

doi:10.3799/dqkx.2016.083

# 西藏拉抗俄斑岩 Cu-Mo 矿床含矿斑岩地球化学、 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成

冷秋锋<sup>1</sup>, 唐菊兴<sup>2</sup>, 郑文宝<sup>2,3\*</sup>, 王保宏<sup>4</sup>, 唐攀<sup>1</sup>, 王豪<sup>1</sup>

1. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

2. 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, 北京 100037

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

4. 内蒙古地质矿产勘查院, 内蒙古呼和浩特 010010

**摘要:** 拉抗俄 Cu-Mo 矿床是冈底斯成矿带东段典型的斑岩型矿床, 前人对该矿床进行了初步的矿床地球化学研究, 但欠缺系统性. 在系统的野外地质调查基础上, 对拉抗俄斑岩 Cu-Mo 矿床的含矿斑岩开展了详细的地球化学和年代学研究, 旨在精确确定矿床含矿斑岩的成岩年龄、岩石成因及源区特征. 岩石地球化学特征显示, 含矿花岗闪长斑岩富硅, 相对贫镁和钙, SiO<sub>2</sub> 含量为 62.51%~72.41%, MgO 含量为 0.59%~1.30%, CaO 含量为 0.95%~3.44%; 碱含量高, Na<sub>2</sub>O 含量为 3.51%~4.75%, K<sub>2</sub>O 含量为 3.30%~4.97%; 偏铝质或弱的过铝质, A/CNK 比值为 0.90~1.01; 相对富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、U、Sr, 明显亏损 Nb、Ta、Ti、P、Zr 等高场强元素. 岩体稀土总量较低, 为 82.80×10<sup>-6</sup>~132.09×10<sup>-6</sup>; 富集轻稀土, 且轻重稀土分异明显; 具有弱的 Eu 负异常和弱 Ce 负异常. 采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年技术对含矿花岗闪长斑岩进行定年, 岩体成岩年龄为 13.58±0.42 Ma, 系中新世岩浆活动的产物. 锆石 ε<sub>Hf</sub>(t) 值为 -3.99~4.49, Hf 同位素两阶段模式年龄 t<sub>DM2</sub> 为 808~1349 Ma. 研究结果显示拉抗俄含矿花岗闪长斑岩具有埃达克岩地球化学特征, 其岩浆源区主要来源于新生地壳部分熔融的组分. 在岩浆侵位过程中遭受了古老地壳物质的混染, 岩石形成于印度-亚洲大陆碰撞造山带的后碰撞伸展构造背景.

**关键词:** 地球化学; 锆石 U-Pb 测年; Hf 同位素; 冈底斯成矿带; 西藏.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2016)06-0999-17

收稿日期: 2015-11-30

## Geochronology, Geochemistry and Zircon Hf Isotopic Compositions of the Ore-Bearing Porphyry in the Lakang'e Porphyry Cu-Mo Deposit, Tibet

Leng Qiufeng<sup>1</sup>, Tang Juxing<sup>2</sup>, Zheng Wenbao<sup>2,3\*</sup>, Wang Baohong<sup>4</sup>, Tang Pan<sup>1</sup>, Wang Hao<sup>1</sup>

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

4. Institute of Geological Survey and Mineral Exploration, Inner Mongolia, Hohhot 010010, China

**Abstract:** The Lakang'e Cu-Mo deposit is a typical porphyry deposit in the eastern Gangdese metallogenic belt, on which previous geochemical studies are not adequate and systematic. In this paper, we present the results of the systematic logging of drill-holes and provide new petrological zircon U-Pb age, and Hf isotope data for the deposit that allow the identification of the timing of formation and mineralization of the Lakang'e porphyry Cu-Mo deposit and the relationship between this deposit and other porphyry-type deposits in the Gangdese belt. Chemical analyses show that the ore-bearing granodiorite-porphyry has high SiO<sub>2</sub>,

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No. 2011CB403103); 国家自然科学基金项目(No. 41302060); 中国地质调查局项目(Nos. 12120114050501, 12120113093700).

**作者简介:** 冷秋锋(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学方面的研究. E-mail: lengqiufeng9@126.com

\* **通讯作者:** 郑文宝, E-mail: zhengwenbao2009@sina.com

**引用格式:** 冷秋锋, 唐菊兴, 郑文宝, 等, 2016. 西藏拉抗俄斑岩 Cu-Mo 矿床含矿斑岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成. 地球科学, 41(6): 999-1015.

low Mg and Ca ( $\text{SiO}_2=62.51\%$  to  $72.41\%$ ,  $\text{MgO}=0.59\%$  to  $1.30\%$ ,  $\text{CaO}=0.95\%$  to  $3.44\%$ ), highalkaline ( $\text{Na}_2\text{O}=3.51\%$  to  $4.75\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}=3.30\%$  to  $4.97\%$ ), metaluminous ( $A/\text{CNK}=0.90$  to  $1.01$ ), enriched in LILEs such as Rb, Ba, Th, U, Sr, and depleted in HFSEs such as Nb, Ta, Ti, P and Zr. The rocks also display low total REE contents ( $\sum\text{REE}=82.80\times 10^{-6}$  to  $132.09\times 10^{-6}$ ), enriched LREE and differentiate obviously, with weakly negative Eu and Ce anomalies. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating indicates that the Lakang'e ore-bearing granodiorite-porphry emplaced at  $13.58\pm 0.42$  Ma.  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values and two-stage model ages of zircons are  $-3.99$  to  $4.49$  and  $808$  to  $1349$  Ma respectively. The results indicate that the ore-bearing granodiorite-porphry in the Lakang'e deposit has adakite geochemical characteristics, and the parental magmas were mainly derived from a juvenile crust and partly mixed with old continental crust rock during the evolution. The porphyry in Lakang'e deposit was formed in post-collisional extension setting of India-Asia continental collision orogenic belt.

**Key words:** geochemistry; zircon U-Pb dating; Hf isotopic compositions; Gangdese metallogenic belt; Tibet.

## 0 引言

世界的屋脊青藏高原,不仅有与经典洋壳俯冲模式吻合的成岩成矿事件(Sillitoe, 1972; 曲晓明等, 2009; Zhu *et al.*, 2009, 2010; 唐菊兴等, 2010),也发生着一系列与大陆碰撞作用相关的成矿事件(Hou *et al.*, 2003, 2009; Qu *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2009),是探讨陆-陆碰撞造山动力学过程及其成矿作用的天然实验室(Yin and Harrison, 2000; Xu *et al.*, 2012). 岩浆作用作为研究青藏高原岩石圈构造演化的“窗口”与“探针”,其发生时间、位置以及熔融产物的类型和组成研究,可以再造造山带的构造演化历史(高永丰等, 2003). 西藏冈底斯造山带位于班公湖-怒江缝合带(BNSZ)与雅鲁藏布江缝合带(YZSZ)之间,该带因记录了青藏高原自古特提斯至新特提斯以来的构造演化、印度-亚洲大陆碰撞造山作用等重要地质信息而备受地质学界的关注(莫宣学等, 2005; 潘桂堂等, 2006; 王立全等, 2008; 朱弟成等, 2008; 王程等, 2014). 冈底斯带分布着大量的燕山晚期( $137\sim 70$  Ma)、喜山早期( $54\sim 24$  Ma)和喜山晚期( $24\sim 10$  Ma)花岗岩类岩石(高永丰等, 2003). 冈底斯成矿带东段中新世构造-岩浆活动频繁,直接导致了冈底斯成矿作用的大爆发. 随着研究和勘查程度的深入,西藏冈底斯带在东至工布江达县、西至谢通门县、东西长约  $500$  km、南北宽近  $50$  km 的范围内,已有雄村、驱龙、甲玛、邦铺、拉抗俄、冲江、吉如、朱诺、白容、厅官、沙让等众多的斑岩型矿床被学者发现,已具有成为继玉龙之后的西藏第二条斑岩铜矿带的潜力(侯增谦和王二七, 2008). 甲玛、驱龙、邦铺、拉抗俄等与斑岩有关的 Cu、Mo 多金属矿床是该时期构造-岩浆-成矿作用的集中反映.

拉抗俄斑岩 Cu-Mo 矿床位于冈底斯成矿带南

部东段,是 20 世纪 80 年代进行区域化探扫描时发现的化探异常点,随后 20 世纪 90 年代到 21 世纪初西藏自治区地质调查院对该矿区相继进行了异常二级查证工作和矿点检查工作(据西藏达孜县拉抗俄铜矿调查评价报告, 2013),但总体上,矿区的研究程度相对较低. 近年来,随着地质大调查项目的深入,对该矿床的公益性勘查评价和科学研究才得以大力开展. 尽管前人对矿床进行了初步的矿床地球化学研究,并开展了初步的蚀变和成矿年龄研究(曲晓明等, 2003; 侯增谦等, 2003),但欠缺系统性,为了更好获得该矿床的成岩成矿年代学资料,本文在系统的野外地质调查基础上,对拉抗俄斑岩铜钼矿床的含矿斑岩开展了详细的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究,旨在精确厘定矿床含矿斑岩的成岩年龄、岩石成因及源区特征,揭开其复杂的成岩成矿历史,确定矿床与冈底斯成矿带其他斑岩型矿床的时空关系,总结研究同类矿床分布规律. 这一研究既有助于丰富和完善冈底斯斑岩铜矿带成岩成矿理论研究工作,同时对深化和丰富斑岩成矿作用研究具有重要参考价值.

## 1 区域地质背景

拉抗俄斑岩 Cu-Mo 矿床大地构造位置处于西藏特提斯构造域拉萨地块东段中南部,拉萨地块夹持于雅鲁藏布江缝合带与班公湖-怒江缝合带之间(图 1),又被称作冈底斯-念青唐古拉板片(周详和曹佑功, 1984)或者冈底斯造山带(潘桂堂等, 2006). 冈底斯东段先后经历了班公湖-怒江古特提斯洋壳向南俯冲、雅鲁藏布江新特提斯洋形成、雅鲁藏布江新特提斯洋壳向北俯冲消亡、印度大陆与拉萨地块陆陆碰撞等构造发展演化历程,形成了错综复杂的构造格局,主体表现为区域性 EW 向压性断裂、褶

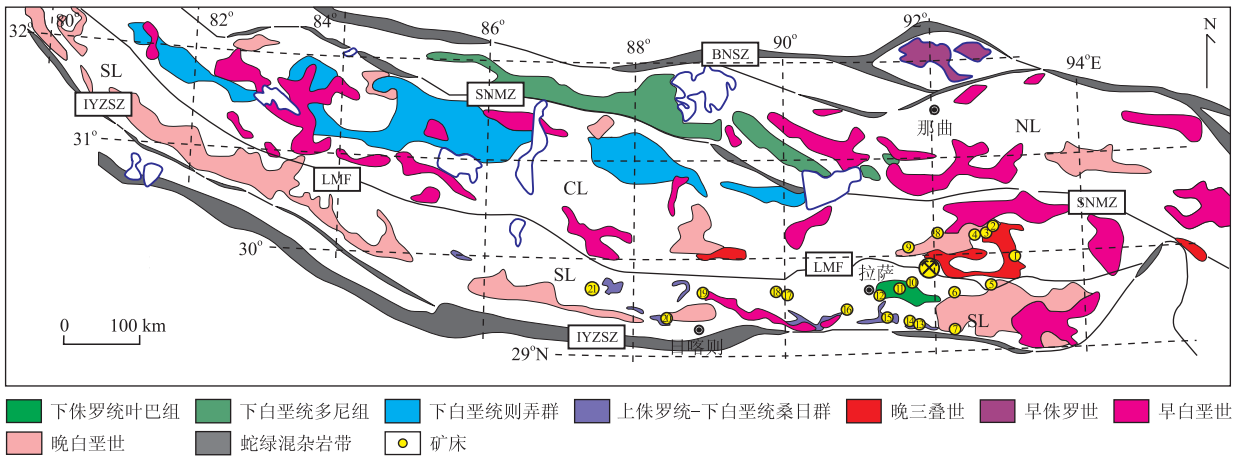


图 1 冈底斯成矿带地质简图及主要斑岩-矽卡岩矿床分布

Fig. 1 Geological sketch of the Gangdese metallogenic belt showing the major ore deposit

矿床: 1. 汤不拉; 2. 亚贵拉; 3. 沙让; 4. 洞中拉; 5. 吹败子; 6. 弄如日; 7. 冲木达; 8. 蒙亚啊; 9. 哈海岗; 10. 甲玛; 11. 驱龙; 12. 拉抗俄; 13. 程巴; 14. 努日; 15. 克鲁; 16. 达布; 17. 厅官; 18. 冲江; 19. 吉如; 20. 雄村; 21. 朱诺. SL. 南冈底斯; CL. 中冈底斯; NL. 北冈底斯; BNSZ. 班公湖-怒江缝合带; SNMZ. 狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带; LMF. 洛巴堆-米拉山断裂带; IYZSZ. 印度河-雅鲁藏布江缝合带; 底图据 Zheng *et al.* (2014) 修改

褶皱和 NS 向张性断裂以及 NE、NW 向走滑断裂(杨德明等, 2001). 伴随复杂的构造演化历程, 区域内岩浆活动强烈, 侵入岩和火山岩广泛发育且具有多期次、多类型、岩石组合复杂等特点. 区域岩浆侵入主要发生于侏罗纪、白垩纪、古近纪和新近纪; 冈底斯东段二叠纪岩浆活动相对较弱, 岩浆岩不甚发育; 三叠纪岩浆岩分布局限, 侵位时代多属于晚三叠世. 区域火山喷发活动主要发生于早一中侏罗世、早白垩世、晚白垩世-始新世. 冈底斯东段矿产资源十分丰富、优势矿种繁多, 主要金属矿产种类包括铜、铅、锌、金、银、钼、铁、钨、锡、铋、钴等, 此外还发育有盐类、铀等非金属矿产和能源矿产. 其中, 铜、铅、锌、金等优势矿种具有储量大、品位高、开采条件佳等特点, 目前冈底斯成矿带已成为国家重要的资源基地, 其东段部分矿床分布见图 1.

## 2 矿区地质概况

矿区出露地层为叶巴组一、二段, 多底沟组及第四系(图 2). 叶巴组一岩段( $J_{1-2}y^1$ )分布于矿区中部, 呈近 EW 向展布, 产状总体倾向北, 倾角陡立, 主要岩性为片理化安山岩、中基性火山角砾岩、绢云石英片岩, 绿泥石英片岩及凝灰岩. 岩石片理化发育, 变形变质特征明显. 叶巴组二岩段( $J_{1-2}y^2$ )分布于矿区北部, 与一岩段呈整合接触, 呈近 EW 向展布, 主要岩性为火山角砾岩、晶屑凝灰岩夹变质细砂岩、砂板岩等. 多底沟组( $J_3d$ )分布于矿区南部, 与叶巴组呈

断层接触, 主要岩性为细晶灰岩、生物碎屑灰岩及大理岩化灰岩夹砂岩, 岩石大理岩化及矽卡岩化显著. 第四系(Q)主要沿水系河床及阶地分布, 主要为全新统洪冲积砾石、砂砾石及含亚砂土层. 矿区断裂构造发育, 主要断裂构造呈 EW 向展布, 次级断裂呈 NW 或 NE 向展布(图 2). 矿区侵入岩主要分布于矿区中东部和西部(图 2), 分布面积约占矿区面积的 20%, 为喜山期中酸性侵入岩. 岩石类型以花岗闪长斑岩为主, 其次为花岗斑岩, 另外钻孔中可见石英闪长玢岩. 火山岩主要分布于矿区中部、北部地区, 出露大面积的侏罗系叶巴组火山岩地层, 出露约占矿区面积的 60%, 主要岩石类型有侏罗系叶巴组的火山熔岩、火山角砾岩、凝灰岩等.

矿区蚀变类型丰富, 主要有钾化、硅化、绢云母化、高岭土化及角岩化, 其次为矽卡岩化和大理岩化. 钾化带: 主要分布于花岗闪长斑岩近中心部位, 表现为次生黑云母、钾长石呈细脉或团斑状产出, 钾长石与石英共生组合组成细脉, 黑云母呈鳞片状交代角闪石, 石英具次生加大现象. 石英绢云母化带: 主要位于花岗闪长斑岩体的内接触带及钾化带两侧, 表现为石英呈脉状沿裂隙充填, 石英有交代熔蚀、次生加大现象. 绢云母交代斜长石、钾长石, 呈团块状、脉状分布. 高岭土化、硅化绢云母带: 该带为发育范围最广的蚀变带, 受多种蚀变叠加, 最常见的是高岭土化和绢云母化, 高岭石和绢云母主要是长石等矿物蚀变产物, 生成以高岭石为主的多种次生粘土矿物呈团块状分布, 该带金属硫化物少, 矿化差.

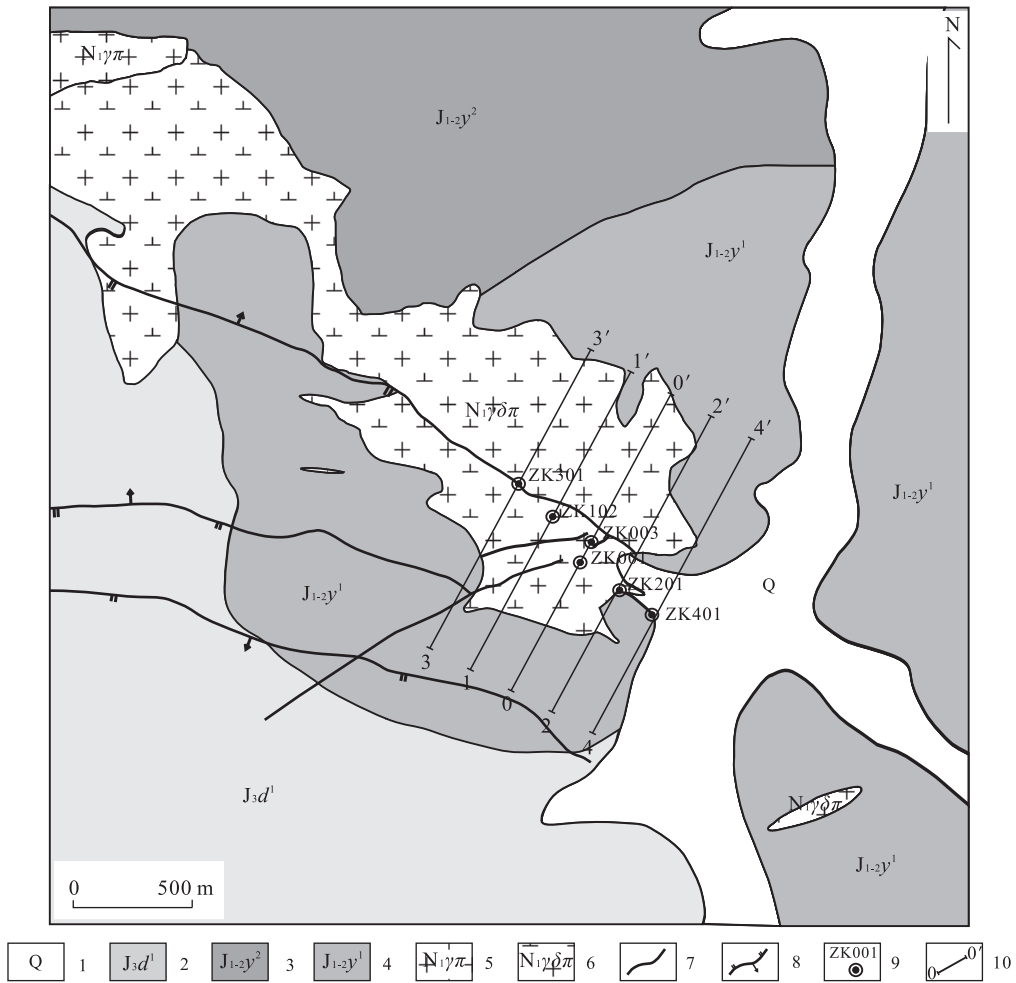


图 2 拉抗俄矿区地质简图

Fig. 2 Geological sketch of Lakang'e mining area

1. 第四系残坡积物、冲洪积物; 2. 上侏罗统多底沟组一段; 3. 中下侏罗统叶巴组二段; 4. 中下侏罗统叶巴组一段; 5. 花岗斑岩; 6. 花岗闪长斑岩; 7. 地质界线; 8. 实测断层; 9. 钻孔及编号; 10. 勘探线及编号

黑云母角岩化带: 分布范围受斑岩体与地层接触带控制, 呈港湾状分布, 表现为硅铝质岩石受热变质作用, 原岩结构构造发生变化, 形成具鳞片变晶结构的黑云母角岩, 该带无矿化显示。大理岩化带: 为蚀变分布的最外带, 分布于多底沟组中, 由于碳酸盐地层发育, 受热接触变质生成大理岩。其中, 铜钼矿化与石英绢云母化及钾化蚀变关系密切。

### 3 样品采集与分析测试

#### 3.1 采样位置及样品特征

本次用于锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究的样品采集于矿区 ZK201 钻孔中的含矿花岗闪长斑岩(图 2), 岩石地球化学样品分别采集于钻孔 ZK101(3 件)和 ZK201(3 件)。花岗闪长斑岩呈灰白色, 斑状结构, 块状构造(图 3a)。斑晶含量为 25%~

35%, 主要为斜长石(>15%)、石英(约 10%)、角闪石(<5%)和少量黑云母(<3%)(图 3b)。斑晶呈分散和无序状分布, 发育熔蚀结构。斜长石斑晶, 中一细粒自形板状, 少许被熔蚀呈浑圆或不规则粒状, 聚片双晶较发育; 石英斑晶, 细粒多被熔蚀呈浑圆粒状或由少许颗粒组成的团斑状聚斑晶组成, 波状消光较强烈, 晶体边缘常具次生加大边。角闪石斑晶, 中一细粒自形长柱状, 部分具菱形横切片, 半定向构造, 多被绿泥石及碳酸盐交代, 局部被浅色云母交代, 边缘多被黑云母交代, 含少许细粒铁质; 基质为长英质, 微粒粒状结构, 主要为斜长石(>45%)、石英(20%)、角闪石(<15%)和少量黑云母(<3%)。副矿物为锆石+榍石+磷灰石+磁铁矿±钛铁矿。

#### 3.2 锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素测定

本次样品破碎和锆石挑选由河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成, 破碎后样品经淘洗

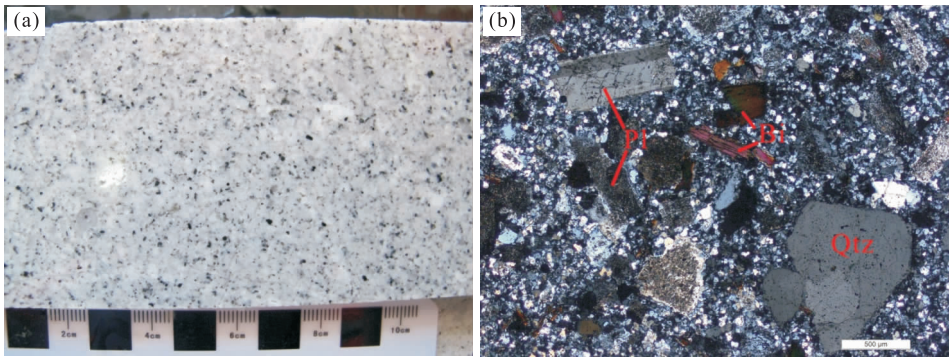


图 3 拉抗俄矿床含矿花岗闪长斑岩手标本及正交偏光镜下照片

Fig. 3 Photograph and microphotograph of ore-bearing granodiorite-porphphyry in Lakang'e deposit

Qtz. 石英; Bt. 黑云母; Pl. 斜长石

除去比重轻的矿物,采用浮选和磁选分选出锆石,在双目镜下挑选晶形、色泽较好、透明度高的锆石颗粒进行制靶(宋彪等,2002),然后利用阴极发光(CL)显微照相观察锆石的内部结构,避开包裹体、裂隙及残留核,最后选择合适的测点进行分析. 锆石 U-Pb 分析在中国地质科学院矿产资源研究所 LA-ICP-MS 实验室完成. 锆石年龄计算以国际标准锆石 91500 为外标. 测试结果用 GLITTER(ver4.0) 软件计算得出,并按照 Andersen(2002)的方法进行普通铅校正,之后用 Isoplot 程序完成年龄计算及谐和图绘制. 具体分析步骤和数据处理过程参见文献(Gao *et al.*, 2002; 柳小明等,2002; 侯可军等,2009).

锆石颗粒 Lu-Hf 同位素测试分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成. 采用 Nu PlasmaHR (Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)进行分析. 分析过程中斑束直径为 44  $\mu\text{m}$ ,每个分析点的气体背景采集时间为 30 s,信号采集时间为 40 s. 在样品测定期间,对标准参考物质 91500 和 GJ-1 进行分析,详细的分析测试技术及方法见 Yuan *et al.* (2008).

### 3.3 主量元素和微量元素分析

岩石主量元素和微量元素分析均在西南冶金地质测试所完成. 主量元素采用 X 荧光光谱法(XRF)分析,FeO 采用氢氟酸、硫酸分解,重铬酸钾法测定,分析精度优于 2%;微量元素采用等离子质谱(ICP-MS)分析方法,测试精度优于 5%.

## 4 测试结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年代学

根据锆石 CL 形态特征,花岗闪长斑岩中分选

出来的锆石均无色透明,呈短柱状或长柱状,其长轴长度为 100~200  $\mu\text{m}$ ,长短轴之比多为 2:1~3:1,自形程度较好,具有明显的震荡环带,均为岩浆锆石(Hanchar and Miller, 1993; 吴元保和郑永飞, 2004; 杨振等,2014).

笔者对花岗闪长斑岩中分选出来的锆石进行了 9 个点的测定(图 4),LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 1. 样品中 U 含量为  $1\,054.51 \times 10^{-6} \sim 3\,800.91 \times 10^{-6}$ ; Th 含量为  $707.50 \times 10^{-6} \sim 14\,711.74 \times 10^{-6}$ ; Th/U 比值为 0.67~3.87,大于 0.1,属于岩浆成因锆石(Belousova *et al.*, 2002; 周涛发等,2011; 张硕等,2014).  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 12.56~15.86 Ma,用 Isoplot 3.0 程序对锆石测年数据进行谐和曲线的投影和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄的计算. 在  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谐和图上(图 5),所有数据分析点均分布在谐和曲线或其附近一个较小区域内,谐和年龄为  $13.58 \pm 0.42$  Ma

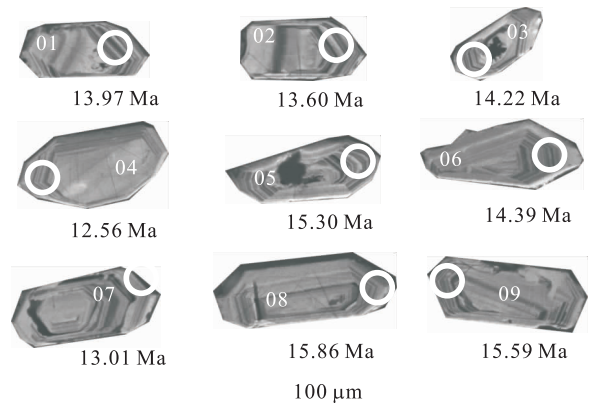


图 4 含矿花岗闪长斑岩锆石 CL 照片

Fig. 4 CL images of zircons from the ore-bearing granodiorite-porphphyry

表 1 拉抗俄矿床含矿花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses of the ore-bearing granodiorite-porphry in Lakang'e deposit

分析点号	组成( $10^{-6}$ )		Th/U	同位素比值				年龄(Ma)							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$				
1	3 408.84	1 874.23	1.82	0.048 83	0.010 02	0.014 88	0.003 18	0.002 17	0.000 10	138.98	422.17	15.00	3.18	13.97	0.62
2	4 429.35	2 355.40	1.88	0.048 33	0.003 22	0.014 07	0.000 96	0.002 11	0.000 04	122.31	142.57	14.19	0.96	13.60	0.27
3	2 717.49	1 351.95	2.01	0.046 02	0.006 03	0.014 42	0.003 03	0.002 21	0.000 21	error	error	14.54	3.03	14.22	1.37
4	2 424.72	1 544.63	1.57	0.048 02	0.008 41	0.013 34	0.002 95	0.001 95	0.000 13	101.94	375.88	13.46	2.95	12.56	0.81
5	707.50	1 054.51	0.67	0.053 07	0.014 73	0.015 94	0.003 03	0.002 38	0.000 19	331.54	531.11	16.06	3.02	15.30	1.23
6	1 870.43	1 360.07	1.38	0.051 36	0.011 59	0.015 08	0.003 09	0.002 24	0.000 13	257.47	448.10	15.19	3.09	14.39	0.82
7	2 931.11	3 478.54	0.84	0.050 55	0.009 81	0.013 95	0.002 55	0.002 02	0.000 05	220.44	396.25	14.07	2.56	13.01	0.31
8	1 799.15	1 552.69	1.16	0.048 20	0.009 44	0.016 25	0.003 69	0.002 46	0.000 31	109.35	407.36	16.36	3.68	15.86	2.00
9	14 711.74	3 800.91	3.87	0.050 76	0.006 49	0.016 48	0.001 97	0.002 42	0.000 08	231.55	270.34	16.60	1.97	15.59	0.53

表 2 拉抗俄矿床含矿花岗闪长斑岩主量元素含量(%)、CIPW 标准矿物及相关参数

Table 2 Major oxide compositions (%) with calculated CIPW-normative minerals and parameters of the ore-bearing granodiorite-porphry in Lakang'e deposit

样品编号—深度(m)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量	总量	SI	AR	AKI	DI
ZK201-26.8	67.40	14.61	0.97	3.07	1.03	1.90	4.56	3.30	0.34	0.060	0.14	2.01	99.39	/	/	/	/
ZK201-86.0	62.51	15.51	1.15	2.63	1.30	3.44	4.48	3.43	0.53	0.060	0.21	4.06	99.32	/	/	/	/
ZK201-47.8	66.45	14.96	0.84	2.71	1.12	1.99	4.72	3.45	0.39	0.050	0.16	2.64	99.48	/	/	/	/
ZK101-109.7	72.42	12.84	0.44	1.89	0.67	0.95	3.51	4.97	0.24	0.050	0.09	1.35	99.42	/	/	/	/
ZK101-140.2	71.92	13.33	0.65	1.87	0.68	1.06	3.67	4.92	0.24	0.040	0.10	1.06	99.54	/	/	/	/
ZK101-431.8	69.80	14.42	0.84	1.38	0.59	1.95	4.75	3.48	0.24	0.003	0.08	2.12	99.64	/	/	/	/

样品编号—深度(m)	Q	An	Ab	Or	C	Di	Hy	Il	Mt	Ap	A/CNK	A/NK	SI	AR	AKI	DI
ZK201-26.8	21.62	8.72	39.60	20.05	0.44	/	7.13	0.66	1.44	0.34	1.01	1.32	7.97	2.82	0.76	81.27
ZK201-86.0	14.67	12.68	39.78	21.30	/	3.13	5.12	1.06	1.75	0.51	0.90	1.40	10.00	2.43	0.72	75.75
ZK201-47.8	19.23	9.10	41.20	21.08	0.24	/	6.74	0.77	1.25	0.39	0.99	1.30	8.72	2.86	0.77	81.51
ZK101-109.7	29.47	4.20	30.29	29.97	0.17	/	4.57	0.46	0.65	0.21	1.00	1.15	5.83	4.20	0.87	89.73
ZK101-140.2	27.98	4.70	31.53	29.55	0.27	/	4.33	0.47	0.95	0.23	1.00	1.17	5.77	3.96	0.85	89.06
ZK101-431.8	24.29	7.97	41.19	21.07	/	1.16	2.43	0.46	1.24	0.19	0.95	1.24	5.35	3.02	0.80	86.55

注: Q, 石英; An, 钙长石; Ab, 钠长石; Or, 钾长石; C, 刚玉; Di, 透辉石; Hy, 紫苏辉石; Il, 钛铁矿; Mt, 磁铁矿; Ap, 磷灰石; A/CNK =  $n(\text{Al}_2\text{O}_3)/[n(\text{CaO}) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})]$ ; A/NK =  $n(\text{Al}_2\text{O}_3)/[n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})]$ ; AKI =  $[n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O})]/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ; SI, 固结指数; AR, 莱特碱度率; DI, 分异指数。

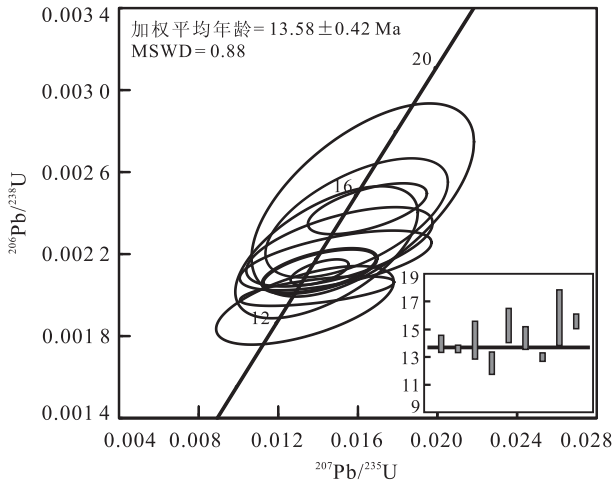


图 5 含矿花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年谐和图解

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram from the ore-bearing granodiorite-porphry

( $n=9$ , MSWD=0.88), 代表了拉抗俄矿床含矿花岗闪长斑岩的成岩年龄。

#### 4.2 主量元素、微量元素及稀土元素

本次研究对矿区 6 件含矿花岗闪长斑岩进行了主量、微量和稀土元素的分析测试, 主量元素测试数据列于表 2。含矿花岗闪长斑岩主量元素具有如下特征。(1) 富硅, 相对贫镁和钙。SiO<sub>2</sub> 含量为 62.51%~72.41%, MgO 含量为 0.59%~1.30%, CaO 含量为 0.95%~3.44%。岩石分异程度较高, 分异指数(DI)为 75.75~89.73。(2) 碱含量高, Na<sub>2</sub>O 含量为 3.51%~4.75%, K<sub>2</sub>O 含量为 3.30%~4.97%, K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 含量为 7.54%~8.59%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值为 0.71~1.42。岩石的碱铝指数(AKI 值)为 0.72~0.87, 岩石的碱度率指数

(AR)为 2.43~4.20, 按碱性、偏碱性和钙碱性 AKI 值分界线(>1.0、0.9~1.0 和 <0.9), 该岩体可归属于钙碱性岩石。在图 6a 中, 样品主要位于高钾钙碱性系列范围内。(3) 偏铝质或弱的过铝质。A/CNK 比值为 0.90~1.01, A/NK 比值为 1.15~1.40, 在图 6b 中样品均位于偏铝质或弱过铝质范围内。(4) 低 TiO<sub>2</sub> 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>。TiO<sub>2</sub> 含量为 0.24%~0.53%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 0.08%~0.21%, 表明岩浆经历了显著的钛铁矿、磷灰石等矿物的分离结晶作用。

矿区含矿花岗闪长斑岩稀土元素及其他微量元素分析结果见表 3。数据表明, 岩体总体表现为稀土总量较低, 为  $82.80 \times 10^{-6} \sim 132.09 \times 10^{-6}$ ; 富集轻稀土, 且轻重稀土分异明显, LREE/HREE = 17.51~19.77, (La/Yb)<sub>N</sub> = 29.65~41.05; 具有弱的 Eu 负异常, Eu/Eu\* 值为 0.88~1.05, 具弱 Ce 负异常, Ce/Ce\* 值为 0.74~0.94; 在球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线中, 总体呈现陡右倾的特征(图 7a), 与冈底斯成矿带大多数成矿斑岩稀土特征一致(高永丰等, 2003)。岩体微量元素分析结果及其原始地幔标准化蛛网图显示花岗闪长斑岩微量元素组成特征基本一致, 表现为大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、U、Sr 相对富集, 而高场强元素 Nb、Ta、Ti、P、Zr 等元素明显亏损(图 7b)。

#### 4.3 锆石 Hf 同位素特征

本次研究在锆石 U-Pb 年代学测试的基础上, 对样品中颗粒较大的锆石进行了 Hf 同位素分析测试, 结果列于表 4。花岗闪长斑岩锆石 7 个测试点 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 为 0.000734~0.002967; <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值为 0.282650~0.282891, 变化范围很小; 笔者计算得到的 ε<sub>Hf</sub>(t) 值为 -3.99~4.49。Hf 同位素单阶

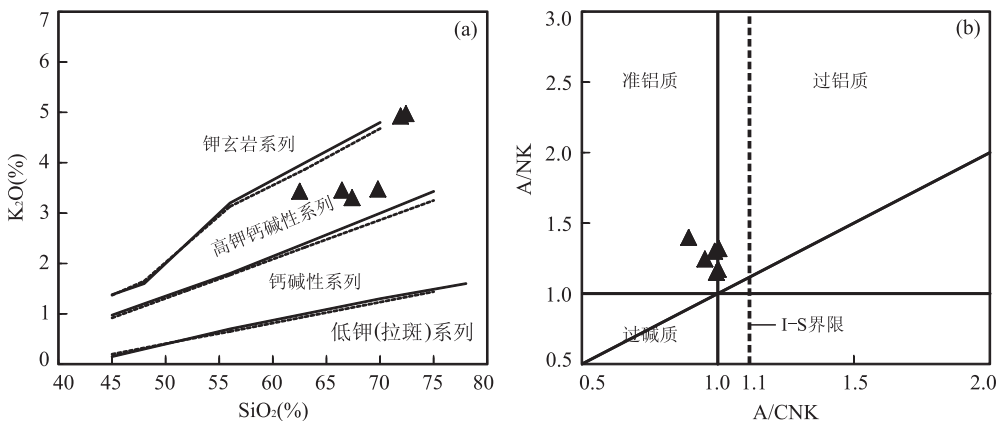


图 6 拉抗俄含矿斑岩 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (a)、A/CNK-A/NK 关系(b)

Fig. 6 Relations of SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (a)、A/CNK-A/NK (b) from the Lakang'e ore-bearing porphyry

表 3 拉抗俄矿床含矿花岗岩闪长斑岩微量及稀土元素含量(10<sup>-6</sup>)及相关参数

Table 3 Results of trace and REE compositions (10<sup>-6</sup>) and parameters of the ore-bearing granodiorite-porphyry in Lakang'e deposit

样品编号—深度(m)	Rb	Ba	Th	U	K	Ta	Nb	Sr	Nd	P	Zr	Hf	Sm	Ti	Y	Yb	Lu	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/						
ZK201-26.8	94	538	5.74	1.43	27419	0.27	1.68	594	21.92	623	102	2.89	3.55	2034	5.62	0.49	0.08	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
ZK201-86.0	92	648	3.79	1.89	28498	0.19	2.39	688	29.64	923	114	1.63	4.91	3195	4.92	0.44	0.06	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
ZK201-47.8	119	729	5.26	1.41	28673	0.21	1.86	509	31.33	709	112	3.22	4.78	2347	6.09	0.53	0.08	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
ZK101-109.7	145	1416	8.49	2.41	41291	0.13	1.29	392	18.70	397	89	1.30	2.90	1423	5.35	0.42	0.07	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
ZK101-140.2	132	737	7.11	2.09	40876	0.11	1.11	483	18.44	422	94	2.78	2.84	1456	3.92	0.42	0.07	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
ZK101-431.8	82	602	7.58	2.16	28864	0.13	1.25	548	20.70	357	113	3.27	3.09	1415	5.49	0.56	0.09	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
样品编号—深度(m)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	∑REE	LREE	HREE	LREE/HREE	La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	Eu <sub>N</sub> /Ce <sub>N</sub>																
ZK201-26.8	23.79	40.88	5.08	21.92	3.55	1.06	2.42	0.27	1.11	0.20	0.61	0.08	0.49	0.08	5.62	101.54	96.28	5.26	18.31	34.68	1.05	0.87															
ZK201-86.0	23.44	48.23	6.54	29.64	4.91	1.34	3.26	0.34	1.25	0.21	0.58	0.07	0.44	0.06	4.92	120.32	114.10	6.22	18.35	38.66	0.96	0.94															
ZK201-47.8	30.10	50.96	7.36	31.33	4.78	1.19	3.14	0.34	1.30	0.24	0.66	0.08	0.53	0.08	6.09	132.09	125.73	6.36	19.77	41.05	0.88	0.81															
ZK101-109.7	18.98	32.64	4.49	18.70	2.90	0.82	1.99	0.22	0.88	0.17	0.48	0.06	0.42	0.07	5.35	82.80	78.52	4.28	18.33	32.33	0.99	0.84															
ZK101-140.2	18.66	35.29	4.31	18.44	2.84	0.84	2.02	0.22	0.87	0.16	0.46	0.06	0.42	0.07	3.92	84.66	80.39	4.27	18.81	32.10	1.02	0.93															
ZK101-431.8	23.29	34.37	5.01	20.70	3.09	0.84	2.16	0.25	1.04	0.20	0.60	0.08	0.56	0.09	5.49	92.28	87.29	4.99	17.51	29.65	0.94	0.74															

注:Eu/Eu\* = 2Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>);Ce/Ce\* = 2Ce<sub>N</sub>/(La<sub>N</sub>+Pr<sub>N</sub>).

表 4 拉抗俄矿床花岗岩闪长斑岩锆石 Hf 同位素组成

Table 4 Hf isotope composition of zircons from the ore-bearing granodiorite-porphyry in Lakang'e deposit

测点	年龄(Ma)	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	1σ	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf(t)	ε <sub>Hf</sub> (t)	ε <sub>Hf</sub> (0)	t <sub>DM1</sub> (Ma)	t <sub>DM2</sub> (Ma)	f <sub>Lu/Hf</sub>
2	13.60	0.039932	0.001656	0.282891	0.000011	0.282887	4.21	4.49	521	808	-0.95
3	14.22	0.019518	0.000852	0.282777	0.000014	0.282955	0.16	0.47	672	1065	-0.97
4	12.56	0.084787	0.002967	0.282823	0.000013	0.282854	1.80	2.05	642	962	-0.91
5	15.30	0.016333	0.000734	0.282650	0.004367	0.259309	-4.32	-3.99	848	1349	-0.98
6	14.39	0.021006	0.000885	0.282749	0.000013	0.282897	-0.83	-0.52	712	1128	-0.97
7	13.01	0.020204	0.000919	0.282738	0.000011	0.282975	-1.19	-0.91	727	1152	-0.97
8	15.86	0.016218	0.000783	0.282691	0.000014	0.282967	-2.88	-2.54	792	1257	-0.98

注:ε<sub>Hf</sub>(t) = 10000 × [(<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>HD)<sub>S</sub> - (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>HD)<sub>CHUR,0</sub> - (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>HD)<sub>CHUR,t</sub> × (e<sup>λt</sup> - 1)] / [(<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>HD)<sub>S</sub> - (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>HD)<sub>DM,t</sub>]; t<sub>DM1</sub><sup>C</sup> = 1/λ × ln[1 + ((<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>HD)<sub>S,t</sub> - (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>HD)<sub>DM,t</sub>] / [(<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>HD)<sub>CHUR,0</sub> - (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>HD)<sub>DM,t</sub>]; t<sub>DM2</sub><sup>C</sup> = 1/λ × ln[1 + ((<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>HD)<sub>S,t</sub> - (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>HD)<sub>DM,t</sub>] / [(<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>HD)<sub>CHUR,0</sub> - (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>HD)<sub>DM,t</sub>] + t; 球粒陨石及亏损地幔现在的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf和<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf同位素比值分别为 0.28277 和 0.03325, 0.28325 和 0.0384; 据 Blücher-Toft and Albarède(1997)和 Griffin et al. (2000); λ = 1.867 × 10<sup>-11</sup> a<sup>-1</sup>, 据 Söderlund et al. (2004); (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>HD)<sub>C</sub> = 0.015, t<sub>0</sub> 锆石结晶年龄; 进行数据处理时,<sup>176</sup>Lu 的衰变常数采用 1.867 × 10<sup>-11</sup> a<sup>-1</sup>, 据 Soderlund et al. (2004); ε<sub>Hf</sub>(t) 值的计算利用 Bouvier et al. (2008) 推荐的球粒陨石的(<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>HD)比值(0.282772)及<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值(0.0332); Hf 模式年龄计算时采用当前亏损地幔的(<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>HD)比值(0.28325)和(<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>HD)比值(0.015), 据 Amelin et al. (1999).



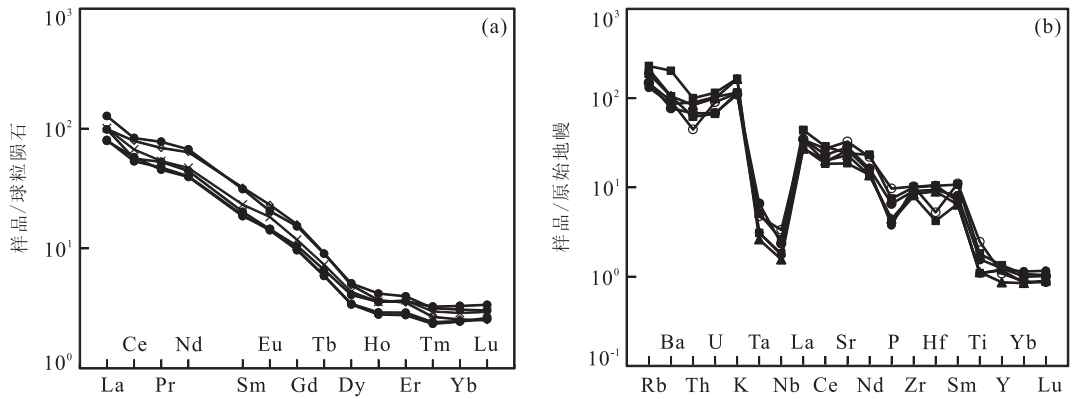


图7 拉抗俄含矿斑岩稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of the ore-bearing porphyry in Lakang'e deposit

a. 球粒陨石数据, 据 Sun and McDonough (1989); b. 原始地幔数据, 据 McDonough *et al.* (1992)

段模式年龄  $t_{DM1}$  为 521~848 Ma; 两阶段模式年龄  $t_{DM2}$  为 808~1 349 Ma.

## 5 讨论

### 5.1 成岩时代与区域构造岩浆演化

精确的成岩成矿年代学是分析矿床成因、阐明成矿规律和理解成矿作用与地球动力学背景的关键(聂风军等, 2007), 在斑岩型矿床研究中, 成矿岩体锆石 U-Pb 年龄与辉钼矿 Re-Os 年龄相互印证. 结合矿床地质特征, 本文得到的拉抗俄斑岩 Cu-Mo 矿床含矿花岗岩闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄为  $13.58 \pm 0.42$  Ma ( $n=9$ , MSWD=0.88), 代表了矿床含矿花岗岩闪长斑岩的成岩年龄. 该年龄数据与矿区的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 ( $13.12 \pm 0.44$  Ma; 冷秋峰等, 2015) 数据相近, 两者在同一误差范围. 由此可知拉抗俄 Cu-Mo 矿床成岩成矿几乎同时形成, 均为喜山晚期岩浆活动的产物, 成岩成矿时代为中新世. 位于雅鲁藏布江结合带和班公湖-怒江结合带之间的冈底斯成矿带, 其是青藏高原白垩纪以来岩浆活动期次最多、规模最大、岩浆岩类型最复杂的构造-岩浆岩带(莫宣学等, 2003, 2005; 耿全如等, 2007). 受控于古特提斯洋和新特提斯洋的发展演化, 冈底斯成矿带经历了复杂的地质-构造-岩浆演化过程(潘桂棠等, 2006; 莫宣学等, 2005; 朱弟成等, 2008), 形成了巨量的矿产资源, 从而使其成为中国乃至世界著名的铜铅锌钨钼金银多金属成矿带. 空间上大致以纳木错-嘉黎构造带为界分为南北两个亚带(耿全如等, 2011), 北带称为藏北念青唐古拉花岗岩带,

人们一般认为其与怒江洋壳向南消减及碰撞造山有成因联系; 南带称为冈底斯花岗岩带, 其形成是新特提斯洋消减俯冲的结果(和钟铨等, 2012). 冈底斯成矿带的形成和发展过程记录了雅鲁藏布江特提斯洋壳向北俯冲直至印度与亚洲大陆碰撞、碰撞后伸展过程的岩浆和构造演化事件(唐菊兴等, 2009a; 莫宣学等, 2009; 纪伟强等, 2009; 朱弟成等, 2009). 雅江洋从晚三叠世开始发育(Pearce and Mei, 1988; Gaetani and Garzanti, 1991), 早-中侏罗世开始向北俯冲, 形成一套与活动大陆边缘弧有关的, 以叶巴组为代表的火山岩(潘桂棠等, 2006); 经历了晚侏罗世-早白垩世继续向北俯冲这一阶段, 雅江洋于古近纪早中期开始关闭, 随之进入印度-亚洲大陆碰撞造山阶段, 自印度-亚洲大陆碰撞以来, 冈底斯成矿带发生了两次岩浆活动高潮: 第一次为同碰撞期岩浆活动(65~40 Ma), 以规模巨大的曲水花岗岩和林子宗火山岩为代表; 第二次为后碰撞期岩浆活动(25~10 Ma), 以钾质-超钾质火山岩、埃达克质斑岩、强过铝质花岗岩的侵位为特征(莫宣学等, 2006); 中新世随着雅江洋俯冲洋壳板片的断离(Miller *et al.*, 1999; Mahéo *et al.*, 2002), 冈底斯成矿带发生 EW 向伸展, 形成了数量众多的花岗质斑岩体(曲晓明等, 2002), 年龄集中于 20~13 Ma(Hou *et al.*, 2004), 形成了一条平行于主碰撞带的近 EW 向展布的冈底斯花岗岩斑岩带(曲晓明等, 2002; 王立强等, 2012). 本文得到的拉抗俄含矿花岗岩闪长斑岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $13.58 \pm 0.42$  Ma, 与区域上邻近的甲玛斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床花岗岩斑岩体成岩时代(15.31~16.27 Ma; 秦志鹏等, 2011)、驱龙斑岩型铜矿床含

矿斑岩体成岩年龄(16.35~17.58 Ma; 芮宗瑶等, 2003; Hou *et al.*, 2004; 王亮亮等, 2006)、邦铺斑岩型钼(铜)矿床含矿二长花岗斑岩成岩时代(16.23 Ma; 王立强等, 2012)乃至整个斑岩成矿带成岩年龄(集中于 17~12 Ma; 张刚阳等, 2008; 唐菊兴等, 2009a)基本一致, 它们均为印-亚大陆碰撞后伸展背景下形成的斑岩体。

## 5.2 岩石成因及岩浆源区

拉抗俄含矿花岗闪长斑岩具有富硅, 相对贫镁和钙; 岩石碱含量高, 分异程度较高, 属于高钾钙碱性系列的准铝质中酸性花岗岩类。岩石高 Sr( $392 \times 10^{-6} \sim 689 \times 10^{-6}$ )、低 Y( $3.92 \times 10^{-6} \sim 6.09 \times 10^{-6}$ )和 Yb( $0.42 \times 10^{-6} \sim 0.56 \times 10^{-6}$ ), Sr/Y 比值为 73.27~139.99, Rb、Th、U、Sr 等大离子亲石元素相对富集, 而重稀土元素(HREE)及 Nb、Ta、Ti、P、Zr 等高场强元素则表现为相对亏损, 无 Eu 异常或轻微的负 Eu 异常, 具有埃达克岩地球化学特征, 显示埃达克岩岩浆亲和性(Defant and Drummond, 1990; 王焰等, 2000; 王强等, 2001; 张旗等, 2001; Castillo, 2006), 因此可将拉抗俄矿区含矿斑岩定为埃达克岩(图 8)。埃达克岩的富 Sr 和弱负 Eu 异常暗示其岩浆源区无斜长石, 或者残留相无斜长石。岩石强烈亏损高场强元素, 表明其岩浆源区是一种含水并残留石榴石的角闪榴辉岩或石榴石角闪岩(Defant and Drummond, 1990, 1993; Drummond *et al.*, 1996), 因为在含水条件下的部分熔融过程中, Nb 偏向于进入角闪石中(Pearce and Norry, 1979), 而 Ti 则主要集中于残留相金红石中(Tatsumi *et al.*, 1986)。斑岩的 Yb 强烈亏损和 LREE/

HREE 强烈分馏也反映, 形成埃达克岩要求角闪榴辉岩或石榴石角闪岩发生 10%~25% 的部分熔融(Defant and Drummond, 1990)。已有研究表明, 埃达克岩存在着 O 型埃达克岩与 C 型埃达克岩之分。O 型埃达克岩形成于俯冲玄武质洋壳的部分熔融(Defant and Drummond, 1990; Drummond *et al.*, 1996; 张旗等, 2001), 而 C 型埃达克岩则形成于下地壳底侵玄武质岩石的部分熔融或加厚下地壳的部分熔融(Atherton and Pertord, 1993; Wang *et al.*, 2005, 2007)。拉抗俄矿区含矿斑岩富 K, 且具有较高的 Th 含量( $3.79 \times 10^{-6} \sim 8.49 \times 10^{-6}$ ), 与 C 型埃达克岩地球化学特征相似(张旗等, 2001)。拉抗俄埃达克岩形成于中新世的后碰撞伸展构造背景, 其源区与下地壳的部分熔融有关。

锆石在形成后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累, 所测定的锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值基本代表了锆石形成时体系的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007), 从而能够示踪岩浆源区(陈懋弘等, 2009)。当锆石初始  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为正值, 说明岩体在形成时有较多幔源或是新生地壳物质的加入, 而初始  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值偏负值, 说明岩体形成时壳源物质成分占主导地位(水新芳等, 2012)。围绕冈底斯成矿带花岗岩的岩浆源区, 前人开展了大量的研究工作, 纪伟强等(2009)总结了冈底斯新生代花岗岩 Hf 同位素组成的特点: 具有高的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值、正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和年轻的模式年龄(1000~300 Ma), 提出从新生代早期开始岩浆源区便有古老地壳物质的贡献。莫宣学等(2005)也认为冈底斯花岗岩具有年轻的模式年龄, 可能是地幔物质透过岩浆底侵-岩浆混合作用大量

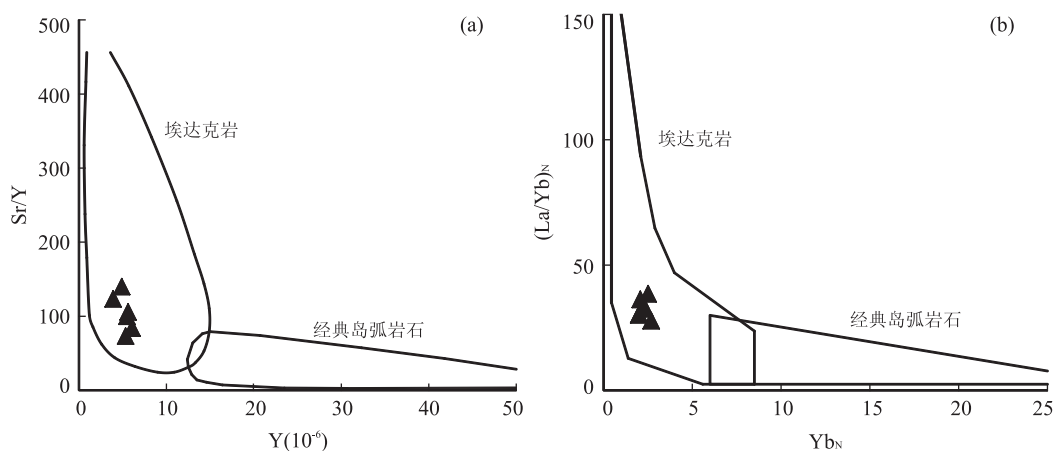


图 8 拉抗俄含矿花岗闪长斑岩 Sr/Y-Y(a)和(La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub>(b)关系

Fig. 8 Relations of Sr/Y-Y (a) and (La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> (b) from the Lakang'e ore-bearing porphyry

底图据 Defant and Drummond (1990)

进入地壳的结果. 在图 9 中,拉抗俄含矿花岗闪长斑岩数据点位于球粒陨石线附近,介于亏损地幔与西藏古老地壳端元之间,其 Hf 同位素组成与同一矿集区的甲玛、邦铺成矿岩体 Hf 同位素组成类似,但较驱龙 Hf 同位素组成偏离亏损地幔,显示壳源物质较多加入的特征. 因此, Hf 同位素数据显示拉抗俄矿区的含矿花岗闪长斑岩的岩浆源区主要来源于新生地壳部分熔融的组分,但在岩浆侵位过程中遭受了古老地壳物质的混染.

### 5.3 构造背景

用于花岗岩构造环境判别的图解较多,包括 Batchelor and Bowden(1985)提出的  $R_1$ - $R_2$  判别图解、Feng and Kerrich(1992)提出的  $CaO/(Na_2O+K_2O)-SiO_2$  图解以及 Pearce *et al.* (1984) 提出的 Rb-Y-Nb、Rb-Yb-Ta 等. 考虑到 Rb、Na、K 等元素在热液中活动性较强,而拉抗俄含矿花岗闪长斑岩可能或多或少存在一定蚀变,笔者选用  $R_1$ - $R_2$  图解可照顾到更多的元素,能更客观地反映岩浆岩形成的构造环境. 在图 10 中,拉抗俄含矿花岗闪长斑岩 6 个样品点主要位于晚造山环境,其侵位时代为 14 Ma 左右,反映出其形成于印度-亚洲大陆碰撞后的构造环境. 受班公湖-怒江特提斯洋俯冲作用,拉萨地体微陆块南部在早古生代形成弧后盆地(Zhu *et al.*, 2010). 随着班公湖-怒江特提斯洋壳向南持续的俯冲作用,雅鲁藏布江洋新特提斯洋于三叠纪开始发育(Gaetani and Grezanti, 1991; Zhu

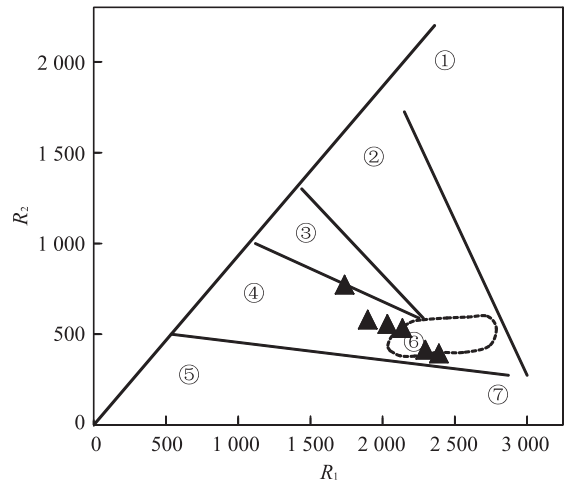


图 10 拉抗俄含矿花岗闪长斑岩  $R_1$ - $R_2$  构造环境判别关系

Fig. 10  $R_1$ - $R_2$  factor diagram of the ore-bearing granodiorite porphyry in Lakang'e deposit

①幔斜长花岗岩;②破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩;③板块碰撞后隆起期花岗岩;④晚造山花岗岩;⑤非造山期 A 型花岗岩;⑥同碰撞(S 型)花岗岩;⑦造山期后 A 型花岗岩. 底图据 Batchelor and Bowden(1985)

*et al.*, 2010). 早一中侏罗世雅江洋开始向北俯冲,形成以叶巴组 and 雄村组为代表的岛弧火山岩(莫宣学等, 2005; 潘桂棠等, 2006; Zhu *et al.*, 2008; 唐菊兴等, 2009b, 2010). 晚侏罗世班公湖-怒江特提斯洋和雅江洋特提斯洋双向俯冲,形成冈底斯南缘桑日增生弧(莫宣学等, 2005; 潘桂棠等, 2006; Zhu *et al.*, 2009, 2010). 70~65 Ma 雅江洋开始闭合,印度-亚洲大陆开始碰撞(莫宣学等, 2005),冈底斯成矿带形成同碰撞型林子宗组火山岩(莫宣学等, 2003, 2005). 中新世随着俯冲的印度大陆陆壳边缘岩石圈板片发生断离(Miller *et al.*, 1999; Mahéo *et al.*, 2002),冈底斯发生 EW 向伸展,形成数量众多的壳幔混合来源的侵位矿化斑岩,其年龄集中于 20~13 Ma(侯增谦等, 2004). 拉抗俄含矿花岗闪长斑岩形成于印度-亚洲大陆碰撞造山带的后碰撞伸展构造背景.

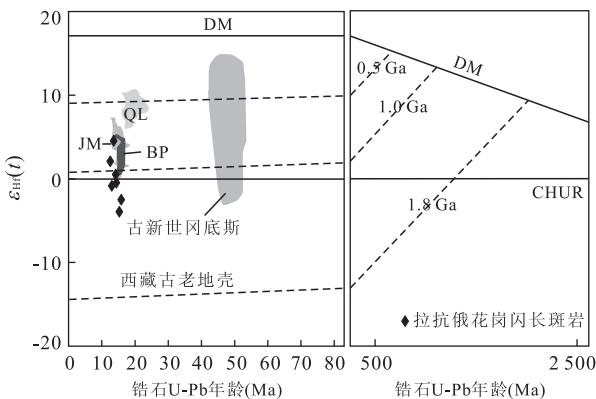


图 9 拉抗俄含矿花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄-Hf 同位素组成关系

Fig. 9 Relations between U-Pb ages and Hf isotopic composition of zircons from the ore-bearing granodiorite porphyry in Lakang'e deposit

驱龙数据引自杨志明(2008);甲玛数据引自应立娟,未刊资料;邦铺数据引自王立强,未刊资料;QL. 驱龙;JM. 甲玛;BP. 邦铺;底图据侯增谦等(2012)

## 6 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试结果表明,拉抗俄含矿花岗闪长斑岩形成时代为  $13.58 \pm 0.42$  Ma, 岩浆侵位于中新世.

(2) 含矿花岗闪长斑岩富硅,相对贫镁和钙;岩石碱含量高,分异程度较高,属于高钾钙碱性系列的

准铝质中酸性花岗岩类; 岩石具有埃达克岩地球化学特征, 岩浆源区与下地壳的部分熔融有关。

(3) 锆石 Hf 同位素组成特征指示其岩浆物质源区主要来源于新生地壳部分熔融的组分, 在岩浆侵位过程中遭受了古老地壳物质的混染, 岩石形成于印度—亚洲大陆碰撞造山带的后碰撞伸展构造背景。

致谢: 野外工作得到西藏地质六队张焕彬队长、西藏地调院刘鸿飞院长等领导的大力支持; 参加野外工作的还有中国地质大学(北京)李海峰硕士; 室内工作得到中国地质科学院矿产资源研究所 LA-ICP-MS 实验室侯可军老师的帮助; 审稿过程中, 相关专家指出了本文的许多不足并提出了宝贵的意见和建议, 在此一并致以诚挚的谢意!

## 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. *Nature*, 399(6733): 252—255. doi: 10. 1038/20426
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do not Report <sup>204</sup>Pb. *Chemical Geology*, 192(1—2): 59—79. doi: 10. 1016/s0009—2541(02)00195—x
- Atherton M. P., Pertord N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362(6416): 144—146. doi: 10. 1038/362144a0
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1—4): 43—55. doi: 10. 1016/0009—2541(85)90034—8
- Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602—622. doi: 10. 1007/s00410—002—0364—7
- Blichert-Toft J., Albarède F., 1997. The Lu-Hf Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243—258. doi: 10. 1016/s0012—821x(97)00040—x
- Bouvier, A., Vervoort, J. D., 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1—2): 48—57. doi: 10. 1016/j. epsl. 2008. 06. 010
- Castillo, P. R., 2006. An Overview of Adakite Petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257—268. doi: 10. 1007/s11434—006—0257—7
- Chen, M. H., Zhang, W., Yang, Z. X., et al., 2009. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Hf Isotopic Composition of Baiceng Ultrabasic Dykes in Zhenfeng County, Southwestern Guizhou Province. *Mineral Deposits*, 28(3): 240—250 (in Chinese with English abstract).
- Defant M. J., Drummond M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662—665. doi: 10. 1038/347662a0
- Defant M. J., Drummond M. S., 1993. Mount St. Helens: Potential Example of the Partial Melting of the Subducted Lithosphere in a Volcanic Arc. *Geology*, 21(6): 547—550. doi: 10. 1130/0091—7613(1993)021<0547:msh-  
peo>2. 3. co;2
- Drummond, M. S., Defant, M. J., Kepezhinskis, P. K., 1996. Petrogenesis of Slab-Derived Trondhjemite-Tonalite-Dacite/Adakite Magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87(1—2): 205—215. doi: 10. 1017/s0263593300006611
- Feng, R., Kerrich, R., 1992. Geochemical Evolution of Granitoids from the Archean Abitibi Southern Volcanic Zone and the Pontiac Subprovince, Superior Province, Canada; Implications for Tectonic History and Source Regions. *Chemical Geology*, 98(1—2): 23—70. doi: 10. 1016/0009—2541(92)90090—r
- Gaetani, M., Garzanti, E., 1991. Multicyclic History of the Northern India Continental Margin (Northwestern Himalaya). *AAPG Bulletin*, 75: 1427—1446. doi: 10. 1306/0c9b2957—1710—11d7—8645000102c1865d
- Gao, S., Liu, X. M., Yuan, H. L., et al., 2002. Analysis of Forty-Two Major and Trace Elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICP-MS. *Geostandard Newslett*, 22: 181—196.
- Gao, Y. F., Hou, Z. Q., Wei, R. H., 2003. Neogene Porphyries from Gangdese; Petrological, Geochemical Characteristics and Geodynamic Significances. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 418—428 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Q. R., Pan, G. T., Wang, L. Q., et al., 2011. Tethyan Evolution and Metallogenic Geological Background of the Bangong Co-Nujiang Belt and the Qiangtang Massif in Tibet. *Geological Bulletin of China*, 30: 1261—1274 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Q. R., Wang, L. Q., Pan, G. T., et al., 2007. Volcanic Rock Geochemistry and Tectonic Implication of the Luobadui Formation on the Gangdese Zone, Xizang (Ti-

- bet). *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2699—2714 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—147. doi: 10.1016/s0016-7037(99)00343-9
- Hanchar, J. M., Miller, C. F., 1993. Zircon Zonation Patterns as Revealed by Cathodoluminescence and Backscattered Electron Images: Implications for Interpretation of Complex Crustal Histories. *Chemical Geology*, 110(1—3): 1—13. doi: 10.1016/0009-2541(93)90244-d
- He, Z. H., Yang, D. M., Zheng, C. Q., et al., 2012. Isotopic Dating of the Mamba Granitoid in the Gangdise Tectonic Belt and Its Constraint on the Subduction Time of the Neotethys. *Geological Review*, 52(1): 100—106 (in Chinese with English abstract).
- Hou, K. J., Li, Y. H., Tian, Y. R., 2009. In Situ U-Pb Zircon Dating Using Laser Ablation-Multi Ion Counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481—492 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Gao, Y. F., Qu, X. M., et al., 2004. Origin of Adakitic Intrusives Generated during Mid-Miocene East-West Extension in Southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1—2): 139—155. doi: 10.1016/s0012-821x(04)00007-x
- Hou, Z. Q., Gao, Y. F., Meng, X. J., et al., 2004. Genesis of Adakitic Porphyry and Tectonic Controls on the Gangdise Miocene Porphyry Copper Belt in the Tibetan Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 239—248 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Ma, H. W., Zaw, K., et al., 2003. The Himalayan Yulong Porphyry Copper Belt: Product of Large-Scale Strike-Slip Faulting in Eastern Tibet. *Economic Geology*, 98(1): 125—145. doi: 10.2113/98.1.125
- Hou, Z. Q., Qu, X. M., Wang, S. X., et al., 2003. Re-Os Dating of Molybdenite from the Gangdise Metallogenic Belt, Tibet: Applications of Mineralization Time and Dynamic Background. *Science in China (Series D)*, 33(7): 609—618 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Wang, E. Q., 2008. Metallogenesis of the Indo-Asian Collisional Orogen: New Advances. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 275—292 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Yang, Z. M., Qu, X. M., et al., 2009. The Miocene Gangdise Porphyry Copper Belt Generated during Post-Collisional Extension in the Tibetan Orogen. *Ore Geology Reviews*, 36(1—3): 25—51. doi: 10.1016/j.oregeorev.2008.09.006
- Hou, Z. Q., Zheng, Y. C., Yang, Z. M., et al., 2012. Metallogenesis of Continental Collision Setting: Part I. Gangdise Cenozoic Porphyry Cu-Mo Systems in Tibet. *Mineral Deposits*, 31(4): 647—670 (in Chinese with English abstract).
- Ji, W. Q., Wu, F. Y., Zhong, S. L., et al., 2009. Petrogenesis and Ages of Granites in the Gangdise Batholith, South Tibet. *Science in China (Series D)*, 39(7): 849—871 (in Chinese with English abstract).
- Leng, Q. F., Tang, J. X., Zheng, W. B., et al., 2015. Re-Os Dating of Molybdenite from the Lakang'e Porphyry Cu-Mo Deposit in Tibet and Its Geological Significance. *Geology in China*, 42(2): 570—584 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Gao, S., Yuan, H. L., et al., 2002. Analysis of 42 Major and Trace Elements in Glass Standard Reference Materials by 193 nm La-ICP-MS. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 408—418 (in Chinese with English abstract).
- Mahéo, G., Guillot, S., Blichert-Toft, J., et al., 2002. A Slab Breakoff Model for the Neogene Thermal Evolution of South Karakorum and South Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(1—2): 45—58. doi: 10.1016/s0012-821x(01)00578-7
- McDonough, W. F., Sun, S. S., Ringwood, A. E., et al., 1992. Potassium, Rubidium and Cesium in the Earth and Moon and the Evolution of the Mantle of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001—1012. doi: 10.1016/0016-7037(92)90043-i
- Miller, C., Schuster, R., Klotzli, U., et al., 1999. Post-Collisional Potassic and Ultrapotassic Magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Constraints for Mantle Source Characteristics and Petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40(9): 1399—1424. doi: 10.1093/ptroj/40.9.1399
- Mo, X. X., Dong, G. C., Zhao, Z. D., et al., 2005. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdise, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281—290 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2003. Response of Volcanism to the India-Asia Collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135—148 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., DePaolo, D. J., et al., 2006. Three Types of Collisional and Post-Collisional Magmatism in

- the Lhasa Block, Tibet and Implications for India Intra-Continental Subduction and Mineralization; Evidence from Sr-Nd Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 795–803 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Zhu, D. C., et al., 2009. On the Lithosphere of Indo-Asia Collision Zone in Southern Tibet; Petrological and Geochemical Constraints. *Earth Science*, 34(1): 17–24 (in Chinese with English abstract).
- Nie, F. J., Zhang, W. Y., Du, A. D., et al., 2007. Re-Os Isotopic Dating on Molybdenite Separates from the Xiaodonggou Porphyry Mo Deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 898–905 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Mo, X. X., Hou, Z. Q., et al., 2006. Spatial-Temporal Framework of the Gangdese Orogenic Belt and Its Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521–533 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. doi:10.1093/petrology/25.4.956
- Pearce, J. A., Mei, H., 1988. Volcanic Rocks for the 1985 Tibet Geotraverse Lhasa to Golmud. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A*, 327: 203–213.
- Pearce J. A., Norry M. J., 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33–47. doi:10.1007/bf00375192
- Qin, Z. P., Wang, X. W., Duo, J., et al., 2011. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Age of Intermediate-Acidic Intrusive Rocks in Jiama of Tibet and Its Metallogenic Significance. *Mineral Deposits*, 30(2): 339–348 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Hou, Z. Q., Li, Y. G., 2002. Implications of S and Pb Isotopic Compositions of the Gangdise Porphyry Copper Belt for the Ore-Forming Material Source and Material Recycling within the Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 768–776 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Hou, Z. Q., Li, Z. Q., 2003.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Ages of the Ore-Bearing Porphyries of the Gangdese Porphyry Copper Belt and Their Geological Significances. *Acta Geological Sinica*, 77(2): 245–252 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Hou, Z. Q., Zaw, K., et al., 2007. Characteristics and Genesis of Gangdese Porphyry Copper Deposits in the Southern Tibetan Plateau: Preliminary Geochemical and Geochronological Results. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 205–223. doi:10.1016/j.oregeorev.2005.03.012
- Qu, X. M., Wang, R. J., Xin, H. B., et al., 2009. Geochronology and Geochemistry of Igneous Rocks Related to the Subduction of the Tethys Oceanic Plate along the Bangong Lake Arc Zone, the Western Tibetan Plateau. *Geochimica*, 38(6): 523–535 (in Chinese with English abstract).
- Rui, Z. Y., Hou, Z. Q., Qu, X. M., et al., 2003. Metallogenic Epoch of Gangdese Porphyry Copper Belt and Uplift of Qinghai-Tibet Plateau. *Mineral Deposits*, 22(3): 217–225 (in Chinese with English abstract).
- Shui, X. F., Zhao, Y. Y., Guo, S., et al., 2012. U-Pb Dating and Hf Isotopic Characteristics of Zircons from Granodiorite in the Dexing Ore Concentration. *Geology in China*, 39(6): 1543–1561 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe, R. H., 1972. A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, 67(2): 184–197. doi:10.2113/gsecongeo.67.2.184
- Söderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The  $^{176}\text{Lu}$  Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324. doi:10.1016/s0012-821x(04)00012-3
- Song, B., Zhang, Y. H., Wan, Y. S., et al., 2002. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. doi:10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tang, J. X., Chen, Y. C., Duo, J., et al., 2009a. The Main Ore Types, Metallogenic Regularities and Prospecting Evaluation in the Eastern of Gangdese Metallogenic Belt, Tibet. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(Suppl. 1): 476–478 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J. X., Huang, Y., Li, Z. J., et al., 2009b. Element Geochemical Characteristics of Xiongcu Cu-Au Deposit in Xaitongmoin County, Tibet. *Mineral Deposits*, 28(1): 15–28 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J. X., Li, F. J., Li, Z. J., et al., 2010. Time Limit for Formation of Main Geological Bodies in Xiongcu Copper-Gold Deposit, Xietongmen County, Tibet: Evidence from Zircon U-Pb Ages and Re-Os Age of Molybdenite. *Mineral Deposits*, 29(3): 461–475 (in Chinese

- with English abstract).
- Tatsumi, Y., Hamilton, D. L., Nesbitt, R. W., 1986. Chemical Characteristics of Fluid Phase Released from a Subducted Lithosphere and Origin of Arc Magmas; Evidence from High-Pressure Experiments and Natural Rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1-4): 293-309. doi: 10. 1016/0377-0273(86)90049-1
- Wang, C., Wei, Q. R., Liu, X. N., et al., 2014. Post-Collision Related Late Indosinian Granites of Gangdise Terrane; Evidences from Zircon U-Pb Geochronology and Petrogeochemistry. *Earth Science*, 39(9): 1277-1288 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. L., Mo, X. X., Li, B., et al., 2006. Geochronology and Geochemistry of the Ore-Bearing Porphyry in Qulong Cu (Mo) Ore Deposit, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 1001-1008 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. Q., Pan, G. T., Zhu, D. C., et al., 2008. Carboniferous-Permian Island Arc Orogenesis in the Gangdise Belt, Tibet, China; Evidence from Volcanic Rocks and Geochemistry. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1509-1534 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. Q., Tang, J. X., Chen, Y. C., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Ore-Bearing Monzogranite Porphyry in Bangpu Molybdenum(Copper) Deposit, Tibet and Its Significance. *Mineral Deposits*, 30(2): 349-360 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., McDermott, F., Xu, J. F., et al., 2005. Cenozoic K-Rich Adakitic Volcanic Rocks in the Hohxil Area, Northern Tibet; Lower-Crustal Melting in an Intracontinental Setting. *Geology*, 33(6): 465. doi: 10. 1130/g21522. 1
- Wang, Q., Wyman, D. A., Xu, J. F., et al., 2007. Early Cretaceous Adakitic Granites in the Northern Dabie Complex, Central China; Implications for Partial Melting and Delamination of Thickened Lower Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609-2636. doi: 10. 1016/j. gca. 2007. 03. 008
- Wang, Q., Xu, J. F., Zhao, Z. H., 2001. The Summary and Comment on Research on a New Kind of Igneous Rock-Adakite. *Advance in Earth Sciences*, 16(2): 201-208 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Zhang, Q., Qian, Q., 2000. Adakite; Geochemical Characteristics and Tectonic Significances. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251-256 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematic and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Minerageny of Zircon and Its Restrict on the Explanation for U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1602 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Ji, S. C., Cai, Z. H., et al., 2012. Kinematics and Dynamics of the Namche Barwa Syntaxis, Eastern Himalaya; Constraints from Deformation, Fabrics and Geochronology. *Gondwana Research*, 21(1): 19-36. doi: 10. 1016/j. gr. 2011. 06. 010
- Yang, D. M., Li, C., Wang, T. W., 2001. Features and Genesis of the North-South-Trending Tectonic Belt in the Eastern Sector of the Gangdese Mountains, Tibet. *Regional Geology of China*, 20(4): 392-397 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Liu, R., Wang, X. Y., et al., 2014. Petrogenesis and Tectonic Significance of Late Yanshanian Granites in Yunkai Area, Southeast China; Evidence from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes. *Earth Science*, 39(9): 1258-1276 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. M., 2008. The Qulong Giant Porphyry Copper Deposit in Tibet; Magmatism and Mineralization (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 1-145 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. S., Hou, Z. Q., Meng, X. J., et al., 2009. Post-Collisional Sb and Au Mineralization Related to the South Tibetan Detachment System in Himalayan Orogen. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 194-212. doi: 10. 1016/j. oregeorev. 2009. 03. 005
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211-280. doi: 10. 1146/annurev. earth. 28. 1. 211
- Yuan, H. L., Gao, S., Dai, M. N., et al., 2008. Simultaneous Determinations of U-Pb Age, Hf Isotopes and Trace Element Compositions of Zircon by Excimer Laser-Ablation Quadrupole and Multiple-Collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1-2): 100-118. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2007. 10. 003
- Zhang, G. Y., Zheng, Y. Y., Gong, F. Z., et al., 2008. Geochronologic Constraints on Magmatic Intrusions and Mineralization of the Jiru Porphyry Copper Deposit, Tibet, Associated with Continent-Continent Collisional Process. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 473-479 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al., 2001. The Character-

- istics and Tectonic-Metallogenic Significances of the Adakites in Yanshan Period from Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Shi, H. F., Hao, H. J., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Late Cretaceous Adakites in Bangong Lake, Tibet. *Earth Science*, 39(5): 509—524 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y., Sun, X., Gao, S. B., et al., 2014. Multiple Mineralization Events at the Jiru Porphyry Copper Deposit, Southern Tibet: Implications for Eocene and Miocene Magma Sources and Resource Potential. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 842—857. doi:10.1016/j.jseas.2013.03.029
- Zhou, T. F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 2011. Geochronology and Significance of Volcanic Rocks in the Ning-Wu Basin of China. *Science in China (Series D)*, 41(7): 960—971 (in Chinese).
- Zhou, X., Cao, Y. G., 1984. Tibet Plate Tectonics-Construction Plans and Specifications. Geological Publishing House, Beijing, 1—20 (in Chinese).
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Zhao, Z. D., et al., 2009. Permian and Early Cretaceous Tectonism in Southern Tibet and Tethyan Evolution: New Perspective. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 1—20 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Zhao, Z. D., et al., 2010. Presence of Permian Extension and Arc-Type Magmatism in Southern Tibet: Paleogeographic Implications. *Geological Society of America Bulletin*, 122(7—8): 979—993. doi:10.1130/b30062.1
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Chung, S. L., et al., 2008. SHRIMP Zircon Age and Geochemical Constraints on the Origin of Lower Jurassic Volcanic Rocks from the Yeba Formation, Southern Gangdese, South Tibet. *International Geology Review*, 50(5): 442—471. doi:10.2747/0020—6814.50.5.442
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Wang, L. Q., et al., 2008. Spatial-Temporal Distribution and Tectonic Setting of Jurassic Magmatism in the Gangdese Belt, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 458—468 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 241—255. doi:10.1016/j.epsl.2010.11.005
- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Pan, G. T., et al., 2009. Early Cretaceous Subduction-Related Adakite-Like Rocks of the Gangdese Belt, Southern Tibet: Products of Slab Melting and Subsequent Melt-Peridotite Interaction? *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 298—309. doi:10.1016/j.jseas.2008.05.003
- ### 附中文参考文献
- 陈懋弘, 章伟, 杨宗喜, 等, 2009. 黔西南白层超基性岩墙锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成研究. 矿床地质, 28(3): 240—250.
- 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华, 2003. 冈底斯晚第三纪斑岩的岩石学、地球化学及其地球动力学意义. 岩石学报, 19(3): 418—428.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等, 2011. 班公湖—怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景. 地质通报, 30(8): 1261—1274.
- 耿全如, 王立全, 潘桂棠, 等, 2007. 西藏冈底斯带洛巴堆组火山岩地球化学及构造意义. 岩石学报, 23(11): 2699—2714.
- 和钟铨, 杨德明, 郑常青, 等, 2012. 冈底斯带门巴花岗岩同位素测年及其对新特提斯洋俯冲时代的约束. 地质论评, 52(1): 100—106.
- 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. 矿床地质, 28(4): 481—492.
- 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 等, 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克质斑岩成因与构造控制. 岩石学报, 20(2): 239—248.
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 等, 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用. 中国科学(D辑), 33(7): 609—618.
- 侯增谦, 王二七, 2008. 印度—亚洲大陆碰撞成矿作用主要研究进展. 地球学报, 29(3): 275—292.
- 侯增谦, 郑远川, 杨志明, 等, 2012. 大陆碰撞成矿作用: I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统. 矿床地质, 31(4): 647—670.
- 纪伟强, 吴福元, 鍾孙霖, 等, 2009. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因. 中国科学(D辑), 39(7): 849—871.
- 冷秋锋, 唐菊兴, 郑文宝, 等, 2015. 西藏拉抗俄斑岩铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义. 中国地质, 42(2): 570—584.
- 柳小明, 高山, 袁洪林, 等, 2002. 193 nm LA-ICP-MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析. 岩石学报, 18(3): 408—418.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等, 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息. 高校地质学报, 11(3): 281—290.
- 莫宣学, 赵志丹, Don J DePaolo, 等, 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞—后碰撞岩浆作用的三种类型及其对大陆俯冲和



- 成矿作用的启示: Sr-Nd 同位素证据. 岩石学报, 22(4): 795—803.
- 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. 地质前缘, 10(3): 135—148.
- 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 等, 2009. 西藏南部印度—亚洲碰撞带岩石圈: 岩石学—地球化学约束. 地球科学, 34(1): 17—24.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 等, 2007. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床辉钼矿铼—钨同位素年龄及地质意义. 地质学报, 81(7): 898—905.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等, 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报, 22(3): 521—533.
- 秦志鹏, 汪雄武, 多吉, 等, 2011. 西藏甲玛中酸性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿意义. 矿床地质, 30(2): 339—348.
- 曲晓明, 侯增谦, 李佑国, 2002. S、Pb 同位素对冈底斯斑岩铜矿带成矿物质来源和造山带物质循环的指示. 地质通报, 21(11): 768—776.
- 曲晓明, 侯增谦, 李振清, 2003. 冈底斯铜矿带含矿斑岩的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄及地质意义. 地质学报, 77(2): 245—252.
- 曲晓明, 王瑞江, 辛洪波, 等, 2009. 西藏西部与班公湖特提斯洋盆俯冲相关的火成岩年代学和地球化学. 地球化学, 38(6): 523—535.
- 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. 矿床地质, 22(3): 217—225.
- 水新芳, 赵元艺, 郭硕, 等, 2012. 德兴矿集区花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义. 中国地质, 39(6): 1543—1561.
- 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. 地质论评, 48(增刊): 26—30.
- 唐菊兴, 陈毓川, 多吉, 等, 2009a. 西藏冈底斯成矿带东段主要矿床类型、成矿规律和找矿评价. 矿物学报, 29(增刊 1): 476—478.
- 唐菊兴, 黄勇, 李志军, 等, 2009b. 西藏谢通门县雄村铜金矿床元素地球化学特征. 矿床地质, 28(1): 15—28.
- 唐菊兴, 黎凤信, 李志军, 等, 2010. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体形成的时限: 锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年龄的证据. 矿床地质, 29(3): 461—475.
- 王程, 魏启荣, 刘小念, 等, 2014. 冈底斯印支晚期后碰撞花岗岩: 锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据. 地球科学, 39(9): 1277—1288.
- 王亮亮, 莫宣学, 李冰, 等, 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿含矿斑岩的年代学与地球化学. 岩石学报, 22(4): 1001—1008.
- 王立强, 唐菊兴, 陈毓川, 等, 2012. 西藏邦铺钼(铜)矿床含矿二长花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. 矿床地质, 30(2): 349—360.
- 王立全, 潘桂棠, 朱弟成, 等, 2008. 西藏冈底斯带石炭纪—二叠纪岛弧造山作用: 火山岩和地球化学证据. 地质通报, 27(9): 1509—1534.
- 王强, 许继锋, 赵振华, 2001. 一种新的火成岩—埃达克岩的研究综述. 地球科学进展, 16(2): 201—208.
- 王焰, 张旗, 钱青, 2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义. 地质科学, 35(2): 251—256.
- 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. 岩石学报, 23(2): 185—220.
- 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. 科学通报, 49(16): 1589—1602.
- 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. 中国区域地质, 20(4): 392—397.
- 杨振, 刘锐, 王新宇, 等, 2014. 云开地区燕山晚期花岗岩的岩石成因及构造意义: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素证据. 地球科学, 39(9): 1258—1276.
- 杨志明, 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床——岩浆作用与矿床成因(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院, 1—145.
- 张刚阳, 郑有业, 龚福志, 等, 2008. 西藏吉如斑岩铜矿: 与陆陆碰撞过程相关的斑岩成岩成矿时代约束. 岩石学报, 24(3): 473—479.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等, 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造—成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236—244.
- 张硕, 史洪峰, 郝海健, 等, 2014. 青藏高原班公湖地区晚白垩世埃达克岩年代学、地球化学及构造意义. 地球科学, 39(5): 509—524.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 等, 2011. 宁芜(南京—芜湖)盆地火山岩的年代学及其意义. 中国科学(D 辑), 41(7): 960—971.
- 周详, 曹佑功, 1984. 西藏板块构造—建造图及说明书. 北京: 地质出版社, 1—20.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等, 2009. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化: 新观点. 地质前缘, 16(2): 1—20.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等, 2008. 西藏冈底斯带侏罗纪岩浆作用的时空分布及构造环境. 地质通报, 27(4): 458—466.