

王金贵, 冯钊, 李鹏, 等, 2024. 西藏冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩地质特征及成矿潜力评价[J]. 沉积 与特提斯地质, 44(1): 134-149. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.08002 WANG J G, FENG Z, LI P, et al., 2024. Geological characteristics and metallogenic potential of Paleocene granodiorite in Azhaxiang, southern Gangdese, Xizang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(1): 134-149.

doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.08002

西藏冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩地质特征及成矿 潜力评价

王金贵¹,冯 钊^{2*},李 鹏³,葛 玢¹,张鑫全¹,段炳鑫¹,王 硕¹,侯德华¹,杨鑫朋¹, 程 洲¹,张 欢¹,刘 琦¹

(1. 河北省区域地质调查院,河北 廊坊 065000; 2. 河北地质大学资源与环境工程研究所,河北 石家庄 050000;3. 河北省煤田地质局环境地质调查院,河北 石家庄 050000)

摘要: 西藏冈底斯岩浆弧带是我国重要的铜矿资源产地。研究区位于南冈底斯斑岩铜矿带东段克鲁铜金矿床西侧,古新世 岩浆活动较为强烈,但如此强烈的岩浆活动与铜矿的关系究竟如何?其是否具有好的成矿潜力?解决这些问题对指导该地 区的找矿工作具有重要的意义。基于此,本文通过年代学、岩石地球化学、锆石同位素分析了花岗闪长岩的岩浆起源、岩 石成因及形成的构造环境,并结合氧逸度分析成矿潜力。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,岩体形成于古新世 (64.55±0.93 Ma),岩石属钙碱性系列,稀土元素总量∑REE (包括 Y 元素)平均为 94.01×10⁻⁶,富集 K、U、Rb、Ba 和 轻稀土(LREEs),亏损 Nb、Ta、Ti、Zr 和重稀土(HREEs),无明显 Eu 负异常。Rb/Sr 比值平均为 0.20, Nb/Ta 比值平 均为 11.89, 锆石 ε_{HI}(*t*)值为+10.7~+13.3, *t*_{DM2}变化于 285.5~453.4 Ma, *I*₄=490, *I*₇=484,岩体中锆石结晶温度大约在 700℃, 显示岩浆来源于俯冲环境新生地壳的部分熔融,并有少量幔源物质加入,具典型的 I 型花岗岩特征,推断其形成于挤压俯 冲碰撞前的弧构造环境。结合高氧逸度、地幔物质以及流体的贡献,可推知该地区具有良好的深部铜金资源成矿潜力。 关键词:冈底斯南缘;古新世;花岗闪长岩;成矿潜力 中图分类号: P581; P612 文献标识码: A

Geological characteristics and metallogenic potential of Paleocene granodiorite in Azhaxiang, southern Gangdese, Xizang

WANG Jingui¹, FENG Zhao^{2*}, LI Peng³, GE Bin¹, ZHANG Xinquan¹, DUAN Bingxin¹, WANG Shuo¹, HOU Dehua¹, YANG Xinpeng¹, CHENG Zhou¹, ZHANG Huan¹, LIU Qi¹

(1. Regional Geology Survey Institute of Hebei Province, Langfang 065000, China; 2. Institute of resources and environmental engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050000, China; 3. Environmental Geological Survey Institute of Hebei Coalfield Geological Bureau, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The Gangdese magmatic arc belt in Xizang is an important copper producing area in China. The Azhaxiang study area is

收稿日期: 2021-08-13; 改回日期: 2022-07-27; 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 王金贵(1986—),男,高级工程师,主要从事区域地质构造研究。E-mail: airstarry@163.com

通讯作者: 冯钊(1988—),男,理学博士,主要从事岩浆房过程、数值模拟、三稀矿产等研究。E-mail: fengzhao_sp@163.com

资助项目: 冈底斯--喜马拉雅铜矿资源基地调查项目(DD20160015-09)

located in the eastern part of South Gangdese porphyry copper belt, an area of extensive Paleocene magmatism. However, the relationship of Paleocene magmatism to copper mineralization and the metallogenic potential of the Paleocene rocks is not well understood. A better understanding of the nature of the Paleocene magmatism is important to guide prospecting in this area. In this paper, we analyzed the magmatic origin, petrogenesis, and tectonic setting of the Azhaxiang granodiorite using geochronology, petrochemistry, and zircon isotopes combined with oxygen fugacity to analyze the metallogenic potential. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results show that the pluton was formed in the Paleocene (64.55±0.93 Ma). The rocks are calcalkaline, and the average REE (including Y) is 94.01×10^{-6} , enriched in K, U, Rb, Ba and LREEs, depleted in Nb, Ta, Ti, Zr and HREEs, without obvious negative Eu anomalies. The average Rb/Sr and Nb/Ta is 0.20 and 11.89 respectively. The $\varepsilon_{HI}(t)$ value is $\pm 10.7 \times \pm 13.3$, the t_{DM2} is 285.5×453.4 Ma, $I_A = 490$, $I_T = 484$. The crystallization temperature of zircon in the pluton is about 700°C, which indicates that the magma originated from the partial melting of the newborn crust in the subduction environment, and a small amount of mantle material added. It has typical characteristics of I-type granite. It is inferred that it was formed in the island margin arc tectonic setting before compression and subduction collision. Combined with the contribution of high oxygen fugacity, mantle, and fluid, it shows that the area has good metallogenic potential for deep-seated copper and gold resources.

Key words: southern margin of Gangdese; Paleocene Epoch; granodiorite; metallogenic potential

0 引言

青藏高原位于冈瓦纳大陆与欧亚大陆之间的 东特提斯构造域,经历了特提斯洋的形成、俯冲、 消亡,到青藏高原隆升的全过程,完整地记录了岩 浆深部作用的地质信息,是研究大陆动力学和板块 构造的天然实验室,备受地质学界的关注(Yin and Harrison, 2000; 许志琴等, 2011; 朱弟成等, 2012; Zhu et al., 2013)。前人把青藏高原的形成演化过 程分为三个阶段,分别是古特提斯演化阶段、新特 提斯演化阶段、印度-亚洲大陆碰撞及高原隆升阶 段(莫宣学, 2006)。其中, 新特提斯演化阶段、印 度-亚洲大陆碰撞及高原隆升阶段的岩浆记录在南 冈底斯岩浆弧大量发育,出露面积占冈底斯带总面 积的 80% 以上(潘桂棠等, 2006; 朱弟成等, 2008; 莫宣学,2011)。该时期伴随着大量的岩浆活动,形 成了一系列的热液型多金属矿床(Lang et al., 2014; 唐菊兴等, 2016; Xie et al., 2018), 相继发现了朱诺、 冲江、厅宫、白容、驱龙、甲玛等斑岩型铜多金属 矿床,取得了一系列研究成果。然而,这些斑岩型 铜多金属矿床的成矿斑岩多集中于中新世(21~12 Ma)(曲晓明等, 2003; 芮宗瑶等, 2003; 2004; 郑有 业等,2004;黄勇等,2015;曾忠诚等,2016)。近些 年,在冈底斯成矿带西段(谢通门县以西地区)古新 世的岩浆岩中(黄瀚霄等, 2019)发现了纳如松多 (纪现华等, 2014; 刘英超等, 2015)、查个勒(高顺 宝,2015)等多个大型—超大型矿床,在东部地区目 前也发现了沙让、勒青拉等与古近纪岩浆岩有关

的热液矿床,显示了冈底斯该时期岩浆岩具有良好的成矿潜力。然而,通过大量勘查研究,在南冈底 斯东段已出露的大量古近纪岩浆岩中局部发现了 内生矿床,而大量同时代的其他中酸性岩体中却无 明显的找矿突破。这些矿床周围其他同时期大规 模岩体是否也具有成矿潜力?另外,前人对该地区 古新世岩浆岩的研究主要集中在岩石学、年代学 和地球化学等方面,主要探讨了岩浆的演化及形成 的构造环境(王立全等,2006;郑有业等,2007;夏林 圻等,2009;刘冯斌等,2020)但对于古新世岩浆岩 与成矿的关系以及相关岩体的成矿潜力评价研究 较为薄弱。

基于以上原因,本文选取前人研究较薄弱的南 冈底斯东段的扎囊县阿扎乡至桑耶镇一带广泛发 育的古新世花岗闪长岩为研究对象,通过锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素、锆石形态和成分标型及 全岩地球化学的研究,分析了岩浆的形成过程,在 此基础上探讨了岩浆演化趋势及成矿潜力,以期为 该区域的岩浆岩研究与相关矿产的勘查工作提供 新的数据支撑。

1 区域地质背景

冈底斯岩浆带位于拉萨地体南部,是夹持于班 公湖-怒江缝合带(BNSZ)和雅鲁藏布缝合带 (YZSZ)之间的一条近东西向的巨型构造-岩浆带 (图 1a),东西长约 2 500 km,南北宽约 150~300 km, 面积约 4.5×10⁵ km²(潘桂棠等, 2006)。一般认为, 冈底斯岩浆带形成于新特提斯洋壳向拉萨地体俯



a. 喜马拉雅-西藏造山带位置示意图; b. 冈底斯岩浆岩分布图; c. 研究区地质简图。JSSZ—金沙江缝合带; LSSZ—龙木 错--双湖缝合带; BNSZ—班公湖--怒江缝合带; SNMZ—狮泉河--纳木错混杂岩; LMF—洛巴堆--米拉山断裂带; YZSZ—雅鲁藏布缝合带。

图 1 冈底斯岩浆弧地质图及研究区地质图(据王旭辉等, 2018 修改) Fig. 1 Geological map in Gangdese magmatic arc and the study area (after Wang et al., 2018)

冲消亡过程中,并叠加了强烈的新生代岩浆作用
(董昕和张泽明, 2013; Pan et al., 2016; Weller et al., 2016)。根据出露岩浆岩的形成时代,冈底斯岩浆 弧被划分为南冈底斯带和北冈底斯带(Coulon et al., 1986);根据沉积盖层和岩石基底性质差异,将冈底斯岩浆弧划分为北、中、南三部分(Zhu et al., 2011)(图 1a)。冈底斯的岩浆作用可划分为 220~100 Ma、100~80 Ma、80~65 Ma、65~40 Ma、40~8 Ma 5 个阶段,峰期分别为 95~90 Ma、52~48 Ma 和 18~14 Ma(Zhu et al., 2017;张泽明等, 2019)。

研究区位于南冈底斯构造带南缘的桑日火山 弧(潘桂棠等,2006;图 1b),受特提斯洋的演化控 制,区内岩浆活动强烈,呈近东西向带状分布于阿 扎乡—桑耶镇一带,主要发育晚白垩世及古新世的 岩浆活动。区内侵入岩从南向北大致具有由老到 新的分布特点,侵位于三叠系昌果组和侏罗系地层 之中,呈岩基、岩株状产出,平面形态多为不规则 的椭圆形(图 1c)。区内断裂构造发育,主要为近 东西向的压剪性断裂,是区内控岩控矿构造,晚期 的近南北向断裂切穿岩体(图 1c)。

2 岩石学特征

古新世花岗闪长岩呈岩基状产出,近东西向展 布,出露面积约为80km²,侵入到晚侏罗世碳酸盐 岩地层中,表面发育球形风化特征(图 2a、2b),岩 体中发育闪长岩捕虏体,脉体发育(图 2c),紧邻克 鲁铜金矿一侧发育褐铁矿化和孔雀石化。岩石呈 灰白色、深灰色,中粗粒花岗结构(图 2d),主要由 斜长石(50%~55%)、石英(20%~25%)、钾长石(15%)、 角闪石(5%)、黑云母(5%)组成(图 2e、2f)。斜长 石为半自形板状,杂乱排列,粒径 3~8 mm,表面绢 云母化、高岭土化明显,少见绿帘石化,环带发育。 钾长石呈它形粒状,多为 3~8 mm,少量 < 2 mm,零 散分布,填充于斜长石颗粒间,具高岭土化。石英 呈它形粒状, 粒径 2~6 mm, 部分呈堆状聚集, 部分 为填隙状分布,颗粒具带状、波状消光。角闪石为 绿色,呈半自形粒状或柱状,多色性明显,粒度多小 于 5 mm, 小部分为 4~7 mm, 零散分布为叶片状, 少

2024年(1)



a、b.野外宏观产出照片; c、d.野外露头照片; e、f.花岗闪长岩的镜下照片(正交偏光)。Pl—斜长石; Amp—角闪石; Qtz—石英。

图 2 西藏冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩野外及镜下显微照片 Fig. 2 Field and microscopic photos of Paleocene granodiorite in Azhaxiang, southern Gangdese, Xizang

量角闪石具绿泥石化。黑云母,片径<3 mm,零散 分布,表面可见绿泥石化和绿帘石化。

3 分析方法

3.1 锆石 U-Pb 测年

锆石单矿物的分选在河北省区域地质调查院 实验室进行,将完整的锆石置于 DEVCON 环氧树 脂中,待固结后抛磨,使锆石内部充分暴露后进行 锆石的反射光和透射光照相及锆石阴极发光照相, 锆石的制靶及透射光、反射光、阴极发光照相在河 北省区域地质调查院实验室完成。

锆石 U-Pb 定年采用 LA-ICP-MS 法, 在北京科 荟测试技术有限公司进行。同位素分析测试仪器 为+Jena PQMS 多接收等离子体质谱, 激光剥蚀系 统为 New wave 193, 实验过程中的激光剥蚀斑束直 径为 32 μm, 激光剥蚀深度为 20~40 μm。锆石年龄 计算采用国际标准锆石 95 100 作为外标, 元素含 量采用美国国家标准与技术研究院人工合成硅酸 盐玻璃 NIST610 作为外标, ²⁹Si 作为内标元素进行 校正。样品的同位素比值和元素含量数据处理采

3.2 锆石原位 Lu-Hf 同位素分析

锆石 Lu-Hf 同位素分析在北京科荟测试技术 有限公司进行,利用 LA-ICP-MS 系统对经过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的同一测点进行了 Hf 同位 素组成测试。Lu-Hf 同位素分析激光进样系统为 NWR 213 nm 固体激光器,分析系统为多接收等离 子体质谱仪(NEPTUNE plus),实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,激光束直径为 55 μm,激光脉 冲频率为 4~6 Hz。本次分析过程中使用锆石国际 标样 Mud tank 作为外标。Mud tank 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值 为 0.282 537±15(*n*=515)。仪器分析条件和数据获 取方法见文献(侯可军等, 2007; Wu et al., 2006)。

3.3 岩石地球化学测试

岩石地球化学分析测试由河北省区域地质调查院所实验室完成,样品加工过程均在无污染设备中进行。主量元素采用碱烧法制备样品,使用Axios^{max} X 射线荧光光谱仪完成分析测试,相对误差不大于 2%,烧失量、H₂O⁺和 H₂O⁻采用 P1245 电子分析天平完成测试。稀土元素和微量元素分析采用酸溶法制备样品,稀土元素和多数微量元素使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(X Serise2)完成测试, Zr、Ti、K 等元素在 X 射线荧光光谱仪(Axios^{max} X)上完成测试,分析精度高于 5%~10%,

测试方法见文献(高剑峰等,2003)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

本文对中粗粒花岗闪长岩(PM25TW1)进行了 锆石 U-Pb 年代学测年(附表 1^{*})。样品的取样位置 为 91°16′2.87″E、29°24′27.85″N。样品锆石大多 为近短柱状--长柱状,呈无色透明,自形程度较好, 锆石粒径多介于 150~250 µm,长宽比多为 1.5:1~ 2:1(图 3a)。阴极发光图像中锆石为灰色-灰黑色, 显示清晰的岩浆震荡环带,表明为岩浆成因锆石。 从锆石 U-Pb 年龄谐和图(附表 1^{*}、图 3b)可以看出, 样品年龄谐和度较高,大部分高于 90%,各年龄集 中分布,获得加权平均年龄均为 64.55±0.93 Ma,代 表其形成于古新世。

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素分析

锆石 Lu-Hf 同位素测试是在 U-Pb 定年的基础 上进行的, 对定年样品中的 20 颗锆石进行了 Hf 同 位素测试。结果显示, ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 为 0.012 65~ 0.029 51, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 为 0.000 55~0.001 26(附表 2^{*}), 均小于 0. 002, 表明锆石形成后基本没有明显的放 射性成因 Hf 的积累, 因而可以使用所测定的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值代表其形成时 Hf 同位素的组成(吴 福元等, 2007)。¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 为 0.283 03~0.283 11, 对 应 ε_{Hf}(*t*) 值为+10.7~+13.3(图 4)。 $f_{Lu/Hf}$ 变化在-0.98~ -0.96之间, 低于铁镁质地壳 $f_{Lu/Hf}$ (-0.34, Amelin



图 3 西藏冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩锆石阴极发光图像(a)与 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig. 3 Zircon U-Pb CL images (a) and concordia diagram (b) of Paleocene granodiorite in Azhaxiang, southern Gangdese, Xizang

^{*}数据资料联系编辑部或者登录本刊网站 https://www.cjyttsdz.com.cn 获取。



图 4 西藏冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩 ε_н(*t*) 与 U-Pb 年龄图解(底图据 Amelin et al., 1999)

Fig. 4 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and U-Pb age of Paleocene granodiorite in Azhaxiang, southern Gangdese, Xizang (base map after Amelin et al., 1999)

et al., 1999),因此,二阶段模式年龄更能反映源区物质从亏损地幔被抽取的时间。单阶段 Hf 模式年龄(*t*_{DM1})主要集中在 202.9~306.8 Ma 之间,平均为 245.6 Ma。二阶段 Hf 模式年龄(*t*_{DM2})变化于 285.5~453.4 之间,平均为 354.8 Ma。

4.3 锆石微量元素特征

计算年龄所用 20 颗锆石微区微量元素测试结 果(附表 3^{*})显示,花岗闪长岩中锆石的稀土总量 为 360×10⁻⁶~935.17×10⁻⁶,平均为 526.36×10⁻⁶; LREE/HREE 为 0.02~0.159, 平均为 0.05; 锆石 U 含量为 111.8×10⁻⁶~262.01×10⁻⁶, 平均为 182.33×10⁻⁶; Th 含量为 67.13×10⁻⁶~184.19×10⁻⁶, 平均为 113.23×10⁻⁶; 相应的 Th/U 比值范围为 0.47~0.92, 比值较高(均大于 0.1), 属典型岩浆锆石特征(Belousova et al., 2002); Y 含量为 357.98×10⁻⁶~1 279.91×10⁻⁶, 平均为 585.94×10⁻⁶; Hf 为 7 351×10⁻⁶~11 427×10⁻⁶, 平均为 10 147×10⁻⁶。稀土元素具有强烈的正 Ce 异常(δ Ce 平均为 66.6)和负 Eu 异常(δ Eu 平均为 0.345)的特征, 符合一般岩浆锆石的稀土元素特征(Corfu et al., 2003)。

4.4 岩石地球化学分析

冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩样品的 主量元素和微量元素分析结果见附表4°。样品 SiO₂含量为63.43%~69.83%,平均为66.23%;Al₂O₃ 为15.47%~16.17%,平均为15.89%;MgO为0.78%~ 2.47%,平均为1.77%;岩石全碱(Na₂O+K₂O)含量 5.90%~7.44%,平均为6.40%;FeO^T值为1.69%~ 4.70%;平均为3.64%;Mg#值为43.33~48.86;平均 为45.65;K₂O/Na₂O为0.50~0.89,里特曼指数*σ*为 1.48~2.05,碱度指数KN/A=0.54~0.63,碱度率(A.R.) 为1.82~2.30,岩石属钙碱性系列。镁铁指数 MF=66.56~69.53与长英指数FL=56.56~70.92,说明 岩浆分离结晶程度中等。在TAS图中,样品基本 落于花岗闪长岩区(图5a),与室内镜下鉴定的名



1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—花岗岩; 7—硅英岩; 8—二长辉长岩; 9—二长闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—正长岩; 13—副长石辉长岩; 14— 副长石二长闪长岩; 15—副长石二长正长岩; 16—副长正长岩; 17—副长深成岩; 18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩。 图5 西藏冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩 TAS 图解(a, 据 Middlemost, 1994)和 SiO₂-K₂O 图解(b, 据 Rickwood, 1989)

Fig. 5 The TAS (a, after Middlemost, 1994) and SiO₂-K₂O (b, after Rickwood, 1989) diagrams of Paleocene granodiorite in Azhaxiang, southern Gangdese, Xizang

称基本一致;在 K₂O-SiO₂ 图解中,样品落于钙碱性系列和高钾钙碱性系列区(图 5b)。

样品稀土元素总量**Σ**REE(包括 Y 元素)为 71.36×10⁻⁶~116.84×10⁻⁶,平均为94.01×10⁻⁶,明显 低于上地壳稀土总量(210×10⁻⁶),略高于下地壳稀 土总量(74×10⁻⁶, Taylor, 1979)。轻稀土(LREE)为 49.78×10⁻⁶~86.99×10⁻⁶,平均为 69.33×10⁻⁶,重稀土 (HREE)为 7.64×10⁻⁶~14.56×10⁻⁶, LR/HR 为 5.61~ 8.45, 相对亏损重稀土元素; δEu 为 0.87~1.21, 平均 为1.04, 铕基本无异常; 轻、重稀土元素分馏较显 著(La_N/Yb_N=4.49~8.25),且主要是轻稀土元素的分 馏(La_N/Sm_N=2.62~5.23), 重稀土元素基本无分馏 (Gd_N/Yb_N=0.86~1.20);稀土配分曲线显示为右倾型, 轻稀土较为富集(图 6a)。球粒陨石标准化的蜘蛛 网图中显示强不相容元素富集的配分型式(图 6b), δCe为 0.91~0.97, 平均为 0.94。 接近 0.90~1.10 (Polat et al., 2002), 且没有 Ce 异常为特征(图 6a), 表明这些岩石的主要化学特征在晚期蚀变和变质

作用期间没有受到显著影响。同时, Rb、U、K 相 对富集, Nb、Ta、P、Ti等相对亏损明显; 样品 Sr 含 量为 326.2×10⁻⁶~414.1×10⁻⁶, 平均为 375.22×10⁻⁶, Y 含量为 11.21×10⁻⁶~19.94×10⁻⁶, 平均为 14.47× 10⁻⁶, 并不具备明显的埃达克特征, 在(La/Yb)_N-Yb_N 与 Sr/Y-Y 图解中样品均落入经典岛弧范围内 (图 6c、6d)。

5 讨论

5.1 岩石成因

一般来说,部分微量元素由于具有基本一致的 地球化学行为,其比值在一般的岩浆系统过程中常 能保持稳定,可用来示踪相似的源区(Green, 1995)。 阿扎乡古新世花岗闪长岩 Zr/Hf 和 Y/Ho 比值与 SiO₂相对恒定,表明它们应该具有共同的起源。阿 扎乡花岗闪长岩样品以富 Si、Al、K,贫 Ca、Mg、 Ti 为特征, A/CNK 为 0.95~1.02,全部低于 I 型与 S 型花岗岩的分界值,显示了与 I 型花岗岩的亲缘性。



图 6 西藏冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a,标准化值据 Boynton, 1984); 原始地幔标准化微量元素蜘蛛图(b,标准化值据 Sun and McDonough, 1989); (La/Yb)_N-Yb_N图解(c,据 Drummond and Defant, 1990); Sr/Y-Y 图解(d,据 Drummond and Defant, 1990)

Fig. 6 Chondrite-normalized distribution diagram of Paleocene granodiorite in Azhaxiang, southern Gangdese, Xizang (a, normalization values after Boynton, 1984); primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989); (La/Yb)_N-Yb_N diagram (c, after Drummond and Defant, 1990); Sr/Y-Y diagram (d, after Drummond and Defant, 1990)

岩石中含有角闪石,并且具有较低的铝饱和指数, 与 I 型花岗岩的特征一致。此外,实验发现, P₂O₅ 在准铝质-弱过铝质 I 型花岗质岩浆中随 SiO₂ 的增 加而减少,呈负相关;在强过铝质 S 型花岗质岩浆 中随 SiO₂ 的增加而增加,或保持不变(Chappell, 1999; Wolf and London, 1994;徐夕生和邱检生, 2010; Chappell and White, 1992)。本文样品 P₂O₅ 与 SiO₂ 具有良好的负相关性,显示了 I 型花岗岩的 演化趋势(图 7a)。同时,在 K₂O-Na₂O 图解中样品 均落入 I 型花岗岩区域(图 7b),因此,该岩体为典 型的 I 型花岗岩。

源区的部分熔融、围岩的同化混染、岩浆混合 以及分离结晶作用均可以使岩浆成分发生明显、 连续的变化。样品的 Mg#值为 43.33~48.86, 平 均为45.65,大于地壳部分熔融形成的岩浆岩 (Mg#<40, Atherton and Petford, 1993), 低于由地幔 部分熔融形成的岩浆岩(Mg#>60, McCarron and Smellie, 1998), 暗示其可能具有少量幔源物质加入。 本次研究过程中,在野外观察到椭圆状暗色包体但 未见不规则团块,也说明岩浆演化过程存在岩浆混 合作用。但实验岩石学研究表明,来自亏损地幔的 岩浆具有高 Mg 和低 SiO, 的特征 (Falloon and Danyushevsky, 2000; Nicholls and Carmicheal, 1972), 而阿扎乡花岗闪长岩具有低 Mg 和高 SiO₂ 的特征, 说明岩浆可能主要来自新生地壳。另外,样品的 Rb/Sr 比值为 0.11~0.29, 平均为 0.20, 明显高于上 地幔平均值(0.034), 接近大陆地壳平均值(0.35, Taylor et al., 1995); Nb/Ta 比值为 6.44~14.10, 平均

为11.89,低于幔源岩石(17.5±2,Hofmann,1988; Green,1995),接近陆壳岩石(11左右,Green,1995); Zr/Hf比值为21.20~29.55,平均为27.41,更接近大 陆平均值(地壳33±,Taylor and McLennan,1985;地 幔37.0,McDonough and Sun,1995),证明岩浆主要 来源于地壳。结合同位素特征、微量元素的连续 演化趋势(详见下文讨论),以及在镜下未见明显的 淬冷针状矿物、矿物环带和不平衡现象(王玉往等, 2007,贺敬博和陈斌,2011),加之矿物之间的包裹 现象不明显(Arslan and Aslan,2006),本文认为阿 扎乡古新世花岗闪长岩受到了岩浆混合作用的影 响,但是影响程度有限,成分变化主要是自身演化 的结果。

在岩浆演化过程中, La/Sm 与 La 的关系可以 识别分离结晶和部分熔融过程。分离结晶过程中, La/Sm 随 La 的升高变化不大; 而部分熔融过程中, 二者呈正相关关系(Allégr and Hart, 1978)。阿扎乡 古新世花岗闪长岩的 La/Sm 比值随 La 含量的增高 而基本保持不变, 暗示其主要受分离结晶作用的影 响(图 8a)。此外, LREE 为强不相容元素, 在岩石 熔融过程中优先进入熔体, 并随着熔融程度的增加 而逐渐减少(White, 2020)。本文样品中的 LREE 与 SiO₂ 呈负相关(图 8b), 表明部分熔融对花岗闪 长岩岩浆成分演化的贡献不显著。同时, La/Yb 和 Yb 之间的关系也表明岩浆演化主要受分离结晶控 制(图 8c)。因此, 阿扎乡古新世花岗闪长岩的地 球化学特征主要受分离结晶作用的控制。幔源的 玄武质岩浆可以通过矿物的分离结晶逐渐变为酸



图 7 西藏冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩 P₂O₅-SiO₂(a, 据 Li et al., 2007)和 K₂O-Na₂O(b, 据 Collins et al., 1982) 岩石成因类型判别图解

Fig. 7 Genetic types of rocks discrimination diagrams for the Paleocene granodiorite P₂O₅–SiO₂ (a, after Li et al., 2007) and K₂O–Na₂O (b, after Collins et al., 1982) in Azhaxiang, southern Gangdese, Xizang



a. La/Sm-La 图解(据 Allégr and Hart, 1978); b. LREE-SiO₂ 图解; c. La/Yb-Yb 图解(据 Fan et al., 2004); d. Y-SiO₂ 图解; e. (Dy/Yb)_N-SiO₂ 图解; f. Er-Dy 图解。



性岩浆。但前文我们已经证明,阿扎乡花岗闪长岩 主要起源于地壳的部分熔融。并且,大量酸性火山 岩的形成需要更大规模玄武质岩浆的分离结晶,而 区域上并未发现大规模连续的中基性岩浆岩组合。 因此,阿扎乡花岗闪长岩的地球化学特征是地壳部 分熔融后岩浆分离结晶的结果。

磷灰石是轻稀土和 P_2O_5 的主要载体相(Bédard, 2006), 本文研究的花岗闪长岩的 LREE 和 P₂O₅含 量随 SiO2 的增加而同步降低,因此,我们将磷灰石 视为分馏相(图 7a、图 8b)。此外,微量元素特征表 明花岗闪长岩还具角闪石的分离结晶特征(图 8d, 8f)。斜长石富含铕,其分离结晶必然导致残余熔 体中铕负异常,本文的花岗闪长岩未见明显的负 Eu 异常(δEu 平均为 1.04)(图 6a), Eu/Eu^{*}和 Sr 之 间没有线性关系,表明斜长石的分离结晶不显著, 源区的深度大于斜长石的稳定性。此外,本文的花 岗闪长岩具有相对较高的 Al₂O₃(>15%), 表明源区 没有残留斜长石(Barker and Arth, 1976)。石榴石 富含 HREEs, 其分离结晶或作为源区的残余物将 导致 HREEs 的耗尽和 LREEs/HREEs 的强烈分馏, 而本文的花岗闪长岩没有强烈的 HREEs 亏损, LREEs/HREEs 与岩浆演化没有明显的线性关系, 表明源区没有石榴石的明显残留。综上所述,我们 认为阿扎乡古新世花岗闪长岩的岩浆源区是斜长 石和石榴石稳定场的过渡带,随后,岩浆经历了角 闪石和磷灰石的分馏作用。

5.2 岩浆起源

锆石 $\varepsilon_{\rm eff}(t)$ 值提供了有关岩浆来源的信息, 小 于零的值表示岩浆起源于古地壳成分的部分熔融, 大于零的值表示源于新生地壳或地幔物质的部分 熔融,接近零的表明岩浆起源于壳源岩浆和幔源岩 浆的混合(Kinny and Maas, 2003)。冈底斯南缘古 新世花岗闪长岩锆石 ε_{нf}(t) 值为+10.7~+13.3, t_{DM2} 在 285.5~453.4 Ma 之间(图 4), 表明岩浆源区主要 为亏损地幔或新生的年轻地壳。前人对该区域花 岗闪长岩进行了广泛的 Sr-Nd 同位素分析,其初始 锶 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr); 为 0.704 6~0.704 9, ε_{Nd}(t) 值 为 — 1.1~ -0.2, 暗示其来源可能以地壳为主, 混染了地幔物 质(Hou et al., 2004, 2015; 徐净等, 2019; 付强, 2013)。锆石群型特征的分布同样可以指示花岗岩 类的成因(廖忠礼等, 2006),即 I₄和 I₇可反映锆石 群结晶时的温度和碱度特征以及锆石群类型的演 化趋势(陈光远等, 1993)。本文花岗闪长岩 I₄= 490,



1—壳源高铝淡色花岗岩; 2—壳源半原地二长花岗岩和 花岗闪长岩; 3—壳源异地侵入高铝二长花岗岩和花岗闪 长岩; 4a、4b、4c—地壳+地幔成因钙碱性花岗岩(上 部=二长花岗岩+碱性花岗岩;下部=花岗闪长岩+二长花岗 岩); 5—地壳+地幔成因亚碱性系列花岗岩; 6—地幔成 因或主要为地幔成因的碱性系列花岗岩; 7—地幔成因拉 斑玄武岩系列花岗岩; Ch—紫苏花岗岩区; Mu—白云母 花岗岩(*I_r=*450)。

图 9 锆石群平均点和不同成因类型岩石演化趋势(据 Pupin, 1980)

Fig. 9 Average point of zircon groups and evolution trends of rocks of different genetic types (after Pupin, 1980)

I_r= 484, 岩体中锆石结晶温度大约在 700℃, 将锆石 群平均点投影在图 9上, 结果显示其属于地壳地幔 成因钙碱性花岗岩, 落于 Mu 虚线以下的高温区。 综合以上讨论, 本文认为, 阿扎乡古新世花岗闪长 岩主要来源于新生地壳, 可能有少量地幔物质加入, 岩浆自身的分离结晶控制了成分的演化。

5.3 构造环境分析

前人将冈底斯岩浆活动分为 205~152 Ma、 109~80 Ma、65~41 Ma 和 33~13 Ma 共 4 个阶段(纪 伟强等, 2009),通过对林子宗火山岩(65~41 Ma) 的研究,认为该时期为同碰撞环境,并认为 65~45 Ma间的冈底斯岩基花岗岩为同碰撞花岗岩 (莫宣学等, 2005;侯增谦等, 2006),也有观点认为, 该期岩浆作用为一复杂地质过程的产物,包括新特 提斯洋板片继续俯冲、板片回转和大洋板片断离 等一系列过程。同时,阿扎乡古新世花岗闪长岩岩 石地球化学特征显示 LREE 富集, HREE 亏损, 无 明显的 Eu 异常(图 6a), 加上典型的 Nb、Ta、Ti等 亏损的地球化学特征(图 6b), 表明其形成于俯冲 相关背景。张宁(2019)根据冈底斯东段晚白垩世 片麻岩的研究认为, 74 Ma 左右该地区仍处于新特 提斯洋的俯冲背景。大量的相关研究认为, 在 65 Ma 左右, 冈底斯地区主要处于俯冲晚期至碰撞期 的转换阶段(张泽明等, 2019)。在此基础上, 我们 利用阿扎乡花岗闪长岩的锆石 Eu/Eu^{*}与地壳厚度 之间呈正相关关系(Tang et al., 2020), 通过以下公 式计算得到岩浆的形成深度:

 $h = (84.2 \pm 9.2) \times \text{Eu}/\text{Eu}^* + (24.5 \pm 3.3)$

通过锆石微量元素计算测得该岩体形成的深 度范围为 60.7±7.2 km,处于加厚地壳的构造环境。 此时冈底斯的地壳厚度可能增加到 50~58 km,这 可能与俯冲板片的回旋和幔源岩浆的底侵导致地 壳加厚有关(Guo et al., 2012; Zhu et al., 2018)。而 Tang et al.(2020)利用碎屑锆石探究了晚白垩世至 新生代藏南冈底斯的地壳厚度变化,显示 65 Ma 左 右该区域的地壳厚度接近 60 km。综合以上分析, 本文认为该岩体形成于弧环境,该时期地壳厚度可 达约 60 km。

5.4 成矿潜力评价

研究区位于南冈底斯斑岩铜矿带东段,该带中 内生矿床的成矿时代主要集中于中新世,如朱诺、 冲江、厅宫、白容、驱龙、甲玛等斑岩型铜多金属 矿床(曲晓明等,2003; 芮宗瑶等,2003,2004; 郑有 业等,2004; 黄勇等,2015; 曾忠诚等,2016), 仅少量 为古新世,如研究区东侧的扎囊县克鲁铜金矿床 (李光明等,2002; 江化寨等,2011; 程超杰,2012)。 然而随着近些年研究的深入,同期岩浆在冈底斯成 矿带西段(谢通门县以西地区)(黄瀚霄等,2019)发 现了纳如松多(纪现华等,2014; 刘英超等,2015)、 查个勒(高顺宝,2015)等多个大型-超大型矿床, 显示了良好的成矿潜力。最近,拉萨附近新发现的 日阿窄多金属矿床也确定了该带在古新世(60~62 Ma)具有较好的 Fe-Cu 多金属矿成矿潜力(徐净等, 2019)。

在岩浆演化过程中,高氧逸度和流体的贡献是 控制斑岩铜(金)矿床形成的两个关键因素(孙卫东 等,2015),特别是氧逸度(f_o),高f_o能够使Au、 Cu等亲硫成矿元素在岩浆形成过程从源区中活化 迁出(Mungall,2002),并在还原条件下与其它硫化

物一起沉淀富集。如果岩浆结晶分异过程中存在 大量 S²⁻就会导致熔体中的 S 离子与 Cu、Au 等阳 离子结合在早期以硫化物形式沉淀,不利于晚阶段 含Au、Cu 成矿流体的形成和残余岩浆中Au、Cu 的富集。在高氧逸度条件下,岩浆中的硫绝大多数 以 SO4²⁻和 SO2形式溶解在硅酸盐熔体中,其溶解 度远大于硫化物,而在硫不饱和的岩浆中Au、Cu 显示不相容性,在岩浆演化过程中能够长期稳定存 在并不断富集最终进入流体相,从而富集形成斑岩 铜金矿床(Richards, 2003; Sun et al., 2013, 2015; Jenner et al., 2010)。另外,由于洋壳铜、金、硫含量 是陆壳和地幔丰度的3倍以上,且俯冲板块部分熔 融时的氧逸度高出铁橄榄石-石英-磁铁矿氧逸度 缓冲线2个数量级,在此氧逸度下,岩浆中硫主要 以硫酸根形式存在,有利于形成具有高初始铜金含 量的岩浆(Sun et al., 2015)。此外,吴昌炟(2019)通 过统计冈底斯成矿岩体与非成矿岩体发现,幔源物 质的加入、流体贡献的多少及高的氧逸度可以使 源区的硫化物分解,导致 Cu、S 等元素在岩浆中富 集并迁移。因此,源区的流体交代程度和 Cu 的富 集程度、高的氧逸度是成矿的关键。

本文花岗闪长岩锆石的/FMQ平均为 0.87, 具 有中高的氧逸度,是斑岩型铜金矿床形成的有利氧 逸度范围(*AFMQ为* 0~2)(Richards, 2011)。在锆石 的 $T-\lg f_{O_2}$ 图解和 (Ce/Ce^{*})_{CHUR}-10⁴/T (K⁻¹) 图解中, 样品大部分位于 FMQ 线以上区域(图 10),显示了 较高的氧逸度。岩体中可见角闪石,一般角闪石的 存在证明结晶过程中岩浆属于富水环境(>4%, Scaillet and Evans, 1999)。前文也证明, 阿扎乡古 新世花岗闪长岩明显受到地幔物质的混染。以上 事实似乎显示该岩体具有较好的成矿潜力。但是, 区域上并未发现大型的铜(金)矿与该岩体相关。 因此,我们又通过其他特征进一步对阿扎乡花岗闪 长岩的成矿潜力进行了判断。全岩的 Sr/Y 为 19~33, 小于 Loucks(2014)认为的成矿岩体应该具 有的高 Sr/Y 的特征(大于 35)。另外,尽管矿物学 和地球化学特征显示阿扎乡花岗闪长岩经历了俯 冲流体的改造,但是,成矿过程可能需要更高的流 体交代(吴昌炟, 2019), 而阿扎乡花岗闪长岩的 Ba/La、Sr/Nd显示其与成矿岩体相比,具有相对较 弱的流体改造(吴昌炟, 2019)。根据锆石微量原素 情况,阿扎乡花岗闪长岩尽管形成深度较大(约 60 km),但是不具有埃达克岩的特征,而区域上绝



图 10 西藏冈底斯南缘阿扎乡古新世花岗闪长岩锆石的 T-lg f_0 图解(a, 据 Eugster and Wones, 1962)和 $(Ce/Ce^*)_{CHUR}$ -10⁴/ $T(K^{-1})$ 图解(b, 据 Trail et al., 2011)

Fig. 10 Zircon T-lg $f_{0:}$ diagrams (a, after Eugster and Wones, 1962)) and (Ce/Ce^{*})_{CHUR}-10⁴/*T* (K⁻¹) diagrams (b, after Trail et al., 2011) of granodiorite of Paleocene granodiorite in Azhaxiang, southern Gangdese, Xizang

大多数的铜金矿床为埃达克质,显示了更深的岩浆 起源。由于地幔物质和俯冲流体都是自下而上迁 移的,因此更大深度的岩浆自然会受到更多地幔物 质和俯冲流体的作用。结合区域上已经发现了铜 (金)矿床的事实(如克鲁铜金矿床),表明该区域深 部曾经存在 Cu、Au等成矿元素的富集过程。

综合以上分析,通过对阿扎乡花岗闪长岩的研究,认为该地区在古新世为俯冲背景,越向深部可能受到越多地幔物质和俯冲流体的作用。因此,阿 扎乡花岗闪长岩本身应该与铜(金)矿的关系不大, 但是区域上已经发现的大型铜(金)矿床以及该时 期花岗闪长岩的特征暗示研究区深部可能存在较 好的 Cu、Au 元素成矿条件,具有较好的深部找矿 前景。

6 结论

(1) 冈底斯南缘古新世花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 64.55±0.93 Ma, 侵位时代为 古新世。锆石 ε_{Hf}(t) 值为+10.7~+13.3, 单阶段 Hf 模 式年龄(t_{DM1})平均为 245.6 Ma。二阶段 Hf 模式年 龄平均为 354.8 Ma。

(2)花岗闪长岩为典型的 I 型花岗岩, 锆石 I₄= 490, I₇= 484, 结晶温度大约在 700℃, 岩浆来源于俯 冲环境新生地壳的部分熔融, 并有少量幔源物质加 入, 岩浆经历了角闪石和磷灰石的分馏作用, 形成 于挤压碰撞前的弧构造环境,推断该岩体形成深度 为 60 km 左右,受新特提斯板块继续俯冲的影响。

(3)花岗闪长岩的熔融条件、形成过程以及区 域大型铜金矿床的发现显示该区域具有良好的深 部找矿潜力。

References

- Allégre C J, Hart S R, 1978. Trace Elements in Igneous Petrology [J]. The Journal of Geology, 86 (6):773 – 774.
- Amelin Y, Lee D, Halliday A N, et al., 1999. Nature of Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. Nature, 399: 252 - 255.
- Arslan M, Aslan Z, 2006. Mineralogy, petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the Eastern Pontides, Turkey[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 27 (2) : 177 – 193.
- Atherton M P, Petford N, 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. Nature, 362: 144 – 146.
- Barker F, Arth J G, 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemitic-basalt suites [J]. Geology, 4: 596 – 600.
- Bédard J H, 2006. A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archean crust and sub-continental lithospheric mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70: 1188 – 1214.
- 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[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143 (5): 602 – 622.
- Boynton W V, 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). Rare Earth Element

Geochemistry[J]. Amsterdam: Elsevier, 2: 63 - 114.

- Chappell B W, 1999. Aluminum saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J].Lithos, 46: 535 – 551.
- Chappell B W, White A J R, 1992. I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 83 (1-2) : 1 – 26.
- Chen G Y, Sun D S, Zhou X R, et al., Genetic Mineralogy and gold mineralization of Guojialing Granodiorite in eastern Shandong[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993, 1–164.
- Cheng C J, 2012. The Geologic Feature and Regional Metallogenic Prediction of Kelu Copper Deposit in Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Collins W J, Beams S D, White A J H, 1982. Nature and origin of Atype granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 80 (2) : 189 – 200.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, 2003. Atlas of zircon textures[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53 (1): 469-495.
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C, 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ³⁹Ar/⁴⁰Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. [J]. Earth and Planetary Science Letters, 79: 281 – 302.
- Dong X, Zhang Z M, 2013. Genesis and tectonic significance of the Early Jurassic magmatic rocks from the southern Lhasa terrane[J]. Acta Petrologica Sinica, 29 (6) : 1933 – 1948 (in Chinese with English abstract).
- Drummond M S, Defant M J, 1990. A model for Trondhjemite-Tonalite-Dacite Genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. Journal of Geophysical Research, 95: 21503 – 21521.
- Eugster H P, Wones D R, 1962. Stability relations of the ferruginous biotite, annite[J]. Journal of Petrology, 3 (1): 82 – 125.
- Falloon T J, Danyushevsky L V, 2000. Melting of Refractory Mantle at 1.5, 2 and 2.5 GPa under Anhydrous and H₂O-undersaturated Conditions: Implications for the Petrogenesis of High-Ca Boninites and the Influence of Subduction Components on Mantle Melting[J]. Journal of Petrology, 41: 257 – 283.
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, 2004. Late Mesozoic volcanism in the northern Huaiyang tectono-magmatic belt, central China: Partial melts from a lithospheric mantle with subducted continental crust relicts beneath the Dabie orogen?[J].Chemical Geology, 209 (1-2) : 27 – 48.
- Fu Q, 2013. Mineralization of skarn Fe (Cu) deposits in the north Gangdese belt, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing.
- Gao J F, Lu J J, Lai M Y, et al., 2003. Analysis of Trace Elements in Rock Samples Using HR-ICPMS[J]. Journal of NanJing University (Natural Sciences), 39 (6): 844 – 850 (in Chinese with English abstract).
- Gao S B, 2015. Copper-iron polymetal metallogenic regularity and election of targeet areas in the western of Gangdise Metallogenic Belt, Tibet[D]. Wuhan: China University of Geosciences.

Green T H, 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical

processes in the crust-mantle system [J]. Chemical Geology, 120: 347 – 359.

- Guo L, Zhang H F, Harris N, 2012. Paleogene crustal anatexis and metamorphism in Lhasa terrane, eastern Himalayan syntaxis: Evidence from U-Pb zircon ages and Hf isotopic compositions of the Nyingchi Complex[J]. Gondwana Research, 21 (1) : 100 – 111.
- He J B, Chen B, 2011. Petrogenesis of Karamay plutons in the west Junggar: Constraints from geochronology, petrology and geochemistry[J]. Earth Science Frontiers, 18 (2) : 191 – 211 (in Chinese with English abstract).
- Hofmann A W, 1988. Chemical differentiation of the Earth : the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 90 (3) : 297 – 314.
- Hou K J, Li Y H, Zou T R, et al., 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological application[J]. Acta Petrologica Sinica, 23 (10) : 2595 – 2604 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Duan L F, Lu Y J, 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Economic Geology, 110 (6) : 1541 – 1575.
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 220 (1-2) : 139 – 155.
- Hou Z Q, Mo X X, Gao Y F, et al., 2006. Early Processes and Tectonic Model for the Indian—Asian Continental Collision: Evidence from the Cenozoic Gangdese Igneous Rocks in Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 80 (9) : 1233 – 1248 (in Chinese with English abstract).
- Huang H X, Zhang L K, Liu H, et al., 2019. Major Types, Mineralization and Potential Prospecting Areas in Western Section of the Gangdise Metallogenic Belt, Tibet[J]. Earth Science, 44 (6) : 1876 – 1887 (in Chinese with English abstract).
- Huang Y, Ding J, Li G M, et al., 2015. U-Pb Dating, Hf Isotopic Characteristics of Zircons from Intrusions in the Zhuluo Porphyry Cu-Mo-Au Deposit and Its Mineralization Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 89 (1): 99 – 108 (in Chinese with English abstract).
- Jiang H Z, Zeng H L, Wu Z S, 2011. Geological characteristics and prospecting prediction in deep area of layer Skarn Cu-W-Mo deposit in Shannan Nuri ore district Tibet[J]. Geology and Prospecting, 47 (1): 71 – 77 (in Chinese with English abstract).
- Jenner F E, O'Neill H S C, Arcuhs R J, 2010. The magnetite crisis in the evolution of arc-related magmas and the initial concentration of Au, Ag and Cu[J]. Journal of Petrology, 51 (12) : 2445 – 2464.
- Ji W Q, Wu F Y, Zhong S L, et al., 2009. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet[J]. Science in China (Series D:Earth Sciences), 39 (7) : 849 – 871 (in Chinese with English abstract).
- Ji X H, Meng X J, Yang Z S, et al., 2014. The Ar-Ar geochronology of sericite from the cryptoexplosive breccia type Pb-Zn deposit in Narusongduo, Tibet and its geological significance [J]. Geology and Exploration, 50 (2) : 0281 – 290.
- Kinny P D, Maas R, 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 327 – 341.
- Lang X H, Tang J X, Li Z J, 2014. U-Pb and Re-Os geochronological

evidence for the Jurassic porphyry metallogenic event of the Xiongcun district in the Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet, PRC[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 79 (B5) : 608 – 622.

- Li G M, Wang G M, Gao D F, et al., 2002. Perspective of copper ore deposit and its exploration direction in Gangdise Metallogenic Belt, Tibet[J]. Mineral deposits, 21 (S1) : 144 - 147 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li W X, Li Z H, 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China[J]. Chinese Science Bulletin, 52 (14) : 1873 – 1885.
- Liao Z L, Mo X X, Pan G T, et al., 2006. Characteristics and implication of the topology of zircons from the peraluminous granites in Tibet[J]. Geotectonica et Metallogenia, 30 (1) : 63 - 71 (in Chinese with English abstract).
- Liu F B, Zhang N, Ding F, et al., 2020. Geochemical characteristics and tectonic response of Dianzhong Formation volcanic rocks in Chunzhe area, Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 47 (4): 411 – 422 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y C, Ji X H, Hou Z Q, et al., 2015. The establishment of an independent Pb-Zn mineralization system related to magmatism: A case study of the Narusongduo Pb-Zn deposit in Tibet[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 34 (4) : 539 - 556 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, 2010. Continental and oceanic crust recyclinginduced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 51: 537 – 571.
- Loucks R R, 2014. Distinctive Composition of Copper-Ore-Forming Arcmagmas[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 61 (1):5-16.
- McCarron J J, Smellie J, 1998. Tectonic Implications of P'ore-Arc Magmatism and Generation of High-Magnesian Andesites: Alexander Island, Antarctica[J]. Journal of the Geological, 155: 269 – 280.
- McDonough W F, Sun S S, 1995. The Composition of the Earth [J]. Chemical Geology, 120 (3/4) : 223 – 253.
- Middlemost E A K, 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System[J]. Earth-Science Reviews, 37: 215 – 244.
- Mo X X, 2011. Magmatism and Evolution of the Tibetan Plateau [J]. Geological Journal of China Universities, 17 (3) : 351 367 (in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, et al., 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution[J]. Geological Journal of China Universities, 11 (3) : 281 – 290 (in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Pan G T, 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events [J]. Earth Science Frontiers, 13 (6) : 43 - 51 (in Chinese with English abstract).
- Mungall J E, 2002. Roasting the mantle: slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu ore deposits [J]. Geology, 30 (10) :915-918.
- Nicholls J, Carmichael I S E, 1972. The equilibration temperature and pressure of various lava types with spinel-and garnet-peridotite[J].

American Mineralogist, 57: 941 - 959.

- Pan F B, Zhang H F, Xu W C, 2016. U-Pb zircon dating, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of mafic intrusive rocks in the Motuo, SE Tibet constrain on their petrogenesis and tectonic implication[J]. Lithos, 245: 133 – 146.
- Pan G T, Mo X X, Hou Z Q, et al., 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 22 (3) : 521-533.
- Polat A, Hofmann A W, Rosing M T, 2002. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7-3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth [J]. Chemical geology, 184: 231 – 254.
- Pupin J P, 1980. Zircon and granite prtrology [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 73 (3) : 207 – 220.
- Qu X M, Hou Z Q, Li Z Q, 2003. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Ages of the ore-bearing porphyries of the Gangdese porphyry copper belt and their geological significances[J]. Acta Geologica Sinica, 77 (2) : 245 252 (in Chinese with English abstract).
- Richards J P, 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu- (Mo-Au) deposit formation [J]. Economic Geology, 98: 1515 – 1533.
- Richards J P, 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: Just add water[J]. Economic Geology, 106 (7) : 1075 1081.
- Rickwood P C, 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 22 (4) : 247 – 263.
- Rui Z Y, Li G M, Zhang L S, et al., 2004. The response of porphyry copper deposits to important geological events in Xizang[J]. Earth Science Frontiers, 11 (1) : 145 – 152.
- Rui Z Y, Lu Y, Li G M, et al., 2003. Looking forward to the prospects of porphyry copper deposits in Tibet[J]. Geology in China, 30 (3) : 302 - 308 (in Chinese with English abstract).
- Sun W D, Li H, Ling M X, et al., 2015. Magnetite crisis and copper gold mineralization[J]. Bulletion of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 34 (5): 895 – 901 (in Chinese with English abstract).
- Scaillet B, Evans B W, 1999. The 15 June 1991 Eruption of Mount Pinatubo. I. Phase Equilibria and Pre-eruption P-T-f O₂ -f H₂O Conditions of the Dacite Magma[J]. Journal of Petrology, 40: 381 – 411.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[J]. Geological Society of London Special Publications, 42 (1): 313 – 345.
- Sun W D, Huang R F, Li H, 2015. Porphyry deposits and oxidized magmas[J]. Ore Geology Reviews, 65: 97 131.
- Sun W D, Li H, Ling M X, et al., 2015. Magnetite Crisis and Copper Gold Mineralization[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 34 (5): 895-901+884.
- Sun W D, Liang H Y, Ling M X, 2013. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 103: 263 – 275.
- Tang J X, Song Y, Wang Q, et al., 2016. Geological Characteristics and Exploration Model of the Tiegelongnan Cu (Au-Ag) Deposit: The First Ten Million Tons Metal Resources of a Porphyry-epithermal

Deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37 (6) : 663 – 690 (in Chinese with English abstract).

- Tang M, Ji W Q, Chu X, 2020. Reconstructing crustal thickness evolution from europium anomalies in detrital zircons[J]. Geology, 49 (1): 76-80.
- Taylor S R, 1979. Trace element analysis of rare earth element by spark source mass spectromentry. In: Gschneidner K A Jr, Eyring L (eds). Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, 4. Amsterdam: North-Holland.
- Taylor S R, McLenann S M, 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [J]. Blackwell: Oxford Press, 1 312.
- Taylor S R, McLennan S M, 1995. The Geochemical evolution of the Continental Crust[J]. Reviews of Geophysics, 33: 241 – 265.
- Trail D, Watson E B, Tailby N D, 2011. The oxidation state of Hadean magmas and implications for early Earth's atmosphere[J]. Nature, 480 (7375): 79 – 82.
- Wang L Q, Zhu D C, Geng Q R, et al., 2006. The Formation Age and Significance of Granite Porphyry Related to Collision Processes in the Linzhou Basin of the Gangdise Belt, Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 51 (16) : 1920 – 1928 (in Chinese with English abstract).
- Wang X H, Lang X H, Deng Y L, et al., 2018. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Tectonic Implications of the Tangbai Porphyritic Granite Pluton in Southern Margin of Gangdese, Tibet[J]. Geological Journal of China Universities, 24 (1): 41 – 55 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y W, Wang J B, Wang L J, et al., 2007. Three-stages magma mixing in the Weiya or e district, Xinjiang[J]. Geology In China, 34 (2) : 289 – 299 (in Chinese with English abstract).
- Weller O M, St-Onge M R, Rayner N, 2016. Miocene magmatism in the Western Nyainqentanglha Mountains of southern Tibet: An exhumed bright spot?[J]. Lithos, 245: 147 – 160.
- White W M, 2020. Geochemistry [M]. John Wiley & Sons.
- Wolf M B, London D, 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranite melts : An experimental study of solubilities and mechanisms [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 58: 4127 – 4145.
- Wu C D, 2019. Petrogenesis of adakites and its potential for porphyry copper mineralization in Gangdese belt, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, et al., 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23 (2) : 185 – 220 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 234 (1-2) : 105 – 126.
- Wu X M, Zhang Z P, Luo X G, et al., 2019. The chronology, geochemical characteristics and geological significance of the Granodiorite in gangjiezexiong, north of sangye temple, Tibet[J]. Geotechnical Engineering World, 10 (06) : 1339 – 1350 (in Chinese with English abstract).
- Xia L Q, Ma Z P, Li X M, et al., 2009. Paleocene-Early Eocene (65-40 Ma) volcanic rocks in tibetan plateau: The products of syn-collisional volcanism[J]. Northwestern Geology, 2009, 42 (3) : 1 25 (in Chinese with English abstract).
- Xie F W, Tang J X, Lang X H, 2018. The different sources and petrogenesis of Jurassic intrusive rocks in the southern Lhasa

subterrane, Tibet: Evidence from the trace element compositions of zircon, apatite, and titanite[J]. Lithos, 314-315: 447 – 462.

- Xu J, Li X F, Xu Q H, 2019. The genesis and significance of the Paleocene granitoids in the Riazhai Pb polymetallic deposit, southern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 35 (11) : 3529 – 3548 (in Chinese with English abstract).
- Xu X S, Qiu J S, 2010. Igneous Petrology [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- Xu Z Q, Yang J S, Li H B, et al., 2011. On the Tectonics of the India-Asia Collision [J]. Acta Geologica Sinica, 85 (1) : 1 – 33 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Harrison T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28 (1): 211-280.
- Zeng Z C, Liu D M, Wang M Z, et al., 2016. Tectonic-Magmatic Evolution and Mineralization of the Qulong-Jiama Areas in Eastern Section of Gangdese Mountains, Xizang (Tibet) [J]. Geological Review, 62 (3) : 663 – 678 (in Chinese with English abstract).
- Zhang N, 2019. Late Cretaceous gneiss in the eastern Gangdese magmatic arc: Petrology and Geochronology[D]. Beijing: China University of Geosciences.
- Zhang Z M, Ding H X, Dong X, et al., 2019. Formation and evolution of the Gangdese magmatic arc, southern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 35 (2): 275 – 294 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y Y, Xue Y X, Cheng L J, et al., 2004. Finding , Characteristics and Significances of Qulong Superlarge Porphyry Copper (Molybdenum) Deposit Tibet[J]. Earth Science, 29 (1) : 103 – 108 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y Y, Zhang G Y, Xu R K, et al., 2007. Constraints on the diagenetic and mineralization age of the Juno porphyry copper deposit in Gangdise, Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 52 (21) : 2542 – 2548 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Pan G T, Wang L Q, et al., 2008. Tempo- spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues[J]. Geologcal Bulletin of China, 27 (9) : 1535 – 1550 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Wang Q, Cawood P A, 2017. Raising the Gangdese Mountains in southern Tibet [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122 (1) : 214 – 223.
- Zhu D C, Wang Q, Chung S L, 2018. Gangdese magmatism in southern Tibet and India-Asia convergence since 120Ma[J]. In: Treloar P J and Searle M P (eds.). Himalayan Tectonics: A Modern Synthesis. Geological Society, London, Special Publications: 483.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth [J]. Earth and Planetary Science Letters, 301: 241 – 255.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 23: 1429 1454.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al., 2012. Origin and Paleozoic Tectonic Evolution of the Lhasa Terrane[J]. Geological Journal of China Universities, 18 (1) : 1 – 15 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈光远,孙岱生,周珣若,等,1993.胶东郭家岭花岗闪长岩成因 矿物学与金矿化[M].武汉:中国地质大学出版社,1-164.
- 程超杰,2012.西藏克鲁铜矿床地质特征及区域成矿预测[D].成都:成都理工大学.
- 董昕,张泽明,2013. 拉萨地体南部早侏罗世岩浆岩的成因与构造 意义[J]. 岩石学报,29(6):1933-1948.
- 付强,2013. 西藏冈底斯北部矽卡岩型铁(铜) 矿床成矿作用研究 [D]. 北京:中国地质大学.
- 高剑峰,陆建军,赖鸣远,等,2003.岩石样品中微量元素的高分 辨率等离子质谱分析[J].南京大学学报(自然科学版), 39(6):844-850.
- 高顺宝,2015. 西藏冈底斯西段铜铁多金属成矿作用与找矿方向[D]. 武汉:中国地质大学.
- 贺敬博,陈斌,2011.西准噶尔克拉玛依岩体的成因:年代学、岩石学和地球化学证据[J].地学前缘,18(2):191-211.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等, 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位 素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2595-2604.
- 侯增谦,莫宣学,高永丰,等,2006.印度大陆与亚洲大陆早期碰 撞过程与动力学模型——来自西藏冈底斯新生代火成岩证据 [J].地质学报,80(9):1233-1248.
- 黄瀚霄,张林奎,刘洪,等,2019.西藏冈底斯成矿带西段矿床类型、成矿作用和找矿方向[J].地球科学,44(6):1876-1887.
- 黄勇,丁俊,李光明,等,2015.西藏朱诺斑岩铜-钼-金矿区侵入岩 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其成矿意义[J].地质学报, 89(1):99-108.
- 江化寨,曾海良,吴志山,2011.西藏山南努日矿区层砂卡岩型铜 钨钼矿床地质特征及深部找矿预测[J].地质与勘探,47(1):71-77.
- 纪伟强,吴福元,锺孙霖,等,2009.西藏南部冈底斯岩基花岗岩 时代与岩石成因[J].中国科学(D辑:地球科学),39(7): 849-871.
- 纪现华,孟祥金,杨竹森,等,2014.西藏纳如松多隐爆角砾岩型 铅锌矿床绢云母 Ar-Ar 定年及其地质意义[J].地质与勘探, 50(2):281-290.
- 李光明,王高明,高大发,等,2002.西藏冈底斯铜矿资源前景与 找矿方向[J].矿床地质,21(S1):144-147.
- 廖忠礼,莫宣学,潘桂棠,等,2006.西藏过铝花岗岩锆石群型的成因信息[J].大地构造与成矿学,30(1):63-71.
- 刘冯斌,张娜,丁枫,等,2020.西藏春哲地区古新统典中组火山 岩地球化学特征及其构造响应[J].成都理工大学学报(自然科 学版),47(4):411-422.
- 刘英超,纪现华,侯增谦,等,2015.一个与岩浆作用有关的独立 铅锌成矿系统的建立——以西藏纳如松多铅锌矿床为例[J].岩 石矿物学杂志,34(4):539-556.
- 莫宣学,2011. 岩浆作用与青藏高原演化 [J]. 高校地质学报, 17 (3):351-367.
- 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[J].高校地质学报,11(3):281-290.
- 莫宣学,潘桂棠, 2006.从特提斯到青藏高原形成:构造-岩浆事件 的约束[J].地学前缘,13(6):43-51.
- 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[J]. 岩石学报, 22 (3): 521-533.

- 曲晓明,侯增谦,李振清,2003. 冈底斯铜矿带含矿斑岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及地质意义[J]. 地质学报,77(2):245-252.
- 芮宗瑶,李光明,张立生,等,2004.西藏斑岩铜矿对重大地质事件的响应[J]地学前缘,11(1):145-152.
- 芮宗瑶, 陆彦, 李光明, 等, 2003. 西藏斑岩铜矿的前景展望[J]. 中国地质, 30 (3): 302-308.
- 孙卫东,李贺,凌明星,等,2015.磁铁矿危机与铜金热液成矿[J]. 矿物岩石地球化学通报,34(5):895-901.
- 唐菊兴,宋扬,王勤,等,2016.西藏铁格隆南铜(金银)矿床地 质特征及勘查模型——西藏首例千万吨级斑岩-浅成低温热液型 矿床[J].地球学报,37(6):663-690.
- 王立全,朱弟成,耿全如,等,2006.西藏冈底斯带林周盆地与碰撞过程相关花岗斑岩的形成时代及其意义[J].科学通报,51(16):1920-1928.
- 王旭辉,郎兴海,邓煜霖,等,2018.西藏冈底斯南缘汤白斑状花 岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及地质意义[J].高校地质学 报,24(1):41-55.
- 王玉往,王京彬,王莉娟,等,2007.新疆尾亚矿区3期岩浆混合 作用的初步研究[J].中国地质,34(2):289-299.
- 吴昌炟,2019.西藏冈底斯带埃达克岩岩石成因与斑岩铜成矿潜力 研究[D].北京:中国地质大学(北京).
- 吴福元,李献华,郑永飞,等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学 应用[J]. 岩石学报, 23 (2): 185-220.
- 武雪梅,张志平,雒晓刚,等,2019.西藏桑耶寺北岗结则雄花岗 闪长岩体年代学、地球化学特征及地质意义[J].矿产勘查, 10(06):1339-1350.
- 夏林圻,马中平,李向民,等,2009. 青藏高原古新世一始新世早期 (65~40Ma) 火山岩—同碰撞火山作用的产物 [J]. 西北地质,42 (3):1-25.
- 徐净,李晓峰,徐庆鸿,等,2019.西藏日阿窄铅多金属矿区古新 世岩浆岩岩石成因及意义[J].岩石学报,2019,35(11):3529-3548.
- 徐夕生,邱检生,2010.火成岩岩石学[M].北京:科学出版社, 2010.
- 许志琴,杨经绥,李海兵,等,2011.印度-亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报,85(1):1-33.
- 曾忠诚,刘德民,王明志,等,2016.西藏冈底斯东段驱龙—甲马 地区构造—岩浆演化与成矿[J].地质论评,62(3):663-678.
- 张宁,2019. 冈底斯岩浆弧东段晚白垩世片麻岩:岩石学和年代学 [D].北京:中国地质大学(北京).
- 张泽明,丁慧霞,董昕,等,2019. 冈底斯岩浆弧的形成与演化[J]. 岩石学报,35(2):275-294.
- 郑有业,薛迎喜,程力军,等,2004.西藏驱龙超大型斑岩铜(钼) 矿床:发现、特征及意义[J].地球科学,29(1):103-108.
- 郑有业,张刚阳,许荣科,等,2007.西藏冈底斯朱诺斑岩铜矿床 成岩成矿时代约束[J].科学通报,52(21):2542-2548.
- 朱弟成,潘桂棠,王立全,等,2008.西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J].地质通报,27(9):1535-1550.
- 朱弟成,赵志丹,牛耀龄,等,2012.拉萨地体的起源和古生代构造演化[J].高校地质学报,18(1):1-15.