

西藏列廷冈铁多金属矿侵入岩锆石 U-Pb 定年、 Hf 同位素组成及其地质意义

杨毅¹, 多吉², 德西央宗³, 刘鸿飞³, 张金树³, 张志¹, 郝建亭³, 刘苗苗⁴

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 西藏国土资源厅, 西藏 拉萨 850000; 3. 西藏地质调查院, 西藏 拉萨 850000; 4. 中石化勘探分公司, 四川 成都 610000)

摘要: 西藏列廷冈铁多金属矿床位于冈底斯-念青唐古拉岩弧北缘, 是冈底斯北缘 Pb-Zn-Ag-Cu-Fe 多金属成矿带上典型的铁多金属矿床, 与成矿关系最为密切的岩体为花岗闪长岩和花岗斑岩。采用锆石 LA-ICP-MS 对花岗闪长岩和花岗斑岩进行了定年, 结果显示花岗闪长岩的成岩年龄为 58.69 ± 0.68 Ma, 花岗斑岩成岩年龄为 60.69 ± 0.98 Ma。与加拉普铁多金属矿、沙让钼矿、亚贵拉铅锌银矿等冈底斯-念青唐古拉岩弧上其它矿床的对比分析表明, 这一系列矿床受印度-欧亚大陆碰撞过程中地幔的岩浆底侵作用影响, 形成于印度-亚洲大陆碰撞早期。列廷冈锆石的 Lu-Hf 测试结果显示岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-3.01 \sim 3.0$, Hf 二阶段模式年龄 $742 \sim 1322$ Ma, 表明岩浆具有壳幔混源的特点。结合列廷冈的目前勘探情况, 认为在区域的铁多金属矿中, 深部的 Cu-Pb-Zn 矿产将是今后勘查方向。

关键词: 同位素地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 列廷冈; 西藏

中图分类号: P597; P618.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)03-0281-14

Zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition of intrusions in the Lietinggang iron polymetallic deposit in Tibet and their geological significance

YANG Yi¹, DUO Ji², DEXI Yang-zong³, LIU Hong-fei³, ZHANG Jin-shu³, ZHANG Zhi¹, HAO Jian-ting³
and LIU Miao-miao⁴

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Department of Land and Resources of Tibet, Lhasa 850000, China; 3. Geological Survey of Tibet, Lhasa 850000, China; 4. Sinopec Exploration Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: Lying in the north of Gandise-Nyainqentanglha magmatic arc, the Lietinggang deposit is a typical iron polymetallic deposit in the Gandise Pb-Zn-Ag-Cu-Fe metallogenic belt. Granodiorite and granite porphyry have a close metallogenic relationship with the Lietinggang deposit. The authors conducted LA-ICP-MS zircon dating of the granodiorite and granite porphyry, which yielded monzonitic granite age of 58.69 ± 0.68 Ma and granite porphyry age of 60.69 ± 0.98 Ma. The Lietinggang deposit was compared in metallogenic background with the ore deposits in Gandise-Nyainqentanglha magmatic arc, such as Jialapu, Sharang and Yaguila. With the underplating of mantle-derived magma during India-Eurasian continental collision, the series of deposits were formed in the main collision period. The zircon Lu-Hf of zircons from the Lietinggang deposit have $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranging from -3.01 to 3.0 , and t_{DM2} ages of Hf between 742 and 1322 Ma, suggesting that the magma was from the mantle and the crust. The exploration achievements of the Lietinggang deposit show that the exploration of the

收稿日期: 2014-11-06; 修订日期: 2015-04-08

基金项目: 中国地质调查局地调项目(1212011221073); 国家重点基础研究发展计划(973)(1212010818098)

作者简介: 杨毅(1983-), 男, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床学和矿产普查与勘探工作, E-mail: 290744982@qq.com

iron polymetallic deposits in this region should be focused on the prospecting for Cu, Pb, Zn resources in the depth.

Key words: isotope geochemistry; zircon U-Pb age; Hf isotope; Lietinggang; Tibet

冈底斯成矿带是我国最重要的资源接续基地之一(唐菊兴等, 2013)。长期以来, 众多学者对该区尤其新生代岩浆岩进行了广泛而深入的研究, 在成岩成矿时代、成矿背景等方面取得了重要的成果(芮宗瑶等, 2003; 郑有业等, 2007; 秦克章等, 2008; 侯增谦等, 2008; 唐菊兴等, 2012)。在印度板块与亚洲板块的强烈碰撞的基础上, 冈底斯成矿带成矿作用具有明显的阶段性, 碰撞早期成矿(65~41 Ma)以亚贵拉铅锌矿、沙让钼矿、洞中拉铅锌矿为代表, 碰撞转换期成矿(40~26 Ma)以程巴钼铜矿、努日钨铜钼矿为代表, 碰撞伸展期成矿(25~0 Ma)以甲玛铜多金属、驱龙铜多金属、邦铺钼铜为代表。但根据近年勘探成果发现, 在冈底斯东段北侧的林周盆地内, 以列廷冈为代表的铁多金属矿床形成了一条矿物组合以磁铁矿、黄铜矿、辉钼矿、闪锌矿、方铅矿为特征的成矿亚带。目前对于该成矿亚带铁多金属矿床的研究较薄弱, 仅有很少工作报告, 如加拉普矿区 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 该岩体成岩年龄为 63 Ma 左右(付强等, 2013), 勒青拉矿区的野外调查结果显示, 成矿主要发生在喜山期(范文玉等, 2007), 而林周盆地最具成矿潜力的铁多金属矿床之一的列廷冈矿区的矿床学研究则鲜有报道, 影响了对整个成矿亚带成矿过程的认识和区域成矿潜力的评价。本文通过对列廷冈矿区花岗斑岩和花岗闪长岩岩体锆石 LA-ICP-MS 定年和 Hf 同位素研究, 厘定了该矿床岩体的形成年代, 探讨了成矿地质背景, 总结了林周地区铁多金属矿找矿方向。

1 区域地质概况

冈底斯北缘发育了一条东西长约 500 km、南北宽约 90 km 的 Pb-Zn-Ag-Fe-Cu 矿化带, 南邻雅江藏布洋盆消减带, 北以米拉山-松多断裂为限(侯增谦等, 2008)。该矿化带与古新世-始新世中酸性火山-中浅成岩浆建造有关, 成矿年龄在 65~38 Ma, 地处

林周盆地-南木林盆地及其北侧的隆格尔断隆带, 是主要是铅锌、银、钼、钨、铁矿床成矿亚系列(沙让式、亚贵拉式、洞中拉式)找矿远景区(唐菊兴等, 2012)。列廷冈矿床则是该矿化带北缘的典型矿床(图 1), 大地构造位于冈底斯-念青唐古拉岩浆弧, 早期称之为冈底斯弧背断隆带(周详等, 1984)。

区域地层归属冈底斯-腾冲区的拉萨-察隅分区, 发育了以旁多群为主体的古生界石炭-二叠系、中生界三叠-白垩系、新生界古新系, 地层主要呈近东西向, 多呈片状、带状展布, 地层大部分呈整合接触(赵守仁等, 2012)^①。区域构造较为复杂, 主要为区域性东西向压性断裂和褶皱(杨德明等, 2001), 断裂构造主要有巴嘎当-央日阿拉断层、拉多岗-日阿断层、吓拉断层和哈母断层, 褶皱构造主要有曲古-蹦叉背斜、哈玛拉-央地雄背斜和日阿扒贡-江多背斜(赵守仁等, 2012)^①。区域火山岩主要为新生代古近系始新统年波组、帕那组火山岩, 分布在林周盆地与旁多-羊八井火山-沉积盆地, 属冈底斯火山岩浆弧重要组成部分。古近纪岛弧型及陆缘弧型火山岩也广泛发育, 火山岩分布与区域构造演化存在密切关系; 侵入岩广泛分布, 区域成矿多于侵入岩有关, 多出露于旁多-羊八井盆地, 形成时代包括早侏罗世、早白垩世、始新世和中新世; 岩石类型以中酸性深成岩为主, 出露面积较大, 岩性以二长花岗岩、黑云母二长花岗斑岩、花岗斑岩、花岗玢岩、石英闪长玢岩为主(吴珍汉等, 2003)^②。

2 矿区地质概况

列廷冈铁多金属矿床位于堆龙德庆县德庆乡。矿区主要出露早中三叠世查曲浦组(T_{1-2c})大理岩(图 2)。矿区构造样式简单, 以规模较小的断层构造为主, 仅在Ⅲ号矿体见断层 F1。侵入岩分布广泛, 主要岩石类型为花岗闪长岩、花岗斑岩、二长花岗岩、闪长玢岩、辉长岩、辉绿岩等, 其中, 与成矿关系

① 赵守仁, 强巴扎西, 郭琳. 2012. 西藏丁嘎门堆地区地质矿产调查报告. 拉萨: 西藏自治区地质调查院. 1~272.

② 吴珍汉, 孟宪刚, 胡道功, 等. 2003. 西藏当雄幅 1:25 万区域地质调查. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所. 1~622.

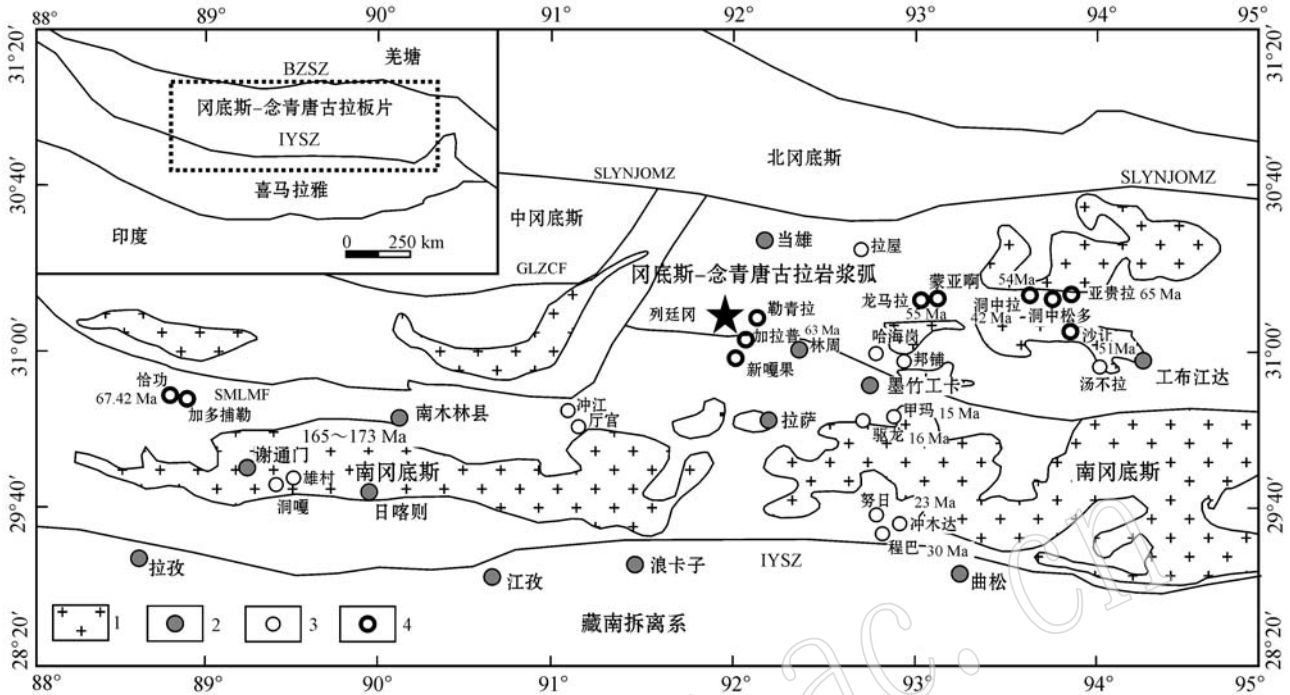


图 1 西藏冈底斯东段构造单元划分及部分矿产分布图(据王立强等,2014)

Fig. 1 Division of tectonic units and distribution of partial ore deposits in the eastern section of Gangdise, Tibet (modified after Wang Liqiang et al., 2014)

- 1—酸性岩浆岩; 2—地名; 3—冈底斯成矿带典型矿床; 4—冈底斯北缘典型矿床; SLYNJOMZ—狮泉河-拉米错-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿岩混杂带; SMLMF—沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂; GLZCF—噶尔-隆格尔-扎日南木错-错麦断裂带; BZSZ—班公湖-怒江缝合带; IYSZ—雅鲁藏布江缝合带
- 1—acidic magmatic rocks; 2—place name; 3—typical deposit of Gangdise mineralization belt; 4—typical deposit in northern Gangdise; SLYNJOMZ—Shiquan River-Nam Co melange zone; SMLMF—Shalemo-Maila-Luobadui-Milashan fault; GLZCF—Gaer-Longge'er-Zharinanmu Co-Cuomai fault; BZSZ—Bangong-Nujiang suture zone

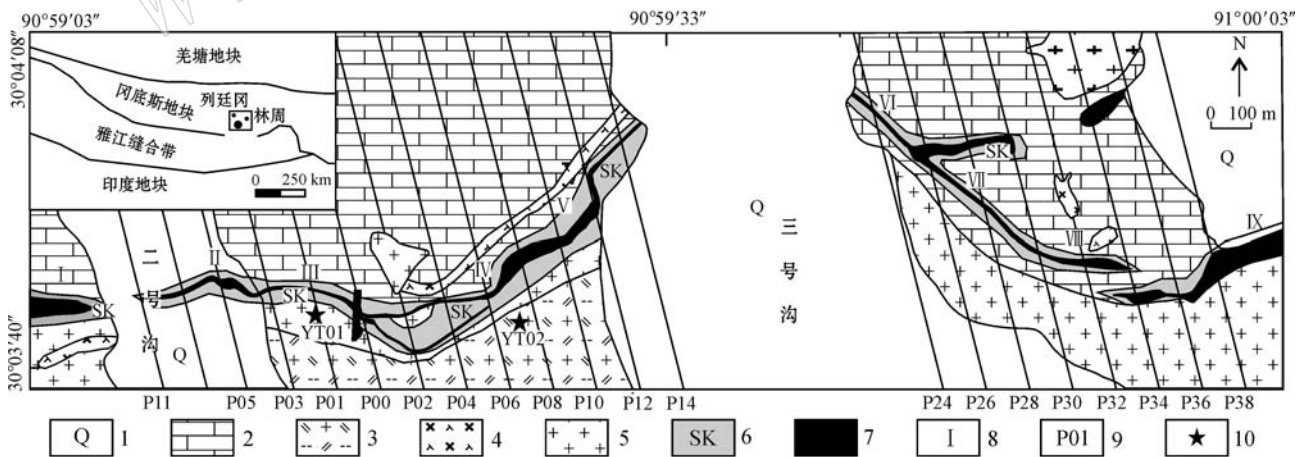


图 2 西藏列廷冈铁多金属矿床地质简图[据马代海等(2012)修改]

Fig. 2 Simplified geological map of the Lietinggang Fe polymetallic ore deposit(modified after Ma Daihai et al., 2012)

- 1—第四系; 2—大理岩; 3—花岗闪长岩; 4—辉绿岩; 5—花岗斑岩; 6—砂卡岩; 7—矿体; 8—矿体编号; 9—勘探线及编号; 10—采样位置
- 1—Quaternary; 2—marble; 3—granite diorite; 4—diabase; 5—granite porphyry; 6—skarn; 7—orebody; 8—serial number of orebody; 9—exploration line and its serial number; 10—sampling position

① 马代海, 陈 雳, 彭火坤. 2012. 西藏自治区堆龙德庆县列廷冈铁矿区普查报告. 拉萨: 西藏地质调查院, 1~272.

最为密切的为花岗斑岩、花岗闪长岩(图 3a、3b、3c)。岩体长轴方向均与构造线及地层走向一致,花岗斑岩主要以岩盆状产出于矿区南侧,整体呈近东西向

展布,花岗闪长岩、二长花岗岩等主要以岩株或岩脉状产出,基本顺岩层走向分布。

花岗闪长岩手标本观察呈灰黑色或灰色,斑状

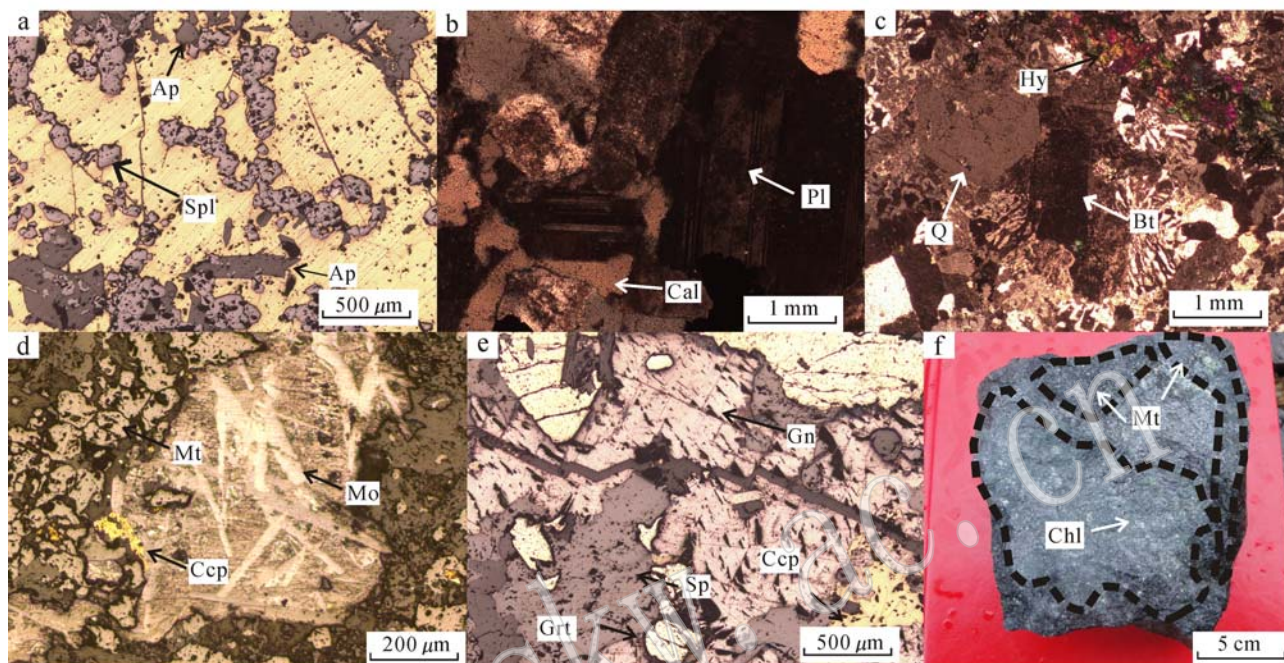


图3 列廷冈铁多金属矿野外和岩相学照片

Fig. 3 Petrographic photographs of the Lietinggang deposit

a—矽卡岩中脉石矿物; b、c—花岗斑岩蚀变矿物; d、e—矽卡岩中金属矿物; f—团块状磁铁矿和绿泥石接触关系(a、d、e 采自Ⅱ号矿体, b、c 采自Ⅲ号矿体, f 采自Ⅳ号矿体); Ap—磷灰石; Spl—尖晶石; Cal—方解石; Pl—斜长石; Hy—紫苏辉石; Bt—黑云母; Q—石英; Mt—磁铁矿; Ccp—黄铜矿; Mo—辉钼矿; Grt—石榴子石; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Chl—绿泥石

a—gangue minerals in skarn; b, c—strongly altered granite porphyry; d, e—metallic minerals in skarn; f—porphyritic magnetite and chlorite (a, d, e from No. II orebody, b, c from No. III orebody, f from No. III orebody); Ap—apatite; Spl—spinel; Cal—calcite; Pl—plagioclase; Hy—hypersthene; Bt—biotite; Q—quartz; Mt—magnetite; Ccp—chalcocite; Mo—molybdenite; Grt—garnet; Sp—sphalerite; Gn—galena; Chl—chlorite

结构,块状构造。岩石斑晶主要为斜长石、石英和角闪石(15%~20%),基质主要为斜长石和角闪石。斜长石自形程度较高,为板状或柱状,粒度为3~10 mm,大部分较新鲜,少量发生碳酸盐化;石英斑晶多发育溶蚀现象,呈浑圆状或港湾状;角闪石由于蚀变及其他矿物交代作用,往往呈现出他形颗粒状,但也有较自形的角闪石,粒度大小不一,最大可达10 mm左右。

花岗斑岩风化面常呈浅黄色,新鲜面为灰白-乳白色,斑状结构,块状构造。斑晶主要由长石、石英组成,有少量云母类,约占总含量的20%;基质主要由斜长石和石英组成,基质中副矿物主要有磷灰石、榍石、磁铁矿。

矿区共圈定9个矿体组成,由西向东,依次编号为I~IX, I~V号为西矿段, VI~IX号为东矿段。矿体多呈囊状、透镜状或似层状产出。I号矿体矿石类型以磁铁矿为主。II号矿体为矿区内已发现规模最大的矿体,矿石以磁铁矿、辉钼矿、黄铜矿组合为主(图3d、3f),少量闪锌矿和方铅矿(图3e),已开采的矿体Cu平均品位大于0.7%,Mo平均品位大于0.1%;矿体中伴生的银含量较高,银 6.78×10^{-4} ;Co含量达到 0.6×10^{-4} (马代海等,2012)^①。III号矿体以磁铁矿为主,次为黄铜矿,并见少量闪锌矿。IV号矿体下部以磁铁矿为主,上部发育一定量黄铜矿,其南侧花岗闪长岩和二长花岗岩中见浸染状和细脉状辉钼矿化。V号矿体出露海拔位置较IV

① 马代海,陈 雳,彭火坤. 2012. 西藏自治区堆龙德庆县列廷冈铁矿区普查报告. 拉萨: 西藏地质调查院, 1~272.

号矿体低, 矿石以磁铁矿为主, 基本未见黄铜矿, 其南侧花岗闪长岩和二长花岗岩中见浸染状和细脉状辉钼矿化。Ⅵ号矿体以磁铁矿为主, 发育少量黄铜矿和闪锌矿, 在二长花岗岩形成的内矽卡岩中见辉钼矿化。Ⅶ号矿体以磁铁矿为主, 发育一定量的闪锌矿, 基本未见方铅矿。Ⅷ号矿体位于Ⅶ号矿体北侧, 以磁铁矿为主, 可见少量辉钼矿化和黄铜矿化, 而闪锌矿基本未见。Ⅸ号矿体以磁铁矿、黄铜矿为主, 矿体底部靠近西边采场除磁铁矿外, 可见少量闪

锌矿和闪锌矿; 顶部以磁铁矿为主, 可见厚约 2 m 的黄铜矿体穿插于磁铁矿中, 黄铜矿较磁铁矿形成晚。矿区金属矿物主要为磁铁矿、黄铜矿、辉钼矿, 其次为闪锌矿, 少量黄铁矿、镜铁矿、钼华、方铅矿、磁黄铁矿; 非金属矿物主要有石榴子石、绿泥石、绿帘石、电气石、阳起石、石英、角闪石、钾长石、绢云母, 少量硅灰石和萤石, 矿石构造主要以块状、网脉状、浸染状为主(表 1)。

表 1 列廷冈各矿体矿物组成一览表

Table 1 Mineral composition of the orebody in Lietinggang

矿体编号	矿段	矿体形态、规模	金属矿物	非金属矿物
I		透镜状、囊状	磁铁矿(主要), 方铅矿、闪锌矿、褐铁矿(次要), 辉钼矿(少量)	
II	西矿段	透镜状	磁铁矿、黄铜矿、辉钼矿(主要), 方铅矿、闪锌矿(次要), 孔雀石(少量)	萤石、石英、钾长石、电气石、绿帘石、绿泥石、石榴子石、角闪石、硅灰石、绢云母、阳起石、黑云母
III		透镜状、囊状	磁铁矿(主要), 黄铜矿、闪锌矿(次要), 辉钼矿、镜铁矿(少量)	
IV		透镜状、囊状	磁铁矿(主要), 黄铜矿、辉钼矿(少量)	
V		透镜状、囊状	磁铁矿(主要), 辉钼矿(少量)	备注: 硅灰石仅在 I 号矿体少量出现, 萤石仅在 II 和 VIII 号矿体少量出现
VI		透镜状、囊状	磁铁矿(主要), 黄铜矿、闪锌矿(次要), 辉钼矿(少量)	
VII	东矿段	透镜状、囊状	磁铁矿(主要), 黄铜矿、闪锌矿(次要), 辉钼矿(少量)	
VIII		透镜状、囊状	磁铁矿(主要), 黄铜矿、辉钼矿、孔雀石(少量)	
IX		透镜状	磁铁矿、黄铜矿(主要), 辉钼矿、闪锌矿、方铅矿(少量)	

3 样品采集及实验方法

本次实验样品主要采自 III 号和 IV 号矿体以南的花岗闪长岩(YT01)和花岗斑岩(YT02)。样品的破碎和锆石的挑选工作由河北省廊坊区域地质矿产调查所实验室完成。锆石激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)U-Pb 同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 激光束斑直径为 25 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 为载气, 详细实验过程参见侯可军等(2009)。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)上进行, 激光束斑直径为 60 μm , 剥蚀速率 6 Hz, 激光剥蚀时间为 26 s, 激光能量密度为 15 J/cm², 测定时用锆石国际标样 91500 作外标, 实

验中采用 He 气作为剥蚀物质载气详细测试流程以及仪器运行条件等参见 Wu 等(2006)。

本文共对 2 件样品(YT01 为花岗闪长岩, YT02 为花岗斑岩)的锆石进行了 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析, 获得了 34 个 U-Pb 年龄数据和 24 个 Hf 同位素数据。

4 实验结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

从样品 YT01、YT02 (> 30 kg) 中分别选择 > 200 颗锆石, 进行 U-Pb 年代学测定。挑选出的锆石为自形无色透明状, 阴极发光下具有清晰的震荡环带, 均为典型的岩浆锆石, 所测锆石的 Th/U 值均大于 0.1(0.60~1.28 之间)。样品测试过程中尽量选择阴极发光生长环带明显、无包裹体、无裂纹的锆石晶体或避开锆石中的裂纹和包裹体。样品的分析数

据列于表 2, 年代计算结果及代表性锆石阴极发光 (CL) 图像见图 4。YT01 (花岗闪长岩)²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化于 58.44 ~ 61.85 Ma, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄 60.69 ± 0.98 Ma; YT02 (花岗斑岩)²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化于 60.02 ~ 62.66 Ma, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄 60.69 ± 0.68 Ma。

表 2 列廷冈铁多金属矿花岗闪长岩和花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析数据

Table 2 Zircon grains LA-ICP-MS U-Pb data for granodiorite in the Lietinggang deposit

样号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						年龄			
	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
YT02-2	73.26	120.39	0.61	0.109 4	0.006 8	0.145 2	0.011 8	0.009 6	0.000 3	138	10	61.55	2
YT02-3	85.43	120.82	0.15	0.145 9	0.046 4	0.197 0	0.063 6	0.009 8	0.000 1	183	54	62.67	1
YT02-4	72.53	110.80	0.65	0.112 0	0.008 1	0.149 3	0.011 1	0.009 6	0.000 1	141	10	61.87	1
YT02-5	94.13	126.77	0.74	0.120 2	0.007 1	0.157 5	0.010 6	0.009 4	0.000 1	149	9	60.57	1
YT02-6	91.14	122.02	0.75	0.120 1	0.005 0	0.162 5	0.007 8	0.009 7	0.000 1	153	7	62.14	1
YT02-7	214.14	182.91	1.17	0.112 7	0.005 6	0.151 3	0.008 7	0.009 7	0.000 1	143	8	62.12	1
YT02-8	217.80	225.12	0.97	0.108 9	0.003 6	0.145 0	0.005 4	0.009 6	0.000 1	137	5	61.62	1
YT02-12	229.51	178.49	1.29	0.060 7	0.003 7	0.078 8	0.004 4	0.009 4	0.000 3	77	4	60.63	2
YT02-13	106.09	109.44	0.97	0.127 3	0.003 7	0.164 7	0.005 5	0.009 4	0.000 1	155	5	60.13	1
YT02-15	156.35	138.93	1.13	0.096 6	0.002 8	0.127 2	0.004 4	0.009 5	0.000 2	122	4	61.18	2
YT02-16	243.49	181.10	1.34	0.086 9	0.002 8	0.112 6	0.004 0	0.009 4	0.000 1	108	4	60.02	1
YT02-17	107.77	116.66	0.92	0.089 5	0.003 6	0.118 6	0.005 4	0.009 5	0.000 1	114	5	60.98	1
YT02-18	197.11	120.83	1.63	0.062 5	0.001 4	0.081 2	0.001 9	0.009 4	0.000 1	79	2	60.58	1
YT02-19	123.71	139.98	0.88	0.073 4	0.001 6	0.096 0	0.002 5	0.009 5	0.000 1	93	2	60.79	1
YT02-20	70.76	102.83	0.69	0.075 2	0.003 7	0.099 2	0.005 1	0.009 6	0.000 1	96	5	61.36	1
YT01-1	162.65	163.13	1.00	0.087 2	0.002 7	0.113 0	0.004 0	0.009 4	0.000 1	109	4	60.19	1
YT01-2	95.54	110.55	0.86	0.067 9	0.005 1	0.084 7	0.005 7	0.009 1	0.000 1	83	5	58.13	1
YT01-3	89.77	117.48	0.76	0.169 3	0.007 3	0.225 2	0.009 8	0.009 6	0.000 1	206	8	61.85	1
YT01-4	191.65	158.31	1.21	0.096 2	0.003 2	0.125 2	0.004 6	0.009 4	0.000 1	120	4	60.44	1
YT01-5	126.90	136.38	0.93	0.113 2	0.003 8	0.146 4	0.005 0	0.009 4	0.000 1	139	4	60.19	1
YT01-6	255.54	211.13	1.21	0.072 9	0.004 6	0.093 8	0.006 7	0.009 2	0.000 1	91	6	59.25	1
YT01-7	107.93	133.21	0.81	0.130 2	0.010 8	0.174 7	0.017 1	0.009 5	0.000 3	163	15	61.26	2
YT01-8	107.52	124.90	0.86	0.082 4	0.006 5	0.110 7	0.013 8	0.009 4	0.000 2	107	13	60.26	1
YT01-9	243.82	237.20	1.03	0.093 7	0.003 6	0.122 5	0.005 2	0.009 4	0.000 1	117	5	60.41	1
YT01-10	102.44	125.42	0.82	0.083 5	0.002 9	0.107 3	0.004 1	0.009 3	0.000 1	103	4	59.72	1
YT01-11	66.70	83.87	0.80	0.091 9	0.004 5	0.119 8	0.006 7	0.009 4	0.000 2	115	6	60.10	1
YT01-12	229.83	177.90	1.29	0.143 6	0.003 6	0.183 5	0.005 2	0.009 3	0.000 2	171	5	59.51	1
YT01-13	104.22	118.18	0.88	0.072 8	0.002 4	0.093 2	0.003 6	0.009 2	0.000 1	90	3	59.16	1
YT01-14	97.39	107.71	0.90	0.136 0	0.007 9	0.185 6	0.013 1	0.009 6	0.000 2	173	11	61.70	1
YT01-15	111.82	119.78	0.93	0.074 0	0.006 3	0.097 2	0.009 7	0.009 5	0.000 3	94	9	60.81	2
YT01-17	99.46	112.81	0.88	0.069 3	0.003 9	0.090 4	0.007 0	0.009 2	0.000 2	88	7	59.31	1
YT01-18	81.88	102.27	0.80	0.073 6	0.003 8	0.093 9	0.005 8	0.009 2	0.000 1	91	5	59.01	1
YT01-19	124.32	131.64	0.94	0.072 0	0.003 1	0.090 4	0.003 8	0.009 1	0.000 1	88	4	58.44	1
YT01-20	45.69	76.85	0.59	0.063 0	0.003 6	0.082 5	0.004 7	0.009 5	0.000 2	80	4	60.95	1

4.2 锆石 Hf 同位素数据

依据 CL 图像和锆石 U-Pb 年代学结果, 选择若干颗锆石进行原位激光剥蚀法 Hf 同位素测定, 分析点与定年点接近, 采用选取与年龄点相同环带的原则进行测试以尽量保证与年龄的匹配质量(图 4a 和 4c)。2 件样品共取得了 24 个锆石 Hf 同位素数据, 测定结果列于表 3。¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 的范围分别为 0.011 ~ 0.076 和 0.000 53 ~ 0.002 8,

¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 基本在 0.002 及以下, 表明所测锆石放射成因 Hf 的积累很少, 可以使用初始的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值来代替锆石的初始 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值(吴福元等, 2007)。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -3.01 ~ 3.0, Hf 同位素地壳模式年龄 742 ~ 1 322 Ma。

4.3 岩石地球化学特征

列廷冈花岗闪长岩和花岗斑岩主量、微量和稀土元素分析结果见于表 4。从主量元素来看, 列廷冈

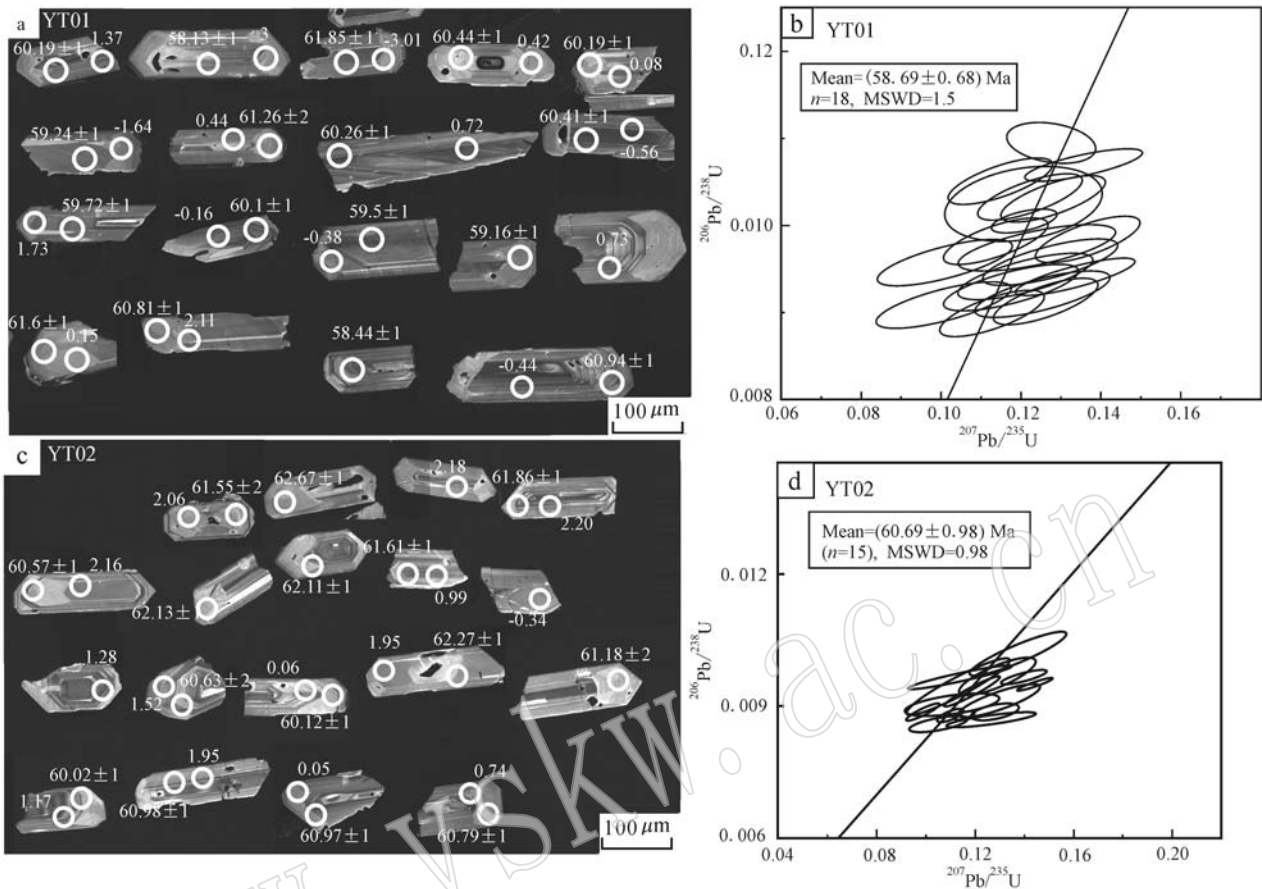


图 4 列廷冈铁多金属矿床 YT01 和 YT02 中锆石样品阴极发光图和锆石 U-Pb 年龄谐和图
 Fig. 4 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia diagrams of zircon for samples from the Liatinggang deposit

表 3 列廷冈铁多金属矿床花岗岩闪长岩和花岗斑岩锆石 Hf 同位素分析结果
 Table 3 Zircon Hf isotopic data of granodiorite in the Liatinggang deposit

分析点	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	2σ	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^*/\text{Ma}$	f_{Lu}/Hf
YT-01 01	60.19	0.072 250	0.002 713	0.282 777	0.000 023	0.282 774	1.37	0.8	707	1 042	-0.92
YT-01 02	58.13	0.052 649	0.001 954	0.282 823	0.000 024	0.282 821	3.00	0.9	625	937	-0.94
YT-01 03	61.85	0.030 282	0.001 144	0.282 650	0.000 026	0.282 649	-3.01	0.9	857	1 322	-0.97
YT-01 04	60.44	0.051 441	0.001 954	0.282 749	0.000 026	0.282 746	0.42	0.9	733	1 103	-0.94
YT-01 05	60.19	0.033 029	0.001 258	0.282 738	0.000 020	0.282 737	0.08	0.7	733	1 124	-0.96
YT-01 06	59.25	0.034 598	0.001 327	0.282 691	0.000 032	0.282 689	-1.64	1.1	803	1 233	-0.96
YT-01 07	61.26	0.040 042	0.001 504	0.282 748	0.000 024	0.282 746	0.44	0.9	724	1 102	-0.95
YT-01 08	60.26	0.022 446	0.000 881	0.282 756	0.000 024	0.282 755	0.72	0.8	701	1 084	-0.97
YT-01 09	60.41	0.045 784	0.001 765	0.282 721	0.000 026	0.282 719	-0.56	0.9	769	1 165	-0.95
YT-01 10	59.72	0.029 287	0.001 147	0.282 785	0.000 019	0.282 784	1.73	0.7	665	1 019	-0.97
YT-01 11	60.10	0.048 379	0.001 855	0.282 732	0.000 023	0.282 730	-0.16	0.8	754	1 140	-0.94
YT-01 12	59.51	0.046 665	0.001 786	0.282 726	0.000 025	0.282 724	-0.38	0.9	762	1 153	-0.95
YT-01 13	59.16	0.053 221	0.002 063	0.282 725	0.000 024	0.282 723	-0.44	0.8	769	1 157	-0.94
YT-01 14	61.70	0.029 040	0.001 132	0.282 795	0.000 018	0.282 794	2.11	0.6	651	996	-0.97
YT-01 15	60.81	0.042 999	0.001 652	0.282 740	0.000 020	0.282 738	0.15	0.7	739	1 121	-0.95
YT-02 01	61.55	0.054 669	0.002 092	0.282 794	0.000 028	0.282 792	2.06	1.0	669	1 000	-0.94
YT-02 04	60.57	0.029 468	0.001 138	0.282 798	0.000 022	0.282 797	2.20	0.8	647	990	-0.97
YT-02 08	60.63	0.035 041	0.001 342	0.282 779	0.000 024	0.282 777	1.52	0.8	677	1 033	-0.96
YT-02 09	60.13	0.060 295	0.002 309	0.282 739	0.000 030	0.282 737	0.06	1.1	754	1 125	-0.93
YT-02 11	61.18	0.032 625	0.001 242	0.282 768	0.000 021	0.282 767	1.17	0.8	690	1 056	-0.96
YT-02 12	60.02	0.055 197	0.002 103	0.282 792	0.000 022	0.282 790	1.95	0.8	672	1 005	-0.94
YT-02 13	60.98	0.045 564	0.001 771	0.282 738	0.000 023	0.282 735	0.05	0.8	745	1 127	-0.95
YT-02 14	60.58	0.042 032	0.001 621	0.282 757	0.000 021	0.282 755	0.74	0.8	714	1 083	-0.95
YT-02 15	61.36	0.032 838	0.001 276	0.282 734	0.000 021	0.282 732	-0.06	0.7	741	1 134	-0.96

表 4 列廷冈铁多金属矿床花岗闪长岩和花岗斑岩主量元素($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果
 Table 4 Major elements($w_B/\%$), REE and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of granodiorite and granite porphyry in the
 Lietinggang iron polymetallic deposit

样品编号	花岗闪长岩			花岗斑岩			
	DB14	DB17	DB18	DB11	DB21	DB18(2)	DB19(2)
SiO ₂	75.34	68.46	70.88	73.13	75.36	66.08	72.73
Al ₂ O ₃	8.28	9.27	9.68	12.77	10.79	9.97	12.79
Fe ₂ O ₃	2.37	2.14	1.81	0.69	0.92	0.41	0.81
MgO	0.61	0.65	0.41	0.35	0.22	2.42	0.36
CaO	3.43	6.07	5.21	1.46	2.36	9.79	1.89
Na ₂ O	1.25	2.04	0.65	3.7	2.31	5.78	3.72
K ₂ O	1.99	2.22	3.61	4.08	3.61	2.57	3.74
MnO	0.17	0.16	0.14	0.10	0.10	0.097	0.05
TiO ₂	0.1	0.11	0.1	0.24	0.13	0.18	0.24
P ₂ O ₅	0.13	0.08	0.01	0.04	0.01	0.15	0.046
FeO	4.75	4.46	2.50	2.60	3.21	2.15	2.11
Rb	54.3	71.9	125	109	91.9	14.73	107.56
Ba	249	343	529	721	618	464.22	654.5
Th	12.2	12.3	8.42	13.1	14.7	6.1	13.78
U	4	3.36	1.94	3.11	3.57	1.6	1.71
K	1.65	1.84	3	3.39	3	0.48	3.1
Ta	0.59	0.61	0.47	0.64	0.67	0.42	0.83
Nb	5.24	6.37	3.61	7.78	6.98	6.18	12.01
La	36.5	28.7	9.78	28	36.2	21.22	63.2
Ce	78.1	60.4	18.9	55	73.5	41.14	111.58
Sr	172	246	101	153	158	101	138.95
Nd	36.7	28.1	9.91	26	34.3	23.78	51.07
P	0.06	0.03	0.01	0.02	0.01	0.07	0.02
Zr	83.2	93.2	112	174	123	121.64	84.58
Hf	3.44	3.74	4.06	5.96	4.73	3.26	4.97
Sm	7.57	5.79	2.21	5	6.79	4.86	8.28
Y	43	28	13.5	30	37.5	19.72	27.17
Yb	5.04	3.73	1.88	4.06	4.99	2.12	3.55
Lu	0.78	0.57	0.32	0.63	0.81	0.33	0.54
La	36.5	28.7	9.78	28	36.2	21.22	63.2
Ce	78.1	60.4	18.9	55	73.5	41.14	111.58
Pr	9.24	7	2.31	6.55	8.61	5.36	13.27
Nd	36.7	28.1	9.91	26	34.3	23.78	51.07
Sm	7.57	5.79	2.21	5	6.79	4.86	8.28
Eu	0.97	0.8	0.68	0.92	0.86	1.17	1.26
Gd	8.48	6.38	2.63	5.66	7.68	4.35	7.69
Tb	1.29	0.94	0.42	0.9	1.11	0.66	1.1
Dy	8.21	5.79	2.54	5.71	7.13	3.56	5.91
Ho	1.73	1.2	0.53	1.22	1.51	0.72	1.21
Er	5.2	3.56	1.6	3.65	4.54	2.13	3.71
Tm	0.84	0.6	0.27	0.61	0.77	0.3	0.52
Yb	5.04	3.73	1.88	4.06	4.99	2.12	3.55
Lu	0.78	0.57	0.32	0.63	0.81	0.33	0.54
Y	43	28	13.5	30	37.5	19.72	27.17

花岗闪长岩具有高硅、富铝、富碱、低镁的特点,岩石 SiO₂ 含量为 66.08% ~ 75.36%, (Na₂O + CaO) 含量为 15.57% ~ 4.67%, Al₂O₃ 含量为 8.28% ~

17.97%, MgO 含量为 0.22% ~ 2.42%, 全铁含量为 2.92% ~ 7.12%, 全碱(K₂O + Na₂O) 含量变化于 3.24% ~ 7.78%, P₂O₅ 和 TiO₂ 含量较低, P₂O₅ 含

量为 0.01%~0.15%, TiO₂ 含量为 0.1%~0.44%。在侵入岩 TAS 图解(图 5a)中, 岩体样品主要落入花岗岩和花岗闪长岩范围内。A/NCK 为 0.33~0.97, 平均为 0.72, 岩石为准铝质中高钾钙碱性系列 I 型花岗岩(图 5b)。

样品稀土元素总量($\sum REE$)为 $53.98 \times 10^{-6} \sim 270.9 \times 10^{-6}$, 轻、重稀土元素发生一定程度分馏, 总体呈右倾[(La/Yb)_N = 0.95~12.01], 并具有弱-中等负 Eu 异常($\delta Eu = 0.36 \sim 0.99$)(图 6a)。在微量

元素原始地幔标准化蛛网图(图 6b)中, 花岗闪长岩富集 Th、Ta、La、Sr, 相对亏损 K、Nb、Ce、P。列廷冈花岗闪长岩样品的 Nb/U 平均值为 1.9 和 Nb/Ta 平均值为 9.92 较低, 与地壳值相似(Nb/U = 6.2, Rudnick and Gao, 2003; Nb/Ta = 12~13, Barth *et al.*, 2000), 偏离幔源岩浆值(Nb/U = 47, Hofmann *et al.*, 1986; Nb/Ta = 17.5 ± 2.0, Green, 1995), 说明岩浆源区有较多地壳物质来源物质。

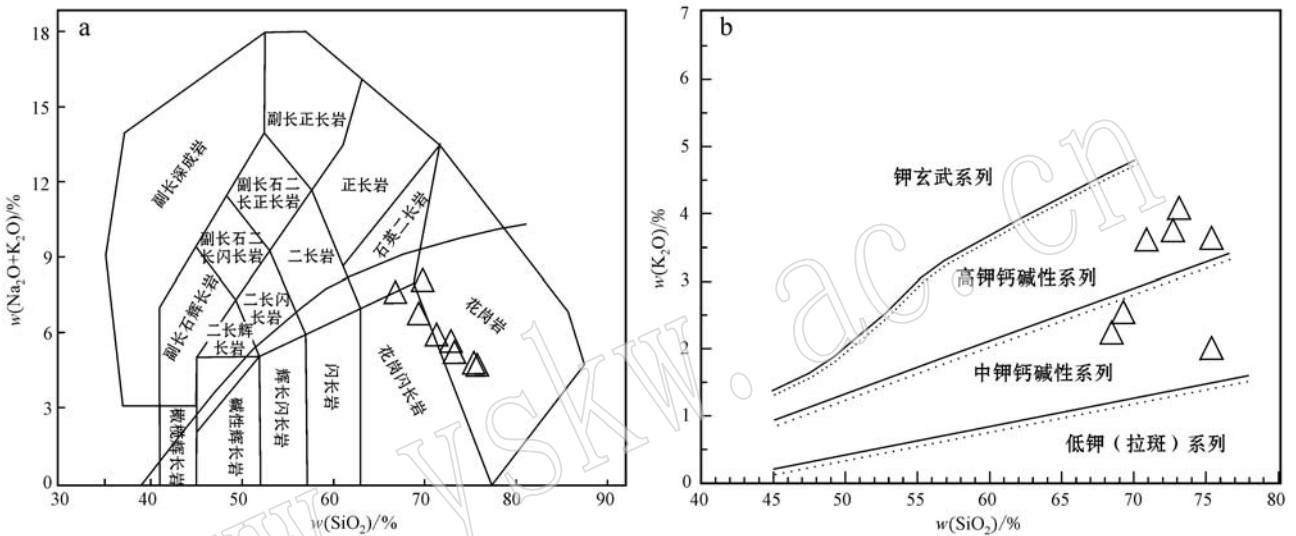


图 5 列廷冈花岗闪长岩岩石类型和系列划分图解

Fig. 5 Type and serial diagrams of granodiorite in the Lietinggang deposit
a—TAS diagram (分类据 Middlemost, 1994); b—K₂O—SiO₂ 关系图(据 Le Maitre, 2002)
a—TAS diagram (after Middlemost, 1994); b—K₂O—SiO₂ diagram (after Le Maitre, 2002)

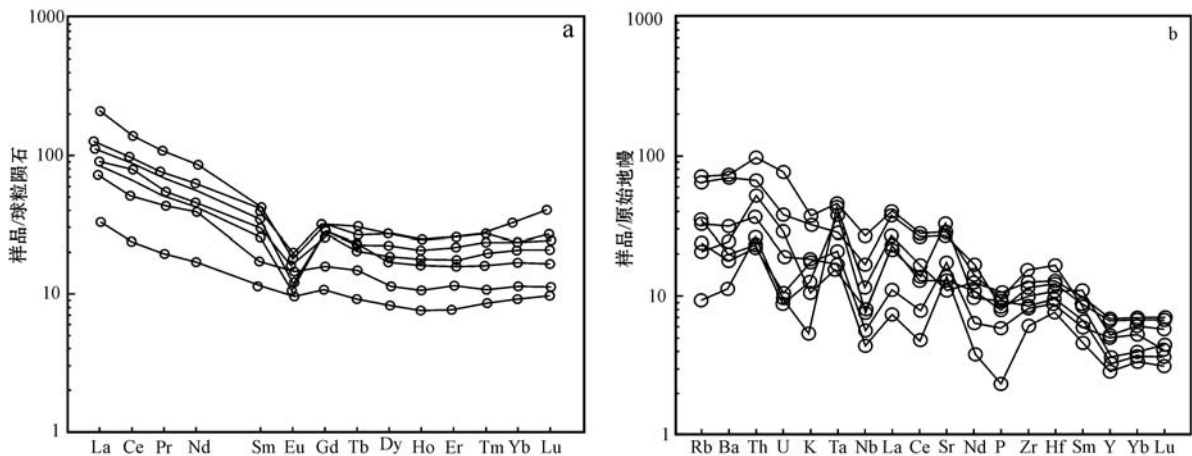


图 6 列廷冈花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化配分曲线图(b)
(球粒陨石及原始地幔数据据 Sun *et al.*, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element diagrams (b) for granodiorite in the Lietinggang deposit (chondrite and primitive mantle after Sun *et al.*, 1989)

5 讨论

5.1 成岩时代和构造环境时限的约束

冈底斯成矿带位于雅鲁藏布江缝合带、班公湖-怒江洋两条缝合带之间,在形成和发展过程中,经历了雅鲁藏布江向北俯冲、班公湖-怒江洋壳向南俯冲直至碰撞期、碰撞转换期和碰撞后伸展期的地质演化过程。本文得到的列廷冈花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 58.69 ± 0.68 Ma, 花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 60.69 ± 0.98 Ma, 说明其正是碰撞期岩浆作用的产物。而列廷冈辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 62.28 Ma (杨毅等, 2014), 说明矿床形成于古新世, 成矿年龄早于成岩年龄, 这为该地区的构造运动时限提供了约束。矿床的形成受发生在碰撞期的新特提斯板块“后旋”的模式影响, 即新特提斯洋俯冲角度在晚白垩世时由缓变陡, 引发地幔楔的部分熔融作用, 造成了岩浆的底侵集聚(董国臣等, 2006), 而列廷冈岩浆侵位年龄和成矿时代与“底侵”事件时间上的吻合, 印证了从 65 Ma 左右开始发生的印度-亚洲大陆碰撞(在西藏南部)对矿床形成的决定性作用。同样位于冈底斯-念青唐古拉岩浆弧的加拉普(铁多金属矿)、加拉捕勒(铁铜矿)、沙让(钼矿)、亚贵拉(铅锌钼多金属)等矿床, 具有相似的成矿动力学背景(李皓扬等, 2007; 唐菊兴等, 2009; 于玉帅等, 2011; 付强等, 2013)。不难发现在相似的成矿时代和相同的大地成矿背景下, 这一系列的大型矿床都具有相似的构造成矿专属性, 说明主碰撞期的板块“后旋”模式是冈底斯-念青唐古拉岩浆弧内的一种重要的成矿方式。列廷冈成岩成矿时代的确定, 证明了位于冈底斯-念青唐古拉岩浆弧内大型矿床成岩成矿构造活动大致都在 50~65 Ma, 构造活动不早于 65 Ma, 结束于 40~45 Ma(莫宣学等, 2003)。

5.2 岩浆与成矿专属性

锆石极强的稳定性使其 Hf 同位素组成较少受到后期地质事件影响, 极低的 Lu 含量可以获得锆石形成时准确的 Hf 同位素组成, 这些特性使锆石成为目前探讨地壳演化和示踪岩石源区的重要工具(Amelin *et al.*, 1999, 2000; Griffin *et al.*, 2002)。不同地球化学储源库具有明显不同的 Hf 同位素组成(吴福元, 2007)。当锆石初始 Hf 值为正值时, 说明岩体在形成时有较多幔源或是新生地壳物质加

入; 而初始 Hf 值偏负值, 说明岩体形成时壳源物质成分占主导地位。在列廷冈矿区中, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $-3.01 \sim 3$ 之间, Hf 同位素特征暗示花岗斑岩和花岗闪长岩很可能是壳幔物质混合而来。列廷冈岩体一阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1}) 平均为 0.7 Ga, 二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2}) 平均为 1.79 Ga, 也说明该岩体是冈底斯古新世岩浆与拉萨地体基底熔融形成, 同时辉钼矿的 Re 含量也显示成矿物质来源是壳幔混合的结果(杨毅等, 2014)。此外如前文所述。列廷冈花岗闪长岩样品的 Nb/U 值和 Nb/Ta 值显示与地壳微量元素地球化学特征相似, 物质来源有明显的地壳物质贡献, 是壳幔混源的结果; 另一方面, 列廷冈位于冈底斯弧背断隆带, 后者发育念青唐古拉群古老结晶基底, 年代学研究显示其形成时代为 862~1802 Ma(Harris *et al.*, 1988; 胡道功等, 2005)。列廷冈矿区岩体两阶段模式年龄与念青唐古拉群形成时代相似, 也佐证了物质来源具有地壳基底物质和地幔岩浆重熔的特点。

与中酸性浅成侵入岩有关的铁矿, 通常属于矽卡岩型铁矿的一种, 成矿专属性具有以下特点, 成矿元素组合为铁、铜、铅、锌、钴、钨、锡, 而矿体产出严格受岩体和围岩地层的接触带控制, 呈透镜状和扁豆状, 矿石结构构造多为块状和浸染状, 矿石矿物多为磁铁矿和硫化物, 脉石矿物主要为矽卡岩矿物和碳酸盐矿物, 围岩蚀变矽卡岩化和钠长石化, 规模中小-中大型, 矿石品位较高。矿化蚀变经历钠长石化-干矽卡岩化(即早期矽卡岩阶段)-湿矽卡岩化(即晚期矽卡岩阶段)-硫化物阶段-石英碳酸盐化, 而铁矿多形成于湿矽卡岩化阶段(张招崇等, 2014)。决定矽卡岩型铁多金属矿床的最关键因素是热源, 而多期次的岩浆侵入是保持稳定热源的重要保障。这种多期次的岩浆侵入表现为岩体岩性的复杂, 以列廷冈为例, 主要岩体有花岗闪长岩、花岗斑岩、二长花岗岩、闪长玢岩、辉长岩、辉绿岩等, 证明了岩性组合复杂是形成矽卡岩型铁多金属矿床的必要条件。

以冈底斯-念青唐古拉岩浆弧上已发现的典型矿床来看, ϵ_{Hf} 值具有以下特点: 加拉普花岗闪长岩($-9.1 \sim 4.3$)、加多捕勒黑云母二长花岗岩($-7.72 \sim 4.29$)、沙让角闪闪长岩($-1.5 \sim 1.6$)、亚贵拉喜马拉雅期石英斑岩($-5.6 \sim 3.1$)、勒青拉($-6.25 \sim 6.79$)变化范围相似, 极差小, 位于 0 附近, Hf 同位素组成不均一, Hf 同位素的正值很可能是新生地壳加入的结果, 所以, 岩石具有壳幔混源的特点。图7

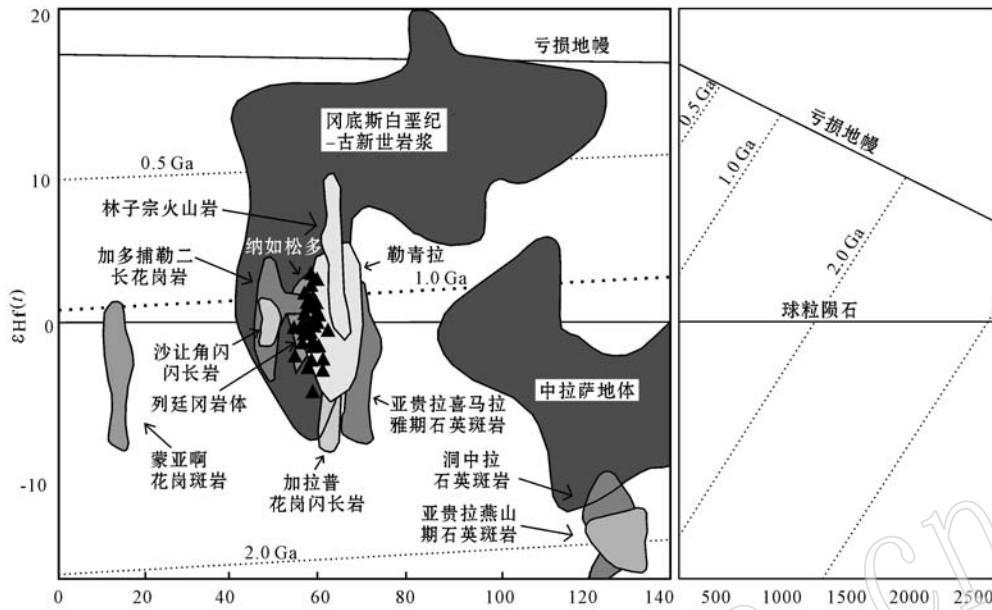


图 7 列廷冈岩体锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ -U-Pb 年龄图解[据 Amelin 等(1999)、付强等(2013)修改]

Fig. 7 Zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ -U-Pb age diagram of granodiorite in the Lietinggang deposit (after Amelin *et al.*, 1999; Fu Qiang *et al.*, 2013)

列廷冈数据来自本文,蒙亚啊数据据黄克贤等(2012);加拉普数据据付强等(2013);加多捕勒数据据于玉帅等(2011);林子宗数据据李皓扬等(2007);其他数据据高一鸣等(2011)

Lietinggang data after this text; Mengyaa data after Huang Kexian *et al.*, 2012; Jialapu data after Fu Qiang *et al.*, 2013;

Jiabuobule data after Yu Yushuai *et al.*, 2011; Linzizong data after Li Haoyang *et al.*, 2007; other data after Gao Yiming *et al.*, 2011

显示, ϵHf 值有较多部分重合,而蒙亚啊花岗斑岩 (-5.6~2.1)、洞中拉石英斑岩 (-19.7~-10.6)、亚贵拉燕山期石英斑岩 (-21.5~-7.8)与上述矿区 ϵHf 值具有明显的差别,主要为负值,成岩物质来源主要为壳源。通过以上两组不同 Hf 同位素组成矿床对比,说明位于冈底斯-念青唐古拉岩浆弧的大型矿床矿化过程中成矿物质的来源受成矿时代和成矿背景的影响,集中在 50~65 Ma 成矿的大型矿床具有 Fe-Cu-Mo-Pb-Zn 矿化,壳源物质和地幔物质在成矿过程中都具有重要的作用,成矿物质来源存在壳幔混源的特点,形成“列廷冈式矽卡岩型铁多金属矿床”或者“沙让式斑岩型钼矿床”。这些矿床都是在古老地壳的基础上,幔源物质的“底侵作用”形成成矿流体,最终形成大型矿床。同时,结合其他学者对冈底斯-念青唐古拉岩浆弧上典中组、年波组、林子宗组地层以及加拉普、龙马拉、加多捕勒等典型铁多金属矿床的研究成果(李皓扬等, 2007; 唐菊兴等, 2009; 付强等, 2013),也发现岩石主要是因为幔源物质与拉萨地体的混染作用形成,因而呈现出壳幔混源的特点。因此,从 Hf 同位素组成的角度来

看,在冈底斯-念青唐古拉岩浆弧上成矿时代在 50~65 Ma 的岩石中岩浆的混染作用是普遍存在的。而在其他成矿时代成矿的蒙亚啊、洞中拉、亚贵拉,显示出地壳物质在 Pb-Zn 成矿过程中起主导作用,形成“洞中拉式矽卡岩型铅锌矿床”。

5.3 区域找矿意义

冈底斯成矿带目前研究和勘查程度较高的是冈底斯成矿带拉孜-工布江达一带,拉屋-蒙亚啊-洞中拉-沙让-亚贵拉成矿亚带构成了冈底斯成矿带的北亚带(念青唐古拉成矿带)(唐菊兴等, 2012),带中细分为东带以斑岩型钼矿(沙让)、矽卡岩型铅锌矿(蒙亚啊、亚贵拉、龙玛拉、洞中拉等)为主,中西带为矽卡岩型铁多金属矿(甲拉普、勒青拉、洛巴堆、列廷冈、斯弄多)、隐爆角砾岩型-矽卡岩型铅锌(银)矿(纳如松多)。从冈底斯成矿带北亚带上已经发现的列廷冈、甲拉普、龙马拉、勒青拉等一系列的铁多金属矿床来看,该类矿床是该成矿亚带重要的组成部分,多以矽卡岩型铁铜铅锌矿为主,也是冈底斯成矿带北亚带重要的铁多金属矿成矿远景区,列廷冈与林周盆地已发现的勒青拉、普琼朗、加拉普等铁多金

属矿床构成冈底斯东段最具潜力的铁多金属成矿带。将该类型斑岩-矽卡岩型矿床的成矿地质条件、成矿规律作为区域找矿的指导,已经在洛巴堆、新嘎果等新发现的铁多金属矿床获得新的找矿成果,而列廷冈只是该类矿床中的一个典型矿床。这些铁多金属矿都具有相似的地质背景以及类似的成矿地质条件,矽卡岩型矿体受大理岩或灰岩与岩体之间层间破碎带控制,矿体稳定连续,后期构造破坏小,磁铁铁矿体埋藏较浅,深部与岩浆成矿作用有关的铜、钼、铅锌矿化将是今后找矿的方向。

6 结论

(1) 列廷冈花岗闪长岩的成岩年龄为 58.69 ± 0.68 Ma, 花岗斑岩成岩年龄为 60.69 ± 0.98 Ma, 成岩作用发生在印-亚陆-陆碰撞早期,与加拉普、勒青拉、沙让、亚贵拉等冈底斯-念青唐古拉岩浆弧上斑岩-矽卡岩矿床具有相似的成矿背景,成矿流体受底侵作用影响。

(2) 列廷冈矿区中 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 介于 $-3.01 \sim 3$ 之间, 岩浆源于冈底斯古新世岩浆与中拉萨地体基底熔融,在冈底斯成矿带北亚带大型矿床中, $65 \sim 50$ Ma 成矿的大型矿床具有 Fe-Cu-Mo-Pb-Zn 矿化特点,具有相似 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值特征,多集中于 0 值附近,广泛具有壳幔混源的成岩特点。

(3) 根据成矿系列理论,可由浅部的磁铁铁矿追索深部的 Cu、Mo 或 Pb、Zn 多金属矿体。以磁铁铁矿为找矿标志,利用“磁铁铁矿+碳酸盐岩+层间构造+斑岩”控矿的成矿模型,深部的 Cu、Mo、Pb、Zn 矿体将是今后找矿方向。

致谢 野外工作整理得到拉萨普信矿业的大力支持,室内工作得到唐菊兴研究员、王立强助理研究员的悉心指导,审稿专家及编辑老师提出宝贵的修改意见,在此一并致谢。

References

Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, *et al.* 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 399: 252~255.

Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of

single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 4 205~4 225.

Barth M G, McDonough W F and Rudnick R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 165: 197~213.

Dong Guochen, Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, *et al.* 2006. Magma mixing in middle part of Gangdise magma belt: Evidengce from granitoid complex[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 835~844(in Chinese with English abstract).

Fan Wenyu, Gao Dafa, Zhang Linkui, *et al.* 2009. Geological characteristics of the Leqingla iron deposit, Tibet, and their prospecting significance[J]. *Geology in China*, 34(1): 110~106(in Chinese with English abstract).

Fu Qiang, Yang Zhusen, Zheng Yuanchuan, *et al.* 2013. Zircon U-Pb ages, Hf isotope and geochemistry of granodiorite in Jialapu Fe deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 32(3): 564~578(in Chinese with English abstract).

Gao Yiming, Chen Yuchuan, Wang Chenghui, *et al.* 2011. Zircon Hf isotopic characteristics and constraints on petrogenesis of Mesozoic-Cenozoic magmatic rocks in Nyainqentanglha region, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 279~291(in Chinese with English abstract).

Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 120: 347~359.

Griffin WL, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon geochemistry and magma mixing, SE China: In situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237~269.

Harris N B W, Xu R H, Lewis C L, *et al.* 1988. Isotope geochemistry of the 1985 Tibet geotraverse, Lhsa to Golmud[J]. *Phil. Trans R. Soc. Lond. A*, 327: 263~285.

Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, *et al.* 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution[J]. *Earth and Planetray Science Letters*, 79: 33~45.

Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492(in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian, Wang Erqi, Mo Xuanxue, *et al.* 2008. Collisional Orogeny and Metallogenesis in Tibetan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~985(in Chinese with English abstract).

Hu Daogong, Wu Zhenhan, Jiang Wan, *et al.* 2005. SHRIMP U-Pb ages of zircons and Nd isotope from the Nyaiqentanglha, Tibet[J]. *Science China Ser. D*, 35(1): 29~37(in Chinese).

Huang Kexian, Zheng Yuanchuan, Zhang Song, *et al.* 2012. LA-ICP-

- MS zircon U-Pb dating of two types of porphyry in the Yaguila mining area, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 348~360(in Chinese with English abstract).
- Le Maitre R W. 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*[M]. Cambridge University Press, 33~39.
- Li Haoyang, Zhong Sunlin, Wang Yanbin, *et al.* 2007. Age, petrogenesis and geological significance of the Linzizong volcanic successions in the Linzhou basin, southern Tibet: Evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 493~500(in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rocks system[J]. *Earth Sciences Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135~148(in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Li Guangming, Zhao Junxing, *et al.* 2008. Discovery of sharing large-scale porphyry molybdenum deposit, the first Single Mo deposit in Tibet and its significance[J]. *Geology in China*, 35(6): 1101~1112(in Chinese with English abstract).
- Rudnick R and Gao S. 2003. *Composition of the continental crust*[A]. Holland HD and Turckian K K. *Treatise on geochemistry*[C]. Oxford: Elsevier-Pergamon, 1~64.
- Rui Zongyao, Hou Zengqian, Qu Xiaoming, *et al.* 2003. Metallogenetic Epoch of Gangdese Porphyry Copper Belt and Uplift of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Mineral Deposits*, 22(3): 217~225(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in oceanic basins* [C]. *Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 42:313~345.
- Tang Juxing, Chen Yuchuan, Wang Denghong, *et al.* 2009. Re-Os Dating of Molybdenite from the Sharang Porphyry Molybdenum Deposit in Gongbo'gyamda County, Tibet and Its Geological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 698~704(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Duo Ji, Liu Hongfei, *et al.* 2012. Mineralogical Series of Ore Deposits in the East Part of the Gangdese Metallogenic Belt[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 393~410(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, *et al.* 2013. Prospecting Breakthrough of the Deep Porphyry Ore Body and Its Significance in Jiama Copper Polymetallic Deposit, Tibet, China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 43(4): 1100~1111(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Tangjuxing, Zhengwenbao, *et al.* 2014. Study on Metallogeny of Main Molybdenum Polymetallic Deposits in the Eastern Section of the Gangdese Metallogenic Belt[J]. *Geological Review*, 60(2): 363~379(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 234: 105~126.
- Yang Deming, Li Cai and Wang Tianwu. 2001. Features and genesis of the north-south-trending tectonic belt in the eastern sector of the Gangdise Mountains, Tibet[J]. *Regional Geology of China*, 20(4): 392~397(in Chinese with English abstract).
- Yang Yi, Duo Ji, Liu Hongfei, *et al.* 2014. Re-Os dating of molybdenite from the Lietinggang iron polymetallic deposit of Tibet and its geological significance[J]. *Geology in China*, 41(5): 1554~1564(in Chinese with English abstract).
- Yu Yushuai, Yang Zhusen, Duo Ji, *et al.* 2011. Age and petrogenesis of magmatic rocks from Jialapu skarn Fe-Cu deposit in Tibet: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating, Hf isotope and REE[J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 420~434(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Li Houmin, *et al.* 2014. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1189~1204(in Chinese with English abstract).
- Zheng Youye, Duo Ji, Wang Ruijiang, *et al.* 2007. New Advances in the study of the gigantic Gangdise porphyry copper metallogenic zone, Tibet[J]. *Geology in China*, 34(2): 324~334(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiang and Cao Yougong. 1984. *Plate Tectonic-Lithofacies Map of Tibet*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~20(in Chinese).

附中文参考文献

- 董国臣, 赵志丹, 莫宣学, 等. 2006. 冈底斯岩浆带中段岩来自花岗岩杂岩的证据浆混合作用[J]. *岩石学报*, 22(4): 835~844.
- 范文玉, 高大发, 张林奎, 等. 2009. 西藏勒青拉铁矿床地质特征及其找矿意义[J]. *中国地质*, 34(1): 110~116.
- 付强, 杨竹森, 郑远川, 等. 2013. 加拉普铁矿区花岗闪长岩锆石

- U-Pb 年龄、Hf 同位素及地球化学研究[J]. 矿床地质, 32(3): 564~578.
- 高一鸣, 陈毓川, 王成辉, 等. 2011. 亚贵拉-沙让-洞中拉矿集区中新世岩体 Hf 同位素特征与岩浆源区示踪[J]. 矿床地质, 30(2): 279~291.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 侯增谦, 王二七, 莫宣学, 等. 2008. 青藏高原碰撞造山与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社. 1~985.
- 胡道功, 吴珍汉, 江 万, 等. 2005. 西藏念青唐古拉岩群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素研究[J]. 中国科学 D 辑, 35(1): 29~37.
- 黄克贤, 郑远川, 张 松, 等. 2012. 西藏亚贵拉矿区两期岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(3): 348~360.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135~148.
- 李皓扬, 锤孙霖, 王彦斌, 等. 2007. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代-成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 23(2): 493~500.
- 秦克章, 李光明, 赵俊兴, 等. 2008. 西藏首例独立钼矿-冈底斯沙让大型斑岩钼矿的发现及其意义[J]. 中国地质, 35(6): 1101~1112.
- 芮宗瑶, 侯增谦, 曲晓明, 等. 2003. 冈底斯斑岩铜矿成矿时代及青藏高原隆升[J]. 矿床地质, 22(3): 217~225.
- 唐菊兴, 陈毓川, 王登红, 等. 2009. 西藏工布江达县沙让斑岩钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 83(5): 698~704.
- 唐菊兴, 多 吉, 刘鸿飞, 等. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393~410.
- 唐菊兴, 郑文宝, 陈毓川, 等. 2013. 西藏甲玛铜多金属矿床深部斑岩矿体找矿突破及其意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1100~1111.
- 王立强, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 2014. 西藏冈底斯成矿带东段主要钼多金属矿床成矿规律研究[J]. 地质论评, 60(2): 363~379.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 杨德明, 李 才, 王天武. 2001. 西藏冈底斯东段南北向构造特征与成因[J]. 中国区域地质, 20(4): 392~397.
- 杨 毅, 多 吉, 刘鸿飞, 等. 2014. 西藏列廷冈铁多金属矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 41(5): 1554~1564.
- 于玉帅, 杨竹森, 多 吉, 等. 2011. 西藏加多捕勒铁铜矿成矿岩体时代与成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素与稀土元素证据[J]. 矿床地质, 30(3): 420~434.
- 张招崇, 侯 通, 李厚民, 等. 2014. 岩浆热液系统中铁的富集机制探讨[J]. 岩石学报, 30(5): 1189~1204.
- 郑有业, 多 吉, 王瑞江, 等. 2007. 西藏冈底斯巨型斑岩铜矿带勘查研究最新进展[J]. 中国地质, 34(2): 324~334.
- 周 详, 曹佑功. 1984. 西藏板块构造-建造图及说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1~20.