑岩;下泥盆统托让格库都克组(D<sub>2t</sub>)滨海、浅海相—海陆交互火山岩建造,卓木巴斯套组(D<sub>1zh</sub>)海相碎屑岩、灰岩、大理岩;下石炭统黑山头组(C<sub>1h</sub>)滨海、浅海相碎屑岩和中性火山岩,巴塔玛依内山组(C<sub>1b</sub>)火山—沉积岩;第三系葡萄沟组(N<sub>2p</sub>)橙黄色粉砂岩及第四系(Q)。绿石沟岩体侵入围岩为中泥盆统北塔山组和下石炭统黑山头组和泥盆纪花岗岩(图 1b)。绿石沟岩体由黑云母石英二长岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩等多种岩石类型组成,其中石英二长岩是主体,其形成时代为石炭纪 354 ~ 346 Ma(赵建新等, 2017)。绿石沟岩体内部发育多条 NW 向断裂(图 1b)。

## 2 岩墙的空间分布及岩石学特征

琼河坝地区石炭纪绿石沟岩体花岗岩中发育大量中基性岩墙,高分辨率遥感影像精细目视解译出了约 110 条岩墙片段(图 1b),它们的走向主要为 N、NE 走向,其中 N 走向的数量最多,主要分布在绿石沟铜矿以西。在绿石沟岩体开展 1:10 000 野外地质填图过程中,发现大量密集分布的暗色岩墙,它们走向不同,局部部分与其他走向的岩墙呈“X”形交叉(图 2),岩墙宽窄不一,宽度变化约为 2 m 到 15 m,长数百米到数千米不等。各个走向上的岩墙岩性多样,在矿物组合上很大不同。笔者识别出有闪长玢岩和辉绿玢岩两种不同岩石类型侵入在绿石沟岩体中(图 2)。

第 1 种是闪长玢岩,呈浅灰绿色,斑状结构,块状构造,走向 85°,脉宽一般为 0.5 ~ 3 m,长度多为 20 ~ 200 m,最长的约为 1.5 km。斑晶主要矿物为斜长石、角闪石,有少量黑云母(图 3a、3b),副矿物见磁铁矿和锆石。长石斑晶粒径 0.2 ~ 1 mm,自形—半自形板状,有的包裹磁铁矿。角闪石主要存在基质中,呈菱形或短柱状,单偏光下多呈绿色—浅绿色。

第 2 种为辉绿玢岩,主要为南北向展布(走向为 9°、10°、15°等),在绿石沟岩体中出露很多,规模较大,其宽度多为半米,长约数十米到数百米不等。辉绿玢岩呈深灰色,具有典型的斑状结构,基质为变余辉绿结构,块状构造。斑晶约 20%,成分主要是斜长石、辉石、少量角闪石。斜长石斑晶呈自形—

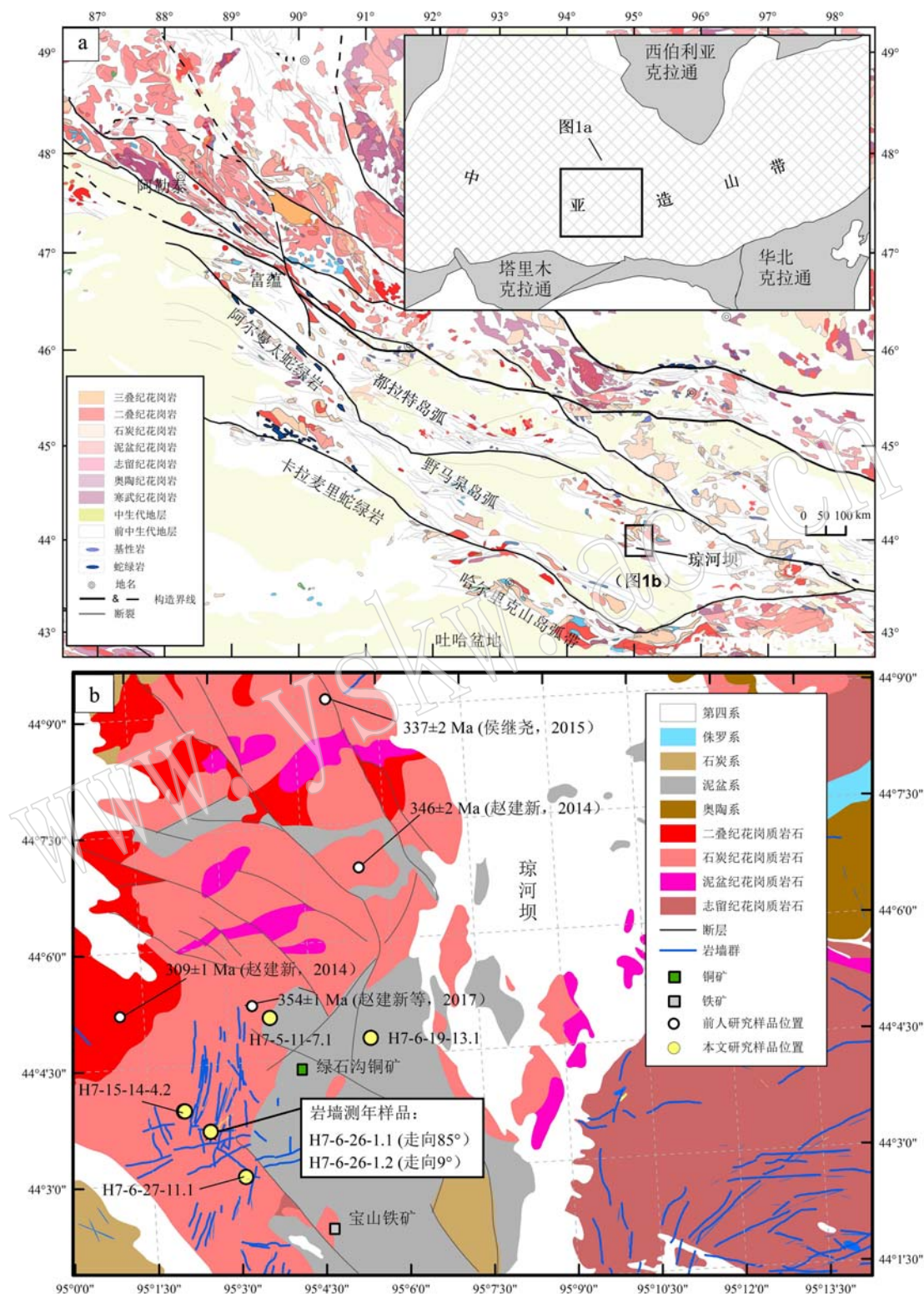


图1 新疆东准噶尔地区大地构造位置、地质简图(a, 据 Zhang *et al.*, 2017)及琼河坝地区绿石沟岩体地质图(b, 据新疆地矿局第二区域地质调查大队, 2009<sup>①</sup>和赵建新等, 2017)

Fig. 1 Sketch map showing the location of the East Junggar (a, modified after Zhang *et al.*, 2017) and geological map of the Lushigou pluton from the Qionghiba area, East Junggar (b, modified after Second Brigade of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2009<sup>①</sup> and Zhao Jianxin *et al.*, 2017)

① 新疆地矿局第二区域地质调查大队. 2009. 新疆伊吾县绿石沟铜矿区一带区域地质矿产图 L46E024021 (1:50 000).

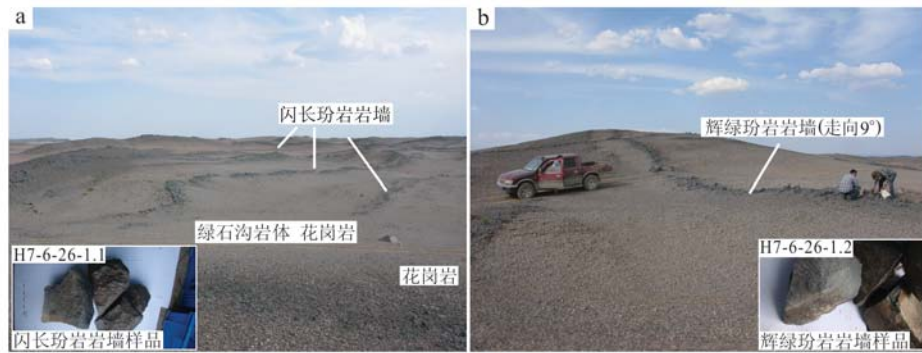


图2 琼河坝地区绿石沟岩体中基性岩墙的野外地质特征及样品手标本照片  
Fig. 2 Field outcrop photos of dykes in Lushigou pluton, Qionghaba area, with studied samples showing in corner

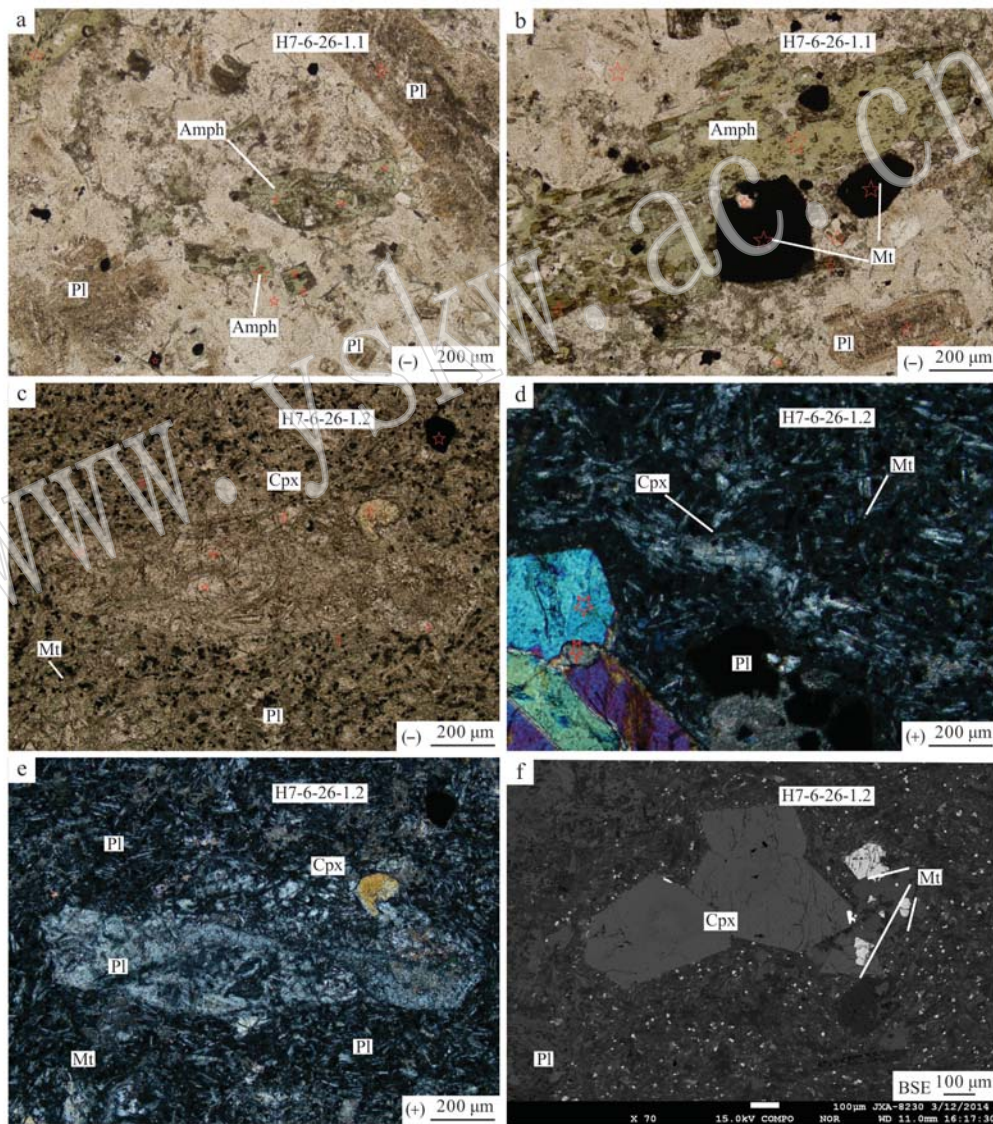


图3 闪长玢岩(a,b)和辉绿玢岩(c~f)岩墙的岩相学特征

Fig. 3 Microphotographs of the dykes from Lushigou pluton

a—自形的角闪石在斜长石间隙中; b—角闪石周围发育磁铁矿; c、e—基质中辉石呈细小粒状, 充填在斜长石条晶格架中; d、f—辉石和斜长石等的接触关系; Cpx—辉石; Pl—斜长石; Amph—角闪石; Mt—磁铁矿  
a—euhedral amphibole surrounded with plagioclase; b—magnetite distributed around amphibole; c, e—fine-grained clinopyroxene embedded in plagioclase phenocrysts in matrix; d, f—clinopyroxene and plagioclase in matrix; Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase; Amph—amphibole; Mt—magnetite

半自形板状, 基质粒径一般为 0.1~0.8 mm, 斜长石约占 55%, 呈短片状, 板状, 辉石占 20% 左右, 大小为 1~2 mm。可见大量暗色矿物, 副矿物为磁铁矿、黄铁矿、锆石等。基质成分同斑晶基本相同, 为微晶结构, 基质主要由他形的长石和辉石组成。辉石或磁铁矿等充填在斜长石搭成的格架中, 构成辉绿结构或间粒结构(图 3c、3d)。

### 3 样品概况及测试方法

本文对侵入到绿石沟岩体中的 7 条代表性新鲜暗色岩墙进行了样品采集, 采样位置见图 1。对选取的闪长玢岩样品 H7-6-26-1.1 进行了 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年和全岩地球化学分析, 对辉绿玢岩样品 H7-6-26-1.2 进行了锆石 SHRIMP 定年、O 同位素和 Hf 同位素分析、矿物电子探针分析和全岩地球化学分析, 同时对另外 5 个辉绿玢岩样品进行了全岩地球化学分析。

#### 3.1 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 定年

使用常规的重液浮选和电磁分离方法挑选出锆石颗粒, 随后在双目镜下根据颜色、自形程度、形态学和透明度等特征进行初步分类, 并挑选出具有代表性的锆石, 将其粘贴在环氧树脂表面。固结后抛磨, 使锆石内部充分暴露, 然后进行反射光、透射光和阴极发光显微照相, 观察分析后, 排除多裂纹、多包裹体和抛光不清晰的锆石, 选择具有代表性的锆石进行测试。

闪长玢岩样品 H7-6-26-1.1 的锆石 U-Pb 年代学分析在天津地质矿产研究所同位素实验室完成。所用质谱仪型号为 Agilent7700x 及配套的 GeolasPro 激光剥蚀系统, 采用激光束斑直径为 35  $\mu\text{m}$ , 激光能量密度为 13~14 J/cm<sup>2</sup>, 激光频率为 9 Hz。激光取样过程采用 20 s 的背景采集时间、40 s 的剥蚀取样时间和 10 s 的样品池冲洗时间, 剥落的样品由高纯氦气(1.100 L/min)带入 ICP-MS; 同位素<sup>204</sup>Pb、<sup>206</sup>Pb、<sup>208</sup>Pb和<sup>232</sup>Th 采用 20 ms, <sup>238</sup>U 采用 10 ms, <sup>207</sup>Pb 采用 30 ms 的积分时间; 采用锆石标样 91500 作为外标进行 U-Pb 同位素分馏效应和质量歧视的校正计算, 采用 Plesovice 锆石标样作为监控盲样来监视测试过程的稳定性, 保证每 5 个样品点至少插一组标样。数据处理应用 Glitter 计算程序计算锆石的同位素比值和元素含量; 应用 Isoplot 4.15 计算程序对锆石样品的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U、<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 年龄在谐和图上进行投图,

并计算<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄的加权平均值。

#### 3.2 锆石 SHRIMP 测年及锆石 O 同位素

辉绿玢岩样品 H7-6-26-1.2 锆石的反射光、透射光和阴极发光显微照相在北京离子探针中心实验室完成, SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 分析在北京离子探针中心 SHRIMP-II 上完成, 详细分析流程及原理见宋彪等(2002)。锆石 O 同位素分析在北京离子探针中心多接收二次离子质谱(SHRIMP II e-MC)上完成。在对锆石进行氧同位素测试之前, 对已进行过年龄测试的靶进行抛光和镀金等处理。锆石氧同位素原位测试分析点与 SHRIMP U-Pb 年龄测试点位置相同, 以保证测得的氧同位素值与年龄值对应。详细的分析流程介绍见 Ickert 等(2008)和董春艳等(2016)。

#### 3.3 Lu-Hf 同位素测定

锆石 Lu-Hf 同位素测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。关于实验仪器和实验过程的详细介绍见侯可军等(2007)和 Wu 等(2006)。实验过程中的激光束斑直径为 55  $\mu\text{m}$ 。为消除<sup>176</sup>Lu 和<sup>176</sup>Yb 对<sup>176</sup>Hf 测定的干扰, 实验预设<sup>176</sup>Lu/<sup>175</sup>Lu = 0.026 58 以及<sup>176</sup>Yb/<sup>173</sup>Yb = 0.796 218。此外, 为了校正仪器导致的测试偏差, 根据实验规程, Yb 同位素比值依照<sup>172</sup>Yb/<sup>173</sup>Yb = 1.352 74 进行校准。标准锆石 GJ-1 (Morel *et al.*, 2008)被选用为实验的标样, 得到 GJ-1 的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值为 0.282 013  $\pm$  0.000 08 (2 $\sigma$ ,  $n$  = 18)。该结果与 Elhlou 等(2006)实验所测得的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值(0.282 013  $\pm$  0.000 019, 2 $\sigma$ )在误差范围内基本一致。

在进行锆石 Lu-Hf 同位素成分计算时,<sup>176</sup>Lu 的衰变常数采用 1.865  $\times 10^{-11}/a$  (Scherer *et al.*, 2001),  $\epsilon\text{Hf}(t)$  值的计算采用 Bouvier 等(2008)推荐的球粒陨石 Hf 同位素值: <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf = 0.033 2, <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf = 0.282 772。Hf 模式年龄采用现代亏损地幔的 (<sup>176</sup>Hf /<sup>177</sup>Hf)<sub>DM</sub> 值 0.283 25 和 (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf)<sub>DM</sub> 值 0.038 4 (Griffin *et al.*, 2000)、平均地壳的 (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf)<sub>C</sub> 值 0.012 5 (Chauvel *et al.*, 2014) 进行计算。

#### 3.4 全岩主量元素和微量元素含量分析

样品的全岩主量、微量元素地球化学分析测试在加拿大 ACME 实验室完成。详细的样品处理和分析方法为: 准确称取 0.20 g 粉末样品, 将其与 1.50 g LiBO<sub>2</sub> 助熔剂放置于石墨坩埚内进行充分混合。将

样品、助熔剂的混合物于马弗炉上在 1 050℃ 的温度下加热 15 min。提取熔融后的混合物,倒入 100 mL 由去离子水和 ACS 级纯度硝酸配置的 5% 浓度的  $\text{HNO}_3$  中。摇晃溶液 2 h 使其充分溶解,取其一部分置入聚丙烯分析管内。将标定标样、检验标样和本底空白样加入样品序列。通过电感耦合等离子光谱分析(ICP-AES)进行主要氧化物和 Ba、Sc、Cu、Zn 和 Ni 含量的分析。在 ICP-MS 上进行其它微量元素以及稀土元素含量的分析。对于贵金属的分析,另外单独选取 0.50 g 样品,置于 3 mL 高温的(95℃)王水中进行溶解,通过 ICP-MS 进行贵金属分析。主要氧化物、微量元素和稀土元素的检测限分别为 0.01% ~ 0.1%、 $0.1 \times 10^{-6}$  ~  $10 \times 10^{-6}$  和  $0.01 \times 10^{-6}$  ~  $0.5 \times 10^{-6}$ 。详细的分析方法与 ACME 中 LF202 组的流程相同,所有分析偏差均优于  $\pm 3\%$ 。

### 3.5 矿物电子探针实验室分析

矿物电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成。仪器型号为 JXA-8230,加速电压为 15

kV,工作电流为 20 nA,束斑直径统一为 5  $\mu\text{m}$ ,用天然矿物样品和 PAP 校正处理程序进行仪器标定和数据校正。

## 4 实验结果

### 4.1 锆石 U-Pb 测年结果

绿石沟岩体中闪长玢岩样品 H7-6-26-1.1 的锆石晶型完好,多呈短柱状或长柱状,锆石颗粒的长轴多在 90 ~ 290  $\mu\text{m}$  之间,长宽比变化范围为 1:1 ~ 4:1。CL 图像上显示所有的锆石边部都发育岩浆震荡环带(图 4),表明它们都是岩浆成因锆石。在分析结果中(表 1),基本上锆石的 Th/U 值均大于 0.4,也说明了锆石的岩浆成因。样品 H7-6-26-1.1 中的 28 颗锆石的测试数据点都落在锆石 U-Pb 年龄谐和曲线上,它们的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄位于 350 ~ 340 Ma 之间(图 5a),28 个点年龄的加权平均值为  $346 \pm 1$  Ma (MSWD = 1.4),代表了闪长玢岩侵位年龄。

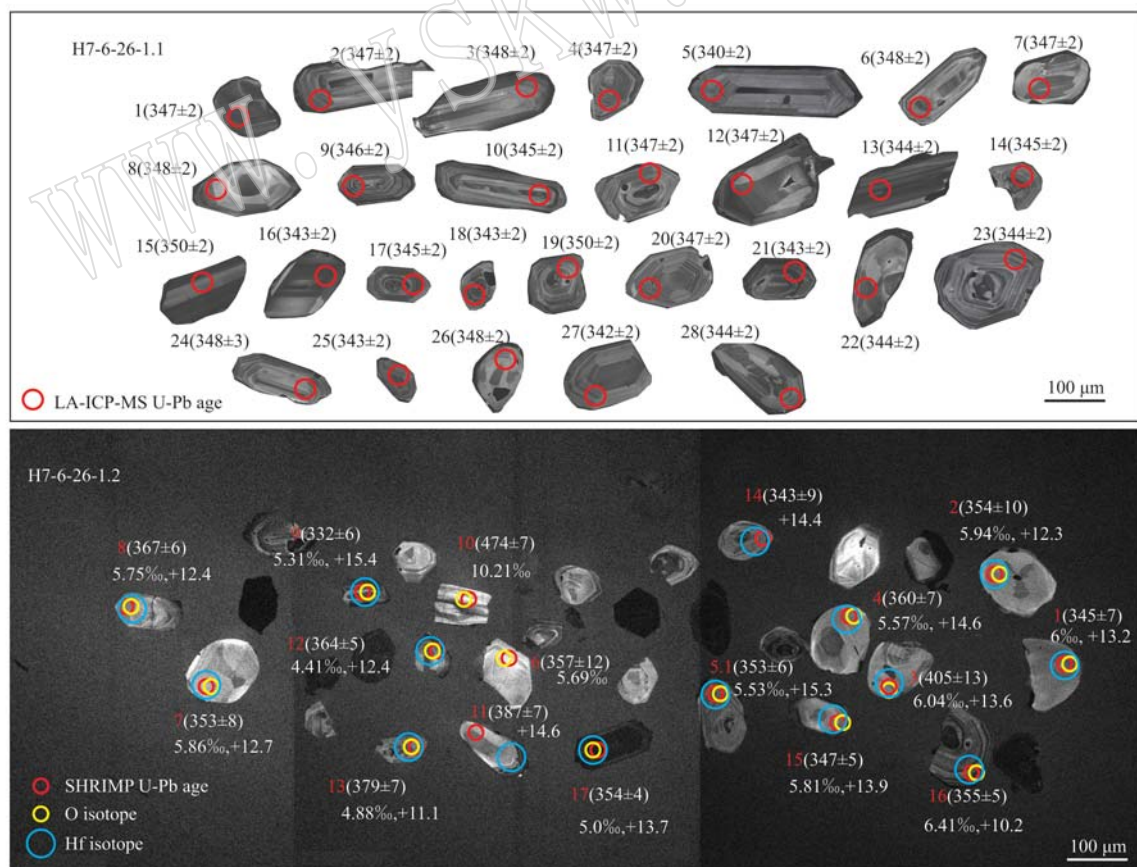


图 4 绿石沟岩体中基性岩墙样品锆石 CL 图及各测试点的相关数据

Fig. 4 CL images for zircon grains from the studied dykes of Lushigou pluton, showing the age dating and Hf-O isotopic analysis spots, and their age, O isotope and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values

表 1 绿石沟岩体闪长玢岩墙的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic results for diorite-porphyrityte dyke from the Lüshigou pluton

| 样品号         | $w_B/10^{-6}$ |     |     | Th/U | 同位素比值                            |            |                                  |            | 年龄/Ma                             |            |                                  |            |                                  |            |                                   |            |
|-------------|---------------|-----|-----|------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
|             | Pb            | Th  | U   |      | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ |
| H7-6-26-1.1 | 20            | 196 | 329 | 0.60 | 0.055 4                          | 0.000 3    | 0.417 0                          | 0.006 9    | 0.054 6                           | 0.000 9    | 347                              | 2          | 354                              | 6          | 397                               | 36         |
| 1           | 15            | 100 | 258 | 0.39 | 0.055 4                          | 0.000 3    | 0.416 7                          | 0.009 1    | 0.054 6                           | 0.001 2    | 347                              | 2          | 354                              | 8          | 395                               | 48         |
| 2           | 9             | 54  | 158 | 0.34 | 0.055 4                          | 0.000 3    | 0.410 6                          | 0.015 6    | 0.053 7                           | 0.002 0    | 348                              | 2          | 349                              | 13         | 361                               | 85         |
| 3           | 13            | 104 | 232 | 0.45 | 0.055 3                          | 0.000 3    | 0.414 1                          | 0.009 5    | 0.054 4                           | 0.001 2    | 347                              | 2          | 352                              | 8          | 386                               | 50         |
| 4           | 12            | 73  | 209 | 0.35 | 0.054 2                          | 0.000 3    | 0.405 6                          | 0.007 1    | 0.054 3                           | 0.001 0    | 340                              | 2          | 346                              | 6          | 384                               | 40         |
| 5           | 12            | 81  | 205 | 0.40 | 0.055 5                          | 0.000 3    | 0.419 6                          | 0.010 0    | 0.054 8                           | 0.001 3    | 348                              | 2          | 356                              | 8          | 404                               | 53         |
| 6           | 12            | 8   | 134 | 0.58 | 0.055 3                          | 0.000 3    | 0.410 8                          | 0.014 9    | 0.0539                            | 0.001 9    | 347                              | 2          | 349                              | 13         | 365                               | 81         |
| 7           | 7             | 50  | 127 | 0.39 | 0.055 5                          | 0.000 4    | 0.416 1                          | 0.016 7    | 0.054 4                           | 0.002 2    | 348                              | 2          | 353                              | 14         | 388                               | 89         |
| 8           | 21            | 209 | 340 | 0.61 | 0.055 1                          | 0.000 3    | 0.410 5                          | 0.006 7    | 0.054 0                           | 0.000 9    | 346                              | 2          | 349                              | 6          | 371                               | 36         |
| 9           | 11            | 97  | 178 | 0.54 | 0.055 0                          | 0.000 3    | 0.411 1                          | 0.011 0    | 0.054 2                           | 0.001 4    | 345                              | 2          | 350                              | 9          | 378                               | 59         |
| 10          | 10            | 92  | 161 | 0.57 | 0.055 3                          | 0.000 3    | 0.409 3                          | 0.012 1    | 0.053 6                           | 0.001 6    | 347                              | 2          | 348                              | 10         | 356                               | 66         |
| 11          | 8             | 72  | 141 | 0.51 | 0.055 3                          | 0.000 3    | 0.409 0                          | 0.013 7    | 0.053 6                           | 0.001 8    | 347                              | 2          | 348                              | 12         | 355                               | 75         |
| 12          | 18            | 214 | 289 | 0.74 | 0.054 8                          | 0.000 3    | 0.411 3                          | 0.007 4    | 0.054 5                           | 0.001 0    | 344                              | 2          | 350                              | 6          | 391                               | 40         |
| 13          | 16            | 151 | 277 | 0.55 | 0.055 0                          | 0.000 3    | 0.414 6                          | 0.009 3    | 0.054 7                           | 0.001 2    | 345                              | 2          | 352                              | 8          | 399                               | 50         |
| 14          | 20            | 113 | 359 | 0.31 | 0.055 8                          | 0.000 3    | 0.412 6                          | 0.007 6    | 0.053 6                           | 0.001 0    | 350                              | 2          | 351                              | 6          | 356                               | 41         |
| 15          | 17            | 223 | 272 | 0.82 | 0.054 7                          | 0.000 3    | 0.405 6                          | 0.008 7    | 0.053 8                           | 0.001 2    | 343                              | 2          | 346                              | 7          | 362                               | 48         |
| 16          | 13            | 122 | 223 | 0.55 | 0.054 9                          | 0.000 3    | 0.416 9                          | 0.011 0    | 0.055 1                           | 0.001 5    | 345                              | 2          | 354                              | 9          | 415                               | 59         |
| 17          | 14            | 17  | 275 | 0.06 | 0.054 7                          | 0.000 3    | 0.412 1                          | 0.007 2    | 0.054 7                           | 0.000 9    | 343                              | 2          | 350                              | 6          | 399                               | 39         |
| 18          | 8             | 54  | 134 | 0.40 | 0.055 9                          | 0.000 4    | 0.415 6                          | 0.016 5    | 0.053 9                           | 0.002 1    | 350                              | 2          | 353                              | 14         | 369                               | 89         |
| 19          | 9             | 64  | 165 | 0.39 | 0.055 3                          | 0.000 3    | 0.405 5                          | 0.012 6    | 0.053 2                           | 0.001 6    | 347                              | 2          | 346                              | 11         | 339                               | 70         |
| 20          | 21            | 196 | 352 | 0.56 | 0.054 6                          | 0.000 3    | 0.411 0                          | 0.007 1    | 0.054 6                           | 0.000 9    | 343                              | 2          | 350                              | 6          | 396                               | 38         |
| 21          | 9             | 84  | 144 | 0.58 | 0.054 8                          | 0.000 4    | 0.407 7                          | 0.022 2    | 0.053 9                           | 0.002 7    | 344                              | 2          | 347                              | 19         | 368                               | 111        |
| 22          | 7             | 44  | 122 | 0.36 | 0.054 7                          | 0.000 3    | 0.406 2                          | 0.019 4    | 0.053 8                           | 0.002 5    | 344                              | 2          | 346                              | 17         | 364                               | 106        |
| 23          | 6             | 44  | 117 | 0.38 | 0.055 5                          | 0.000 4    | 0.413 1                          | 0.020 8    | 0.054 0                           | 0.002 7    | 348                              | 3          | 351                              | 18         | 370                               | 113        |
| 24          | 12            | 101 | 203 | 0.50 | 0.054 6                          | 0.000 3    | 0.402 5                          | 0.010 4    | 0.053 5                           | 0.001 4    | 343                              | 2          | 343                              | 9          | 349                               | 59         |
| 25          | 5             | 40  | 80  | 0.50 | 0.055 4                          | 0.000 4    | 0.410 3                          | 0.023 6    | 0.053 7                           | 0.003 1    | 348                              | 2          | 349                              | 20         | 359                               | 129        |
| 26          | 10            | 67  | 184 | 0.36 | 0.054 6                          | 0.000 3    | 0.406 5                          | 0.012 3    | 0.054 0                           | 0.001 7    | 342                              | 2          | 346                              | 11         | 373                               | 69         |
| 27          | 10            | 78  | 177 | 0.44 | 0.054 9                          | 0.000 3    | 0.408 5                          | 0.009 9    | 0.054 0                           | 0.001 3    | 344                              | 2          | 348                              | 8          | 370                               | 54         |

样品 H7-6-26-1.2 的锆石 SHRIMP 年龄和氧同位素结果见表 2。辉绿玢岩样品 H7-6-26-1.2 的锆石晶型基本都很完整, 锆石颗粒较小, 多为约 80 ~ 160  $\mu\text{m}$ 。CL 图像上, 大部分锆石发育发光强弱不同的晶域, 其中发光弱的晶域显示出较明显的环状或带状韵律环带结构, 而发光较强的晶域则无明显环带, 并以不规则“补丁”状出现(图 4), 与基性岩浆岩锆石特征相符(吴元保等, 2004)。对辉绿玢岩样品 H7-6-26-1.2 中测试的 17 颗锆石进行了 SHRIMP 定

年, 除了 1 颗锆石(测试点 14.1, 不谐和度远大于 10%, 有强烈铅丢失)之外, 所有测试点数据基本都得到了谐和的年龄投点(图 5b)。Th/U 值为 0.41 ~ 1.08, 具有岩浆锆石的 Th/U 值特征。有 4 颗年龄稍老,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分别为 474、405、387 和 379 Ma(图 4、图 5b), 可能为捕获锆石; 有 1 颗锆石相对年轻,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 332 Ma(图 5b)。其他 11 颗粒锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄的加权平均值为  $355 \pm 5$  Ma (MSWD = 1.3)。

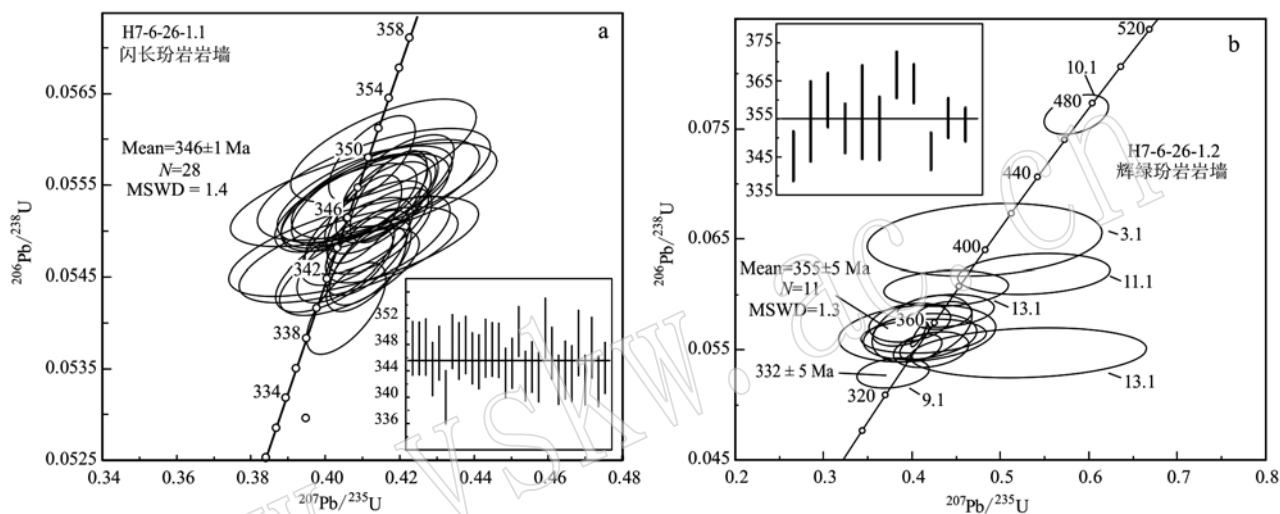


图 5 绿石沟岩体中闪长玢岩锆石的 LA-ICP-MS (a) 和辉绿玢岩锆石的 SHRIMP (b) 年龄谐和图

Fig. 5 Diagrams of U-Pb concordia of LA-ICP-MS (a) and SHRIMP (b) for zircon grains of the studied dykes in the Lushigou pluton

## 4.2 锆石 O 同位素

辉绿玢岩样品(H7-6-26-1.2)锆石氧同位素分析结果和相关信息总结见表 2 和图 4、图 6。

该样品绝大多数锆石获得的 O 同位素结果都可代表其原有本身的氧同位素组成(测试点 10 除外, 有明显铅丢失)。辉绿玢岩样品的锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为 4.41‰ ~ 10.21‰。其中, 年龄为 474、405 和 355 Ma 的 3 颗锆石具有较明显的壳源锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值, 分别为 10.21‰、6.04‰ 和 6.41‰。其它锆石的氧同位素组成与地幔结晶出来的岩浆锆石类似或  $\delta^{18}\text{O}$  值稍高一些(图 6a), 表明它们是从熔融母岩受外生作用影响不大的岩浆中结晶出来的。

## 4.3 锆石 Lu-Hf 同位素

辉绿岩样品 H7-6-26-1.2 中这些锆石颗粒的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值分别分布在 0.000 602 到 0.003 834 之间(表 3), 说明放射性成因的 Hf 含量很低。它们的锆石  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值分布范围为 0.282 853 至

0.283 021, 相应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 +10.2 至 +15.4 (按  $t$  = 各测试点年龄计算), 相应的一阶段 Hf 同位素模式年龄为 0.35 ~ 0.58 Ga, 二阶段 Hf 模式年龄为 0.35 ~ 0.67 Ga(图 6c),  $f_{\text{Lu/Hf}}$  平均值为 -0.95。

## 4.4 全岩地球化学特征

闪长玢岩和辉绿玢岩岩墙样品的主量、微量及稀土元素分析测试结果见表 4。绿石沟岩体闪长玢岩岩墙的  $\text{SiO}_2$  元素含量较高(58.06%), 全碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )含量为 5.95%, MgO 含量为 5.04%, 为高钾钙碱性, 准铝质系列岩石, 在 TAS 图解上落在闪长岩区域(图 7)。总体而言, 闪长玢岩脉在原始地幔标准化蛛网图解中相对富集大离子亲石元素包括 K、Rb、Ba、Sr 等, 亏损高场强元素如 Nb、Ti 等的特征。Sr、Ba 含量高, 分别为  $579.5 \times 10^{-6}$  和  $791 \times 10^{-6}$ 。稀土元素球粒陨石标准化图解(图 8)中, 该样品轻重稀土元素分馏较明显, 为右倾型, 并具有较明显的 Eu 的负异常。结合 Sr 的正异常特征, 指示闪长玢岩

表 2 绿石沟岩体辉绿玢岩墙的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和锆石 O 同位素结果  
Table 2 Zircon SHRIMP U-Pb and O-isotopic results for diabase porphyrite from the Lishigou pluton

| 样品号         | $w(^{206}\text{Pb}_c)$ |       | $w_B/10^{-6}$       |                                  | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$      |         | $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ |         | $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ |     | 误差相<br>关系数 |  | 同位素年龄/Ma                         |                                  | 不谐和<br>度/% | $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ |
|-------------|------------------------|-------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|------------------------------------|-----|------------|--|----------------------------------|----------------------------------|------------|--------------------------------|
|             | U                      | Th    | $^{206}\text{Pb}^*$ | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ | $\pm\%$ | $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$    | $\pm\%$ | $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ | %   |            |  | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ |            |                                |
| H7-6-26-1.2 |                        |       |                     |                                  |                                       |         |                                       |         |                                    |     |            |  |                                  |                                  |            |                                |
| 1           | 1.13                   | 45    | 5.35                | 0.41                             | 0.055 4                               | 6.4     | 0.421                                 | 6.7     | 0.055 0                            | 1.9 | 0.29       |  | 345 ± 6.5                        | 430 ± 140                        | 20         | 6.00 ± 0.00                    |
| 2           | 1.40                   | 33    | 3.26                | 0.51                             | 0.052 2                               | 14.0    | 0.407                                 | 14.0    | 0.056 5                            | 3.0 | 0.21       |  | 354 ± 10.0                       | 296 ± 320                        | -20        | 5.94 ± 0.14                    |
| 3           | 2.15                   | 36    | 4.51                | 0.48                             | 0.053 9                               | 18.0    | 0.482                                 | 18.0    | 0.064 9                            | 3.3 | 0.18       |  | 405 ± 13.0                       | 367 ± 400                        | -10        | 6.04 ± 0.21                    |
| 4           | 1.03                   | 37    | 3.81                | 0.50                             | 0.050 2                               | 7.4     | 0.397                                 | 7.6     | 0.057 4                            | 2.0 | 0.26       |  | 360 ± 7.1                        | 203 ± 170                        | -77        | 5.57 ± 0.26                    |
| 5           | 0.63                   | 56    | 5.89                | 0.48                             | 0.053 3                               | 11.0    | 0.413                                 | 11.0    | 0.056 2                            | 1.9 | 0.17       |  | 353 ± 6.4                        | 341 ± 250                        | -3         | 5.53 ± 0.18                    |
| 6           | 1.41                   | 29    | 3.61                | 0.41                             | 0.052 3                               | 8.4     | 0.410                                 | 9.1     | 0.056 9                            | 3.5 | 0.39       |  | 357 ± 12.0                       | 300 ± 190                        | -19        | 5.69 ± 0.20                    |
| 7           | 1.11                   | 39    | 5.00                | 0.39                             | 0.052 9                               | 10.0    | 0.410                                 | 10.0    | 0.056 2                            | 2.4 | 0.23       |  | 353 ± 8.3                        | 326 ± 230                        | -8         | 5.86 ± 0.22                    |
| 8           | 0.17                   | 70    | 8.23                | 0.44                             | 0.054 2                               | 8.1     | 0.437                                 | 8.3     | 0.058 5                            | 1.7 | 0.2        |  | 367 ± 6.0                        | 378 ± 180                        | 3          | 5.75 ± 0.18                    |
| 9           | 1.03                   | 186   | 14.40               | 0.61                             | 0.052 0                               | 6.8     | 0.379                                 | 7.0     | 0.052 9                            | 1.7 | 0.24       |  | 332 ± 5.5                        | 287 ± 160                        | -16        | 5.31 ± 0.24                    |
| 10          | 0.54                   | 262   | 136                 | 0.54                             | 0.055 6                               | 3.8     | 0.584                                 | 4.1     | 0.076 2                            | 1.5 | 0.38       |  | 474 ± 7.0                        | 436 ± 84                         | -9         | 10.21 ± 0.20                   |
| 11          | 1.91                   | 121   | 53                  | 0.45                             | 0.063 0                               | 10.0    | 0.537                                 | 11.0    | 0.061 8                            | 2.0 | 0.19       |  | 387 ± 7.4                        | 707 ± 220                        | 45         |                                |
| 12          | 0.24                   | 453   | 201                 | 0.46                             | 0.054 2                               | 4.8     | 0.434                                 | 5.0     | 0.058 1                            | 1.4 | 0.29       |  | 364 ± 5.1                        | 378 ± 110                        | 4          | 4.41 ± 0.12                    |
| 13          | 1.24                   | 159   | 74                  | 0.48                             | 0.052 5                               | 10.0    | 0.439                                 | 11.0    | 0.060 5                            | 1.8 | 0.17       |  | 379 ± 6.6                        | 309 ± 240                        | -22        | 4.88 ± 0.31                    |
| 14          | 3.81                   | 123   | 62                  | 0.52                             | 0.070 0                               | 16.0    | 0.531                                 | 17.0    | 0.054 7                            | 2.7 | 0.16       |  | 343 ± 9.2                        | 939 ± 340                        | 63         |                                |
| 15          | 0.26                   | 371   | 159                 | 0.44                             | 0.053 8                               | 3.5     | 0.410                                 | 3.8     | 0.055 2                            | 1.4 | 0.38       |  | 347 ± 4.9                        | 363 ± 80                         | 5          | 5.81 ± 0.12                    |
| 16          | 0.64                   | 273   | 109                 | 0.41                             | 0.049 8                               | 5.1     | 0.389                                 | 5.3     | 0.056 6                            | 1.5 | 0.28       |  | 355 ± 5.2                        | 186 ± 120                        | -91        | 6.41 ± 0.17                    |
| 17          | 0.15                   | 4 534 | 4 730               | 1.08                             | 0.052 4                               | 0.8     | 0.407                                 | 1.5     | 0.056 4                            | 1.3 | 0.85       |  | 354 ± 4.4                        | 302 ± 18                         | -17        | 5.00 ± 0.00                    |

注:  $\text{Pb}_c$  代表普通铅, \* 代表放射性  $\text{Pb}$ 。

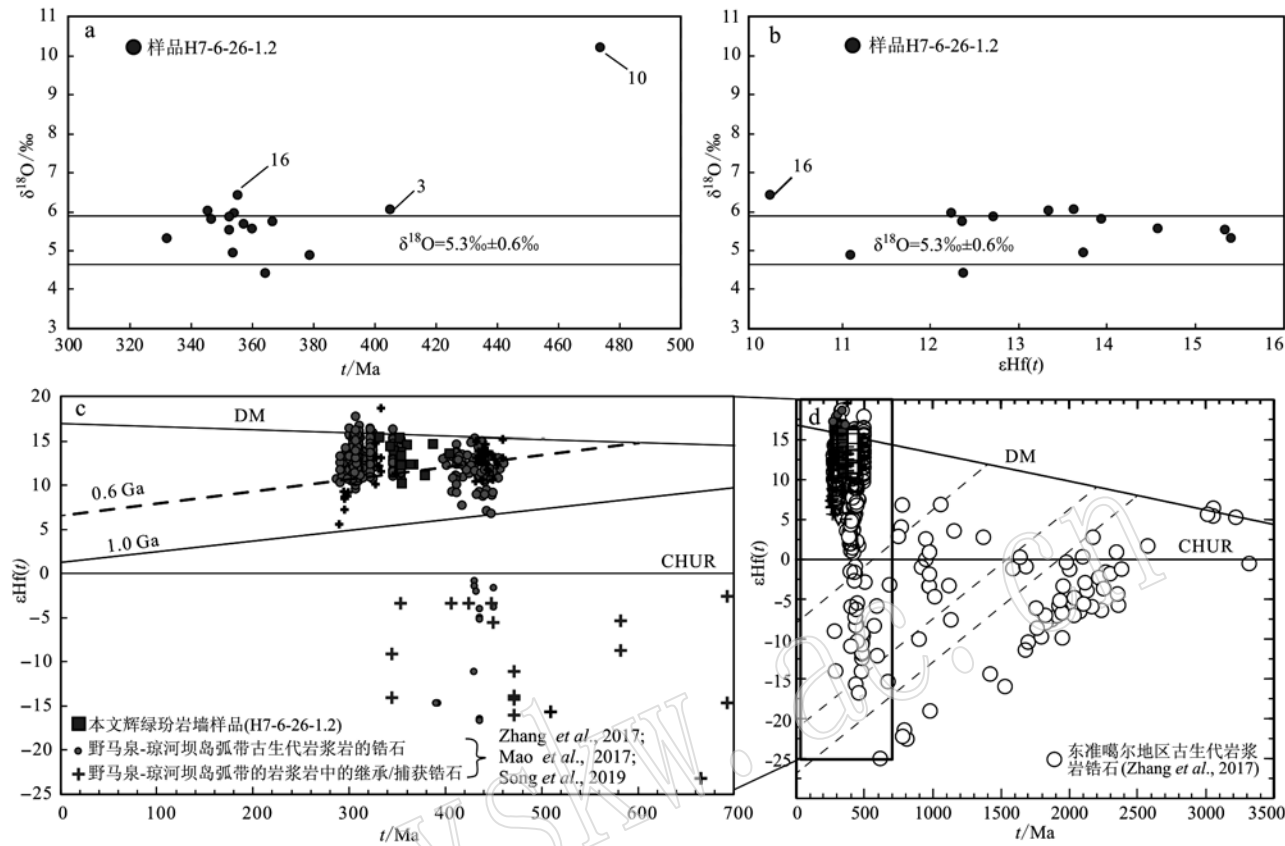


图6 绿石沟岩体辉绿玢岩岩墙样品(H7-6-26-1.2)的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ -年龄(a)、 $\delta^{18}\text{O}-\varepsilon\text{Hf}(t)$ (b)和 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ -年龄(c)变化图解  
Fig. 6  $\delta^{18}\text{O}-t$  (a),  $\delta^{18}\text{O}-\varepsilon\text{Hf}(t)$  (b), and  $\varepsilon\text{Hf}(t)-\text{age}$  diagram (c) of zircons from the studied zircon grains from the dyke (H7-6-26-1.2) within the Lüshigou pluton

地壳演化线据 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0125$  (Chauvel *et al.*, 2014) 计算而来; 地幔来源的锆石氧同位素值范围( $5.3\text{‰}\pm0.6\text{‰}$ , 2SD)根据 Valley (2003)

The crustal evolutionary trend is calculated with  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0125$  (Chauvel *et al.*, 2014); the mantle value is  $5.3\text{‰}\pm0.6\text{‰}$  (Valley, 2003)

表3 绿石沟岩体辉绿玢岩岩墙的锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of diabase porphyrite dyke from the Lüshigou pluton

| H7-6-26-1.2 | <i>t</i> / Ma | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | 2σ        | $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ | $\varepsilon\text{Hf}(0)$ | $\varepsilon\text{Hf}(t)$ | $t_{\text{DM1}}/\text{Ma}$ | $t_{\text{DM2}}/\text{Ma}$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ |
|-------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1           | 345           | 0.028 302                         | 0.000 656                         | 0.282 933                         | 0.000 023 | 0.282 929 09                          | 5.71                      | 13.15                     | 448                        | 494                        | -0.98              |
| 2           | 354           | 0.032 157                         | 0.000 749                         | 0.282 903                         | 0.000 021 | 0.282 897 94                          | 4.63                      | 12.25                     | 492                        | 554                        | -0.98              |
| 3           | 405           | 0.025 309                         | 0.000 602                         | 0.282 910                         | 0.000 023 | 0.282 904 99                          | 4.86                      | 13.63                     | 480                        | 515                        | -0.98              |
| 4           | 360           | 0.031 746                         | 0.000 762                         | 0.282 965                         | 0.000 023 | 0.282 960 08                          | 6.83                      | 14.58                     | 404                        | 424                        | -0.98              |
| 5           | 353           | 0.035 131                         | 0.000 847                         | 0.282 991                         | 0.000 025 | 0.282 985 79                          | 7.76                      | 15.34                     | 368                        | 374                        | -0.97              |
| 7           | 353           | 0.037 705                         | 0.000 911                         | 0.282 918                         | 0.000 023 | 0.282 911 80                          | 5.16                      | 12.72                     | 473                        | 526                        | -0.97              |
| 8           | 367           | 0.036 061                         | 0.000 983                         | 0.282 900                         | 0.000 020 | 0.282 892 96                          | 4.52                      | 12.36                     | 499                        | 558                        | -0.97              |
| 9           | 332           | 0.102 035                         | 0.003 212                         | 0.283 021                         | 0.000 026 | 0.283 001 10                          | 8.81                      | 15.41                     | 347                        | 353                        | -0.90              |
| 11          | 387           | 0.057 399                         | 0.001 447                         | 0.282 955                         | 0.000 023 | 0.282 944 66                          | 6.48                      | 14.63                     | 426                        | 442                        | -0.96              |
| 12          | 364           | 0.115 118                         | 0.003 834                         | 0.282 921                         | 0.000 026 | 0.282 895 27                          | 5.28                      | 12.37                     | 507                        | 555                        | -0.88              |
| 13          | 379           | 0.075 179                         | 0.002 495                         | 0.282 868                         | 0.000 030 | 0.282 849 85                          | 3.38                      | 11.10                     | 568                        | 640                        | -0.92              |
| 14          | 343           | 0.042 476                         | 0.001 074                         | 0.282 972                         | 0.000 024 | 0.282 965 23                          | 7.08                      | 14.39                     | 397                        | 421                        | -0.97              |
| 15          | 347           | 0.064 473                         | 0.002 000                         | 0.282 963                         | 0.000 021 | 0.282 950 0                           | 6.75                      | 13.94                     | 421                        | 451                        | -0.94              |
| 16          | 355           | 0.083 881                         | 0.002 013                         | 0.282 853                         | 0.000 027 | 0.282 839 22                          | 2.85                      | 10.19                     | 582                        | 674                        | -0.94              |
| 17          | 354           | 0.134 615                         | 0.003 505                         | 0.282 963                         | 0.000 025 | 0.282 939 95                          | 6.76                      | 13.73                     | 438                        | 468                        | -0.89              |

表4 绿石沟岩体岩墙样品主量元素( $w_B/\%$ )与微量元素( $w_B/10^{-6}$ )含量Table 4 Major ( $w_B/\%$ ) and trace elements ( $w_B/10^{-6}$ ) composition of dykes from Lùshigou pluton

| 样品                             | H7-6-26-1.1 | H7-6-26-1.2 | H7-5-11-7.1 | H7-5-14-4.2 | H7-5-14-4.3 | H7-6-19-13.1 | H7-6-27-11.1 |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 纬度                             | 44°3'9.0"   | 44°3'38.3"  | 44°5'3.64"  | 44°3'55.10" | 44°3'55.11" | 44°4'43.7"   | 44°3'1.7"    |
| 经度                             | 95°3'20.9"  | 95°2'34.5"  | 95°3'45.16" | 95°2'7"     | 95°2'8"     | 95°5'32.2"   | 95°3'9.32"   |
| 岩性                             | 闪长玢岩        | 辉绿玢岩        | 辉绿玢岩        | 辉绿玢岩        | 辉绿玢岩        | 辉绿玢岩         | 辉绿玢岩         |
| 岩墙走向                           | 85°         | 9°          | 340°        | 15°         | 15°         | 10°          | 110°         |
| SiO <sub>2</sub>               | 58.06       | 50.35       | 48.59       | 46.34       | 47.63       | 48.04        | 49.46        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.59        | 0.73        | 0.79        | 0.86        | 0.82        | 0.86         | 0.92         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.54       | 18.20       | 19.02       | 18.92       | 17.91       | 16.19        | 17.13        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.77        | 8.71        | 10.11       | 11.52       | 11.03       | 11.88        | 10.36        |
| MgO                            | 5.04        | 3.95        | 5.17        | 6.02        | 5.84        | 6.15         | 5.28         |
| MnO                            | 0.14        | 0.16        | 0.18        | 0.20        | 0.20        | 0.22         | 0.18         |
| CaO                            | 5.28        | 8.89        | 8.86        | 9.26        | 9.11        | 8.23         | 8.70         |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.20        | 3.23        | 2.28        | 2.64        | 2.99        | 2.50         | 3.13         |
| K <sub>2</sub> O               | 2.75        | 1.19        | 1.13        | 0.81        | 0.92        | 2.32         | 1.38         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.13        | 0.16        | 0.22        | 0.14        | 0.13        | 0.29         | 0.28         |
| Loi                            | 2.20        | 4.20        | 3.40        | 3.00        | 3.10        | 3.00         | 2.90         |
| total                          | 99.73       | 99.77       | 99.70       | 99.70       | 99.68       | 99.65        | 99.74        |
| Sc                             | 18          | 21          | 31          | 39          | 37          | 35           | 31           |
| V                              | 152         | 253         | 293         | 393         | 413         | 366          | 277          |
| Co                             | 19.2        | 21.4        | 31.6        | 34.4        | 34          | 37.2         | 29.3         |
| Ni                             | 64.7        | 8.9         | 21.3        | 13.6        | 12.6        | 20.3         | 12.6         |
| Cu                             | 92.3        | 136.6       | 150.6       | 167.9       | 155.9       | 92.9         | 123.0        |
| Zn                             | 91          | 65          | 55          | 72          | 78          | 71           | 70           |
| Ga                             | 12.6        | 15.9        | 17.9        | 18.6        | 17.6        | 16.8         | 16.1         |
| Rb                             | 64.8        | 20.2        | 16.4        | 19.8        | 19.8        | 26.6         | 24.1         |
| Sr                             | 579.5       | 528.3       | 726.9       | 576.1       | 725.0       | 803.9        | 727.9        |
| Y                              | 17.2        | 14.3        | 15.7        | 16.4        | 16.7        | 17.0         | 19.0         |
| Zr                             | 87.7        | 42.7        | 37.8        | 28.7        | 29.8        | 43.6         | 57.6         |
| Nb                             | 2.3         | 2.8         | 1.2         | 0.7         | 0.9         | 2.1          | 1.9          |
| Cs                             | 0.8         | 0.6         | 0.4         | 0.7         | 0.8         | 0.4          | 0.4          |
| Ba                             | 791         | 316         | 396         | 295         | 355         | 677          | 493          |
| La                             | 12.1        | 7.5         | 7.3         | 5.7         | 5.6         | 6.6          | 12.2         |
| Ce                             | 24.2        | 14.4        | 16.5        | 12.2        | 12.1        | 14           | 26.1         |
| Pr                             | 3.13        | 2.09        | 2.32        | 1.76        | 1.75        | 1.88         | 3.50         |
| Nd                             | 13.7        | 9.1         | 12.1        | 10.7        | 8.6         | 9.6          | 16.0         |
| Sm                             | 3.10        | 2.47        | 2.84        | 2.38        | 2.09        | 2.38         | 3.90         |
| Eu                             | 0.87        | 0.80        | 1.01        | 0.94        | 0.90        | 0.84         | 1.35         |
| Gd                             | 3.13        | 2.65        | 2.91        | 2.83        | 2.75        | 2.86         | 4.05         |
| Tb                             | 0.4         | 0.43        | 0.46        | 0.45        | 0.46        | 0.51         | 0.53         |
| Dy                             | 3.05        | 2.69        | 3.05        | 2.80        | 2.96        | 3.04         | 3.80         |
| Ho                             | 0.49        | 0.52        | 0.62        | 0.63        | 0.6         | 0.68         | 0.63         |
| Er                             | 1.51        | 1.62        | 1.80        | 1.71        | 1.83        | 1.85         | 1.59         |
| Tm                             | 0.24        | 0.23        | 0.25        | 0.26        | 0.25        | 0.27         | 0.25         |
| Yb                             | 1.43        | 1.68        | 1.59        | 1.75        | 1.87        | 1.80         | 1.51         |
| Lu                             | 0.25        | 0.24        | 0.26        | 0.27        | 0.23        | 0.25         | 0.24         |
| Hf                             | 2.8         | 1.3         | 1.3         | 1.0         | 0.8         | 1.5          | 1.8          |
| Ta                             | <0.1        | <0.1        | <0.1        | 0.1         | 0.2         | 0.2          | 0.1          |
| Pb                             | 56.6        | 1.6         | 1.3         | 0.5         | 4.2         | 1.0          | 1.0          |
| Th                             | 3.9         | 1.0         | 1.1         | 0.5         | 0.4         | 0.6          | 1.7          |
| U                              | 1.5         | 0.6         | 0.4         | 0.3         | 0.6         | 0.3          | 0.5          |
| $t_{Zr}/^{\circ}\text{C}$      | 687         | 610         | 612         | 581         | 577         | 591          | 615          |

注:  $t_{Zr}$  为计算的全岩锆饱和温度结果。

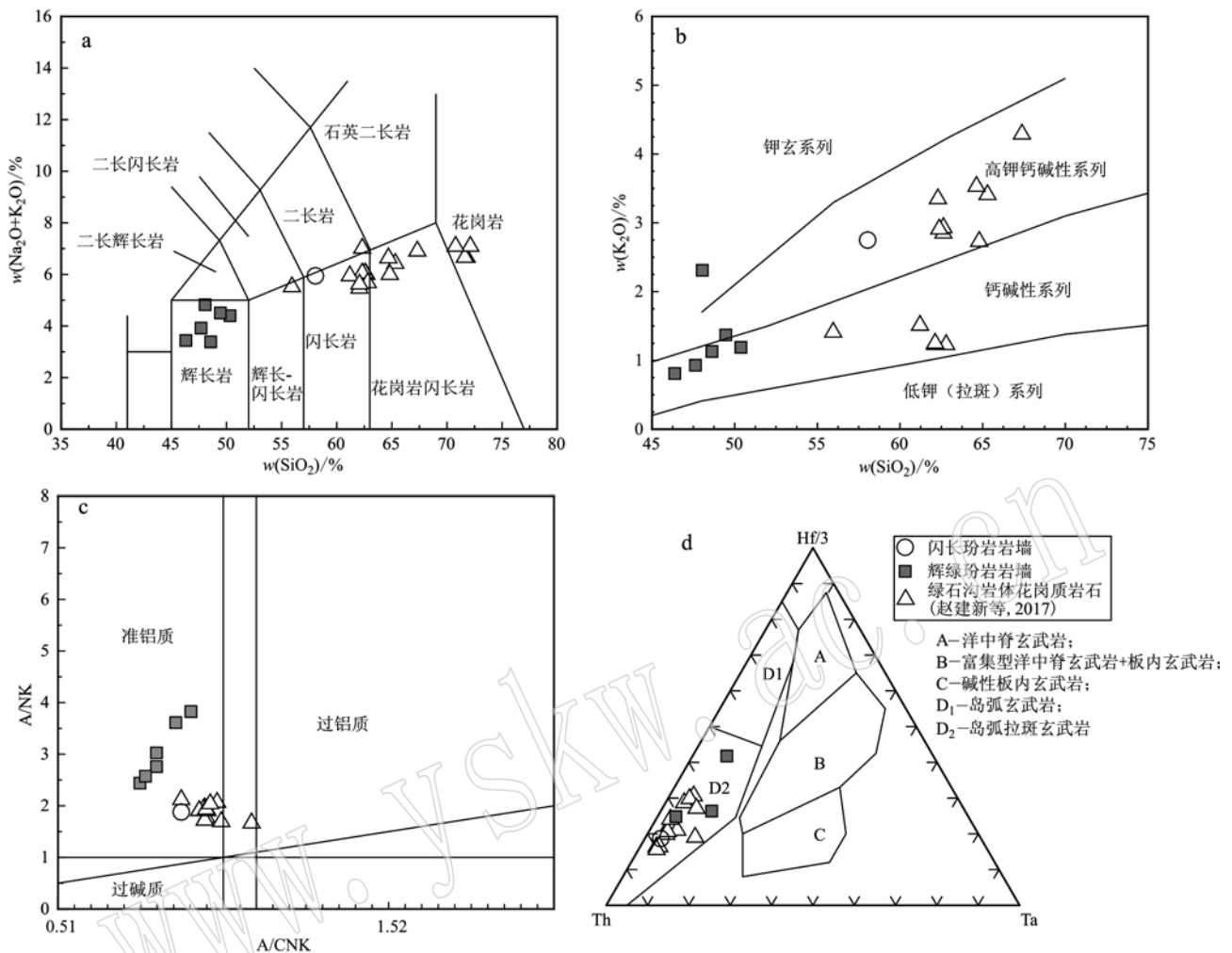


图7 绿石沟岩体岩墙主量和部分微量元素特征图解  
Fig. 7 Major and trace elements characteristics of dykes in the Lüshigou pluton

在形成过程中有斜长石的结晶作用。

辉绿玢岩的  $\text{SiO}_2$  元素含量为 46.34% ~ 50.35%, 全碱 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) 含量为 3.41% ~ 4.82%, 在  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  上大多数样品为钙碱性系列 (图7), 仅其中一个辉绿玢岩样品 (H7-6-19-13.1) 落在钾玄系列范围。在原始地幔标准化蛛网图解中相对富集大离子亲石元素包括 K、Rb、Ba、Sr 等, 亏损高场强元素如 Nb、Ti 等的特征。Sr/Y 值为 35.1 ~ 47.3, Sr 的含量高  $528.3 \times 10^{-6} \sim 803.9 \times 10^{-6}$ , Ni 含量  $8.9 \times 10^{-6} \sim 21.3 \times 10^{-6}$ , Cu 含量高为  $92.9 \times 10^{-6} \sim 167.9 \times 10^{-6}$ 。样品的稀土元素总量较高, 在稀土元素标准化图解上为右倾型曲线, 轻重稀土元素分馏不明显, 无明显的 Eu 异常 (图7)。

#### 4.5 辉绿玢岩岩墙的矿物化学特征

##### 4.5.1 斜长石

对辉绿玢岩岩墙中斑晶的斜长石进行了电子探

针测试, 斜长石的电子探针测试结果见表5。斜长石的  $\text{SiO}_2$  含量为 57.98% ~ 67.06%,  $\text{A}_2\text{O}_3$  含量为 22.14% ~ 23.72%, CaO 含量 2.10% ~ 5.84%。An 值变化范围为 11.01 ~ 32.42, 主要为更长石和中长石 (图9a)。

##### 4.5.2 角闪石

辉绿玢岩岩墙的角闪石电子探针数据结果列于表6。所测角闪石的成分含量比较稳定,  $\text{SiO}_2$  含量为 49.04% ~ 54.45%,  $\text{A}_2\text{O}_3$  含量为 2.84% ~ 27.54%。在角闪石成分分类图解中, 所有的角闪石都属于钙族角闪石亚族,  $(\text{Ca} + \text{Na})_{\text{B}}$  变化于 1.32 ~ 3.31 之间,  $\text{Ca}_{\text{B}} > 1.5$ ,  $\text{Na}_{\text{B}}$  介于 0.06 ~ 1.51 之间, 表明角闪石均属于钙质角闪石 (Leake *et al.*, 1997), 落在铁浅闪石和浅闪石区域 (图9b)。

##### 4.5.3 辉石

辉石电子探针数据被列于表7。辉绿玢岩岩墙

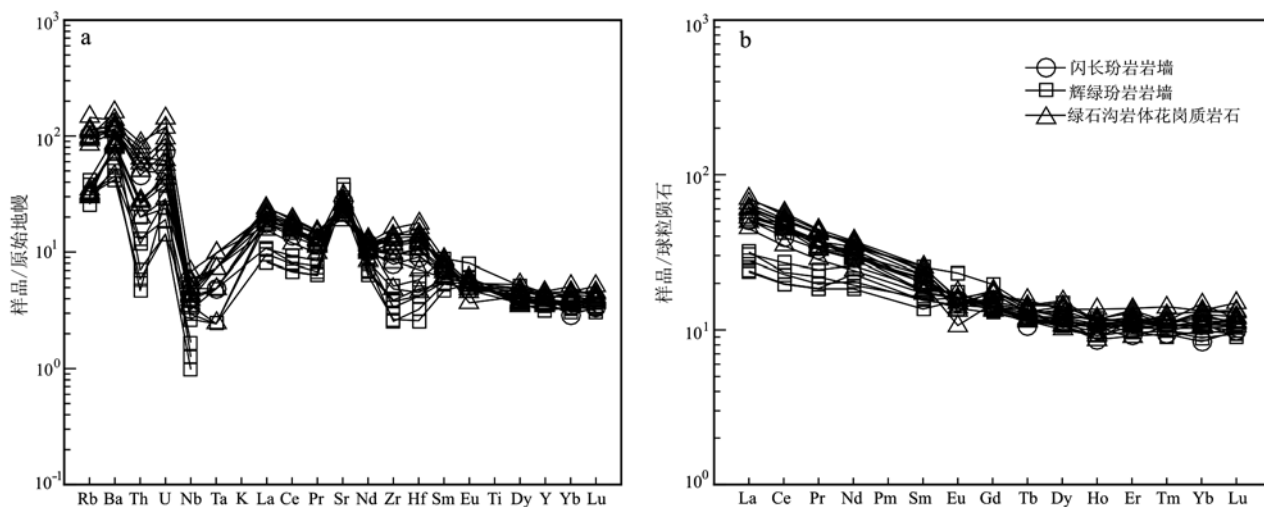


图 8 绿石沟岩体岩墙样品的微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(b)  
Fig. 8 Primitive mantle-normalized multiple trace element diagrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for studied mafic dykes from the Lüshigou pluton

标准化数据引自 Sun and McDonough(1989), 绿石沟岩体花岗岩的地球化学数据引自赵建新等(2017)  
primitive mantle values after Sun and McDonough (1989), geochemical data for the granitic rocks of Lüshigou pluton is cited from Zhao Jianxin *et al.* (2017)

表 5 绿石沟岩体辉绿玢岩岩墙斜长石电子探针结果  
Table 5 Plagioclase compositions analyzed by EPMA of diabase porphyry in Lüshigou pluton

| 测试点号                           | H7-6-26-1.2-1-5 | H7-6-26-1.2-3-2 | H7-6-26-1.2-3-3 |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 67.06           | 66.14           | 57.98           |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.04            | 0.00            | 0.08            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.35           | 22.14           | 23.72           |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.00            | 0.00            | 0.27            |
| FeO                            | 0.21            | 0.35            | 0.76            |
| MnO                            | 0.00            | 0.00            | 0.03            |
| MgO                            | 0.01            | 0.11            | 0.31            |
| CaO                            | 2.97            | 2.10            | 5.84            |
| Na <sub>2</sub> O              | 7.81            | 9.36            | 6.51            |
| K <sub>2</sub> O               | 0.05            | 0.04            | 0.34            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.00            | 0.01            | 0.05            |
| F <sup>-</sup>                 | 0.00            | 0.00            | 0.01            |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0.00            | 0.01            | 0.00            |
| NiO                            | 0.00            | 0.04            | 0.00            |
| Total                          | 100.50          | 100.30          | 95.89           |
| Si                             | 2.90            | 2.89            | 2.69            |
| Al                             | 1.14            | 1.14            | 1.30            |
| Fe <sup>3+</sup>               | 0.01            | 0.01            | 0.03            |
| Mn <sup>3+</sup>               | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Cr                             | 0.00            | 0.00            | 0.01            |
| Ti                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Ba                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Ca                             | 0.14            | 0.10            | 0.29            |
| Na                             | 0.66            | 0.79            | 0.58            |
| K                              | 0.00            | 0.00            | 0.02            |
| An                             | 17.32           | 11.01           | 32.42           |
| Ab                             | 82.37           | 88.73           | 65.34           |
| Or                             | 0.32            | 0.26            | 2.24            |

中的辉石的 SiO<sub>2</sub> 含量为 47.07% ~48.52%，其端员组成 W<sub>0</sub> = 44.9 ~45.6，En = 41.5 ~43.1，Fs = 12.0 ~12.9。在辉石分类图解上，都在透辉石区域（图 9c）。

## 5 讨论

### 5.1 岩墙形成时代

琼河坝地区的中酸性侵入岩前人已做了年代学工作，但其中发育的中基性岩墙仍缺乏高精度的定年数据约束。冯乾文等(2015)对东准噶尔琼河坝地区和尔赛岩体中的暗色岩墙群进行了详细研究，通过岩墙侵入地层的时代和岩墙间的切割关系，限定了和尔赛岩体中岩墙群的形成时代为晚泥盆世—早石炭世。而在和尔赛岩体西北方的绿石沟岩体中的暗色岩墙，也仍未有发表的高精度测年数据。绿石沟岩体花岗岩的锆石 LA-ICP-MS 定年显示其形成于石炭纪的 354 ± 1 Ma ~346 ± 2 Ma(图 1b, 赵建新等, 2017)，因而，从与地层和岩浆岩的接触关系看(它们侵入到石炭系和石炭纪绿石沟岩体花岗岩中)，侵入到绿石沟岩体中的这些岩墙可能的形成时代应晚于 354 ~346 Ma。

在详细的野外地质调查基础上，本文对侵入的绿石沟花岗岩中的两种类型岩墙进行了锆石年代学研究，对闪长玢岩样品锆石进行了 LA-ICPMS 测年，

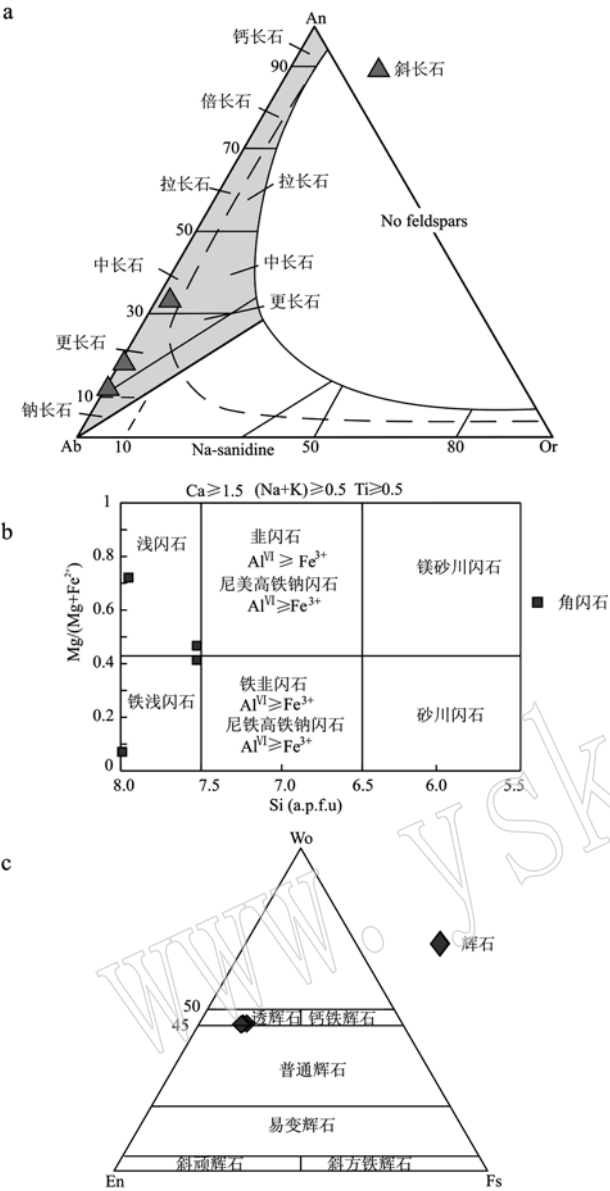


图 9 绿石沟岩体中辉绿玢岩岩墙的斜长石(a, 据 Parsons, 2010)、角闪石(b, 据 Leak *et al.*, 1997)和辉石(c, 据 Morimoto, 1988)矿物成分分类

Fig. 9 Diagrams of classification for plagioclase (a, after Parsons, 2010), amphibole (b, after Leak *et al.*, 1997) and clinopyroxene (c, after Morimoto, 1988) in the diabase porphyrite in the Lushigou pluton

对颗粒较小、挑出粒数少的辉绿玢岩样品锆石开展了 SHRIMP 定年。锆石成因研究是判断锆石年龄意义的基础,侯贵廷等(2005)提出基性岩墙群的锆石地质定年会存在一些问题,如基性岩原生锆石少,并且由于花岗岩体中暗色岩墙时代测定可能受到“围岩捕获锆石”问题的困扰,不能简单地以一组数据的加权平均年龄为准,样品中最年轻锆石也可能代表

表 6 绿石沟岩体辉绿玢岩岩墙中角闪石电子探针结果  $w_B/\%$

Table 6 Major oxide composition of amphibole and crystal chemical coefficients of diabase porphyrite of Lushigou pluton

| 测试点号                                        | H7-6-26-1.2-1-1 | H7-6-26-1.2-1-2 | H7-6-26-1.2-4-4 | H7-6-26-1.2-3-1 |
|---------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| SiO <sub>2</sub>                            | 50.87           | 54.45           | 52.69           | 49.04           |
| TiO <sub>2</sub>                            | 0.33            | 0.04            | 0.00            | 0.00            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 2.84            | 27.54           | 20.41           | 27.63           |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 0.17            | 0.01            | 0.34            | 0.04            |
| FeO                                         | 6.14            | 0.66            | 7.17            | 1.66            |
| MnO                                         | 0.17            | 0.00            | 0.15            | 0.06            |
| MgO                                         | 15.52           | 0.07            | 5.07            | 0.93            |
| CaO                                         | 19.35           | 9.80            | 2.18            | 10.91           |
| Na <sub>2</sub> O                           | 0.20            | 5.26            | 3.53            | 3.72            |
| K <sub>2</sub> O                            | 0.00            | 0.13            | 1.70            | 0.10            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>               | 0.04            | 0.01            | 0.09            | 0.01            |
| F <sup>-</sup>                              | 0.00            | 0.00            | 0.06            | 0.00            |
| ZrO <sub>2</sub>                            | 0.03            | 0.00            | 0.01            | 0.00            |
| NiO                                         | 0.04            | 0.02            | 0.01            | 0.00            |
| Total                                       | 95.67           | 97.98           | 93.43           | 94.09           |
| Si                                          | 8               | 8               | 8               | 8               |
| Al-T                                        | 0.03            | 0.00            | 0.45            | 0.45            |
| su1                                         | 8.00            | 8.08            | 8.00            | 8.00            |
| Ti                                          | 0.04            | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Al-O                                        | 0.49            | 4.82            | 3.00            | 4.56            |
| Cr                                          | 0.02            | 0.00            | 0.04            | 0.00            |
| Fe <sup>3+</sup>                            | 0.00            | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Fe <sup>2+</sup>                            | 0.80            | 0.08            | 0.86            | 0.21            |
| Mn                                          | 0.02            | 0.00            | 0.02            | 0.01            |
| Mg                                          | 3.62            | 0.02            | 1.08            | 0.21            |
| su2                                         | 5               | 5               | 5               | 5               |
| Ca                                          | 3.25            | 1.56            | 0.33            | 1.80            |
| Na                                          | 0.06            | 1.51            | 0.98            | 1.11            |
| K                                           | 0.00            | 0.02            | 0.31            | 0.02            |
| Mg <sup>#</sup>                             | 0.81            | 0.16            | 0.56            | 0.49            |
| Fe <sup>2+</sup> / (Mg + Fe <sup>2+</sup> ) | 0.18            | 0.84            | 0.44            | 0.50            |
| p/MPa                                       | 41              | 195.61 *        | 80              | 88              |
| t/℃                                         | 896             | 1 103 *         | 978             | 984             |
| logfO <sub>2</sub>                          | -10.79          | -7.71 *         | -10.39          | -10.40          |
| H <sub>2</sub> O/%                          | 9.28            | 37.39 *         | 12.33           | 14.77           |
| ΔFMQ                                        | 1.84            | -13.92 *        | 0.81            | 0.67            |
| 深度/km                                       | 1.54            | 738.77 *        | 3.03            | 3.31            |

注:角闪石温度、压力、氧逸度等计算结果依据 Ridolfi 等(2010)、利用 Geo-f<sub>02</sub> 软件(Li *et al.*, 2019)计算得出;其中,\*标识的角闪石电子探针数据(H7-6-26-1.2-1-2)计算出的温压等数据存在异常,可能与角闪石发生部分蚀变有关,该数据在讨论中舍弃。

侵位年龄(宋彪等, 2008, 2015)。从锆石的特征看,可以基本确定闪长玢岩岩墙(H7-6-26-1.1)中所分析的锆石都是岩浆成因锆石,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄  $346 \pm 1$  Ma,可以代表闪长玢岩岩墙的结晶时代。

表7 绿石沟岩体辉绿玢岩岩墙中辉石主要氧化物含量  
( $w_B/\%$ )及晶体化学系数和端员组分

Table 7 Major oxide composition of pyroxene ( $w_B/\%$ ) and crystal chemical coefficients and end-member components in diabase porphyrite of Lüshigou pluton

| 测试点号                           | H7-6-26-1.2-1-3 | H7-6-26-1.2-1-4 | H7-6-26-1.2-4-3 |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 48.52           | 47.07           | 48.04           |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.56            | 0.58            | 0.56            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.26            | 5.47            | 5.85            |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.06            | 0.16            | 0.34            |
| FeO                            | 6.91            | 7.20            | 6.76            |
| MnO                            | 0.14            | 0.17            | 0.20            |
| MgO                            | 13.40           | 12.79           | 13.59           |
| CaO                            | 19.99           | 19.53           | 19.69           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.35            | 0.38            | 0.28            |
| K <sub>2</sub> O               | 0.00            | 0.01            | 0.00            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.00            | 0.03            | 0.00            |
| F <sup>-</sup>                 | 0.01            | 0.00            | 0.00            |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0.01            | 0.01            | 0.02            |
| NiO                            | 0.03            | 0.03            | 0.04            |
| Total                          | 95.24           | 93.43           | 95.35           |
| Si                             | 1.88            | 1.86            | 1.86            |
| P                              | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Al-T                           | 0.12            | 0.13            | 0.14            |
| Al-O                           | 0.12            | 0.12            | 0.12            |
| Ti                             | 0.02            | 0.02            | 0.02            |
| Cr                             | 0.00            | 0.00            | 0.01            |
| Fe <sup>3+</sup>               | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Fe <sup>2+</sup>               | 0.22            | 0.23            | 0.22            |
| Mn                             | 0.00            | 0.01            | 0.01            |
| Mg                             | 0.77            | 0.75            | 0.78            |
| Ni                             | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Ca                             | 0.83            | 0.83            | 0.82            |
| Na                             | 0.03            | 0.03            | 0.02            |
| K                              | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Di                             | 0.56            | 0.54            | 0.53            |
| Hd                             | 0.16            | 0.17            | 0.15            |
| Jd                             | 0.01            | 0.00            | 0.00            |
| Wo                             | 45.4            | 45.6            | 44.9            |
| En                             | 42.3            | 41.5            | 43.1            |
| Fs                             | 12.3            | 12.9            | 12.0            |
| Jo                             | 0.5             | 0.6             | 0.6             |
| $t/^\circ\text{C}$             | 1 099           | 1 095           | 1 092           |
| $p/\text{MPa}$                 | 630             | 580             | 500             |

注: 辉石温压计算结果根据 Neave and Putirka (2017)。

辉绿玢岩岩墙样品中的锆石也显示出岩浆结晶锆石的特征(图4),其中11颗锆石的SHRIMP加权平均年龄为 $355 \pm 5 \text{ Ma}$ ( $\text{MSWD} = 1.3$ ),与绿石沟岩体花岗岩年龄误差范围内基本一致或稍老,如果该年龄代表辉绿玢岩岩墙的侵位时代,显然与野外关系不符。而辉绿玢岩样品(H7-6-26-1.2)测试点9的锆石(图4),与其他锆石颗粒相比,锆石颗粒小,

晶形狭长,SHRIMP测年结果显示它具有最年轻锆石年龄 $332 \pm 6 \text{ Ma}$ (和典型的地幔值特征的Hf-O同位素组成,见下文,为岩浆自身结晶锆石),代表辉绿玢岩岩墙的结晶时代更合理。这与野外关系(辉绿玢岩岩墙切穿闪长玢岩)间接地限定辉绿玢岩晚于闪长玢岩岩墙( $346 \pm 1 \text{ Ma}$ )的形成时代相符合。因而,笔者认为绿石沟岩体中辉绿玢岩岩墙的结晶时代在约 $332 \text{ Ma}$ ,属早石炭世。

而辉绿玢岩样品(H7-6-26-1.2)中那些年龄在 $355 \pm 4.7 \text{ Ma}$ 左右的锆石(图4),如锆石16.1,具有较明显的岩浆震荡环带,具有与绿石沟岩体花岗质岩石中的锆石(赵建新等,2017)相同的结构特征,应为辉绿岩墙在侵位过程中捕获的绿石沟岩体中的锆石。此外,在辉绿玢岩样品识别出的年龄更古老的锆石年龄( $474 \text{ Ma}$ 、 $405 \text{ Ma}$ ,图4、图5b),可能为捕获深部早期岩浆事件的锆石,这间接支持了前人有关琼河坝岛弧被认为是早古生代岛弧(在 $442 \text{ Ma}$ 之前就已出现,张永等,2010)的观点。

## 5.2 岩石源区特征

岩墙群通常也被认为是岩浆上升运移的通道系统,岩墙中基性岩浆在上升侵位过程中可能会与地壳围岩发生不同程度的混染,因而在探讨其岩浆源区特征之前,评估岩墙围岩混染的程度是必要的。绿石沟辉绿玢岩岩墙样品有的Nb/Ta值(7.4、5、10.5、19)和Zr/Hf值(28.7~37.3)与大陆地壳值(大陆地壳Nb/Ta=11, Zr/Hf=33,据Taylor and McLennan, 1985)接近,表明岩浆在上升过程中可能受到了一定程度的地壳物质混染(Green, 1995; Kal-foun *et al.*, 2002),然而,闪长玢岩和辉绿玢岩岩墙样品的La/Nb值为5.3和2.7~8.1,远低于典型陆壳岩石(>12),这表明地壳混染程度对岩石成因影响较小(Lassiter and DePaolo, 1997)。此外,幔源岩浆常具有较低的Th/Ce(0.02~0.05)和Th/La值(~0.12, Sun and McDonough, 1989),大陆地壳具有较高的Th/Ce值(约0.15, Taylor and McLennan, 1985)和Th/La值(~0.30, Plank, 2005);而绿石沟岩体辉绿岩岩墙的Th/Ce值(0.03~0.07)和Th/La值(0.07~0.15)与幔源岩浆较接近,同样说明辉绿玢岩基本未遭受地壳混染,其岩石成因主要受到岩浆源区组成和部分熔融温压条件的控制。

绿石沟岩体闪长玢岩微量元素组成上具有亲石元素富集、高场强元素亏损的特征,稀土元素配分曲线为右倾型,具有Eu负异常和Sr的正异常特征,与

绿石沟岩体花岗岩相似(图8),指示闪长玢岩在形成过程中有斜长石的结晶作用。绿石沟岩体花岗岩的源区被认为是以亏损地幔或新生地壳物质为主,其中还可见镁铁质暗色包体,被认为花岗岩形成过程中有幔源物质参与(赵建新等, 2017)。闪长玢岩的源区可能主要为新生玄武质下地壳的部分熔融。

绿石沟岩体辉绿玢岩岩墙  $\text{SiO}_2$  含量较低(46.34% ~ 50.35%),岩石稀土元素配分曲线呈平缓的右倾形式,轻重稀土元素分异不明显,无明显的负 Eu 异常,表明岩浆分离结晶的程度并不强,可以近似认为辉绿玢岩是岩浆源区平衡部分熔融的产物。所以,可以根据辉绿玢岩的岩石地球化学特征和锆石 Hf-O 同位素来示踪岩浆源区。

辉绿玢岩中的锆石  $\epsilon\text{Hf}(t)$ - $t$  图解上,所有数据点都落在球粒陨石和亏损地幔之间,它们沿着亏损地幔和 0.6 Ga 地壳演化线之间分布(图6c),它们都具有年轻地壳模式年龄,与前人在东准噶尔地区同一个构造单元及邻区的基性岩锆石 Hf 同位素组成相近。辉绿玢岩中的锆石氧同位素  $\delta^{18}\text{O} = 4.41\text{‰} \sim 6.00\text{‰}$ ,与幔源锆石值( $5.3\text{‰} \pm 0.6\text{‰}$ )相一致或稍高一点(图6a、6b),表明它们是从熔融母岩浆受外界影响不大的岩浆中结晶出来的。被认为是代表绿石沟辉绿玢岩侵位年龄的岩浆自结晶锆石  $9.1[332 \pm 6 \text{ Ma}, \delta^{18}\text{O} = 5.31\text{‰}, \epsilon\text{Hf}(t) \text{ 值} = +15.4]$  具有该样品(H7-6-26-1.2)中最高的  $\epsilon\text{Hf}(t)$  值(接近亏损地幔线,图6c)和典型的幔源锆石  $\delta^{18}\text{O}$  特征,其锆石结晶年龄与锆石单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄  $t_{\text{DMI}}$  基本相同,表明它的母岩浆可能直接来源于未受任何影响的亏损地幔。

而辉绿玢岩样品捕获的古老锆石的  $\delta^{18}\text{O} > 10.21\text{‰}$ (474 Ma)和  $6.04\text{‰}$ (405 Ma)则表明,辉绿玢岩岩墙在侵位过程中可能还捕获了早期高  $\delta^{18}\text{O}$  值壳源锆石,或表明其物源区有沉积岩或者岩浆作用过程中有沉积岩或壳源流体/熔体物质的加入(Taylor, 1968; 董春艳等, 2016)。前文已经分析,辉绿玢岩脉在成岩过程中遭受地壳物质的混染不明显,所以最有可能是源区加入了富集的岩石圈地幔,即源区经历了俯冲过程中的流体交代作用。因而,绿石沟岩体中辉绿玢岩岩墙的岩浆源区为幔源物质组成为主(岩石圈地幔),并受到俯冲组分的改造。

### 5.3 侵位过程中物理化学条件

火成岩中造岩矿物的组合、结构和成分对探讨岩浆演化及其相关过程的物理化学条件具有重要意

义(张招崇等, 2005; Zhang *et al.*, 2016)。温度、压力及氧逸度等物理化学条件可通过特定的矿物温压公式来计算,如常见的角闪石温压计(Schmidt, 1992; Anderson and Smith, 1995; Ridolfi and Renzulli, 2012)和辉石温压计(Lindsley and Andersen, 1983; Nimis and Taylor, 2000; Putirka *et al.*, 2003; Yavuz, 2013)等。本文也初步分析了东准噶尔琼河坝地区绿石沟岩体中的早石炭世辉绿玢岩岩墙的形成物理化学条件。

在钙碱性岩浆中,可以根据角闪石的成分估算与其平衡的岩浆的温压条件(Blundy and Holland, 1990; Ridolfi *et al.*, 2010; Putirka, 2016)。前文提到辉绿玢岩为钙碱性系列(图7b),因而通过 Ridolfi 等(2010)的经验公式,计算出角闪石的结晶的物理条件为:  $t = 896 \sim 984^\circ\text{C}$ ,  $p = 41 \sim 88 \text{ MPa}$ (表6、图10),推断角闪石结晶时的岩浆温度为  $896 \sim 984^\circ\text{C}$ , 结晶深度约  $1.54 \sim 3.31 \text{ km}$ 。结合角闪石结晶指示的富水的岩浆环境以及较小平衡压力值指示的较浅的结晶深度,认为角闪石是在上地壳层次结晶。

单斜辉石与熔体的 Fe-Mg 平衡常数被广泛应用于岩浆的分离结晶过程和地质温度-压力计。依据 Neave 和 Putirka(2017)改进的单斜辉石-熔体平衡公式选择岩石全岩成分作为与单斜辉石平衡的熔体,计算了辉绿玢岩中辉石结晶时的温度压力条件,得出辉绿玢岩岩墙的单斜辉石-熔体平衡时的岩浆物理化学条件分别是:  $t = 1092 \sim 1099^\circ\text{C}$ ,  $p = 500 \sim 630 \text{ MPa}$ (表7、图10)。由于辉绿玢岩中辉石斑晶为

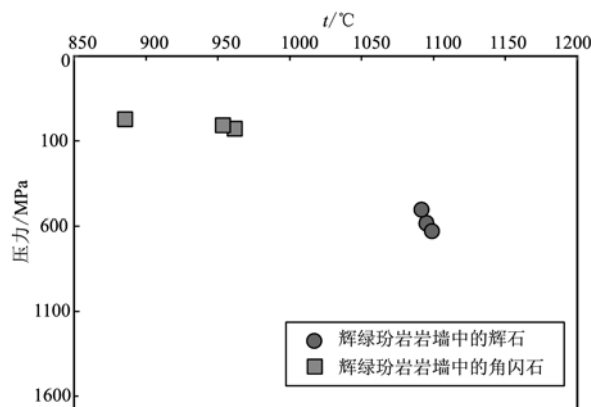


图10 绿石沟岩体中辉绿玢岩中矿物斑晶平衡时结晶的温度和压力估算

Fig. 10 The calculated equilibrium temperature and pressure of the amphibole and pyroxene for the diabase porphyrite in Lüshigou pluton

主要造岩矿物,并且为岩浆早期结晶的矿物,所以普通辉石的温压条件可以用于反演辉绿玢岩侵位结晶时的温压条件及岩浆房储存深度。根据辉石结晶时的平衡压力及深度与压力的关系,推测形成辉绿玢岩岩浆房的存储深度为 16.5 ~ 20.8 km,属于 Annen 等(2006)提出的深部地壳热带(deep crustal hot zones)上部的深度范围。

上述温压计算结果显示,利用角闪石得出的结晶压力和深度明显比辉石所计算的结果要低得多,这可能是辉石斑晶在辉绿玢岩岩浆中较角闪石先结晶的缘故。角闪石结晶温压条件对应辉绿岩墙就位时的深度,辉石可能代表岩浆上升过程中开始结晶的深度或者岩浆房顶部的深度。

氧逸度也是岩浆源区性质的直接反映。在 Dada (2013)的  $Al^IV(apfu) - Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$  图解上(图略),绿石沟辉绿玢岩岩墙中的角闪石  $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$  值为 0.18、0.44、0.50 和 0.84(表 6),表明它们既有在高氧逸度条件( $>0.8$ )下结晶形成的,也有在低氧逸度条件( $<0.6$ )下结晶形成的。绿石沟辉绿玢岩岩墙角闪石的最高和最低  $\log f_{O_2}$  分别为 -10.79 和约 -7.71 ( $\Delta FMQ = 0.67 \sim 1.84$ )(表 6)。此外,铁钛氧化物在辉绿玢岩样品中呈自形或他形(图 3),它们在较短的时间内会达到平衡,因此铁钛氧化物的平衡温度和  $\log f_{O_2}$  反映了岩墙侵位时前的岩浆最后状态(Venezky and Rutherford, 1999)。

#### 5.4 成因、构造环境及地质意义

中基性岩墙一般是深源岩浆(地幔或地壳)在裂隙中侵位到地壳不同层次形成的侵入体,在东准噶尔琼河坝地区广泛分布的中基性岩墙的成因对深入探讨岩石圈伸展和深部动力学过程具有重要意义。在 Wood (1979)基性岩构造环境判别图解  $Th - Ta - Hf/3$  三元图解上(图 7d),侵入到绿石沟岩体中的岩墙都落在“D”火山弧玄武岩区域,显示出具有典型的弧岩浆岩特征。而早石炭世绿石沟岩体(本文所研究岩墙群的围岩)花岗质岩石被认为可能形成于俯冲环境向造山后环境的构造转换阶段(赵建新等, 2017)。早石炭世,东准噶尔地区岩浆作用强烈,岩性多样,伴随着大量 I 型花岗岩的侵位[具有正的  $\epsilon Nd(t)$  和  $\epsilon Hf(t)$  值特征的花岗岩],还有 A 型和碱性花岗岩以及幔源岩浆的产出(李宗怀等, 2004; 童英等, 2010),可能暗示了伸展构造背景。

绿石沟岩体中大量密集分布中基性岩墙构成规模巨大的岩墙群,与东准噶尔琼河坝地区密集分布

着大量的岩墙(冯乾文等, 2015)一样,它们大多数同区域构造线或主断裂延伸方向近垂直或基本平行,因而可将其作为区域伸展构造的重要标志。而这种区域性的伸展拉张作用,可能与造山后伸展或俯冲环境伸展有关,如弧后扩张等(罗照华等, 2008; Peng *et al.*, 2008; 李宏博等, 2012; Torkian, 2019)。由于剥蚀程度的不同,岩墙出露的数量、厚度、长度等几何特征都会有所差异。东准噶尔琼河坝地区的中基性岩墙出露较完整,可能形成于多期岩浆活动,其几何形态也反映了多期构造活动叠加的特征,这得到了闪长玢岩和辉绿玢岩两种岩墙组合野外相互穿插关系及其年代学数据的支持。

最近, Han Yigui 等(2018)系统地综述了中亚造山带西南段的构造演化,勾勒出了古生代准噶尔构造域岛弧和地体之间的增生、碰撞和拼合演化过程框架,提出在早石炭世,东准噶尔岛弧位于北天山洋和额尔齐斯洋之间(图 11),东准噶尔岛弧发育了一系列与俯冲有关的岩浆岩和弧后裂谷。同时,东准噶尔地区存在的泥盆纪前打开的卡拉麦里古洋盆,在早石炭世早期( $\sim 340$  Ma 左右)已经关闭(黄岗等, 2012; Zhang *et al.*, 2013, 2015; 徐学义等, 2014; 田健等, 2015, 2016; 白建科等, 2018)(图 11),洋盆结束后碰撞作用发生。如果是这样,那么早石炭世东准噶尔琼河坝地区可能处于后碰撞伸展背景。

这一认识也得到了东准噶尔地区内广泛发育的早石炭世火山岩及花岗岩均具有后碰撞岩浆活动的特征的支持,如卡拉麦里地区后碰撞花岗岩(五彩城岩体,田健等, 2016)和东准噶尔卡拉麦里地区巴塔玛依内山组发育的早石炭世火山岩(Zhang *et al.*, 2015)和博格达山北侧大石头地区原繇林托凯陶山组古火山安山岩(谭佳奕等, 2010)等。

后碰撞是一个非常复杂的岩浆作用过程,它包括了微陆块俯冲、大规模的剪切运动和连续或幕式的岩石圈扩张导致的岩石圈的拆沉与裂解。此时,在卡拉麦里缝合带以北的东准噶尔琼河坝地区,由之前与卡拉麦里洋有关的俯冲环境进入了碰撞造山环境的转换期,这期间受区域挤压/伸展作用,产生裂隙,新生玄武质下地壳发生部分熔融,在伸展环境下的薄弱地带岩浆上侵就位形成了闪长玢岩岩墙。随着转换期构造背景的演化,在经历了主碰撞后的由挤压向伸展构造演化的后碰撞阶段,由于残留洋壳的拆沉引发岩石圈地幔上涌形成的或由深部地壳热带中产生的幔源岩浆就位形成系列基性岩墙(图 11)。

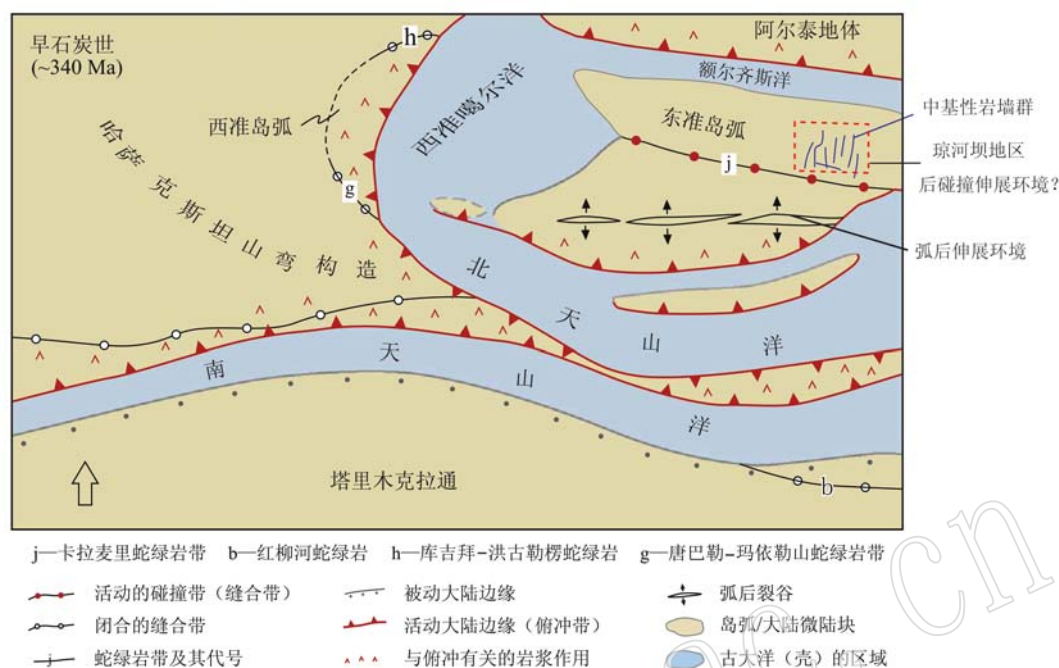


图 11 早石炭世中亚造山带西段东准噶尔及邻区古大陆重建模型卡通图(改自 Han and Zhao, 2018)

Fig. 11 Paleotectonic reconstruction cartoon showing the amalgamation history of main tectonic domains in the Junggar region of the Early Carboniferous (modified after Han and Zhao, 2018)

东准噶尔琼河坝地区绿石沟岩墙群的发育,特别是以辉绿玢岩为代表的幔源岩浆的活动,表明东准噶尔存在明显的地幔物质加入地壳(地壳生长),并产生了独立的基性端员。韩宝福等(2006)认为准噶尔地区大量发育后碰撞岩浆岩,这表明后碰撞阶段是重要的陆壳生长期,有大量幔源岩浆底垫作用导致(韩宝福等, 1998, 2006; Zhang *et al.*, 2009; 李涤等, 2013)。同时,这也进一步佐证了一些学者最近通过区域中酸性岩浆岩的同位素填图和捕获/继承锆石信息集成研究所得出的结论,即新疆东准噶尔地区以新生地壳物质为主(Kröner *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2019),是中亚造山带关键的陆壳生长区。垂向生长为东准琼河坝地区古生代后碰撞时期发生大陆地壳生长的一种重要方式。

## 6 结论

(1) 东准噶尔琼河坝地区绿石沟岩体岩墙存在闪长玢岩和辉绿玢岩岩墙的组合,它们的锆石 LA-ICP-MS 和 SHRIMP U-Pb 定年结果表明,闪长玢岩和灰绿玢岩岩墙形成时代分别为  $346 \pm 1$  Ma 和

$\sim 332$  Ma。

(2) 绿石沟岩体中辉绿玢岩岩墙的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 +10.2 至 +15.4,对应的二阶段 Hf 模式年龄为 0.35 ~ 0.67 Ga, 其锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值主要变化范围为 5.01‰ ~ 6.41‰。这些岩浆自结晶锆石的同位素特征表明其具有幔源物质组成。结合个别古老年龄的捕获锆石具有高  $\delta^{18}\text{O}$  值( $\delta^{18}\text{O} > 10\text{‰}$ )特征,认为辉绿玢岩岩墙的源区主要为亏损性质地幔(岩石圈地幔)物质的部分熔融,并有少量早古生代地壳物质或俯冲组分的加入。

(3) 矿物学研究表明,辉绿玢岩中的角闪石为浅闪石、铁浅闪石,角闪石的结晶温度为 896 ~ 984℃,压力为 41 ~ 88 MPa,结晶深度约 1.54 ~ 3.31 km。辉石为普通辉石,辉石-熔体平衡时的岩浆物理化学条件分别是:温度 1 092 ~ 1 099℃,压力 500 ~ 630 MPa,推测形成辉绿玢岩辉石岩浆房的存储深度为 16.5 ~ 20.8 km。

(4) 东准噶尔琼河坝地区大量中基性岩墙构成的岩墙群,可作为区域伸展构造的重要标志,结合前人对该区构造背景认识,认为琼河坝地区在早石炭世时可能处于后碰撞伸展拉张环境。

**致谢** 感谢张华锋、孟贵祥、史兴俊在野外的大力协助和有益探讨, 本文测试分析工作得到地科院矿产资源所实验室陈小丹、陈振宇的帮助, 匿名审稿专家及编辑对文章提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示诚挚的感谢!

## References

- Anderson J L and Smith D R. 1995. The effects of temperature and  $f_{O_2}$  on the Al-in-hornblende barometer[J]. *American Mineralogist*, 80(5~6): 549~559.
- Annen C, Blundy J D and Sparks R S J. 2006. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones[J]. *Journal of Petrology*, 47(3): 505~539.
- Bai Jianke, Chen Junlu, Tang Zhuo, *et al.* 2018. The closure time of Junggar Paleozoic oceanic basin: Evidence from Carboniferous detrital zircon U-Pb geochronology in Kalamaili area[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(1): 26~38(in Chinese with English abstract).
- Blundy J D and Holland T J. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(2): 208~224.
- Bouvier A, Vervoort 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.
- Chauvel C, Garçon M, Bureau S, *et al.* 2014. Constraints from loess on the Hf-Nd isotopic composition of the upper continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 388: 48~58.
- Chen Nenghua, Dong Jinjin, Chen Jiayu, *et al.* 2014. Geometry and emplacement of the Late Cretaceous mafic dyke swarms on the islands in Zhejiang Province, Southeast China: Insights from high-resolution satellite images[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 302~311.
- Dada O A. 2013. Application of amphibole chemistry in determining the petrogenesis of hornblende-biotite granites from Toro complex, north central, Nigeria[J]. *Continental Journal of Earth Sciences*, 8: 1~11.
- Demoux A, Kröner A, Liu Dunyi, *et al.* 2009. Precambrian crystalline basement in southern Mongolia as revealed by SHRIMP zircon dating[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1365~1380.
- Dong Chunyan, Wan Yusheng, Long Tao, *et al.* 2016. Oxygen isotopic compositions of zircons from Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the Daqingshan-Jining area, North China Craton: In situ SHRIMP analysis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 659~681(in Chinese with English abstract).
- Du Shijun, Qu Xun, Deng Gang, *et al.* 2010. Chronology and tectonic setting of intrusive bodies and associated porphyry copper deposit in Hersai area, eastern Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2198~2296(in Chinese with English abstract).
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 70: A158~A158.
- Ernst R E, Head J W, Parfitt E, *et al.* 1995. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus[J]. *Earth-Science Reviews*, 39: 1~58.
- Feng Qianwen, Zhou Kefa and Wang Jinlin. 2015. The late Paleozoic geodynamic environment of Qionghaba arc, eastern Junggar: Evidence from spatial and temporal distribution patterns of dark dykes in Hersai pluton[J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(4): 1068~1082(in Chinese with English abstract).
- Goldberg A S. 2010. Dyke swarms as indicators of major extensional events in the 1.9~1.2 Ga Columbia supercontinent[J]. *Journal of Geodynamics*, 50(3~4): 176~190.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System[J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 347~359.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Halls H C. 1982. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic processes[J]. *Geoscience Canada*, 9(3): 145~154.
- Han Baofu, He Guoqi, Wang Shiguang, *et al.* 1998. Postcollisional mantle-derived magmatism and vertical growth of the continental crust in North Xinjiang[J]. *Geological Review*, 44(4): 396~404(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077~1086(in Chinese with English abstract).
- Han Yigui and Zhao Guochun. 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Oro-

- genic Belt: constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 129 ~ 152.
- Hanski E S, Mertanen T Rämö and Jouni Vuollo. 2006. Dyke swarms-time markers of crustal evolution: Selected papers of the Fifth International dyke conference in Finland, Rovaniemi, Finland[A]. 31 July-3 Aug 2005 & Fourth International Dyke Conference, KwaZulu-Natal, South Africa 26 ~ 29 June 2001[C]. CRC Press.
- Hong Dawei, Zhang Jisheng, Wang Tao, *et al.* 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 799 ~ 813.
- Hou Guiting. 2012. Mechanism for three types of mafic dyke swarms[J]. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 217 ~ 223.
- Hou Guiting, Liu Yulin, Li Jianghai, *et al.* 2005. The SHRIMP U-Pb chronology of mafic dyke swarms: A case study of Laiwu diabase dykes in western Shandong[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(3): 179 ~ 185(in Chinese with English abstract).
- Hou Jiyao. 2015. East Junggar Naomao Lake Area Late Paleozoic Granite Genesis and geological Implication (Master Dissertation)[D]. China University of Geosciences (Beijing) 1 ~ 64(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Huang Bo, Fu Dong, Kusky Timothy, *et al.* 2018. Sedimentary provenance in response to Carboniferous arc-basin evolution of East Junggar and North Tianshan belts in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonophysics*, 722 : 324 ~ 341.
- Huang Gang, Niu Guangzhi, Wang Xinlu, *et al.* 2012. Formation and emplacement age of Karamaili ophiolite: LA-ICP-MS zircon U-Pb age evidence from the diabase and tuff in eastern Junggar, Xinjiang[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1 267 ~ 1 278(in Chinese with English abstract).
- Ickert R B, Hiess J, Williams I S, *et al.* 2008. Determining high precision, in situ, oxygen isotope ratios with a SHRIMP II: Analyses of MPI-DING silicate-glass reference materials and zircon from contrasting granites[J]. *Chemical Geology*, 257(1 ~ 2): 114 ~ 128.
- Jahn B M. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 226(1): 73 ~ 100.
- Jahn B M, Wu Fuyuan and Chen Bin. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 91(1 ~ 2): 181 ~ 193.
- Ju Wei, Hou Guiting, Li Le, *et al.* 2012. End Late Paleozoic tectonic stress field in the southern edge of Junggar Basin[J]. *Geoscience Frontiers*, 3(5): 707 ~ 715.
- Kalfoun F, Ionov D and Merlet C. 2002. HFSE Residence and Nb/Ta Ratios in Metasomatised, Rutile-Bearing Mantle Peridotites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(1 ~ 2): 49 ~ 65.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, *et al.* 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: Geological and isotopic evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 605 ~ 627.
- Kröner A, Kovach V, Alexeiev D, *et al.* 2017. No excessive crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Further evidence from field relationships and isotopic data[J]. *Gondwana Research*, 50: 135 ~ 166.
- Kröner A, Kovach V, Belousova E, *et al.* 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 25(1): 103 ~ 125.
- Lassiter J C and DePaolo D J. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints[J]. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 100: 335 ~ 356.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219 ~ 246.
- Li Di, He Dengfa, Fan Chun, *et al.* 2013. Early Permian post-collisional magmatic events, East Junggar: Constraints from zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and Hf isotope of rhyolite in the Yundukala area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 317 ~ 337(in Chinese with English abstract).
- Li Di, He Dengfa, Santosh M, *et al.* 2015. Tectonic framework of the northern Junggar Basin part I: The eastern Lüliang Uplift and its link with the East Junggar terrane[J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1 089 ~ 1 109.
- Li Hongbo, Zhang Zhaochong, Lü Linsu, *et al.* 2012. Petrological, geochemical and geometric characteristics of dyke swarms and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(1): 91 ~ 103(in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Liu Yiqun, Dong Yunpeng, *et al.* 2012. The geochemical characteristics, geochronology and tectonic significance of the Carboniferous volcanic rocks of the Santanghu area in northeastern Xinjiang,

- China[J/OL]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 42(11): 1 716 ~ 1 731 (in Chinese).
- Li Weikai, Cheng Yuanqi and Yang Zhiming. 2019. Geo- $f_{O_2}$ : Integrated software for analysis of magmatic oxygen fugacity[J/OL]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20. <https://doi.org/10.1029/2019GC008273>.
- Li Zonghuai, Han Baofu and Song Biao. 2004. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Ertaipei granodiorite and its enclaves from eastern Junggar, Xinjiang, and geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1 263 ~ 1 270 (in Chinese with English abstract).
- Liang Pei, Chen Huayong, Hollings Pete, *et al.* 2016. The Paleozoic tectonic evolution and metallogenesis of the northern margin of East Junggar, Central Asia Orogenic Belt: Geochronological and geochemical constraints from igneous rocks of the Qiaoxiahala Fe-Cu deposit [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130: 23 ~ 45.
- Lindsley D H and Andersen D J. 1983. A two-pyroxene thermometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(S2): 887 ~ 906.
- Liu Wei, Liu Xiujin and Liu Liju. 2013. Underplating generated A- and I-type granitoids of the East Junggar from the lower and the upper oceanic crust with mixing of mafic magma: Insights from integrated zircon U-Pb ages, petrography, geochemistry and Nd-Sr-Hf isotopes [J]. *Lithos*, 179: 293 ~ 319.
- Liu Xijun, Xiao Wenjiao, Xu Jifeng, *et al.* 2017. Geochemical signature and rock associations of ocean ridge-subduction: Evidence from the Karamaili Paleo-Asian ophiolite in East Junggar, NW China[J]. *Gondwana Research*, 48: 34 ~ 49.
- Luo Jun, Xiao Wenjiao, Wakabayashi John, *et al.* 2017a. The Zhaheba ophiolite complex in Eastern Junggar (NW China): Long lived supra-subduction zone ocean crust formation and its implications for the tectonic evolution in southern Altaids[J]. *Gondwana Research*, 43: 17 ~ 40.
- Luo Ting, Liao Qun'an, Chen Jiping, *et al.* 2017b. A record of post-collisional transition: Evidence from geochronology and geochemistry of Palaeozoic volcanic rocks in the eastern Junggar, Central Asia[J]. *International Geology Review*, 59(10): 1 256 ~ 1 275.
- Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Wang Bingzhang, *et al.* 2008. Post-orogenic dike complexes and implications for metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 1 ~ 12 (in Chinese with English abstract).
- Mao Xiang, Li Jianghai, Zhang Huatian, *et al.* 2012. Study on the distribution and developmental environment of the Late Paleozoic volcanoes in Junggar Basin and its adjacent areas[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2 381 ~ 2 391 (in Chinese with English abstract).
- Mao Yajing, Tang Dongmei, Qin Kezhang, *et al.* 2017. Geochemistry of the ~ 326 Ma Xinyuan mafic intrusion in the Eastern Junggar Terrane, Northwest China: Implications for tectonic setting and magmatic Ni-Cu mineralization potential[J]. *International Geology Review*, 59(10): 1 276 ~ 1 291.
- Morel M L, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, *et al.* 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS[J]. *Chemical Geology*, 255(1 ~ 2): 231 ~ 235.
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxenes[J]. *Mineralogy and Petrology*, 39(1): 55 ~ 76.
- Neave D A and Putirka K D. 2017. A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic rift zones[J]. *American Mineralogist*, 102(4): 777 ~ 794.
- Nimis P and Taylor W R. 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(5): 541 ~ 555.
- Park J K, Buchan K L and Harlan S S. 1995. A proposed giant radiating dyke swarm fragmented by the separation of Laurentia and Australia based on paleomagnetism of ca. 780 Ma mafic intrusions in western North America[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 132(1 ~ 4): 129 ~ 139.
- Parsons I. 2010. Feldspars defined and described: A pair of posters published by the Mineralogical Society. Sources and supporting information[J]. *Mineralogical Magazine*, 74(3): 529 ~ 551.
- Peng Peng, Zhai Minguo, Ernst R E, *et al.* 2008. A 1. 78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er volcanic province and the North China dyke swarm[J]. *Lithos*, 101(3 ~ 4): 260 ~ 280.
- Plank T. 2005. Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents[J]. *Journal of Petrology*, 46(5): 921 ~ 944.
- Putirka K. 2016. Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes[J]. *American Mineralogist*, 101(4): 841 ~ 858.
- Putirka K D, Mikaelian H, Ryerson F, *et al.* 2003. New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho[J]. *American Mineralogist*, 88(10): 1 542 ~ 1 554.
- Ridolfi F and Renzulli A. 2012. Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equa-

- tions valid up to 1 130°C and 2. 2 GPa[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 163(5): 877 ~ 895.
- Ridolfi F, Renzulli A and Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160(1): 45 ~ 66.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium[J]. Science, 293: 683 ~ 687.
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 110(2 ~ 3): 304 ~ 310.
- Song Biao. 2015. SHRIMP zircon U-Pb age measurement: Sample preparation, measurement, data processing and explanation[J]. Geological Bulletin of China, 34(10): 1 777 ~ 1 788 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao and Qiao Xiufu. 2008. Ages of the zircons from basalt of the Erdaogou Formation and diabase dyke swarms in Northern Liaoning, and their significances[J]. Earth Science Frontiers, 15(3): 250 ~ 262 (in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. Geological Review, 48(S1): 26 ~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Song Peng, Wang Tao, Tong Ying, *et al.* 2019. Contrasting deep crustal compositions between the Altai and East Junggar orogens, SW Central Asian Orogenic Belt: Evidence from zircon Hf isotopic mapping [J]. Lithos, 328: 297 ~ 311.
- Su Yuping, Zheng Jianping, Griffin William L, *et al.* 2012. Geochemistry and geochronology of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar terrane, NW China: Implication for a tectonic transition[J]. Gondwana Research, 22: 1 009 ~ 1 029.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 ~ 345.
- Tan Jiayi, Wang Shufang, Wu Runjiang, *et al.* 2010. Types and time of Carboniferous volcanic edifices in eastern Junggar, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 440 ~ 448 (in Chinese with English abstract).
- Tang Gongjian, Chung Sunlin, Hawkesworth Chris J, *et al.* 2017. Short episodes of crust generation during protracted accretionary processes: Evidence from Central Asian Orogenic Belt, NW China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 464: 142 ~ 154.
- Taylor H P. 1968. The oxygen isotope geochemistry of igneous rocks[J]. Contributions to mineralogy and Petrology, 19(1): 1 ~ 71.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[J]. Geological Magazine, 122(6): 673 ~ 674.
- Tian Jian, Liao Qun'an, Fan Guangming, *et al.* 2015. The discovery and tectonic implication of Early Carboniferous post-collisional I-type granites from the south of Karamaili in eastern Junggar[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(5): 1 471 ~ 1 484 (in Chinese with English abstract).
- Tian Jian, Liao Qun'an, Fan Guangming, *et al.* 2016. Mantle underplated pluton and stitching granite pluton from south side of the Karamaili fault in eastern Junggar: Geochronological, geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on their petrogenesis and tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 32(6): 1 715 ~ 1 730 (in Chinese with English abstract).
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, *et al.* 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 619 ~ 641 (in Chinese with English abstract).
- Torkian A. 2019. Petrology and Tectonic Setting of Dyke Swarms Emplaced in the Upper Jurassic Qorveh Granitoid Complex (Majidabad and Kangareh), Kurdistan Province, Iran[A]. Dyke Swarms of the World: A Modern Perspective (439 ~ 458) [C]. Singapore: Springer.
- Valley J W. 2003. Oxygen isotopes in zircon[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 343 ~ 385.
- Venezky D Y and Rutherford M J. 1999. Petrology and Fe-Ti oxide reequilibration of the 1991 Mount Unzen mixed magma[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 89(1 ~ 4): 213 ~ 230.
- Wali Guzalnur, Wang Bo, Cluzel Dominique, *et al.* 2018. Carboniferous-early permian magmatic evolution of the Bogda range (Xinjiang, NW China): Implications for the late Paleozoic accretionary tectonics of the SW central Asian orogenic belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 153: 238 ~ 251.
- Wan Bo, Xiao Wenjiao, Windley B F, *et al.* 2017. Contrasting ore styles and their role in understanding the evolution of the Altai[J]. Ore Geology Reviews, 80: 910 ~ 922.
- Wang Chuansheng, Zhang Zunzhong, Gu Lianxing, *et al.* 2010. Zircon geochronology and geochemical characteristics of the Permian granitic complex at Yiwu, eastern Tianshan: Their tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(4): 1 045 ~ 1 058 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Windley B F, Alexeev D, Xiao Wenjiao, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31 ~ 47.
- Wood D A. 1979. A variably veined suboceanic upper mantle-genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence[J]. *Geology*, 7(10): 499 ~ 503.
- Wu Fuyuan, Yang Yueheng, Xie Liewen, *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.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589 ~ 1 064(in Chinese).
- Xiao Wenjiao, Windley Brian F, Sun Shu, *et al.* 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Orocines, sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477 ~ 507.
- Xu Xingwang, Jiang Neng, Li Xianhua, *et al.* 2013. Tectonic evolution of the East Junggar terrane: Evidence from the Taheir tectonic window, Xinjiang, China[J]. *Gondwana Research*, 24(2): 578 ~ 600.
- Xu Xueyi, Li Rongshe, Chen Junlu, *et al.* 2014. New constrains on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1 521 ~ 1 534(in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Meng Guixiang, Yang Yueqing, *et al.* 2017. Discovery and metallogenic characteristics of Layikeleke magmatic skarn type of rich copper-iron deposit, Eastern Junggar, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 63(2): 413 ~ 426(in Chinese with English abstract).
- Yang Qidi, Wang Tao, Guo Lei, *et al.* 2017. Nd isotopic variation of Paleozoic-Mesozoic granitoids from the Da Hinggan Mountains and adjacent areas, NE Asia: Implications for the architecture and growth of continental crust[J]. *Lithos*, 272: 164 ~ 184.
- Yavuz F. 2013. WinPyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry[J]. *American Mineralogist*, 98 (7): 1 338 ~ 1 359.
- Yin Jiyan, Chen Wen, Yuan Chao, *et al.* 2015. Petrogenesis of Early Carboniferous adakitic dikes, Sawur region, northern West Junggar, NW China: Implications for geodynamic evolution[J]. *Gondwana Research*, 27 (4): 1 630 ~ 1 645.
- Zhang Jianjun, Wang Tao, Castro Antonio, *et al.* 2016. Multiple mixing and hybridization from magma source to final emplacement in the Permian Yamatu pluton, the Northern Alxa Block, China[J]. *Journal of Petrology*, 57(5): 933 ~ 980.
- Zhang Jianjun, Wang Tao, Tong Ying, *et al.* 2017. Tracking deep ancient crustal components by xenocrystic/inherited zircons of Palaeozoic felsic igneous rocks from the Altai-East Junggar terrane and adjacent regions, western Central Asian Orogenic Belt and its tectonic significance[J]. *International Geology Review*, 59(16): 2 021 ~ 2 040.
- Zhang Yong, Liang Guanglin, Qu Xun, *et al.* 2010. Evidence of U-Pb age and Hf isotope of zircons for Early Paleozoic magmatism in the Qionghaba arc, East Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2 389 ~ 2 398(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanyuan, Pe-Piper G, Piper D J W, *et al.* 2013. Early Carboniferous collision of the Kalamaili orogenic belt, North Xinjiang, and its implications: Evidence from molasse deposits[J]. *GSA Bulletin*, 125(5 ~ 6): 932 ~ 944.
- Zhang Yuanyuan, Guo Zhaojie, Georgia Pe-Piper, *et al.* 2015. Geochemistry and petrogenesis of Early Carboniferous volcanic rocks in East Junggar, North Xinjiang: Implications for post-collisional magmatism and geodynamic process[J]. *Gondwana Research*, 28(4): 1 466 ~ 1 481.
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, *et al.* 2005. A geochemical comparison between the Emeishan and Siberian large igneous provinces and its petrogenetic implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(1): 12 ~ 20(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Kusky Timothy M, *et al.* 2009. Late Paleozoic volcanic record of the Eastern Junggar terrane, Xinjiang, Northwestern China: Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 16(2): 201 ~ 215.
- Zhao Jianxin. 2014. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Carboniferous Granite in Qionghaba Area, East Junggar (Master Dissertation)[D]. China University of Geosciences (Beijing), 1 ~ 67 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jianxin, Tong Ying, Meng Guixiang, *et al.* 2017. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Lushigou high Ba-Sr quartz-monzonite in East Junggar, Xinjiang, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(5): 743 ~ 754(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianbo, Wilde S A, Zhao Guochun, *et al.* 2018. Nature and assembly of microcontinental blocks within the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 76 ~ 93.

## 附中文参考文献

- 白建科, 陈隽璐, 唐卓, 等. 2018. 新疆准噶尔古生代洋盆闭合时限——来自卡拉麦里地区石炭纪碎屑锆石 U-Pb 年代学的约束[J]. *地质通报*, 37(1): 26 ~ 38.

- 董春艳, 万渝生, 龙涛, 等. 2016. 华北克拉通大青山-集宁地区古元古代变质沉积岩的锆石氧同位素组成: SHRIMP 微区原位分析[J]. 岩石学报, 32(3): 659~681.
- 杜世俊, 屈迅, 邓刚, 等. 2010. 东准噶尔和尔赛斑岩铜矿成岩成矿时代与形成的构造背景[J]. 岩石学报, 26(10): 2 981~2 996.
- 冯乾文, 周可法, 王金陵. 2015. 东准噶尔琼河坝岛弧晚古生代地球动力学环境——来自和尔赛岩体暗色岩墙时空分布的证据[J]. 地质科学, 50(4): 1 068~1 082.
- 韩宝幅, 何国琦, 王式洸. 1998. 新疆北部后碰撞幔源岩浆活动与陆壳纵向生长[J]. 地质论评, 44(4): 396~404.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石学报, 22(5): 1 077~1 086.
- 侯贵廷, 刘玉琳, 李江海, 等. 2005. 关于基性岩墙群的 U-Pb SHRIMP 地质年代学的探讨——以鲁西莱芜辉绿岩岩墙为例[J]. 岩石矿物学杂志, 24(3): 179~185.
- 侯继尧. 2015. 东准噶尔淖毛湖地区晚古生代花岗岩成因及地质意义(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京), 1~64.
- 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.
- 黄岗, 牛广智, 王新录, 等. 2012. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的形成和侵位时限: 来自辉绿岩和凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质通报, 31(8): 1 267~1 278.
- 李涤, 何登发, 樊春, 等. 2013. 东准噶尔早二叠世后碰撞岩浆活动: 蕴都卡拉流纹岩 SHRIMP U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素的制约[J]. 岩石学报, 29(1): 317~337.
- 李宏博, 张招崇, 吕林素, 等. 2012. 岩墙群的岩石学、地球化学和几何学特征及其大地构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(1): 91~103.
- 李玮, 柳益群, 董云鹏, 等. 2012. 新疆三塘湖地区石炭纪火山岩年代学、地球化学及其大地构造意义[J]. 中国科学: 地球科学, 42(11): 1 716~1 731.
- 李宗怀, 韩宝福, 宋彪. 2004. 新疆东准噶尔二台北花岗岩体和包体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 20(5): 1 263~1 270.
- 罗照华, 卢欣祥, 王秉璋, 等. 2008. 造山后脉岩组合与内生成矿作用[J]. 地学前缘, 15(4): 1~12.
- 毛翔, 李江海, 张华添, 等. 2012. 准噶尔盆地及其周缘地区晚古生代火山机构分布与发育环境分析[J]. 岩石学报, 28(8): 2 381~2 391.
- 宋彪. 2015. 用 SHRIMP 测定锆石 U-Pb 年龄的工作方法[J]. 地质通报, 34(10): 1 777~1 788.
- 宋彪, 乔秀夫. 2008. 辽北辉绿岩墙(床)群及二道沟组玄武岩锆石年龄及其构造意义[J]. 地学前缘, 15(3): 250~262.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(S1): 26~30.
- 谭佳奕, 王淑芳, 吴润江, 等. 2010. 新疆东准噶尔石炭纪火山机构类型与时限[J]. 岩石学报, 26(2): 440~448.
- 田健, 廖群安, 樊光明, 等. 2015. 东准噶尔卡拉麦里断裂以南早石炭世后碰撞花岗岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 31(5): 1 471~1 484.
- 田健, 廖群安, 樊光明, 等. 2016. 东准噶尔卡拉麦里断裂以南幔源底侵体、“钉合花岗岩体”的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 32(6): 1 715~1 730.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 2010. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 619~641.
- 汪传胜, 张遵忠, 顾连兴, 等. 2010. 东天山伊吾二叠纪花岗质杂岩体的锆石定年、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 26(4): 1 045~1 058.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 064.
- 徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 等. 2014. 新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. 岩石学报, 30(6): 1 521~1 534.
- 严加永, 孟贵祥, 杨岳清, 等. 2017. 新疆东准噶尔拉克勒克岩体砂岩型富铜-铁矿的发现及其成矿特征[J]. 地质论评, 63(2): 413~426.
- 张永, 梁广林, 屈迅, 等. 2010. 东准噶尔琼河坝岛弧早古生代岩浆活动的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 26(8): 2 389~2 398.
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 2005. 峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省地球化学物征的比较及其成因启示[J]. 岩石矿物学杂志, 24(1): 12~20.
- 赵建新. 2014. 东准噶尔琼河坝地区石炭纪花岗岩年代学、地球化学及成因(硕士学位论文)[D]. 中国地质大学(北京), 1~67.
- 赵建新, 童英, 孟贵祥, 等. 2017. 新疆东准噶尔绿石沟高 Ba-Sr 石英二长岩的锆石 U-Pb 年龄、成因及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 36(5): 743~754.