

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.713>



冈底斯带甲玛矿区花岗斑岩类年代学、地球化学及岩石成因

孟元库^{1,2,3}, 马士委³, 许志琴^{3,4}, 陈希节³, 马绪宣³

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

4. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023

摘要: 藏南冈底斯带中新世斑岩成因主要存在残留洋壳的部分熔融、加厚下地壳的部分熔融、陆下岩石圈的部分熔融和俯冲流体交代基性下地壳的部分熔融四种观点。为了进一步阐明该时期的岩浆成因和大地构造背景, 对冈底斯带甲玛矿区不同类型的斑岩体进行了岩石学分析和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试, 并运用 X 荧光光谱仪和电感耦合等离子体质谱仪分别对样品进行了全岩主、微量元素测试。测试结果显示冈底斯带甲玛矿区的斑岩类形成于 16.7~14.4 Ma, 总体上具有埃达克质岩石的地球化学特征。其中花岗斑岩类来自于藏南加厚的基性新生下地壳的部分熔融, 而辉长闪长玢岩来源于富集的岩石圈地幔。早中新世以来(18~13 Ma)青藏高原处于构造转换阶段, 含矿的埃达克质岩浆沿断裂通道上升, 并且在上升过程中遭受到了中上地壳物质的混染, 演化形成甲玛矿区内的石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩和花岗斑岩, 而近乎同时期来自于岩石圈地幔的岩浆则演化形成辉长闪长玢岩; 矿区内含矿热液流体在岩浆热驱动和构造应力作用下, 在林布宗组砂板岩、角岩与多底沟组大理岩、灰岩的层间滑脱带或褶皱的构造虚脱空间就位, 形成冈底斯带甲玛矽卡岩型铜多金属主矿体。

关键词: 埃达克质; 斑岩体; 中新世; 甲玛; 冈底斯带; 岩石学。

中图分类号: P588.121; P588.122; P597.3

文章编号: 1000-2383(2018)04-1142-22

收稿日期: 2017-12-15

Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Granitoid Porphyries from Jiama Ore Deposit in Gangdese Belt

Meng Yuanku^{1,2,3}, Ma Shiwei³, Xu Zhiqin^{3,4}, Chen Xijie³, Ma Xuxuan³

1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: The petrogenesis of Miocene porphyries is still under debate, involving four different genetic models, such as, partial melting of residual oceanic crust, partial melting of thickened lower crust, partial melting of sub-continental lithospheric mantle and partial melting of metasomatized mafic lower crust related to subducted fluids. In order to clarify the petrogenesis and tectonic setting, petrological analyses and zircon LA-ICP-MS U-Pb dating in this study were carried out. In addition, whole-rock major and trace elements were analyzed by means of XRF and ICP-MS methods. The results demonstrate that the porphyries formed at 16.7–14.4 Ma, showing adakitic geochemical features. Geochemical characteristics, trace elemental ratios and dis-

基金项目: 中国博士后基金项目(No. 2017M612220); 山东省自然科学基金博士基金项目(No. ZR2017BD033); 中国地质调查局项目(No. DD20160137); 国土资源部公益性行业基金项目(No. 201511022)。

作者简介: 孟元库(1986—), 男, 博士, 研究方向为造山带构造。ORCID: 0000-0001-9615-2479. E-mail: ykmeng@foxmail.com

引用格式: 孟元库, 马士委, 许志琴, 等, 2018. 冈底斯带甲玛矿区花岗斑岩类年代学、地球化学及岩石成因. 地球科学, 43(4): 1142–1163.

crimination diagrams suggest that magma source of the granitoid porphyries was derived from partial melting of the lower juvenile crustal material, whereas magma source of gabbro diorite porphyrite was sourced from the enriched lithospheric mantle. Together with published data, it is proposed that the Qinghai-Tibetan plateau was in the tectonic transformation from compression to extension or strike-slip during 18–13 Ma in the early stage of Miocene. The ore-bearing porphyries ascended through vertical fractures or faults and mingled with mid-upper crustal material generating granite porphyry, monzonitic granite porphyry, granodiorite porphyry and quartz diorite porphyrite. On the contrary, the coeval magma derived from the lithosphere mantle formed gabbro diorite porphyrite. Ore-bearing hydrothermal fluid was driven by tectonic stress and heat flow from magma took place at the sandstone slate and hornfel of the Linbuzong Formation, and marble and limestone of the Duodigou Formation characterized by inter-bedded tectonic fracture belts and collapse locations of folds, forming skarn-type copper polymetallic ore deposits.

Key words: adakitic; porphyry pluton; Miocene; Jiama; Gangdese belt; petrology.

印度—亚洲板块的碰撞是地球上新生代以来最为壮观的地质事件(Zhang *et al.*, 2012; 许志琴等, 2016).岩浆岩作为研究地球深部动力学过程的“岩石探针”和“窗口”,是了解壳幔相互作用最佳的研究对象(莫宣学等,2009; 莫宣学,2011).拉萨地体位于青藏高原南部,经历了多期次的俯冲、碰撞和造山,形成了巨型的念青唐古拉—冈底斯造山带(Zhang, 2004; Zhang *et al.*, 2004, 2012, 2014; 潘桂棠等, 2006; 杨经绥等,2006; 许志琴等,2011,2016).冈底斯造山带主要位于拉萨地体南缘,记录了新特提斯洋演化和印—亚板块碰撞的关键信息,并且形成了我国最为重要的铜多金属成矿带(侯增谦等,2008; 唐菊兴等,2012; Sun *et al.*, 2017).根据成矿时间,冈底斯带的成矿类型可以分为俯冲型(>55 Ma)和碰撞型(<55 Ma)两类斑岩型铜多金属矿床(许志琴等,2012; 马士委等,2016).其中俯冲型的铜矿目前仅发现雄村铜矿一处(Tang *et al.*, 2015),而碰撞(后碰撞)型矿床在冈底斯带分布较为普遍(侯增谦等,2008; Wang *et al.*, 2015).研究表明,冈底斯带大规模的铜多金属成矿时间主要集中在16~14 Ma(Wang *et al.*, 2015; 马士委等,2016; Sun *et al.*, 2017; 杨震等,2017).值得注意的是,该时期也是拉萨地体南缘快速隆升和东西向伸展阶段(21~8 Ma)(Williams *et al.*, 2001; 陈希节等,2014; Li *et al.*, 2015a, 2015b, 2016; 杨震等,2017).

近十几年来,冈底斯带含矿斑岩成矿机制的研究取得了许多重要的成果.但是对于中新世斑岩体的岩石成因和大地构造背景研究则相对薄弱,仍然存在着广泛争议(Chung *et al.*, 2003; Qu *et al.*, 2004; Hou *et al.*, 2004; Gao *et al.*, 2007; 徐旺春,2010; Li *et al.*, 2011; 陈希节等,2014; 杨震等,2017).目前主要存在4种不同的学术观点:(1)中新世的斑岩体源于新特提斯洋残留洋壳的部分熔融,

在后期岩浆上升的过程中与上覆陆下岩石圈发生相互作用(Qu *et al.*, 2004);(2)来自于加厚的拉萨地体下地壳的部分熔融(Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004; 陈希节等,2014);(3)斑岩体来自于上部地幔源区的部分熔融,并受到了早期新特提斯洋俯冲流体的交代(Gao *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2011);(4)来自于俯冲流体交代的基性下地壳的部分熔融(Guo *et al.*, 2007; 徐旺春,2010).

前人对甲玛矿区进行了大量的研究工作,主要集中于成矿时代、成矿流体、矿床成因机制和富矿斑岩体上,而对甲玛矿区中弱含矿斑岩体或者不含矿斑岩体的研究则相对薄弱.本文在前人工作的基础上,对甲玛矿区钻孔及野外露头不同类型的斑岩体进行了系统的采集,通过对这些斑岩体的年代学、岩石学和全岩地球化学特征及其大地构造背景进行研究,进而探讨不同类型斑岩体的岩浆源区特征、岩石成因及其壳—幔相互作用的过程,为甲玛矿集区基础地质研究和下一步寻找隐伏矿床提供重要的基础地质资料.

1 区域地质背景及样品特征

1.1 地质背景及研究概况

青藏高原从南向北主要由喜马拉雅、拉萨、羌塘、松潘甘孜和柴达木地体组成(Yin and Harrison, 2000; Zhang *et al.*, 2006, 2007)(图1a).冈底斯岩浆带紧邻印度斯—雅鲁藏布江缝合带,北界为狮泉河—隆格尔—措麦断裂,主要出露大型岩基和岩株构成的花岗岩带以及大规模同碰撞的中酸性火山岩带(林子宗火山岩)(Mo *et al.*, 2007; 莫宣学等, 2009; Zhu *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2017b).最新研究表明,冈底斯带的岩浆活动最老可以追溯到晚三叠世早期(~226 Ma)(Zhang *et al.*, 2004, 2007,

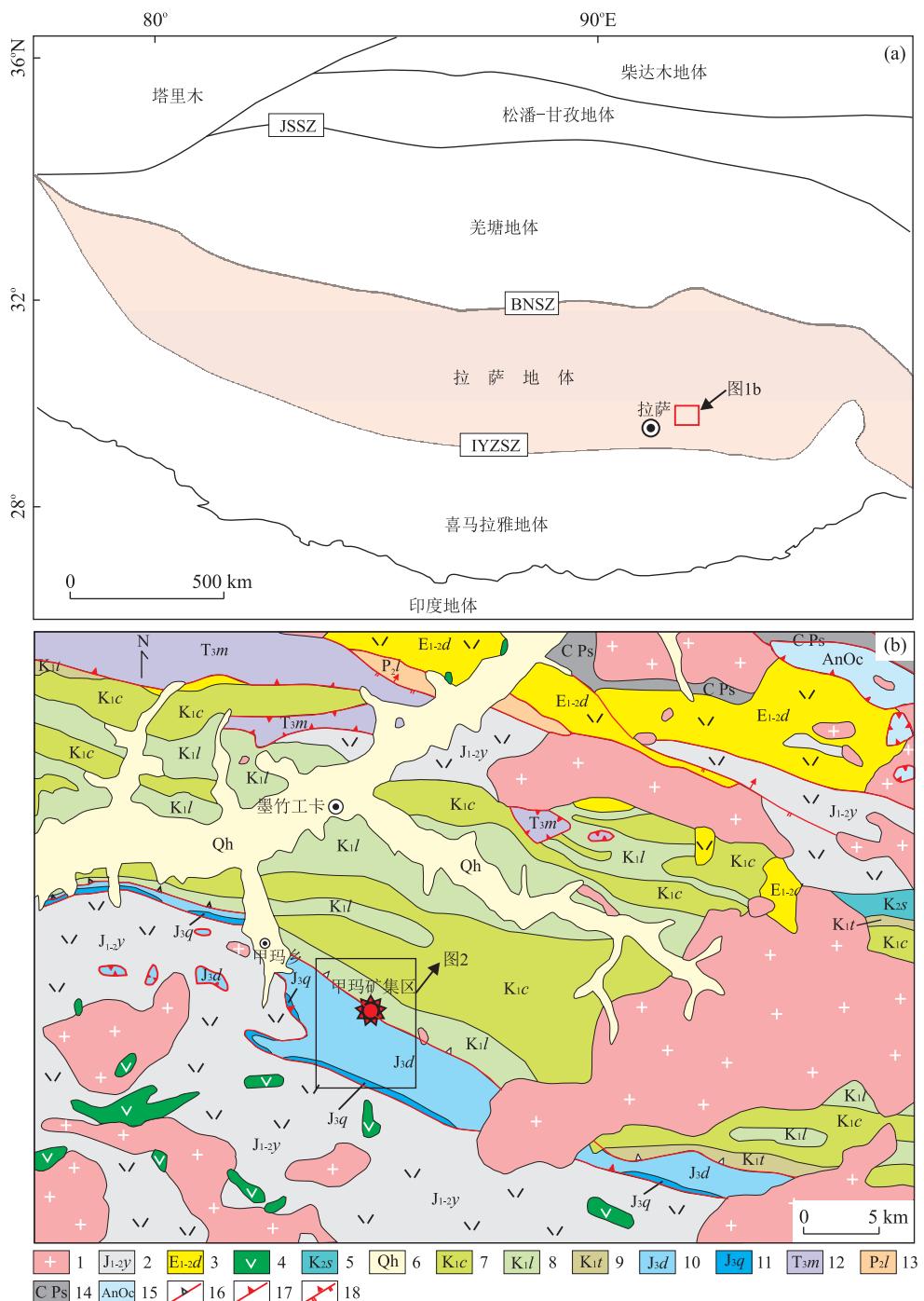


图 1 青藏高原大地构造格架简图(a)和冈底斯带甲玛矿区及邻区地质构造简图(b)

Fig.1 Tectonic simplified framework of the Tibetan plateau (a) and simplified geological map of the Jiama ore deposit and adjacent regions in the Gangdese belt (b)

图 a 据 Yin and Harrison, 2000; JSSZ.金沙江缝合带; BNSZ.班公湖缝合带; IYZSZ.印度斯雅鲁藏布江缝合带; 1.花岗岩类; 2.叶巴组火山岩; 3.典中组; 4.基性岩; 5.设兴组; 6.第四系; 7.楚木龙组; 8.林布宗组; 9.塔克那组; 10.多底沟组; 11.却桑温泉组; 12.三叠系麦隆岗组; 13.二叠系洛巴堆组; 14.石炭系松多岩组; 15.忿萨岗岩组; 16.褶皱冲断带; 17.逆冲断层; 18.正断层

2012; Wang *et al.*, 2016). Ji *et al.* (2009) 根据冈底斯带岩浆活动的特征, 将其分为 4 个不同的阶段: 205~152 Ma、109~80 Ma、65~40 Ma 和 33~13 Ma. 其中 205~152 Ma 岩体以花岗岩为主, 广泛

分布在冈底斯带南缘 (Ji *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2017a). 109~80 Ma 岩体主要分布在冈底斯带南缘和东段, 岩性从辉长岩到花岗岩均有分布. 65~40 Ma 是冈底斯

带岩浆活动最为活跃的时期,该时期的侵入岩和喷出岩构成了冈底斯带的主体(Ji *et al.*, 2009; 莫宣学等, 2009; Zhu *et al.*, 2011, 2015; 孟元库等, 2015)。此外,该时期的岩石类型最为复杂多样,侵入岩以花岗岩类为主,喷出岩以林子宗中—酸性火山岩(典中组、年波组和帕那组)为主(莫宣学等, 2009; 徐旺春, 2010)。33~13 Ma是冈底斯带另一个重要的岩浆活动时期,前人研究表明,33~30 Ma的花岗岩具有埃达克岩的地球化学特征,认为其属于碰撞型埃达克岩(Harrison *et al.*, 2000; Guan *et al.*, 2012; 王青, 2016)。后碰撞成因的中新世斑岩体,岩性以花岗斑岩和闪长玢岩为主,多呈小型岩株、岩滴或岩瘤状分布,是目前冈底斯带最主要的含矿岩体(Hou *et al.*, 2004; 侯增谦等, 2008)。

研究区及邻区位于冈底斯带中东段(图1a),主要出露地层有下白垩统林布宗组(K_1l)、楚木龙组(K_{1c})和塔克那组(K_{1t}),上侏罗统多底沟组(J_3d)和却桑温泉组(J_{3q})(图1b, 图2),区内地层走向为NNW向;岩浆岩主要分布在研究区外围,俯冲期和碰撞期的花岗岩类均有分布,锆石U-Pb定年结果

为152~23 Ma(Chung *et al.*, 2009; Ji *et al.*, 2012),是新特提斯洋俯冲和印—亚板块碰撞的产物。研究区及邻区的构造整体走向近东西,次级构造线多为NNW向展布(图2)(马士委等, 2016)。研究区及邻区发育有NNW或者NW向的脆性断裂、韧性剪切带以及大型褶皱(图2)。研究区内火成岩以晚白垩世花岗岩类和早侏罗世叶巴组火山岩为主,其次可见少量的基性辉长—辉绿杂岩体(图1b)。下白垩统林布宗组(K_1l)和上侏罗统多底沟组(J_3d)是甲玛矿区最为主要的岩性单元(图1b, 图2)。林布宗组(K_1l)岩性以灰黑色板岩、泥岩、粉砂岩和石英砂岩为主,夹泥晶灰岩及薄煤层。多底沟组以灰白色、灰色块状结晶灰岩为主,夹少量薄层灰岩、大理岩和砂泥岩。多底沟组(J_3d)和林布宗组(K_1l)野外为明显的断层接触关系,之间发育大型构造滑脱带(图2)(马士委等, 2016)。甲玛矿区内的岩浆岩主要呈岩滴或者岩枝状展布,岩性包括花岗闪长斑岩、花岗斑岩、石英闪长斑岩、闪长玢岩、煌斑岩和辉绿玢岩等(唐菊兴等, 2010; 马士委等, 2016)。

本文对甲玛矿区钻孔中不同类型的矿化岩体进

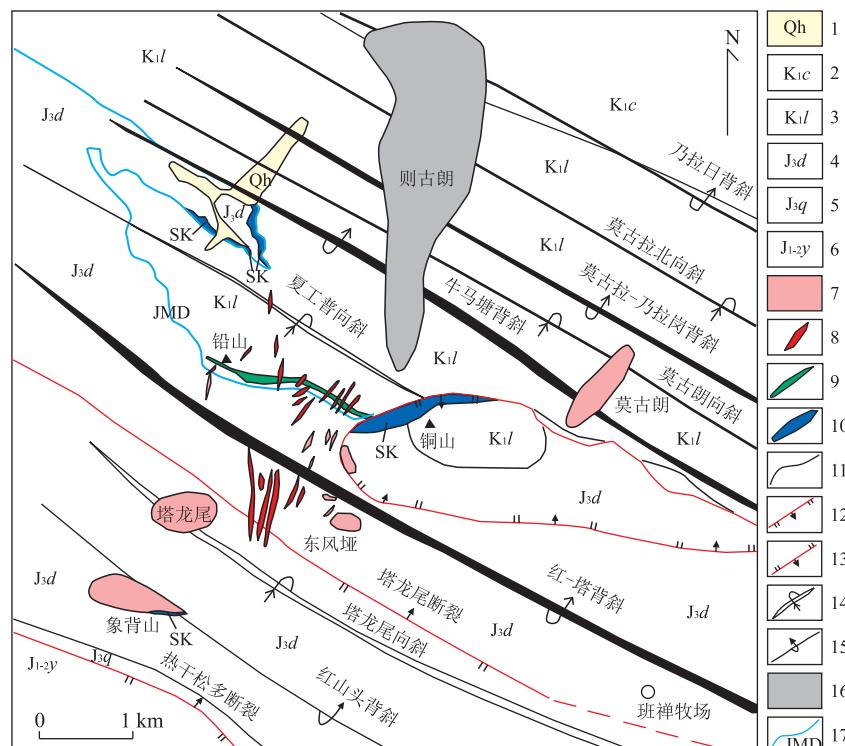


图2 冈底斯带甲玛铜多金属矿集区地质简图

Fig.2 Simplified geological map of the Jiamama copper polymetallic deposit and adjacent regions, southern Tibet
据唐菊兴等, 2011; 钟康惠等, 2012. 1.第四系; 2.下白垩统楚木龙组; 3.下白垩统林布宗组; 4.上侏罗统多底沟组; 5.上侏罗统却桑温泉组; 6.下—中侏罗统叶巴组; 7.花岗斑岩; 8.岩脉; 9.矽卡岩型1号主矿体; 10.矽卡岩矿体(SK-skarn); 11.地质界线; 12.正断层; 13.逆断层; 14.倒转向斜; 15.倒转背斜; 16.矽帽; 17.甲玛滑脱带

行了系统性采样，并进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年和全岩主、微量元素地球化学分析，测试对象为：钻孔 ZK1618 和 ZK2010 的花岗斑岩；钻孔 ZK2010 的二长花岗斑岩；ZK2010、ZK809、ZK1608 和 ZK1526 的花岗闪长斑岩；钻孔 ZK1624、ZK1501 和 ZK3212 的石英闪长玢岩和辉长闪长玢岩。虽然样品采集于钻孔，但涵盖了甲玛矿区主要的含矿斑岩体，而且与矿区野外露头岩体或岩脉相对应。因此，本文测定的锆石 U-Pb 年龄和全岩地球化学数据可以代表矿区岩体的侵位时代和含矿岩浆的地球化学特征。

1.2 样品岩相学特征

甲玛矿区主要出露沉积岩系，侵入岩多为隐伏岩体，岩石类型较为复杂，主要包括辉绿玢岩、煌斑岩、辉长闪长玢岩、石英闪长玢岩、花岗斑岩、二长花岗斑岩和花岗闪长斑岩等，与成矿密切相关的岩石以石英闪长玢岩和辉长闪长玢岩、花岗斑岩、二长花岗斑岩和花岗闪长斑岩为主（唐菊兴等，2010；郑文宝，2012）。

1.2.1 花岗斑岩 灰白色，典型的斑状结构，块状构造，斑晶含量 25%~30%，主要由钾长石（Kfs）、斜长石（Pl）和石英（Qtz）组成，含少量黑云母（Bt）。钾长石，含量约 10%，粒度 1~5 mm，自形一半自形板柱状，可见卡式双晶，少量钾长石发生高岭土化；斜长石，含量约 10%，斑晶粒度 2~6 mm，半自形一半自形晶，可见明显的环带结构和聚片双晶；石英，含量约 2%~5%，粒度 1~5 mm，他形粒状，可见港湾状溶蚀结构，部分颗粒可见波状消光现象；黑云母，含量约 3%~5%，粒度 1~4 mm，呈鳞片状，黄褐色，后期多被绿泥石和碳酸盐交代。花岗斑岩基质主要由长英质、少量黑云母和角闪石（Hbl）组成，半隐晶质结构。副矿物含量~5%，多为锆石、磷灰石、榍石和磁铁矿等。

1.2.2 二长花岗斑岩 浅灰色至灰白色，斑状结构，块状构造，斑晶含量 30%~35%，主要由钾长石、斜长石和石英组成。钾长石，含量约 15%，粒度 2~5 mm，自形一半自形板状或柱状，部分晶体可见卡式双晶；斜长石，含量约 10%~15%，粒度 1~4 mm，自形一半自形板状或粒状，部分颗粒溶蚀成浑圆状，可见较为明显的环带结构和聚片双晶，局部发生绢云母化；石英，含量约 5%，粒度 1~5 mm，他形粒状，发育港湾状溶蚀凹坑，波状消光现象明显；黑云母，含量约 2%，粒度 1~3 mm，呈叶片状，并发生绢云母化（转变为细粒白云母）和碳酸盐化。二长花岗斑岩的基质为隐晶质一半隐晶质结构，主要由

长石、石英、少量黑云母和角闪石组成。副矿物含量约 5%，可见磷灰石、锆石、榍石和磁铁矿等。二长花岗斑岩后期蚀变以钾化和黑云母化为主，伴随有部分硅化，可见大量次生热液黑云母；矿化以浸染状铜矿化和脉状辉钼矿化为主。

1.2.3 花岗闪长斑岩 深灰—灰白色，斑状结构，块状构造，斑晶含量 25%~30%，主要由斜长石、角闪石、黑云母组成，此外含少量钾长石和石英，偶见硬石膏斑晶。斜长石，含量约 15%，粒度 2~5 mm，自形一半自形宽板状或粒状，聚片双晶发育，少见绿帘石化、绿泥石化，有的斜长石颗粒隐约见环带结构；角闪石，含量~5%，粒度 1~4 mm，细粒半自形—自形长柱状或针状，半定向构造，后期多被绿泥石、碳酸盐和黑云母交代；黑云母，含量<5%，粒度 1~4 mm，呈叶片状零星分布；石英，含量<5%，粒度 1~4 mm，他形粒状或浑圆状，发育增生边，波状消光现象明显。花岗闪长斑岩基质为显晶质—细粒结构，主要由长英质、角闪石和少量黑云母组成。副矿物，含量约 3%，主要由磷灰石、锆石、榍石和不透明矿物（金属矿物）等组成。花岗闪长斑岩的蚀变以硅化、绢云母化、绿泥石化和绿帘石化为主；矿化以浸染状铜矿化和脉状辉钼矿化为主。

1.2.4 石英闪长玢岩 灰绿色—灰白色，斑状结构，块状构造，斑晶含量~30%，由斜长石、角闪石和石英组成，局部区域可见斜长石聚斑晶，偶见硬石膏斑晶。斜长石，含量约 15%，粒度 1~10 mm，半自形板状，可见聚片双晶，部分长石颗粒遭受绢云母化、黝帘石化；角闪石，含量约 10%，粒度 1~3 mm，浅黄—褐色，半自形—自形长柱状或粒状，多被绿泥石和碳酸盐交代；石英，含量约 5%，粒度 1~6 mm，他形粒状，部分颗粒溶蚀成浑圆状。石英闪长玢岩基质为显晶质—细粒结构，主要由斜长石和角闪石组成。副矿物含量约 3%，为磷灰石、榍石、磁铁矿和钛铁矿等。石英闪长玢岩蚀变相对较强，以硅化为主，其次可见热液黑云母交代角闪石以及叠加发育碳酸盐化、绢云母化、绿泥石及泥化；矿化以浸染状辉钼矿化和铜矿化为主。

1.2.5 辉长闪长玢岩 灰绿色—灰黑色，斑状结构，块状构造，斑晶主要由斜长石和角闪石组成，此外可见少量石英和辉石颗粒。斜长石，含量约 10%，粒度 1~7 mm，半自形板状或他形粒状，发育聚片双晶，可见绢云母化；角闪石，含量约 5%，粒度 2~4 mm，褐色，半自形—自形长柱状或粒状，多被绿泥石、碳酸盐和黑云母交代；辉石，含量约 3%，粒度

1~2 mm,半自形粒状或短柱状;石英,含量约2%,粒度1~3 mm,他形粒状,部分溶蚀成浑圆状.辉长闪长玢岩基质为细粒结构,主要由斜长石和角闪石组成.副矿物含量小于5%,为榍石、磷灰石、磁铁矿和钛铁矿等,蚀变可见硅化和黑云母化,矿化相对较弱.

2 测试方法

锆石的分选工作在河北省地质测绘院岩矿实验室完成,详细的步骤如下:首先将所测试的岩石样品清洗干净,然后进行物理机械粉碎,按照重力和磁选的方法进行初步筛选,然后再在双目镜下进一步挑纯,确保已选的锆石颗粒完整,没有微小裂隙或破裂.下一步把已经挑选好的锆石粘在环氧树脂上,经抛光后进行透射光、反射光和阴极发光扫描电镜照相(CL, Cathode-luminescence images).锆石的制靶和阴极发光(CL)图像在中国地质科学院矿产资源研究所完成,锆石U-Pb年龄在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上测定.LA-ICP-MS分析仪器的激光剥蚀系统为New Wave公司生产的UP213型,ICP-MS的型号为Agilent 7500a型.剥蚀物质的载气为He气,然后将剥蚀物通过直径为3 mm的PVC塑料管传送到ICP-MS,在进入ICP-MS前与Ar气进行混合,形成He-Ar混合气.U-Pb分馏根据澳大利亚锆石标样GEMOC GJ-1($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 608.5 ± 1.05 Ma, Jackson *et al.*, 2004)来校正,采用锆石标样Mud Tank(732±5 Ma, Black and Gulson, 1978)作为内标以控制分析的准确性和精度.实验数据处理采用Glitter(ver. 4.4)软件,详细的分析方法和流程见Jackson *et al.*. (2004)和Griffin *et al.*. (2004).实验中由于 ^{204}Pb 的信号极低,以及载气中 ^{204}Hg 的干扰,该方法不能直接精确测得其含量,所以对所测试的数据运用Com Pb Corr # 3_15G程序来进行Pb校正.谐和年龄(Concordant)及加权平均年龄(Weighted)计算采用Isoplot (ver.4.11)程序完成(Ludwig, 2003).

全岩地球化学样品的粉碎、研磨由河北省地质测绘院岩矿实验室完成.全岩粉末地球化学(主量元素和微量元素)测试在澳实(广州)检测分析有限公司完成.首先将样品物理粉碎,然后清洗干净,选择新鲜的碎样再研磨到200目.主量元素和微量元素分别采用X荧光光谱仪(XRF, 仪器型号为Philips PW2404)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 仪

器型号为Perkin Elmer Elan 9000)完成,主量元素相对标准偏差(RSD)小于5%,微量元素RSD小于10%,具体操作步骤及流程详见Qian *et al.*. (2014)和孟元库(2016).

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

本文对甲玛矿集区内与成矿密切相关的花岗斑岩、二长花岗斑岩以及花岗闪长斑岩进行了锆石LA-ICP-MS U-Pb定年,详细的分析测试结果见附表1.

3.1.1 花岗斑岩 ZK1618-20 m 锆石为透明一半透明状,典型的棱柱状,大小100~50 μm不等,长短轴之比为1:1~2:1(图3).锆石具有明显的岩浆韵律环带,Th/U比值为0.49~2.49(>0.4),典型岩浆锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003).测试点均分布在谐和线上或者附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值=16.7±0.3 Ma(MSWD=1.8)(图4),代表了花岗斑岩的结晶成岩年龄.

ZK2010-413 m 样品的锆石也为典型的棱柱状、柱状,自形晶,大小为100~50 μm不等,长宽比为1:1~2:1(图3).所测锆石具有明显的岩浆韵律环带以及高的Th/U比值(0.60~2.03>0.4),平均值为1.0,显示了岩浆成因锆石的特征(Hoskin and Schaltegger, 2003).分析结果显示,所有测点均分布在谐和曲线上或者附近,没有明显的铅丢失,

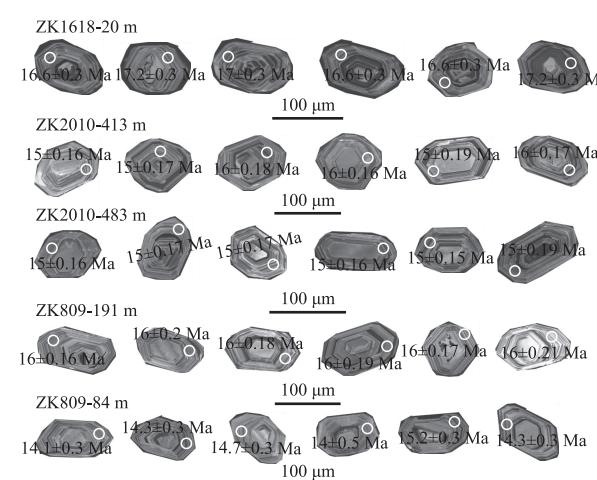


图3 冈底斯带甲玛铜多金属矿床矿化斑岩代表性锆石阴极发光CL图像

Fig.3 CL images of representative zircons of mineralized porphyries from the Jiamma copper polymetallic deposit in the Gangdese belt

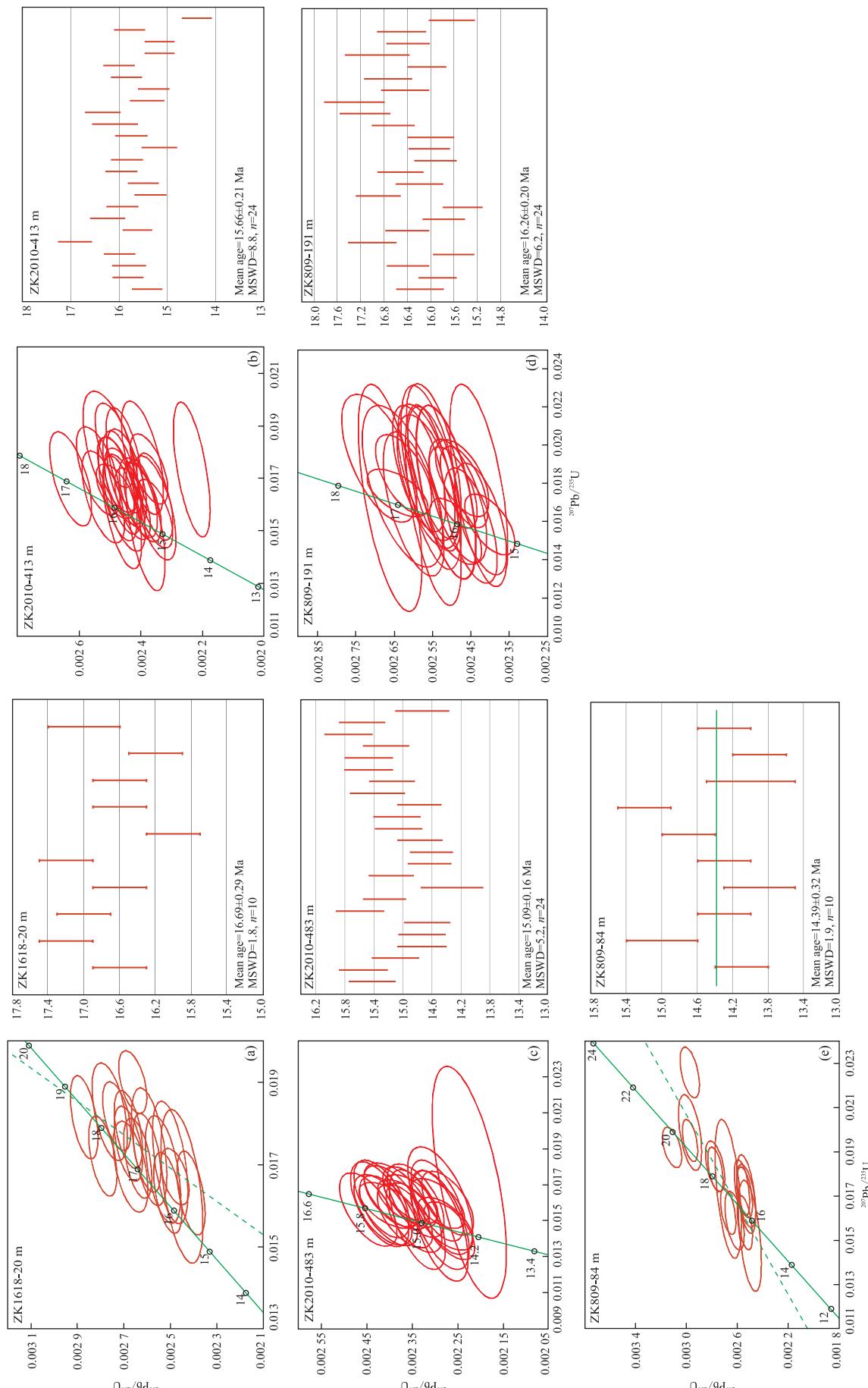


Fig. 4 固底斯带甲玛铜多金属矿床矽化斑岩年龄谱和图
Fig. 4 Concordia diagrams for zircons of mineralized porphyries from the Jiamal copper polymetallic deposit in the Gangdese belt

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 = 15.7 ± 0.2 Ma (MSWD=8.8)(图 4), 该年龄代表了甲玛矿区花岗斑岩的成岩结晶年龄。

3.1.2 二长花岗斑岩 二长花岗斑岩(ZK2010-483 m): 所测锆石为半透明状, 为典型的棱柱状自形晶体, 可见明显的振荡环带结构(图 3). 所测锆石大小为 $60\sim120\ \mu\text{m}$ 不等, 长宽比为 $1:1\sim2:1$. 测试结果显示, 所测锆石的 Th/U 比值介于 $0.54\sim1.38$, 均值为 $0.81>0.4$, 具有岩浆结晶锆石的特征(Hoskin and Schaltegger, 2003). 分析结果显示, 所有测点均位于谐和曲线上, 表明没有明显的普通铅丢失, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值 = 15.1 ± 0.2 Ma (MSWD=5.2)(图 4), 该年龄代表了二长花岗斑岩的成岩年龄。

3.1.3 花岗闪长斑岩 花岗闪长斑岩(ZK809-191 m): 所测锆石为典型的自形晶, 棱柱状, 大小为 $40\sim120\ \mu\text{m}$ 不等, 长短轴之比为 $1:1\sim3:1$ (图 3). 所测锆石可见较为明显的韵律环带结构, Th/U 比值介于 $0.70\sim2.80$, 均值为 $1.17>0.4$, 为典型的岩浆成因(Hoskin and Schaltegger, 2003). 分析结果显示, 所有测点均位于谐和线上或者附近(图 4), 表明没有明显的普通铅丢失, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 = 16.3 ± 0.2 Ma (MSWD=6.2), 该年龄代表了花岗闪长斑岩的结晶成岩年龄. 另一件花岗闪长岩样品(ZK809-84 m)的锆石为半透明状, 自形晶, 长宽比介于 $1:1\sim2:1$ (图 3). 高的 Th/U 比值 $0.48\sim2.22$ (均值 $1.39>0.4$)和明显的岩浆韵律环带暗示了所测锆石为典型的岩浆成因机制(Hoskin and Schaltegger, 2003). 测试结果显示, 测试点均分布在谐和线上或附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 14.4 ± 0.3 Ma (MSWD=1.9)(图 4), 代表了甲玛矿集区花岗斑岩的另一次岩浆侵位事件。

3.2 全岩地球化学

在大量钻孔岩心观察的基础上, 选择甲玛矿区矿化蚀变比较弱的斑岩进行全岩地球化学主微量元素分析, 测试对象为花岗斑岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩和辉长闪长玢岩. 测试结果见附表 2.

3.2.1 主量元素特征 (1) 花岗斑岩. 花岗斑岩 SiO_2 含量为 $61.60\%\sim69.62\%$ (平均值 66.33%); Al_2O_3 含量相对较低, 介于 $14.16\%\sim15.45\%$ (平均值 14.57%); CaO 含量介于 $2.43\%\sim5.17\%$ (平均 3.37%); Na_2O 和 K_2O 含量变化较大, 分别为 $3.21\%\sim5.18\%$ 和 $2.42\%\sim4.72\%$. 其中花岗斑岩的

$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值变化较大, 其中 3 个样品的比值介于 $0.72\sim0.94$, 为典型的钾质岩石, 其余的两个样品具有较高的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值, 分别为 1.60 和 1.83, 显示钠质岩石的特征; P_2O_5 和 TiO_2 含量较低, 分别为 $0.13\%\sim0.20\%$ (平均 0.16%) 和 $0.31\%\sim0.45\%$ (平均 0.38%). 花岗斑岩铝饱和指数 A/CNK 值介于 $0.68\sim1.01$, 平均为 $0.87(<1.1)$, 属于准铝质岩石(图 5a). 在硅碱(TAS)图解中(图 5b), 5 个样品均分布在亚碱性(sub-alkaline)花岗闪长岩区域, 3 个样品落入碱性石英二长岩区域, 并且里特曼指数(σ)分别为 $1.66\sim2.83$ 和 $3.45\sim3.81$, 属钙碱性和碱性岩石, 这与 TAS 图解的结果相一致. 此外, 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中(图 5c), 所测样品落入钙碱性、高钾钙碱性和钾玄岩系列范围, 在 AFM 图解中(图 5d)样品落入钙碱性系列范围.

(2) 二长花岗斑岩. 二长花岗斑岩的 SiO_2 含量为 67.94% ; Al_2O_3 含量相对较低, 为 14.21% ; CaO 含量 2.68% ; 全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量为 8.08% , 为钾质岩石; TiO_2 和 P_2O_5 含量相对较低, 分别为 0.43% 和 0.19% ; 铝饱和指数 A/CNK 值介于 $0.89<1.10$, 为准铝质岩石(图 5a). 在 TAS 图解中(图 5b), 所测样品分布在亚碱性石英二长岩区域, 并且里特曼指数(σ)为 2.64, 属钙碱性岩石, 与 TAS 图解的结果相一致. $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中(图 5c)样品落入高钾钙碱性系列范围, AFM 图解中(图 5d)样品落入钙碱性系列范围.

(3) 花岗闪长斑岩. 花岗闪长斑岩的 SiO_2 含量为 $62.99\%\sim73.01\%$ (平均 66.95%); Al_2O_3 含量变化较大, 含量介于 $12.84\%\sim16.16\%$ (平均含量 15.17%); CaO 含量 $1.64\%\sim3.95\%$ (平均 3.13%); Na_2O 和 K_2O 含量分别为 $2.23\%\sim5.01\%$ 和 $1.88\%\sim4.79\%$, 大部分样品相对富钠, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值介于 $1.30\sim2.26$, 其中 2 个样品 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值分别为 0.47 和 0.83, 显示出富钾的特征; TiO_2 和 P_2O_5 含量相对较低, 分别为 $0.29\%\sim0.58\%$ (平均 0.48%) 和 $0.12\%\sim0.29\%$ (平均 0.21%); 样品的铝饱和指数 A/CNK 值介于 $0.95\sim1.04$, 平均 $1.01<1.10$, 属于弱过铝质岩石(图 5a). 在硅碱(TAS)图解中(图 5b), 样品落在亚碱性花岗闪长岩和花岗岩区域, 1 个样品落入碱性石英二长岩区域, 里特曼指数(σ)介于 $1.42\sim2.08$, 落入碱性石英二长岩区域的样品其 σ 为 3.49, 属钙碱性和碱性岩石, 与 TAS 图解结果相符. $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中(图 5c)样品落入钙碱性、高钾钙碱性系列范围, AFM 图解中(图 5d)样品

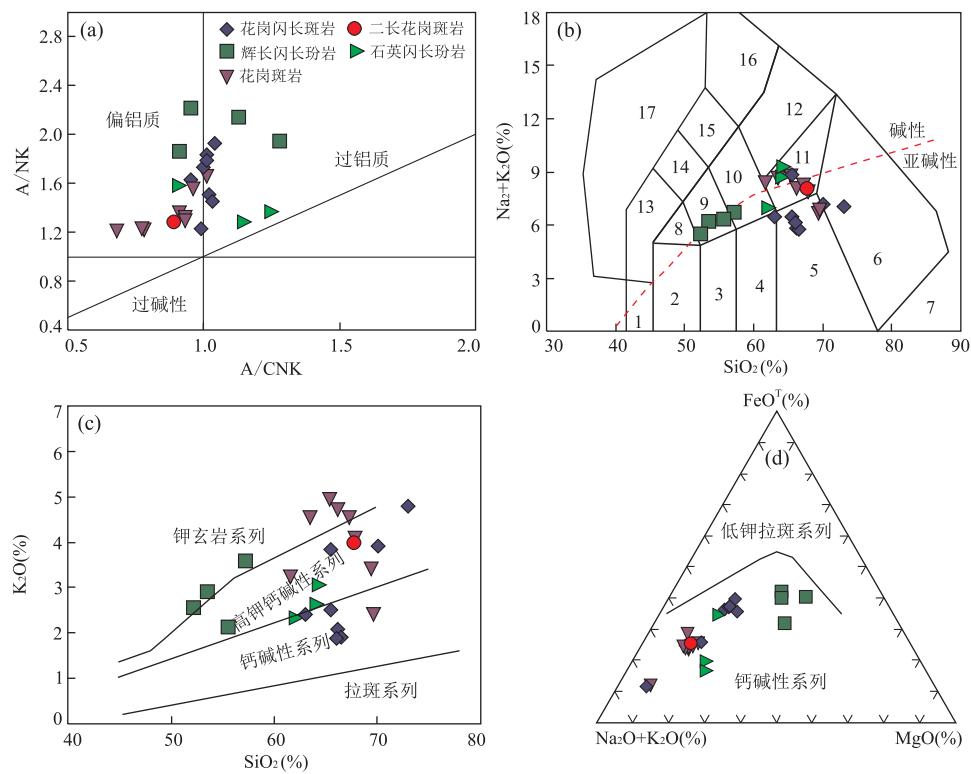


图 5 冈底斯带甲玛铜多金属矿床矿化斑岩主量元素判别图

Fig.5 Discriminative diagrams of major elements of mineralized porphyries from the Jiama copper polymetallic deposit in the Gangdese belt

图 a 据 Maniar and Piccoli(1989); 图 b 据 Middlemost(1994); 图 c 据 Peccerillo and Taylor(1976); 图 d 据 Irvine and Baragar(1971). 1. 橄榄辉长岩; 2. 亚碱性辉长岩; 3. 辉长闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 花岗岩闪长岩; 6. 花岗岩; 7. 石英岩; 8. 碱性辉长岩; 9. 二长辉长岩; 10. 二长闪长岩; 11. 二长岩; 12. 石英二长岩; 13. 正长岩; 14. 似长石辉长岩; 15. 似长石二长闪长岩; 16. 似长石二长正长岩; 17. 似长石正长岩

落入钙碱性系列范围。

(4) 石英闪长玢岩。石英闪长玢岩的 SiO₂ 含量 62.16%~64.36% (平均 63.56%); Al₂O₃ 含量 16.18%~17.66% (平均 17.09%); CaO 含量 0.68%~0.84%, 另外 1 个样品的 CaO 含量偏高, 为 4.13%; Na₂O 和 K₂O 含量分别为 4.66%~6.23% 和 2.34%~3.07%, Na₂O/K₂O 比值 1.99~2.31, 为钠质岩石; TiO₂ 和 P₂O₅ 含量相对较低, 分别为 0.65%~0.70% (平均 0.68%) 和 0.28%~0.40% (平均 0.34%); MgO 含量偏低, 介于 1.80%~2.74%, 然而具有较高的 Mg[#] 值 (71.58~78.74), 另外 1 个样品的 Mg[#] 值偏低 (48.58); 铝饱和指数 A/CNK 值介于 1.15~1.25, 另外 1 个样品偏低 0.91, 显示出强过铝质岩石的地化特征 (图 5a). 在硅碱 (TAS) 图解中 (图 5b), 2 个样品落在碱性石英二长岩区域, 1 个样品落在亚碱性闪长岩区域, 对应的里特曼指数 σ 分别为 3.60~4.05 和 2.92, 属钙碱性和碱性岩石, 与 TAS 图解相一致. 在 SiO₂-K₂O 图解中 (图 5c), 样品落入高钾钙碱性系列范围, AFM 图解中 (图

5d) 样品落入钙碱性系列范围.

(5) 辉长闪长玢岩。辉长闪长岩的 SiO₂ 含量为 52.2%~57.22% (平均 54.62%); Al₂O₃ 含量相对较高, 介于 16.91%~18.40% (平均含量 17.52%); CaO 含量 2.58%~5.61% (平均含量为 4.44%); Na₂O、K₂O 的含量相对较低, 分别为 2.95%~4.22% 和 2.13%~3.60%, 其中 Na₂O/K₂O 比值 1.14~1.98, 为钠质岩石, 仅有 1 个样品的 Na₂O/K₂O 比值为 0.86, 显示出钾质岩石的特征; TiO₂ 和 P₂O₅ 含量较低, 分别为 0.85%~0.93% (平均 0.89%) 和 0.26%~0.37% (平均 0.31%); 此外, 所测样品具有高的 MgO 含量 (5.41%~7.63%) 和高的 Mg[#] 值 (60.21~71.89), 暗示了幔源物质的地化特征; 样品的铝饱和指数 A/CNK 值介于 0.91~1.28, 2 个样品为准铝质岩石, 2 个样品属于强过铝质岩石 (图 5a). 其次, 在硅碱 (TAS) 图解中 (图 5b), 大部分样品位于亚碱性二长闪长岩区域, 里特曼指数 (σ) 介于 3.17~3.67, 属钙碱性岩石, 与 TAS 图解结果相符. 在 SiO₂-K₂O 图解中 (图 5c) 大部分样品

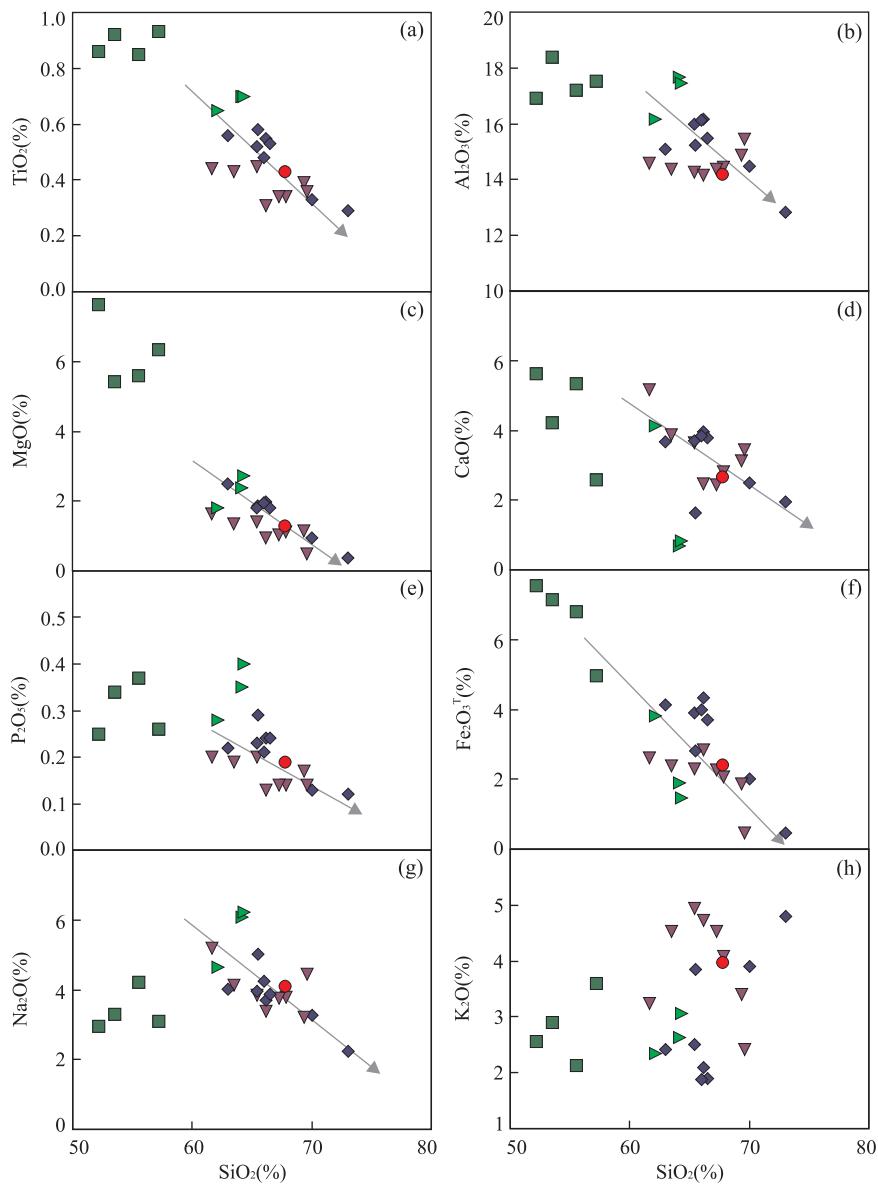


图 6 冈底斯带甲玛铜多金属矿床矿化斑岩 SiO_2 和主要氧化物的 Harker 图解

Fig.6 Harker diagrams of the SiO_2 and oxides of mineralized porphyries from the Jiamama copper polymetallic deposit in the Gangdese belt

落入钾玄岩系列范围, AFM 图解中(图 5d)样品落入钙碱性系列范围。

在 Harker 图解上(图 6), SiO_2 与其他主要元素之间具有很好的负相关性, 而与 Na_2O 、 K_2O 的相关性不太明显, 这可能和后期 K、Na 元素强的活动性有关。在 SiO_2 - K_2O 图解中(图 5c), 大多数被测样品位于高钾钙碱性系列, 少数位于钙碱性系列和钾玄岩系列, 这与藏南中新世埃达克质岩石的地球化学结果相一致(Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004; Gao *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2007; 陈希节等, 2014)。此外, 图 7 还显示, 辉长闪长玢岩与花岗质斑岩不同的谐变关系, 暗示了它们岩浆成因可能

不同。

3.2.2 微量元素特征

花岗斑岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩、石英闪长玢岩和辉长闪长玢岩, 在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 7), 均明显富集大离子亲石元素(LILEs)和 Th、U 元素, 强烈亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(HFSEs)。其中石英闪长玢岩和辉长闪长玢岩 Ti、P 负异常不明显, 不同于花岗斑岩, 这与前人在矿区其他岩心或露头获得的结果和认识相一致(郑文宝, 2012; 秦志鹏, 2013)。在主量—微量元素谐变图解中(图 8), 不同成矿阶段岩石的主量(SiO_2)与微量元素没有较为明显的相关性, 这表明不同类型的斑岩体虽然成岩年龄

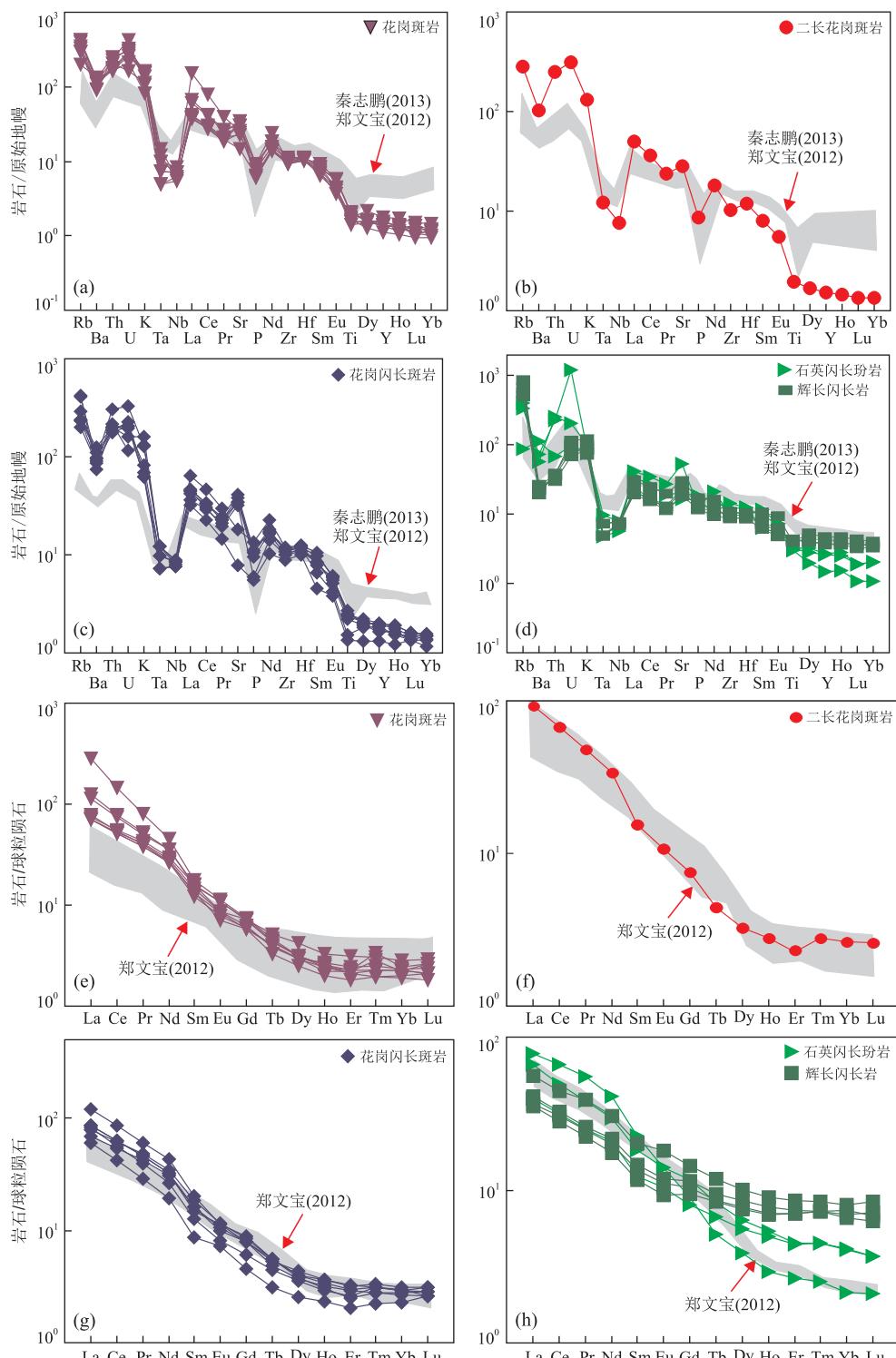


图 7 冈底斯带甲玛铜多金属矿床矿化斑岩原始地幔标准化微量元素蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化曲线图

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams and chondrite-normalized rare earth element distribution patterns of mineralized porphyries from the Jiama copper polymetallic deposit in the Gangdese belt

图 a~d 据标准化据 Sun and McDonough(1989);图 e~h 据标准化据 Boynton(1984)

相近，并且位于同一侵位中心，但是可能来自于不同的母岩浆的分离、结晶。

3.2.3 稀土元素特征 (1)花岗斑岩.花岗斑岩稀土

总含量介于 $106.76 \times 10^{-6} \sim 162.57 \times 10^{-6}$ ， $(\text{La/Yb})_N$ 比值为 $25.79 \sim 54.53$ ，LREEs/HREEs 比值介于 $18.20 \sim 30.94$ ，均远大于 1，显示轻稀土富集

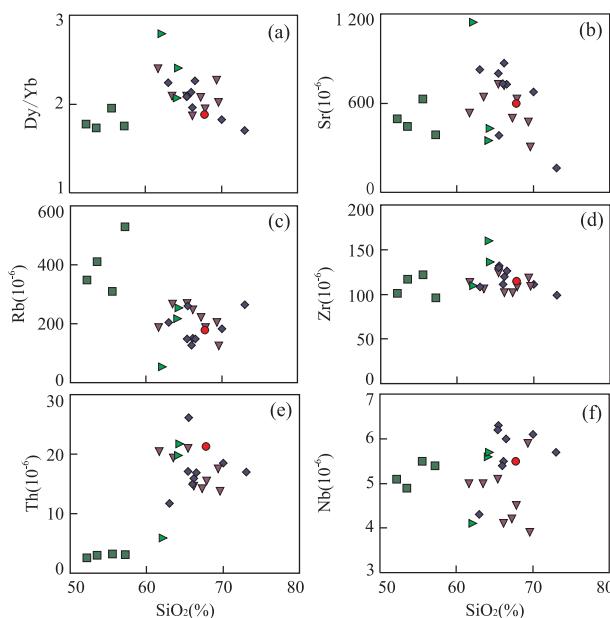


图8 冈底斯带甲玛铜多金属矿床矿化斑岩 SiO_2 vs. 微量元素 Harker 图解

Fig.8 Harker diagrams of SiO_2 vs. trace elements of mineralized porphyries from the Jiama copper polymetallic deposit in the Gangese belt

的特征.其中样品 L5-3-10 稀土总量偏高 296.55×10^{-6} , $(\text{La/Yb})_N$ 为 141.23, $\text{LREEs/HREEs} = 56.81$.花岗斑岩体的 Eu 异常不明显, $\text{Eu}/^* \text{Eu}$ 为 0.79~1.01,集中在 0.9 左右,显示出较弱的异常.轻稀土元素内部也存在明显的分馏作用($(\text{La/Sm})_N = 4.59 \sim 15.89$),而重稀土元素内部则存在相对弱的分馏作用($(\text{Gd/Yb})_N = 2.56 \sim 3.68$).球粒陨石标准化的 REE 曲线呈“LREEs 富集、HREEs 亏损”的右倾模式(图 7).

(2)二长花岗斑岩.二长花岗斑岩稀土总量为 140.02×10^{-6} , $(\text{La/Yb})_N$ 为 35.22, 轻重稀土 $\text{LREEs/HREEs} = 24.46$, 均远大于 1, 表明了轻稀土较重稀土富集;没有 Eu 的异常, $\text{Eu}/^* \text{Eu}$ 为 1.0.此外,轻稀土元素内部也存在明显的分馏作用($(\text{La/Sm})_N = 6.08 > 1$),而重稀土元素内部存在相对弱的分馏作用($(\text{Gd/Yb})_N = 2.86$).球粒陨石标准化的 REE 曲线呈“LREEs 富集、HREEs 亏损”的右倾模式(图 7).

(3)花岗闪长斑岩.花岗闪长斑岩稀土总量为 $86.87 \times 10^{-6} \sim 175.71 \times 10^{-6}$, $(\text{La/Yb})_N$ 为 25.30~42.70($\text{LREEs/HREEs} = 18.31 \sim 27.11$); Eu 异常不明显或者具有弱的异常, $\text{Eu}/^* \text{Eu}$ 为 0.84~1.16, 多集中在 0.9 左右.此外,轻稀土元素内部存在明显的分馏作用($(\text{La/Sm})_N = 4.10 \sim 6.92$),而重稀土元素

内部存在相对弱的分馏作用($(\text{Gd/Yb})_N = 2.00 \sim 3.24$).球粒陨石标准化的 REE 曲线呈“LREE 富集、HREE 亏损”的右倾模式(图 7).

(4)石英闪长玢岩.石英闪长玢岩稀土总量为 $74.15 \times 10^{-6} \sim 140.35 \times 10^{-6}$, $(\text{La/Yb})_N$ 为 9.61~36.34($\text{LREEs/HREEs} = 8.52 \sim 21.82$);没有 Eu 异常, $\text{Eu}/^* \text{Eu}$ 为 0.96~1.04,多集中在 1 左右.轻稀土元素内部存也有明显的分馏作用($(\text{La/Sm})_N = 3.19 \sim 3.64$),重稀土元素内部也存在一定的分馏作用($(\text{Gd/Yb})_N = 1.95 \sim 4.22$).球粒陨石标准化的 REE 曲线(图 7)呈“LREEs 富集、HREEs 亏损”的右倾模式.

(5)辉长闪长玢岩.石英闪长玢岩稀土总量为 $76.55 \times 10^{-6} \sim 112.56 \times 10^{-6}$, $(\text{La/Yb})_N$ 为 5.40~7.13 ($\text{LREEs/HREEs} = 5.56 \sim 6.77$); Eu 异常不明显, $\text{Eu}/^* \text{Eu}$ 为 0.88~1.06,多集中在 0.9 附近.轻稀土元素内部存在明显的分馏作用($(\text{La/Sm})_N = 2.76 \sim 3.03$),重稀土元素内部存在相对弱的分馏作用($(\text{Gd/Yb})_N = 1.43 \sim 1.81$).球粒陨石标准化的 REE 曲线呈“LREEs 富集、HREEs 亏损”的右倾模式(图 7).

综上所述,在稀土元素球粒陨石标准化图上(图 7),甲玛矿区花岗斑岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩和辉长闪长玢岩均呈“LREEs 富集、HREEs 亏损”的右倾模式配分图,表现为强烈的 LREEs 分异和相对弱的 HREEs 分异,并没有明显的 Eu 异常,仅表现为弱的 Eu 负异常或正异常,暗示了岩浆源区没有斜长石的残留,这与前人在甲玛矿集区取得的认识较为一致(郑文宝, 2012; 秦志鹏, 2013).

4 讨论

4.1 成矿时代

综合结果显示,取自钻孔的花岗斑岩、二长花岗斑岩和花岗闪长斑岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年分别为 15.7~16.7 Ma、15.1 Ma 和 14.4~16.3 Ma,与前人的研究结果在误差范围内相一致(唐菊兴等, 2010; 秦志鹏等, 2011; 应立娟等, 2011; 郑文宝, 2012; Zheng et al., 2016).在本文研究的基础上,通过梳理前人研究成果,甲玛矿集区的花岗斑岩成岩时代介于 14.2~16.7 Ma(集中为 15.3~16.7 Ma);二长花岗斑岩成岩时代为 14.8~15.6 Ma;花岗闪长斑岩的成岩时代为 14.1~16.3 Ma(集中为 15.7~16.3 Ma);石英闪长玢岩的

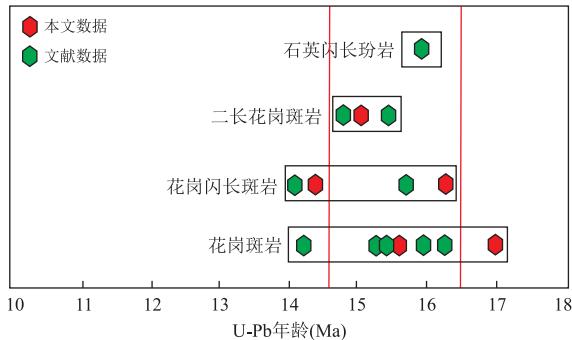


图 9 冈底斯带甲玛铜多金属矿床矿化斑岩年龄统计
Fig.9 Statistical graph of geochronological ages of mineralized porphyries from the Jiama copper polymetallic deposit in the Gangdese belt

成岩时代为 16.0 Ma。因此,甲玛矿区内的岩浆具有脉动式、多期次活动的特征,主要集中在 14.5~16.5 Ma(图 9)。

辉钼矿主要产于甲玛铜多金属矿床矽卡岩、斑岩和角岩中,其中辉钼矿的年龄可以代表甲玛矿区的成矿时代(唐菊兴等,2010)。李光明等(2005)和应立娟等(2009, 2010, 2011)获得了甲玛矿区辉钼矿 Re-Os 同位素年龄(15.3 Ma),该年龄和角岩以及斑

岩中的 Re-Os 同位素年龄较为接近(14.7 Ma),属于中新世 Langhian 期。因此,甲玛矿区的主要成矿时间为 15.3~14.7 Ma。这与冈底斯岩浆带其他斑岩型铜多金属矿床的成矿时间近乎一致,均集中在 13~17 Ma(侯增谦等,2008; Zheng *et al.*, 2014),均为后碰撞阶段的产物。此时拉萨地体发育大量的南北—北东向的伸展构造(陈希节等,2014; Li *et al.*, 2015b),为大量中新世斑岩体的侵入提供了空间,形成该时期大型—超大型的铜多金属矿床。

综上所述,甲玛矿区含矿斑(玢)岩成岩年龄主要集中在 16.7~14.1 Ma,而与矽卡岩—斑岩—角岩成矿密切相关的花岗斑岩和二长花岗斑岩的成岩时代介于 16.7~14.8 Ma,而成矿时代为 15.3~14.7 Ma,成岩和成矿时代相差约 1 Ma。

4.2 岩浆源区及岩石成因

地球化学特征显示,冈底斯带甲玛矿区与成矿密切相关的岩体均具有典型的埃达克质岩石(Adakite rocks)的地球化学特征(Defant and Drummond, 1990),虽然它们的侵位时间和侵位空间相近,但是在岩浆源区和组成上可能存在差异。图 10 显示,通过与世界上不同地区产出的埃达克质岩石

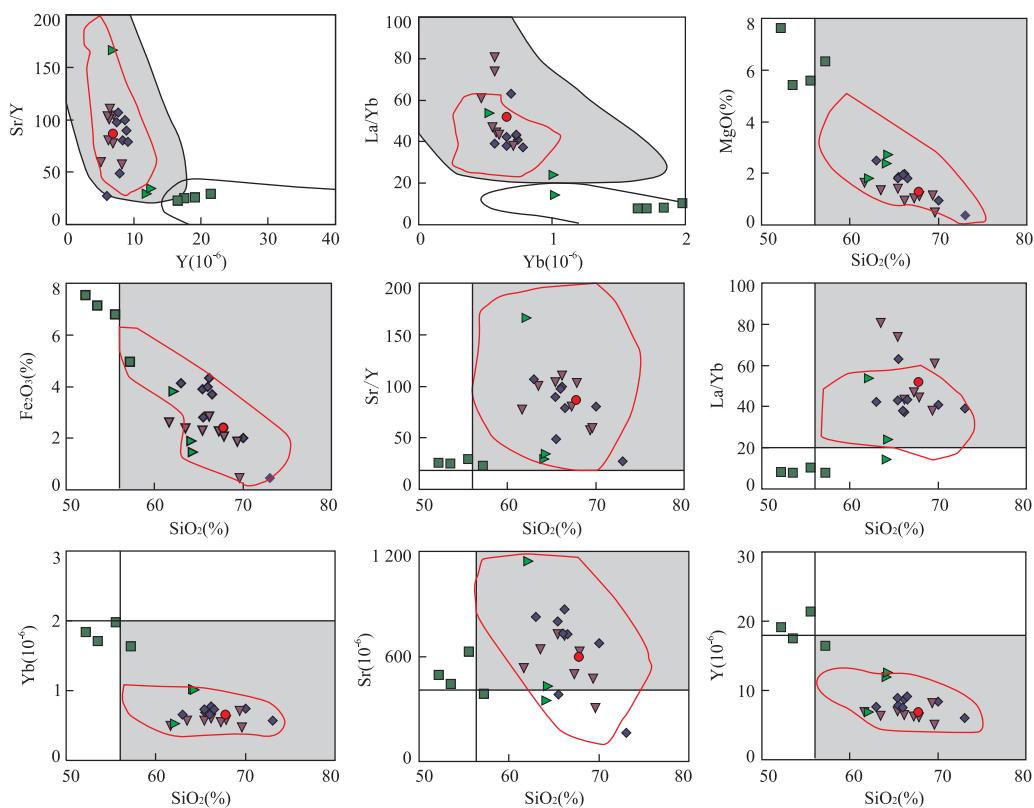


图 10 冈底斯带甲玛矿区花岗斑岩的地球化学亲缘性判别图解

Fig.10 Geochemical discrimination diagrams for porphyry rocks from Jiama ore deposits in the Gangdese belt
底图据 Richards and Kerrich(2007);红色虚线修自秦克章等(2014);浅灰色区域代表埃达克岩的成分区域

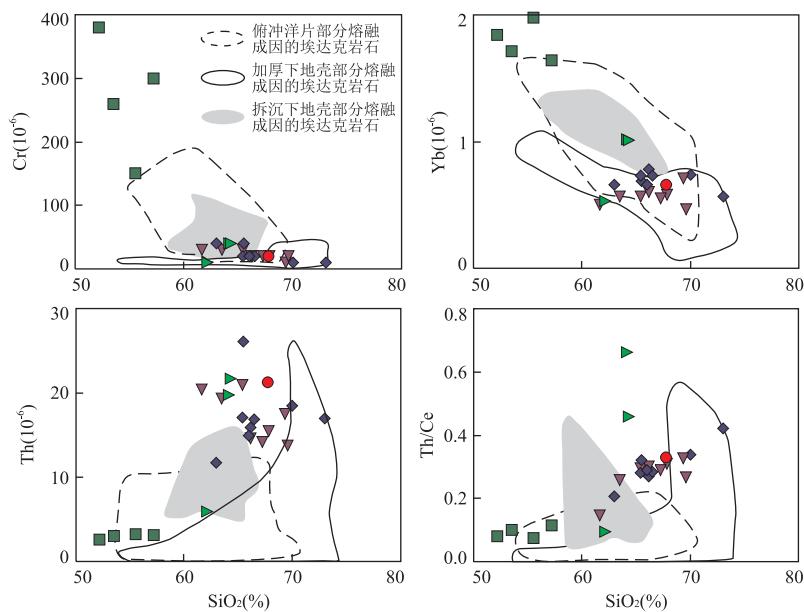
图 11 冈底斯带甲玛铜多金属矿床矿化斑岩 SiO₂ vs. 微量元素判别图解

Fig.11 Discrimination diagrams of the SiO₂ vs. trace elements of mineralized porphyry from the Jiama copper polymetallic deposit in the Gangdese belt

据 Wang et al. (2006); 秦克章等(2014)

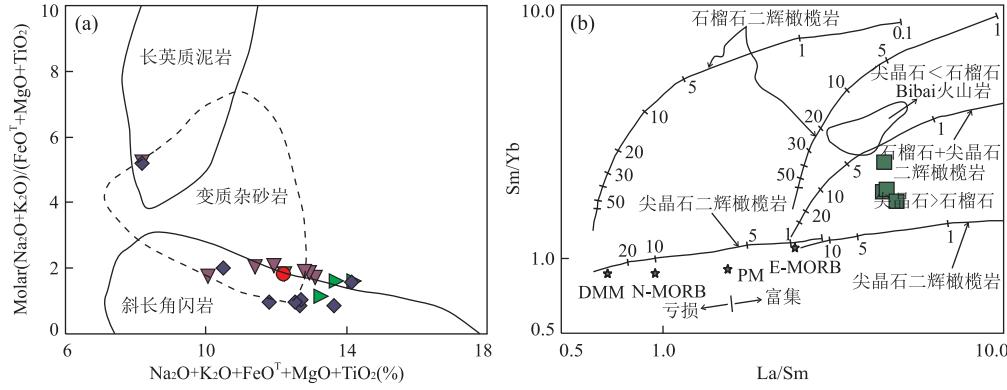


图 12 冈底斯带甲玛铜多金属矿床矿化斑岩浆源区判别图解

Fig.12 The magma source discriminative diagrams of mineralized porphyries from the Jiama copper polymetallic deposit in the Gangdese belt

图 a 据 Patino Douce(1999); 图 b 据朱弟成等(2008)

的地球化学判断标准(Richards and Kerrich, 2007)进行投图比较可知,研究区内的样品几乎均落在埃达克质岩石范围内(图 10),并且与藏南中新世埃达克质岩石和驱龙矿区埃达克质岩石具有相同的地球化学特征(秦克章等,2014; Hu et al., 2015; 孙嘉等,2017).从图 10 中可以看出,辉长闪长玢岩与其他岩石具有不同的特征,充分表明了甲玛矿区岩石来自不同的岩浆源区.秦克章等(2014)认为驱龙矿区与成矿有关的埃达克质岩石来源于加厚的基性下地壳(冈底斯中生代岩浆弧的根部)的部分熔融,而与俯冲板块的部分熔融或富集地幔无关.图 11 揭

示,甲玛矿区侵入岩(除辉长闪长斑岩外)几乎全部落在加厚下地壳部分熔融成因的埃达克质岩石范围内或附近(Petford and Atherton, 1996; Johnson et al., 1997; Xiong et al., 2003; Wang et al., 2006; 秦克章等,2014).此外,甲玛矿区岩石 Sr-Nd-Pb 稳定同位素特征表明,石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩、花岗斑岩源于新生的下地壳(秦志鹏,2013),并且区域上同时期同类型的驱龙矿床 Hf 同位素特征表明驱龙矿区岩浆源于新生下地壳(秦克章等,2014; Hu et al., 2015; 孙嘉等,2017).在花岗岩源区判别图解中(图 12a),石英闪长玢岩和

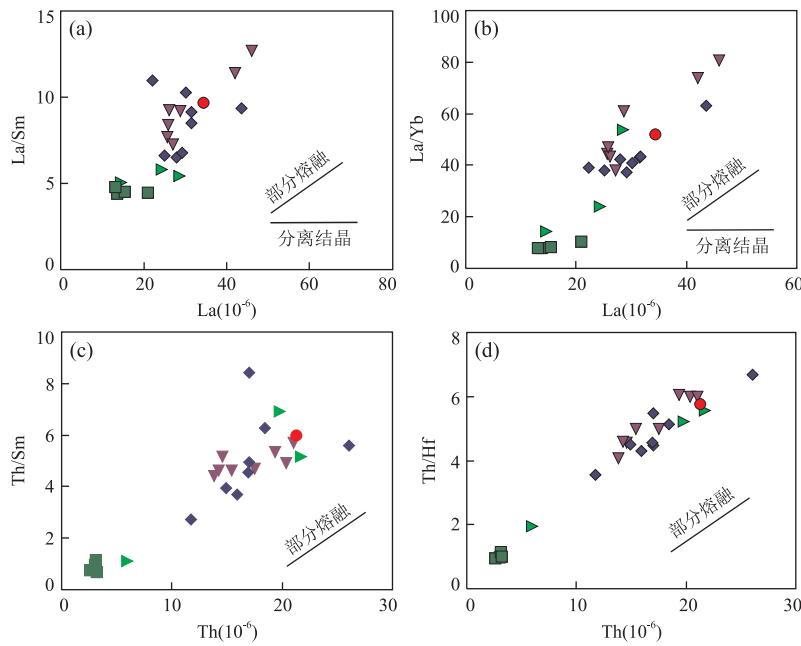


图 13 冈底斯带甲玛铜多金属矿床矿化斑岩部分熔融判别图解

Fig.13 Partial melting discriminative diagrams of mineralized porphyry from Jiama copper polymetallic deposit in the Gangdese belt
据 Schiano *et al.* (2010)

花岗闪长斑岩大部分落入斜长角闪岩范围内,进一步说明其岩浆源区主要为下地壳变基性岩(Patino Douce, 1999),而二长花岗斑岩和花岗斑岩样品分布在斜长角闪岩与变质杂砂岩接触范围内,说明新生基性下地壳与中上地壳可能发生了岩浆混合作用,即基性与中酸性岩浆混合,这也和不均一的 $Mg^{\#}$ 值相一致(附表 2). 在图 13 中,矿区所有样品总体演化趋势平行于部分熔融趋势线,表明矿区岩石的地球化学特征主要受岩浆源区部分熔融的影响,后期演化过程中没有经历明显的分离结晶作用. 矿区石英闪长玢岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩和花岗斑岩均具有较高的 $Mg^{\#}$ 值(40~78; 附表 2),与幔源物质加入形成的岩石 $Mg^{\#}$ 值相一致(>40; Rapp and Watson, 1995),表明矿区内地幔物质混染的结果一致,并且花岗斑岩、二长花岗斑岩和花岗闪长斑岩中暗色包体、斜长石和锆石等特征均表明矿区岩浆混合作用明显(郑文宝, 2012; 秦志鹏, 2013). 综上所述,甲玛矿区石英闪长玢岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩和花岗斑岩是加厚基性新生下地壳部分熔融形成,源区或岩浆演化过程中受到过地幔物质的混染,并且与中上地壳发生岩浆混合作用.

关于矿区辉长闪长玢岩的源区,本文也进行了详细的讨论. 通常而言源于软流圈地幔的玄武岩

La/Nb 比值 < 1.5, La/Ta 比值 < 22, 岩石圈地幔玄武岩则与之相反(Huang *et al.*, 2000). 矿区辉长闪长玢岩的 La/Nb 比值介于 2.43~3.80, La/Ta 比值介于 65.5~77.0, 明显不同于软流圈地幔,说明本区岩石来源于岩石圈地幔而非软流圈地幔. 一般地,尖晶石二辉橄榄岩发生部分熔融时,地幔残留体和熔体具有相似的 Sm/Yb 比值,而 La/Sr 比值将随着部分熔融程度的增高而降低,因此,尖晶石二辉橄榄岩源区的部分熔融将产生相对水平的熔融趋势(接近地幔排列);而石榴石二辉橄榄岩源区(源区残留有石榴石)中低程度部分熔融产生的熔体具有显著增高的 Sm/Yb 比值,导致石榴石二辉橄榄岩的熔融趋势明显偏离地幔排列(Aldanmaz *et al.*, 2000; 朱弟成等, 2008). 在 $Sm/Yb-La/Sm$ 图(图 12b)上,辉长闪长玢岩投点与石榴石+尖晶石二辉橄榄岩熔融趋势为代表的地幔排列趋势一致,暗示岩浆主要来源于石榴石+尖晶石二辉橄榄岩源区很小程度(5%)的部分熔融. Dy/Yb 也是判断源区性质的重要指标;如果源区是石榴石稳定区域,其熔体的 $Dy/Yb > 2.5$;如果熔融作用在尖晶石稳定区域,则熔体的 $Dy/Yb < 1.5$ (Jiang *et al.*, 2009). 矿区辉长闪长玢岩 Dy/Yb 为 1.73~1.95, 比值介于石榴石稳定区与尖晶石稳定区之间,也说明其岩浆为石榴石+尖晶石二辉橄榄岩部分熔融的产物.

综合分析认为,甲玛矿区含矿斑岩(除辉长闪长

玢岩外)成岩年龄非常接近,此外,斑岩的地球化学特征极其相似,说明它们有可能来自相同的岩浆来源区,其深部应该为同一岩浆房,岩浆源区最有可能是加厚基性新生下地壳,该下地壳是新特提斯洋俯冲阶段地幔部分熔融底垫到古老下地壳下部而形成,并且有幔源物质的加入,随后在岩浆上升过程中与中上地壳发生过岩浆混合作用,而辉长闪长岩来源于富集岩石圈地幔,系石榴石+尖晶石二辉橄榄岩源区部分熔融的结果。

4.3 岩浆成矿作用

新生代以来,印度—亚洲大陆的碰撞以及随后印度地体的持续下插,造就了拉萨地体双倍的地壳厚度(~ 70 km)(莫宣学等,2009).然而,大量的研究表明,冈底斯带的成矿时间主要集中在中新世(13~17 Ma),和新特提斯洋板片的闭合相差约 40 Ma (Zhang et al., 2012),在大地构造上属于后碰撞阶段(侯增谦等,2008; 莫宣学等,2009).通过梳理和归纳与甲玛矿区成矿有关的斑岩类的矿物岩石学、地质年代学、岩石地球化学和同位素地球化学特征和规律,结合区域地质背景,认为冈底斯带甲玛矿集区的岩浆—成矿的地球动力学过程为:大约在 26 Ma,拉萨地体岩石圈发生拆沉(Chung et al., 2005),导致软流圈物质上涌,引起新生基性下地壳部分熔融,形成相对富硫、富矿的埃达克质岩浆,在此过程中,幔源物质加入了新生部分熔融岩浆的演化和形成;

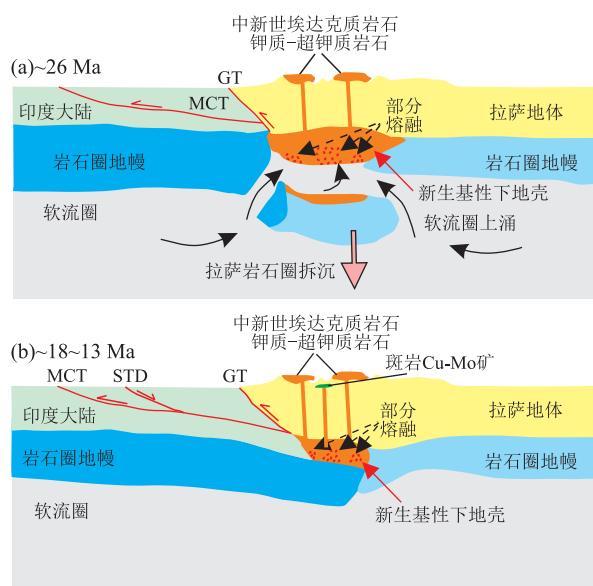


图 14 冈底斯带甲玛铜多金属矿床岩浆—成矿模式

Fig.14 Magma-metallogenic model of the Jiama copper polymetallic deposit in the Gangdese belt
Fig.14 Magma-metallogenic model of the Jiama copper polymetallic deposit in the Gangdese belt

据 Chung et al.(2005); 秦克章等(2014); Hou et al.(2015)修改

约 18~13 Ma,青藏高原处于构造转换阶段,区域构造环境由挤压向走滑(或伸展)机制转换(侯增谦等,2008; 陈希节等,2014; 孟元库等,2016a, 2016b),形成了一系列南北向断裂及近东西向的断层和地堑、地垒构造,含矿岩浆沿断裂通道上升至地壳浅部侵位,形成斑岩岩浆—热液成矿系统,并且含矿岩浆上升过程中与中上地壳发生过岩浆混合作用(图 14).

岩浆活动是成矿物质的重要来源(Hou et al., 2004; 侯增谦等,2008; 郑文宝, 2012; 秦志鹏, 2013),其产生的大量热液流体可为成矿作用提供热驱动力.含矿热液流体在横向可以沿先存的林布宗组与多底沟组层间滑脱带流动,形成甲玛矽卡岩型铜多金属主矿体;垂向上可以沿林布宗组角岩、板岩和斑岩体中筒状裂隙流动发生广泛的热液蚀变作用,形成网脉状、细脉状和浸染状矿石.

5 结论

(1)甲玛矿区成矿斑(玢)岩体主要由花岗斑岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩和辉长闪长玢岩组成,定年结果表明,侵位年龄介于 16.7~14.1 Ma,而与矽卡岩—斑岩一角岩成矿密切相关的岩体主要为花岗斑岩和二长花岗斑岩,侵位年龄介于 16.7~14.8 Ma,辉钼矿 Re-Os 成矿年龄为 15.3~14.7 Ma,成岩和成矿的时间相差约 1 Ma.地球化学分析结果表明,成矿斑(玢)岩大多属于高 Al 和低 Ti 的高钾钙碱性系列,少数为钙碱性系列和钾玄岩系列;明显富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素和 Th、U 元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素;稀土元素总体含量中等,呈“LREEs 富集、HREEs 亏损”的右倾模式,具有典型的埃达克质岩石特征.虽然侵位时间和侵位中心相近,但甲玛矿区含矿斑岩(除辉长闪长岩外)岩浆源区主要为加厚基性新生下地壳,而辉长闪长岩岩浆来源于富集岩石圈地幔.

(2)岩浆—成矿作用的地球动力学过程如下:约 26 Ma,拉萨地体岩石圈发生拆离沉降,引起软流圈物质上涌,导致新生基性下地壳物质发生部分熔融,形成富硫、富矿的埃达克质岩浆,并伴有幔源物质的加入;约 18~13 Ma,青藏高原进入构造转换阶段,含矿埃达克质岩浆沿断裂通道上升,并与中上地壳物质发生岩浆混合作用,到达地壳浅部时发生侵位,形成花岗斑岩、二长花岗斑岩、石英闪长玢岩和花岗闪长斑岩,其中源自岩石圈地幔的岩浆则演化形成辉长闪长玢岩.在构造应力和岩浆热驱动力下,含矿热液

流体充填于林布宗组砂板岩、角岩与多底沟组大理岩、灰岩的层间滑脱带或构造虚脱空间,形成甲玛矽卡岩型铜多金属主矿体。

致谢:两位评审专家提出的建设性修改意见,让本文得到了质的提升,笔者受益匪浅,在此对二位专家表示诚挚的感谢。中国黄金集团公司西藏华泰龙矿业开发有限公司张忠坤、赵孝武、高福太等员工在野外考察和岩心取样方面提供了方便,在此深表感谢!此外,感谢中国地质科学院矿产资源研究所唐菊兴研究员、冷秋峰博士、唐攀博士给予的指导和帮助。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年过程中得到了南京大学地科学院武斌老师和姜鼎盛博士的帮助,对此表示衷心的感谢!

References

- Aldanmaz, E., Pearce, J. A., Thirlwall, M. F., et al., 2000. Petrogenetic Evolution of Late Cenozoic, Post-Collision Volcanism in Western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102 (1–2): 67–95. [https://doi.org/10.1016/s0377-0273\(00\)00182-7](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(00)00182-7)
- Black, L. P., Gulson, B. L., 1978. The Age of the Mud Tank Carbonatite, Strang Ways Range, Northern Territory. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3(3):227–232.
- Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63–114. doi:10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3
- Chen, X. J., Xu, Z. Q., Meng, Y. K., et al., 2014. Petrogenesis of Miocene Adakitic Diorite-Porphyrite in Middle Gangdese Batholith, Southern Tibet: Constraints from Geochemistry, Geochronology and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (8): 2253–2268 (in Chinese with English abstract).
- Chung, S. L., Chu, M. F., Ji, J. Q., et al., 2009. The Nature and Timing of Crustal Thickening in Southern Tibet: Geochemical and Zircon Hf Isotopic Constraints from Post-Collisional Adakites. *Tectonophysics*, 477 (1–2): 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.008>
- Chung, S. L., Chu, M. F., Zhang, Y. Q., et al., 2005. Tibetan Tectonic Evolution Inferred from Spatial and Temporal Variations in Post-Collisional Magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68(3–4):173–196. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.05.001>
- Chung, S. L., Liu, D., Ji, J. Q., et al., 2003. Adakites from Continental Collision Zones: Melting of Thickened Lower
- Crust beneath Southern Tibet. *Geology*, 31(11):1021–1024. <https://doi.org/10.1130/g19796.1>
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294):662–665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Gao, Y. F., Hou, Z. Q., Kamber, B. S., et al., 2007. Adakite-Like Porphyries from the Southern Tibetan Continental Collision Zones: Evidence for Slab Melt Metasomatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153 (1): 105–120. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0137-9>
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131 (3–4): 231–282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Guan, Q., Zhu, D. C., Zhao, Z. D., et al., 2012. Crustal Thickening Prior to 38 Ma in Southern Tibet: Evidence from Lower Crust-Derived Adakitic Magmatism in the Gangdese Batholith. *Gondwana Research*, 21 (1): 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.07.004>
- Guo, Z. F., Wilson, M., Liu, J. Q., 2007. Post-Collisional Adakites in South Tibet: Products of Partial Melting of Subduction-Modified Lower Crust. *Lithos*, 96 (1–2): 205–224. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.011>
- Harrison, T. M., Yin, A., Grove, M., et al., 2000. The Zedong Window: A Record of Superposed Tertiary Convergence in Southeastern Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105 (B8): 19211–19230. <https://doi.org/10.1029/2000jb900078>
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1):27–62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Hou, Z. Q., Duan, L. F., Lu, Y. J., et al., 2015. Lithospheric Architecture of the Lhasa Terrane and Its Control on Ore Deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen. *Economic Geology*, 110: 1541–1575. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.6.1541>
- 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. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00007-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00007-x)
- Hou, Z. Q., Wang, E. Q., Mo, X. X., et al., 2008. Collisional Orogeny and Metallogenesis of the Tibetan Plateau. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hu, Y. B., Liu, J. Q., Ling, M. X., et al., 2015. The Formation

- of Qulong Adakites and Their Relationship with Porphyry Copper Deposit:Geochemical Constraints,*Lithos*, 220—223: 60—80. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.12.025>
- Huang, Y. M., Hawkesworth, C., Smith, I., et al. 2000. Geochemistry of Late Cenozoic Basaltic Volcanism in Northland and Coromandel New Zealand: Implications for Mantle Enrichment Processes. *Chemical Geology*, 64 (3—4): 219—238. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00145-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00145-X)
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 (5): 523—548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to In Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211 (1): 47—69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>
- Ji, W. Q., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2009. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of the Gangdese Batholith, Southern Tibet. *Chemical Geology*, 262 (3—4): 229—245. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.01.020>
- Ji, W. Q., Wu, F. Y., Liu, C. Z., et al., 2012. Early Eocene Crustal Thickening in Southern Tibet: New Age and Geochemical Constraints from the Gangdese Batholith. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53 (2): 82—95. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.08.020>
- Jiang, Y. H., Jiang, S. Y., Dai, B. Z., et al., 2009. Middle to Late Jurassic Felsic and Mafic Magmatism in Southern Hunan Province, Southeast China: Implications for a Continental Arc to Rifting. *Lithos*, 107 (3—4): 185—204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.10.006>
- Johnson, K., Barnes, C. G., Miller, C. A., 1997. Petrology, Geochemistry, and Genesis of High-Al Tonalite and Trondhjemites of the Cornucopia Stock, Blue Mountains, Northeastern Oregon. *Journal of Petrology*, 38(11): 1585—1611.
- Li, G. M., Rui, Z. Y., Wang, G. M., et al., 2005. Molybdenite Re-Os Dating of Jiama and Zhibula Polymetallic Copper Deposits in the Gangdese Metallogenic Belt of Tibet and Its Significance. *Mineral Deposits*, 24 (5): 482—489 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. W., Kohn, B., Sandiford, M., et al., 2015a. Constraining the Age of Liuqu Conglomerate, Southern Tibet: Implications for Evolution of the India-Asia Collision Zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 426: 259—266. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.010>
- Li, G. W., Kohn, B., Sandiford, M., et al., 2016. Synorogenic Morphotectonic Evolution of the Gangdese Batholith, South Tibet: Insights from Low-Temperature Thermo-chronology. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17 (1): 101—112. <https://doi.org/10.1002/2015gc006047>
- Li, J. X., Qin, K. Z., Li, G. M., et al., 2011. Post-Collisional Ore-Bearing Adakitic Porphyries from Gangdese Porphyry Copper Belt, Southern Tibet: Melting of Thickened Juvenile Arc Lower Crust. *Lithos*, 126 (3): 265—277. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.018>
- Li, Y. L., Wang, C. S., Dai, J. G., et al., 2015b. Propagation of the Deformation and Growth of the Tibetan-Himalayan Orogen: A Review. *Earth-Science Reviews*, 143: 36—61. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.01.001>
- Ludwig, K. R., 2003. Use's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Ma, S. W., Meng, Y. K., Xu, Z. Q., et al., 2017a. The Discovery of Late Triassic Mylonitic Granite and Geologic Significance in the Middle Gangdese Batholiths, Southern Tibet. *Journal of Geodynamics*, 104: 49—64. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.10.007>
- Ma, X. X., Xu, Z. Q., Chen, X. J., et al., 2017b. The Origin and Tectonic Significance of the Volcanic Rocks of the Yeba Formation in the Gangdese Magmatic Belt, South Tibet. *Journal of Earth Science*, 28(2): 265—282.
- Ma, S. W., Xu, Z. Q., Zhang, Z. K., et al., 2016. Structural Deformation and Its Constraints of Mineralization of the Jiama Copper-Polymetallic Deposit, Southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3781—3799 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101 (5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2)
- Meng, Y. K., 2016. Tectonic Evolution of the Southern Region in the Middle Gangdese Batholith, Southern Tibet (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y. K., Xu, Z. Q., Chen, X. J., et al., 2015. Zircon Geochronology and Hf Isotopic Composition of Eocene Granite Batholith from Xaitongmoin in Middle Gangdese and Its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenesis*, 39 (5): 933—948 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y. K., Xu, Z. Q., Ma, S. W., et al., 2016a. Deformational Characteristics and Geochronological Constraints of Quxu Ductile Shear Zone in Middle Gangdese Magmatic

- Belt, South Tibet. *Earth Science*, 41(7): 1081–1098 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.090>
- Meng, Y.K., Xu, Z.Q., Ma, S.W., et al., 2016b. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronological Constraints on the Xaitongmoin-Quxu Ductile Shear Zone in the Gangdese Batholith, Southern Tibet. *Geological Review*, 62(4): 795–806 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2016.04.002>
- Meng, Y.K., Xu, Z.Q., Santosh, M., et al., 2016. Late Triassic Crustal Growth in Southern Tibet: Evidence from the Gangdese Magmatic Belt. *Gondwana Research*, 37: 449–464. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.007>
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Mo, X.X., 2011. Magmatism and Evolution of the Tibetan Plateau. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 351–367 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X.X., Hou, Z.Q., Niu, Y.L., et al., 2007. Mantle Contributions to Crustal Thickening during Continental Collision: Evidence from Cenozoic Igneous Rocks in Southern Tibet. *Lithos*, 96(1–2): 225–242. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.10.005>
- Mo, X.X., Zhao, Z.D., Yu, X.H., et al., 2009. Cenozoic Collisional-Postcollisional Igneous Rocks in the Tibetan Plateau. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- 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).
- Patino Douce, A. E., 1999. What do Experiments Tell Us about the Relative Contributions of Crust and Mantle to the Origin of Granitic Magmas? *Geological Society, London, Special Publications*, 168(1): 55–75. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.168.01.05>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>
- Petford, N., Atherton, M., 1996. Na-Rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37(6): 1491–1521. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.6.1491>
- Qian, Y., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2014. Early Permian-Late Triassic Magmatism in the Tuotuohe Region of the Qinghai-Tibet Plateau: Constraints on the Tectonic Evolution of the Western Segment of the Jinshajiang Suture. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(2): 498–516. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12210>
- Qin, K.Z., Xia, D.X., Duo, J., et al., 2014. Porphyry and Skarn Cu-Molybdenum Deposit of Qulong, Tibet. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Qin, Z. P., 2013. Genetic Model of the Jiama Copper-Polymetallic Ore Deposits, Tibet (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Qin, Z. P., Wang, X. W., Dor, J., et al., 2011. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Age of Intermediate-Acidic Intrusive Rocks in Jiama of Tibet and Its Metallogenetic Significance. *Mineral Deposits*, 30(2): 339–348 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Hou, Z. Q., Li, Y. G., 2004. Melt Components Derived from a Subducted Slab in Late Orogenic Ore-Bearing Porphyries in the Gangdese Copper Belt, Southern Tibetan Plateau. *Lithos*, 74(3–4): 131–148. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.01.003>
- Rapp, R.P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Richards, J. P., Kerrich, R., 2007. Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4): 537–576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Schiano, P., Monziger, M., Eissen, J. P., et al., 2010. Simple Mixing as the Major Control of the Evolution of Volcanic Suites in the Ecuadorian Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 60(2): 297–312. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0478-2>
- Sun, J., Mao, J. W., Yao, F. J., et al., 2017. Relation between Magmatic Processes and Porphyry Copper-Gold Ore Formation, the Duolong District, Central Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3217–3238 (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. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, X., Zheng, Y. Y., Xu, J., et al., 2017. Metallogenesis and Ore Controls of Cenozoic Porphyry Mo Deposits in the Gangdese Belt of Southern Tibet. *Ore Geology Reviews*,

- 81: 996—1014. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.01.009>
- Tang, J.X., Deng, S.L., Zheng, W.B., et al., 2011. An Exploration Model for Jiama Copper Polymetallic Deposit in Maizhokunggar County, Tibet. *Mineral Deposits*, 30(2): 179—196 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J.X., Duo, J., Liu, H.F., et al., 2012. Minerogenetic Series of Ore Deposits in the East Part of the Gangdise Metallogenic Belt. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393—410 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J.X., Lang, X.H., Xie, F.W., et al., 2015. Geological Characteristics and Genesis of the Jurassic No.1 Porphyry Cu-Au Deposit in the Xiongcun District, Gangdese Porphyry Copper Belt, Tibet. *Ore Geology Reviews*, 70(4): 438—456. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.008>
- Tang, J.X., Wang, D.H., Wang, X.W., et al., 2010. Geological Features and Metallogenic Model of the Jiama Copper-Polymetallic Deposit in Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 495—506 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Ding, L., Zhang, L.Y., et al., 2016. Petrogenesis of Middle-Late Triassic Volcanic Rocks from the Gangdese Belt, Southern Lhasa Terrane: Implications for Early Subduction of Neo-Tethyan Oceanic Lithosphere. *Lithos*, 262: 320—333. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.021>
- Wang, Q., 2016. Origin and Petrogenesis of the Post-Collisional Magmatism in Both North and South Sides of Lhasa Terrane (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Xu, J.F., Jian, P., et al., 2006. Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119—144. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi070>
- Wang, R., Richards, J.P., Zhou, L.M., et al., 2015. The Role of Indian and Tibetan Lithosphere in Spatial Distribution of Cenozoic Magmatism and Porphyry Cu-Mo Deposits in the Gangdese Belt, Southern Tibet. *Earth-Science Reviews*, 150: 68—94. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.003>
- Williams, H., Turner, S., Kelley, S., et al., 2001. Age and Composition of Dikes in Southern Tibet: New Constraints on the Timing of East-West Extension and Its Relationship to Postcollisional Volcanism. *Geology*, 29(4): 188—193. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0339:aacodi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0339:aacodi>2.0.co;2)
- Xiong, X.L., Li, X.H., Xu, J.F., et al., 2003. Extremely High-Na Adakite-Like Magmas Derived from Alkali-Rich Basaltic Underplate: The Late Cretaceous Zhantang Andesites in the Huichang Basin, SE China. *Geochemical Journal*, 37(2): 233—252. <https://doi.org/10.2343/geochemj.37.233>
- Xu, W.C., 2010. Spatial Variation of Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Compositions of the Gangdese Granitoids and Its Geologic Implications (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Wang, Q., Li, Z.H., et al., 2016. Indo-Asian Collision: Tectonic Transition from Compression to Strike Slip. *Acta Geologica Sinica*, 90(1): 1—23 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Li, H.B., et al., 2011. On the Tectonics of the India-Asia Collision. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 1—33 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Li, W.C., et al., 2012. Tectonic Background of Important Metallogenic Belts in the Southern and Southeastern Tibetan Plateau and Ore Prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1857—1868 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.S., Xu, Z.Q., Geng, Q.R., et al., 2006. A Possible New HP/UHP (?) Metamorphic Belt in China: Discovery of Eclogite in the Lhasa Terrane, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1787—1792 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Jiang, H., Yang, M.G., et al., 2017. Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating of the Gangjiang Porphyry Cu-Mo Deposit in Central Gangdese and Its Geological Significance. *Earth Science*, 42(3): 339—356 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.026>
- Yin, A., Harrison, T.M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(28): 211—280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Ying, L.J., Tang, J.X., Wang, D.H., et al., 2009. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite in Skarn from the Jiama Copper Polymetallic Deposit of Tibet and Its Metallogenic Significance. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 265—268 (in Chinese with English abstract).
- Ying, L.J., Tang, J.X., Wang, D.H., et al., 2011. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Porphyry Vein from the Jiama Copper Polymetallic Deposits in Tibet and Its Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2095—2102 (in Chinese with English abstract).
- Ying, L.J., Wang, D.H., Tang, J.X., et al., 2010. Re-Os Dating of Molybdenite from the Jiama Copper Deposit in Tibet and Its Metallogenic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 84

- (8):1165—1174 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. J., 2004. Secular Geochemical Variations of the Lower Cretaceous Siliciclastic Rocks from Central Tibet (China) Indicate a Tectonic Transition from Continental Collision to Back-Arc Rifting. *Earth and Planetary Science Letters*, 229 (1): 73—89. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.030>
- Zhang, K. J., Cai, J. X., Zhang, Y. X., et al., 2006. Eclogites from Central Qiangtang, Northern Tibet (China) and Tectonic Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 245 (3—4): 722—729. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.02.025>
- Zhang, K. J., Xia, B., Zhang, Y. X., et al., 2014. Central Tibetan Meso-Tethyan Oceanic Plateau. *Lithos*, 210—211: 278—288. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.09.004>
- Zhang, K. J., Xia, B. D., Wang, G. M., et al., 2004. Early Cretaceous Stratigraphy, Depositional Environments, Sandstone Provenance, and Tectonic Setting of Central Tibet, Western China. *Geological Society of America Bulletin*, 116 (9—10): 1202—1222. <https://doi.org/10.1130/b25388.1>
- Zhang, K. J., Zhang, Y. X., Li, B., et al., 2007. Nd Isotopes of Siliciclastic Rocks from Tibet, Western China: Constraints on Provenance and Pre-Cenozoic Tectonic Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 256 (3—4): 604—616. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.02.014>
- Zhang, K. J., Zhang, Y. X., Tang, X. C., et al., 2012. Late Mesozoic Tectonic Evolution and Growth of the Tibetan Plateau Prior to the Indo-Asian Collision. *Earth-Science Reviews*, 114 (3—4): 236—249. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.001>
- Zheng, W. B., 2012. The Study on Metallogenesis Model and Prospecting Pattern for Jiama Polymetallic Copper Deposit, Tibet (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zheng, W. B., Tang, J. X., Zhong, K. H., et al., 2016. Geology of the Jiama Porphyry Copper-Polymetallic System, Lhasa Region, China. *Ore Geology Reviews*, 74: 151—169. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.11.024>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2013.03.029>
- Zhong, K. H., Li, L., Zhou, H. W., et al., 2012. Features of Jiama (Gyama)-Kajunguo Thrust-Gliding Nappe Tectonic System in Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 33 (4): 411—423 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Wang, L. Q., et al., 2008. Hotspot-Ridge Interaction for the Evolution of Neo-Tethys: Insights from the Late Jurassic-Early Cretaceous Magmatism in Southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (2): 225—237 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Wang, Q., Zhao, Z. D., et al., 2015. Magmatic Record of India-Asia Collision. *Scientific Reports*, 5: 14289. <https://doi.org/10.1038/srep14289>
- 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 (1—2): 241—255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>

附中文参考文献

- 陈希节,许志琴,孟元库,等,2014.冈底斯带中段中新世埃达克质岩浆作用的年代学、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. *岩石学报*, 30(8): 2253—2268.
- 侯增谦,王二七,莫宣学,等,2008.青藏高原碰撞造山与成矿作用.北京:地质出版社.
- 李光明,芮宗瑶,王高明,等,2005.西藏冈底斯成矿带甲马和知不拉铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义. *矿床地质*, 24(5): 481—489.
- 马士委,许志琴,张忠坤,等,2016.藏南甲玛铜多金属矿床构造变形及其对成矿的制约. *岩石学报*, 32 (12): 3781—3799.
- 孟元库,2016.藏南冈底斯带中段南缘构造演化(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 孟元库,许志琴,陈希节,等,2015.藏南冈底斯中段谢通门始新世复式岩体锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 39(5): 933—948.
- 孟元库,许志琴,马士委,等,2016a.藏南冈底斯岩浆带中段曲水韧性剪切带的变形特征及其年代学约束. *地球科学*, 41(7): 1081—1098. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.090>
- 孟元库,许志琴,马士委,等,2016b.藏南冈底斯地体谢通门—曲水韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学约束. *地质论评*, 62(4): 795—806.
- 莫宣学,2011.岩浆作用与青藏高原演化. *高校地质学报*, 17 (3): 351—367.
- 莫宣学,赵志丹,喻学惠,等,2009.青藏高原新生代碰撞—后碰撞火成岩.北京:地质出版社.
- 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.
- 秦克章,夏代祥,多吉,等,2014.西藏驱龙斑岩—夕卡岩铜钼矿床.北京:科学出版社.
- 秦志鹏,2013.西藏甲玛铜多金属矿床成因模式(博士学位论

文).成都:成都理工大学.

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.

孙嘉,毛景文,姚佛军,等,2017.西藏多龙矿集区岩浆岩成因与成矿作用关系研究.岩石学报,33(10): 3217—3238.

唐菊兴,邓世林,郑文宝,等,2011.西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型.矿床地质,30(2): 179—196.

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.地球学报,33(4): 393—410.

唐菊兴,王登红,汪雄武,等,2010.西藏甲玛铜多金属矿矿床地质特征及其矿床模型.地球学报,31(4): 495—506.

王青,2016.拉萨地体南北两侧碰撞后岩浆作用的岩浆起源和岩石成因(博士学位论文).北京:中国地质大学.

徐旺春,2010.西藏冈底斯花岗岩类锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成的空间变化及其地质意义(博士学位论文).武汉:中国地质大学.

许志琴,王勤,李忠海,等,2016.印度—亚洲碰撞:从挤压到走滑的构造转换.地质学报,90(1): 1—23.

许志琴,杨经绥,李海兵,等,2011.印度—亚洲碰撞大地构造.地质学报,85(1): 1—33.

许志琴,杨经绥,李文昌,等,2012.青藏高原南部与东南部重要成矿带的大地构造定格与找矿前景.地质学报,86

(12): 1857—1868.

杨经绥,许志琴,耿全如,等,2006.中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带.地质学报,80(12): 1787—1792.

杨震,姜华,杨明国,等,2017.冈底斯中段岗讲斑岩铜钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年代学及其地质意义.地球科学,42(3): 339—356.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.026>

应立娟,唐菊兴,王登红,等,2009.西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩中辉钼矿铼—锇同位素定年及其成矿意义.岩矿测试,28(3): 265—268.

应立娟,唐菊兴,王登红,等,2011.西藏甲玛超大型铜矿区斑岩脉成岩时代及其与成矿的关系.岩石学报,27(7): 2095—2102.

应立娟,王登红,唐菊兴,等,2010.西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿不同矿石中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其成矿意义.地质学报,84(8): 1165—1174.

郑文宝,2012.西藏甲玛铜多金属矿床成矿模式与找矿模型(博士学位论文).成都:成都理工大学.

钟康惠,李磊,周慧文,等,2012.西藏甲玛—卡军果推—滑覆构造系特征.地球学报,33(4): 411—423.

朱弟成,莫宣学,王立全,等,2008.新特提斯演化的热点与洋脊相互作用:西藏南部晚侏罗世—早白垩世岩浆作用推论.岩石学报,24(2): 225—237.