

羌塘南缘青草山斑岩铜矿床地质特征与岩浆属性

董艳蕊¹, 赵晓燕^{1,2}, 杨竹森¹, 刘畅³

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100094; 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 青草山矿化区位于多龙矿集区的西北侧, 地表出露大面积的岩浆岩, 发育斑岩型铜矿化, 但岩浆岩的地球化学特征和起源演化过程尚不明确, 制约了该矿化区找矿潜力进一步的评价。为此, 对青草山矿化区出露的岩浆岩进行了详细的锆石 U-Pb 年代学、锆石微量元素、岩石地球化学、Sr-Nd 同位素和角闪石电子探针分析, 探讨岩浆岩的源区及演化过程, 厘定其温压条件、岩浆氧逸度及含水性等要素, 为进一步评价区域找矿潜力提供支撑。研究显示, 青草山矿化区成矿期岩浆岩主要包括花岗闪长斑岩、闪长玢岩和二长花岗斑岩, 成岩年龄集中在 120~118 Ma, 成矿期后细晶岩的锆石 U-Pb 年龄为 114 Ma, 均为早白垩世岩浆活动的产物。通过锆石中 Ti 含量计算出成矿期的花岗闪长斑岩、闪长玢岩、二长花岗斑岩中锆石的结晶温度平均值分别为 604、689、684°C, 氧逸度 $\lg(f_{O_2})$ 平均值分别为 -18.58、-15.77、-14.18, ΔFMQ 变化范围分别为 $\Delta FMQ-0.46 \sim \Delta FMQ+2.38$ 、 $\Delta FMQ-5.66 \sim \Delta FMQ+4.28$ 、 $\Delta FMQ-1.32 \sim \Delta FMQ+6.24$ 。闪长玢岩和花岗闪长斑岩属于高钾钙碱性-钾玄岩系列, 为准铝质-弱过铝质岩浆岩, 具有弧岩浆岩属性; ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值介于 0.7074~0.7093 之间, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值介于 -7.1~-5.3 之间, 处于亏损地幔与下地壳演化线之间的区域, 显示出壳幔混源的特征。角闪石的电子探针结果显示, 闪长玢岩含水量平均值为 7.4%。研究表明, 青草山白垩纪岩浆岩起源于俯冲板片交代地幔楔部分熔融, 并受到了地壳物质的混染, 同时显示出高氧逸度高含水量的特点, 指示青草山矿化区具有良好的斑岩铜矿成矿潜力。

关键词: 地球化学; 矿物学特征; 岩浆属性; 青草山矿化区; 羌塘南缘

中图分类号: P618.41; P588.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)06-1531-22

Geological characteristics and magmatic properties of the Qingcaoshan porphyry copper deposit in the southern margin of Qiangtang

DONG Yan-rui¹, ZHAO Xiao-yan^{1,2}, YANG Zhu-sen¹ and LIU Chang³

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037,

China; 2. SinoProbe Laboratory of the Ministry of Natural Resources, Beijing 100094, China; 3. Institute of Geology,

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Qingcaoshan mineralization area is located on the northwest side of the Duolong mining area, with a large area of magmatic rocks exposed on the surface and developed porphyry-type copper mineralization. However, the geochemical characteristics and origin and evolution of the magmatic rocks are not yet clear, which restricts further evaluation of the prospecting potential of this mineralization area. For this purpose, detailed zircon U-Pb geochronology, zircon trace elements, rock geochemistry, Sr-Nd isotopes, and hornblende electron microprobe analyses were conducted on the exposed magmatic rocks in the Qingcaoshan mineralization area to explore the source area

收稿日期: 2024-06-01; 接受日期: 2024-08-26; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2021QZKK0302); 中国地质调查局深部地质调查项目(DD20230008, DD20230230)

作者简介: 董艳蕊(2001-), 女, 硕士研究生, 资源与环境专业, E-mail: dyr20010214@163.com; 通讯作者: 赵晓燕(1989-), 副研究员, 从事岩浆热液成矿作用研究, E-mail: zxy19890926@163.com。

and evolution process of the magmatic rocks, determine their temperature and pressure conditions, magma oxygen fugacity, and water content, and provide support for further evaluating the regional prospecting potential. The study shows that the ore-forming magmatic rocks in the Qingcaoshan mineralized area mainly consist of granodiorite porphyry, diorite porphyry, and monzonitic granite porphyry, with diagenetic ages concentrated between 120~118 Ma. The zircon U-Pb age of the postmineralization aplite is 114 Ma, all of which are products of Early Cretaceous magmatic activity. The average crystallization temperatures of zircons in granodiorite porphyry, diorite porphyry, and monzonitic granite porphyry during the mineralization period were calculated based on the Ti content in zircons, which were 604, 689 and 684°C, respectively. The average oxygen fugacity $\lg(f_{O_2})$ was -18.58, -15.77 and -14.18, respectively. The range of ΔFMQ variation was $\Delta FMQ - 0.46 \sim \Delta FMQ + 2.38$, $\Delta FMQ - 5.66 \sim \Delta FMQ + 4.28$ and $\Delta FMQ - 1.32 \sim \Delta FMQ + 6.24$. The diorite porphyry and granodiorite porphyry belong to the high-potassium calcium alkaline-potassium basalt series, and quasi aluminum-weak peraluminous magmatic rocks, with arc magmatic rock properties; The $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ value ranges from 0.7074 to 0.7093, and the $\varepsilon\text{Nd}(t)$ value ranges from -7.1 to -5.3, located in the region between the depleted mantle and the lower crust evolution line, showing the characteristics of crust-mantle mixed origin. The electron probe results of hornblende show that the average water content of diorite porphyry is 7.4%. The study proves that the Cretaceous magmatism of Qingcaoshan originated from the partial melting of mantle wedges caused by subducted slab, and was mixed by crustal materials, and shows the characteristics of high oxygen fugacity and high water content, indicating that the Qingcaoshan mineralized area has good potential for porphyry copper mineralization.

Key words: geochemistry; mineralogical characteristics; magmatic attribute; Qingcaoshan mineralization area; southern edge of Qiangtang terrane

Fund support: The Second Tibetan Plateau Comprehensive Scientific Expedition and Research (2021QZKK0302); Deep Geological Survey Project of the China Geological Survey(DD20230008, DD20230230)

班公湖-怒江成矿带包括缝合带及南北两侧与怒江洋俯冲、碰撞作用有关的岩浆岩区(宋扬等, 2014),其中南侧发育了一批中小型规模的矽卡岩型铜、铁矿,例如尕尔穷、嘎拉勒等(宋扬等, 2014; 伍登浩等, 2018),矿床形成于晚白垩世(张志等, 2015, 2017),累计探明铜金属量约30万吨,金资源量约70吨(唐菊兴等, 2016);北侧发育一系列规模以超大型、大型为主的斑岩-浅成低温热液矿床。多龙矿集区是北侧最主要的矿床集中分布区,例如多不杂、波龙、拿若、荣那、尕尔勤、地堡那木岗、拿顿等(Li *et al.*, 2011, 2013, 2017, 2018; 李玉彬等, 2012; 陈华安等, 2013; 陈红旗等, 2015)。针对多不杂、波龙等超大型斑岩铜金矿已开展了大量研究(祝向平等, 2011, 2015b; 陈华安等, 2013),其成岩和成矿年龄均集中于128~115 Ma(孙振明, 2015),成矿岩浆起源于与俯冲相关的地幔部分熔融(孙嘉等, 2017)。目前,该矿集区已探明铜金属资源量超过2000万吨,金资源量超过500吨(唐菊兴等, 2016)。

青草山和勒玛擦矿化区位于多龙矿集区西北侧

(图1a),是在班公湖-怒江成矿带继多龙矿集区后又一具有良好找矿前景的区域(郑海涛等, 2018)。青草山矿化区工作程度较低,岩浆岩的地球化学特性和起源演化过程尚不明确,这制约了该矿化区的进一步找矿突破。本文基于详尽的野外地质调查,对青草山矿化区内分布的多套岩体进行锆石 U-Pb 年代学、锆石微量元素、岩石地球化学、Sr-Nd 同位素和角闪石电子探针成分研究,并与多龙矿集区进行对比,就青草山矿化区的岩浆属性和成矿条件做一探讨,以期为青草山地区下一步的找矿方向提供理论依据。

1 地质背景

班公湖-怒江成矿带是西藏继冈底斯斑岩成矿带、玉龙斑岩成矿带后又一条铜多金属成矿带(芮宗瑶等, 2004; Li *et al.*, 2011),横跨青藏高原中南部,是南羌塘地体和北拉萨地体碰撞形成的产物(Allegre *et al.*, 1984)。而对于班怒洋闭合的时限,一直存在争议,Kapp等(2005)认为闭合时间为晚侏罗

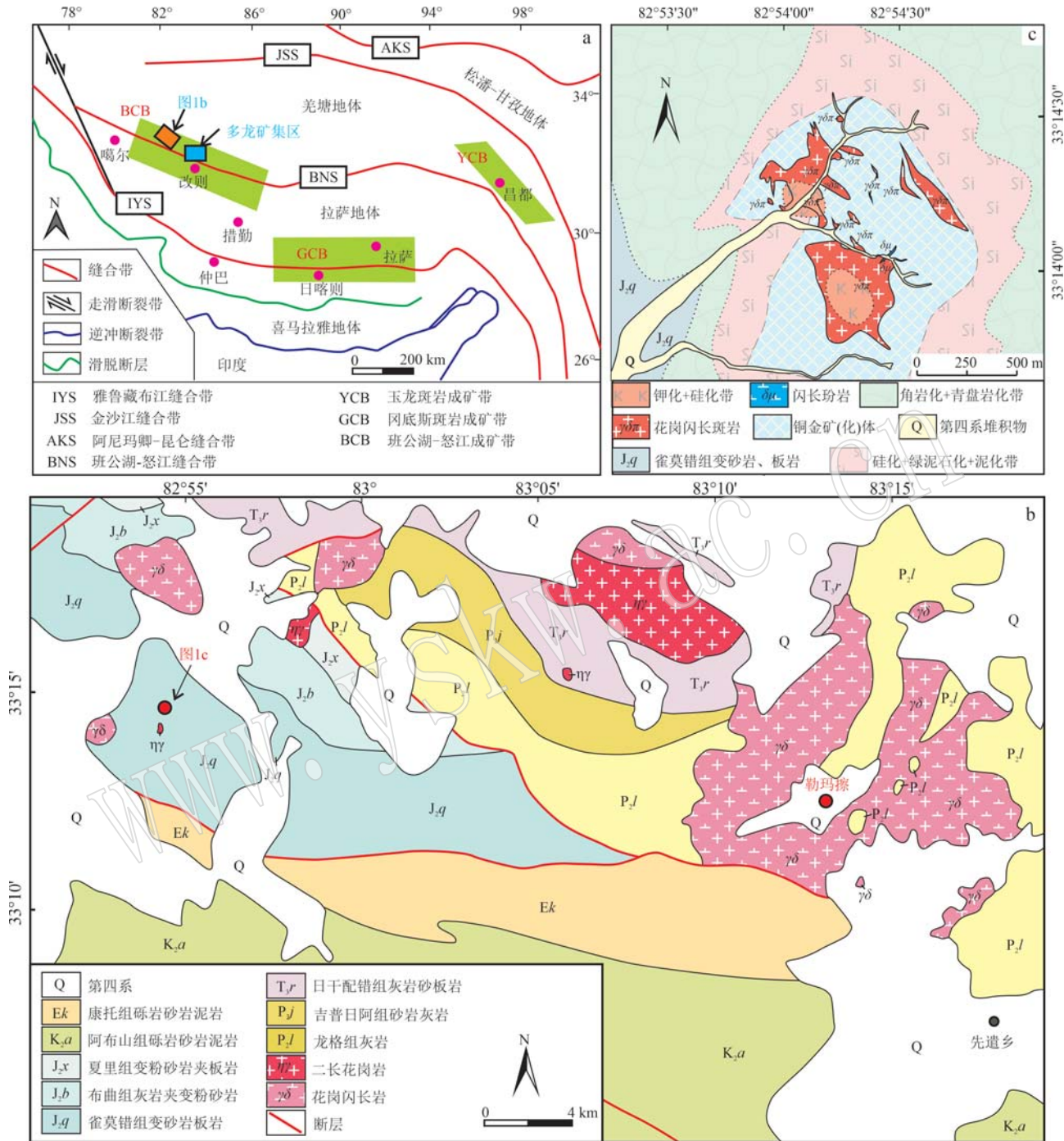


图 1 西藏地区构造分区 [a, 据 Hou 等 (2004) 修改]、青草山-勒玛擦区域地质图 [b, 底图据江西省地质调查研究院 (2005)^① 和贵州省地质调查院 (2005)^② 修改] 和青草山矿化蚀变图 (c)

Fig. 1 Tectonic sketch in Xizang (a, modified after Hou *et al.*, 2004), geological sketch of Qingcaoshan-Lemaca district (modified after Geological Survey of Jiangxi Province, 2005^① and Geological Survey of Guizhou Province, 2005^②) and mineralization alteration map of Qingcaoshan (c)

① 江西省地质调查研究院. 2005. 中华人民共和国地质图羌多幅 (144C003003).

② 贵州省地质调查院. 2005. 中华人民共和国地质图加措幅 (144C003004).

世-早白垩世,而李金祥等(2008)则认为闭合时间应晚于早白垩世中期。班公湖-怒江成矿带北部发育扎普-多布扎岩浆弧,多龙矿集区就分布在该岩浆弧中(李光明等,2011;唐菊兴等,2014,2016;Lin *et al.*,2017;Sun *et al.*,2017);南部发育昂龙岗日-班戈岩浆弧,形成了多个中小型的矽卡岩型、斑岩型和热液型矿床(宋扬等,2014;耿全如等,2015)。班公湖-怒江成矿带内岩浆岩的侵入作用主要发生在早白垩世至晚白垩世早期,岩体一般呈岩株状分布,主要岩性为花岗闪长岩、二长花岗岩、似斑状花岗岩等。斑岩铜矿是班公湖-怒江成矿带上的优势矿种,成矿时代主要集中在120~90 Ma之间(曲晓明等,2015)。

本文研究的青草山地区地处班公湖-怒江成矿带西段北部,多龙矿集区的西北侧(图1a),该区域主要出露地层有二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、第三系和第四系。在该地区,二叠系至侏罗系主要由海洋和陆地沉积物组成,而白垩系至第四系则主要是陆地沉积物。该区域的地质构造主要受到北东向和北西向的正断层和逆断层的控制(周金胜等,

2013)。

2 矿区地质特征

青草山矿区出露地层主要以雀莫错组(J_2q)变砂岩板岩、康托组(E_k)砾岩砂岩泥岩、布曲组(J_2b)灰岩夹变粉砂岩为主,地表有第四系坡积物覆盖,矿区外围则出露阿布山组(K_2a)砾岩砂岩泥岩(图1b)。该区域岩浆活动频繁,岩浆岩主要为闪长玢岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩以及细晶岩。其中,花岗闪长斑岩是矿区内大面积分布的岩体,呈不规则岩株状侵入到雀莫错组中,表面发生了强烈的孔雀石化(图2a、2b)。矿区的热液蚀变现象非常明显,影响范围广泛约6 km²,呈现出典型的斑岩铜矿的蚀变组合特征(图1c)。

蚀变中心向外扩展,蚀变强度呈现梯度变化,依次形成了内带、中带和外带3个蚀变带,内带为钾化-硅化蚀变带,中带为硅化-绿泥石化-泥化蚀变带,外带为角岩化-青磐岩化蚀变带,铜金矿(化)体在矿化蚀变带中的分布呈现出明显的区域性特征,主要

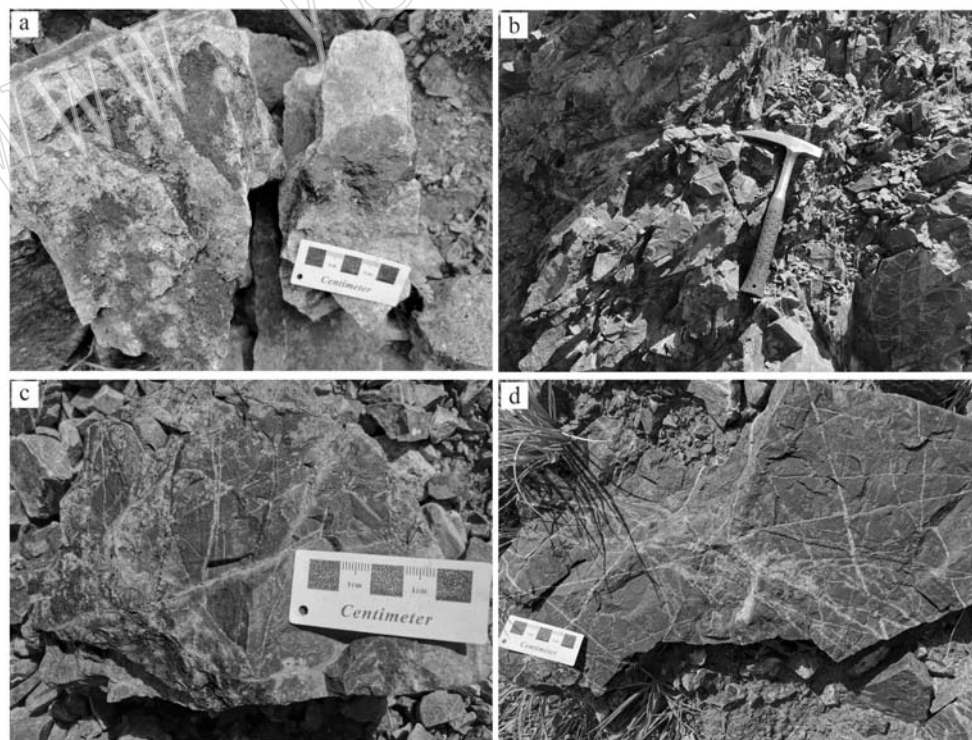


图2 青草山矿化区矿化特征

Fig. 2 Mineralization characteristics of Qingcaoshan minging area

a, b—malachification in granodiorite porphyry; c—malachification of the surrounding rocks; d—veins in the surrounding rock

a, b—malachification in granodiorite porphyry; c—malachification of the surrounding rocks; d—veins in the surrounding rock

集中在内带和中带(图 1c)。矿(化)体由矿化花岗闪长斑岩、闪长玢岩及矿化的围岩两部分组成。矿化体内部由于地表含有 Cu 等矿物的溶解流失和氧化作用,导致矿化程度分布不均匀。岩体中常见的矿石矿物有孔雀石, 偶见铜蓝(图 2a、2b)。围岩中雀莫错组砂板岩表面则发生了强烈的孔雀石化, 发育较多脉体(图 2c、2d)。矿石的微观结构主要呈现为他形粒状, 而宏观构造则以浸染状和细脉浸染状为主。

3 样品特征与分析方法

3.1 样品特征

青草山地区的勘探工作尚未深入, 本文所分析的样品均采自地表露头, 采集的岩浆岩样品包括闪长玢岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩和细晶岩。

花岗闪长斑岩表面呈灰白色, 为中粗粒花岗结构, 呈斑状结构(图3a、3b), 斑晶主要为石英(约

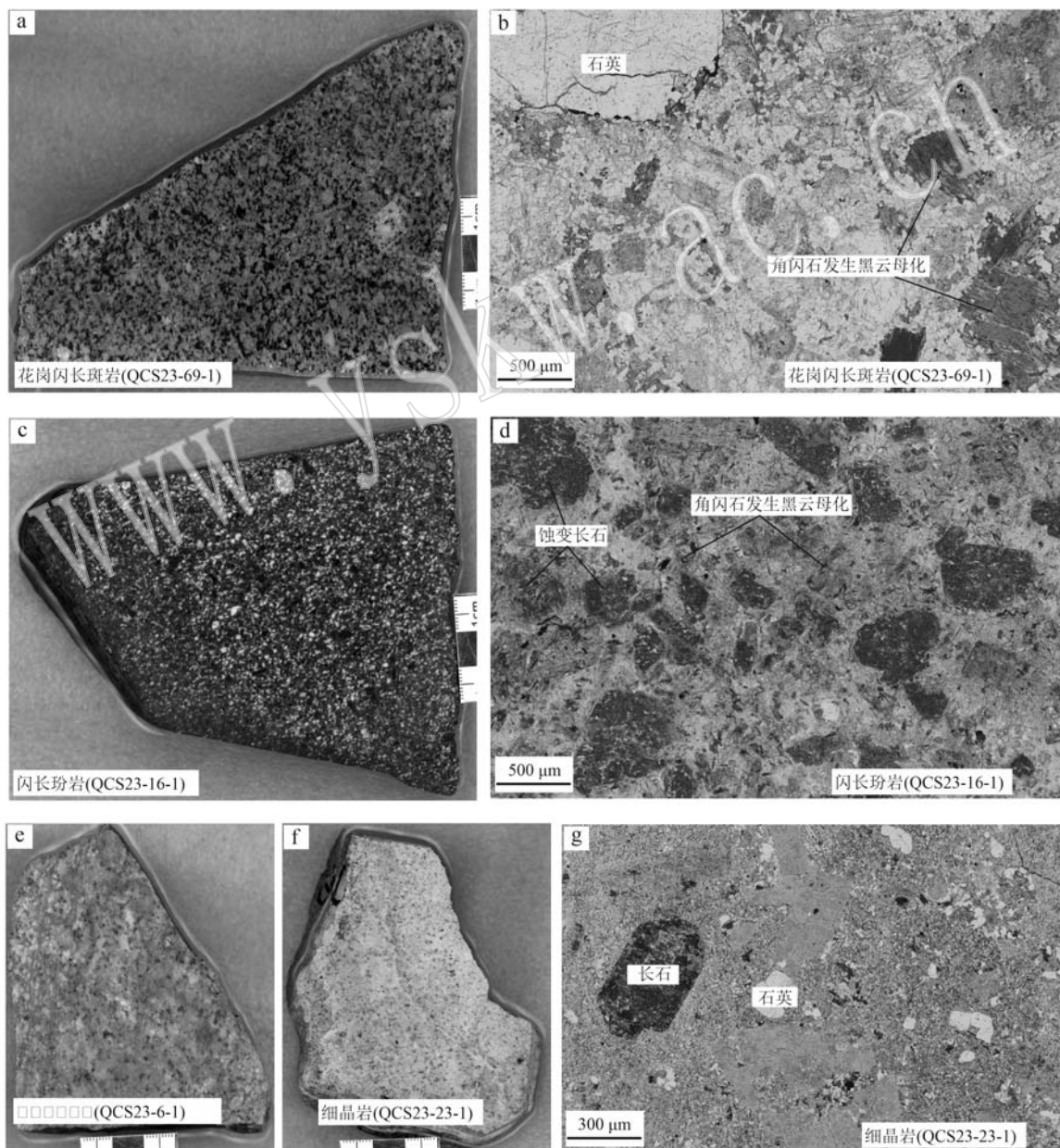


图 3 青草山矿化区岩浆岩特征

Fig. 3 Characteristics of magmatic rocks in Qingcaoshan mining area

20%)、长石(约30%)、角闪石(约15%)和黑云母(约5%)和少量金属矿物(约1%)组成,基质为隐晶质,斑岩中可见较多脉体,发生了较强的绿泥石化;在斑岩体的顶部,存在接近垂直的构造裂缝,呈网脉状,充填物以石英为主,其次为硫化物、绢云母、白云母、绿泥石等。闪长玢岩具有典型的斑状结构(图3c、3d),斑晶主要为斜长石和角闪石,含量约70%,基质含量约30%。二长花岗斑岩(图3e)具典型的斑状结构,斑晶为长石(约40%)、石英(约10%),基质为细粒结构,发生绢云母化、黏土化,见有浸染状黄铜矿、黄铁矿化。细晶岩具典型的细晶结构,表面呈浅黄色,几乎不含有深色矿物,主要由长石和石英组成(图3f、3g)。

3.2 分析方法

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年在中国地质科学院地质研究所矿物/包裹体微区分析实验室使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICPMS)完成。激光剥蚀平台采用 NWR 193uc 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统(Elemental Scientific Lasers, 美国),配备双体积样品池(Two Volume 2)。质谱仪采用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(Agilent, 美国)。详细的分析方法见于超等(2019),锆石样品固定在环氧树脂靶上,抛光后在超纯水中超声清洗,分析前用分析纯甲醇擦拭样品表面。采用5个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀(剥蚀深度约0.3 μm),以去除样品表面可能的污染。在束斑直径30 μm 、剥蚀频率5 Hz、能量密度2 J/cm²的激光条件下分析样品。数据处理采用 Iolite 程序(Paton *et al.*, 2010),锆石 91500 作为主标,GJ-1 作为副标,每隔10~12个样品点分析2个91500标样及1个GJ-1标样。通常采集20 s的气体空白,35~40 s的信号区间进行数据处理,按指数方程进行深度分馏校正(Paton *et al.*, 2010)。以 NIST 610 作为外标,⁹¹Zr 作为内标计算微量元素含量。本次实验过程中测定的 91500 ($1\ 061.5 \pm 3.2\ \text{Ma}$, 2σ)、GJ-1 ($604 \pm 6\ \text{Ma}$, 2σ) 年龄在不确定范围内与推荐值一致。

全岩主量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,使用日本理学(Rigaku)生产的 ZSX Primus II 型波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF),4.0 kW 端窗铍靶 X 射线光管,测试电压50 kV,电流60 mA,主量各元素分析谱线均为 K α ,标准曲线使用国家标准物质岩石系列 GBW07101-14,土壤系列

GSS07401-08,水系沉积物系列 GBW07302-12。数据校正采用理论 α 系数法,测试相对标准偏差(RSD) <2%。

全岩微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成,用于 ICP-MS 分析的样品处理如下:将200目样品置于105℃烘箱中烘干12 h;准确称取粉末样品50 mg置于 Teflon 溶样弹中;先后依次缓慢加入1 mL 高纯 HNO₃ 和1 mL 高纯 HF;将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于190℃烘箱中加热24 h以上;待溶样弹冷却,开盖后置于140℃电热板上蒸干,然后加入1 mL HNO₃ 并再次蒸干;加入1 mL 高纯 HNO₃、1 mL MQ 水和1 mL 内标 In(浓度为 1×10^{-6}),再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于190℃烘箱中加热12 h以上;将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用2% HNO₃ 稀释至100 g 以备 ICP-MS 测试。

锆石微量元素测试在中国地质科学院地质研究所矿物/包裹体微区分析实验室使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)完成。激光剥蚀采用 NWR193uc 型 193nm 深紫外激光剥蚀进样系统(Elemental Scientific Lasers, 美国),配备双体积样品池(Two Volume 2)。质谱仪采用 Agilent7900 型电感耦合等离子体质谱仪(Agilent, 美国)。采用5个激光脉冲对每个剥蚀区域进行预剥蚀(剥蚀深度~0.3 μm),以去除样品表面可能的污染。在束斑直径30 μm 、剥蚀频率10 Hz、能量密度2.5 J/cm²的激光条件下分析样品。数据处理采用 Iolite 程序(Paton *et al.*, 2010),硅酸盐玻璃 NIST610 作为主标,BHVO-1G 作为副标,每隔10~12个样品点分析2个 NIST610 标样及1个 BHVO-1G 标样,电子探针获得的²⁹Si 作为内标计算微量元素含量。通常采集20 s的气体空白,35~40 s的信号区间进行数据处理,按指数方程进行深度分馏校正。本次实验过程中测定的 BHVO-1G 微量元素在不确定范围内与推荐值一致。

全岩 Sr-Nd 同位素测试由武汉上谱分析科技有限责任公司采用德国 Thermo Fisher Scientific 公司的 MC-ICP-MS(Neptune Plus)完成。仪器配备9个法拉第杯接收器。Sr-Nd 同位素的仪器质量分馏采用内标指数法则校正,BCR-2(玄武岩)和 RGM-2(流纹岩)(USGS)被选择作为流程监控标样。

角闪石的电子探针成分分析在南京宏创地质勘查技术服务有限公司利用日本电子 JXA-iSP100 型

号的电子探针完成。测试过程中采用的加速电压为 15 kV, 电流为 20 nA, 束斑直径为 5 μm 。Fe、S 峰位的测试时间为 10 s, Co、Ni、Cu 峰位的测试时间为 20 s, As、Au、Ag 峰位的测试时间为 40 s, 上下背景测试时间为峰位的一半。采用 ZAF 法对数据进行基体校正。所用标样为白铁矿(Fe)、硬石膏(S)、金属钴(Co)、金属镍(Ni)、赤铜矿(Cu)、砷化镓(As)、自然金(Au)和自然银(Ag)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年结果

用于测试的锆石多数呈长柱状, 长宽比介于 1:1~3:1 之间, 粒径变化范围为 90~140 μm 。锆石自形

程度较好, 多呈现白色或浅灰色。如阴极发光(CL)图像(图4)所示, 绝大多数锆石发育密集震荡环带, Th/U 值远大于 0.1, 属于岩浆成因锆石(Belousova *et al.*, 2002)。详细分析结果见表1。

花岗闪长斑岩(QCS23-69-1)共获得 14 个有效测试点, 锆石中 U 含量变化于 $898 \times 10^{-6} \sim 1743 \times 10^{-6}$ 之间, Th 含量变化于 $108 \times 10^{-6} \sim 453 \times 10^{-6}$ 之间。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上(图4a), 锆石有效点获得谐和年龄为 $120.4 \pm 0.32 \text{ Ma}$ (MSWD=0.01, $n=14$)。

二长花岗斑岩(QCS23-6-1)共获得 11 个有效的测试点, 锆石中 U 含量变化于 $1910 \times 10^{-6} \sim 3340 \times 10^{-6}$ 之间, Th 含量变化于 $382 \times 10^{-6} \sim 868 \times 10^{-6}$ 之间。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上(图4b), 锆石有效

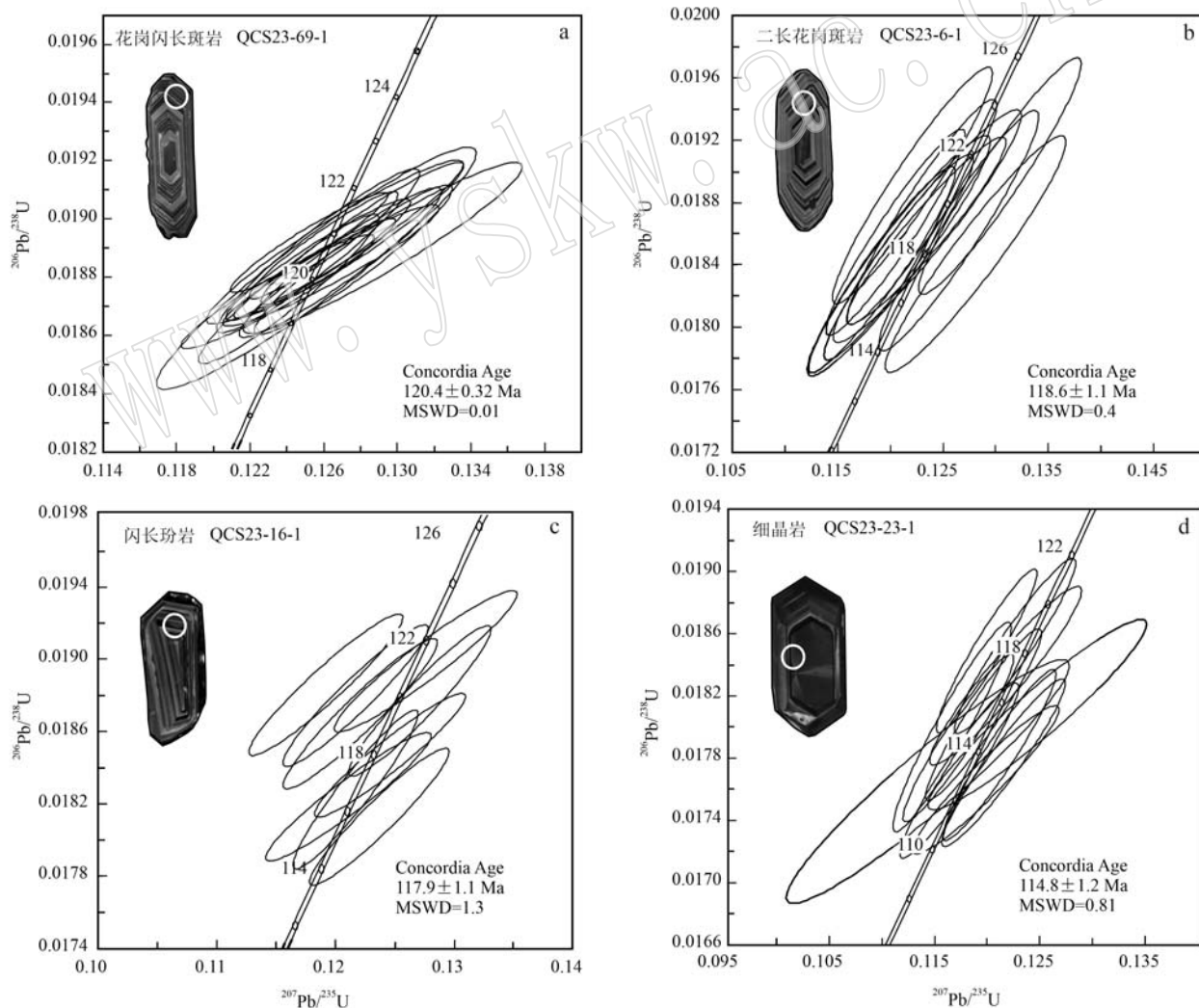


图4 青草山岩浆岩代表性锆石 CL 图像和 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Representative zircon CL images and U-Pb concordia age of magmatic rocks in the Qingcaoshan mineralization area

表1 青草山矿化区岩浆岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon dating result of the magmatic rocks in Qingcaoshan mining area

样品号	Pb	$w_B/10^{-6}$	^{232}Th	^{238}U	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
						$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	2σ
QCS23-6-1-4	51	868	2 551	0.34	0.123 4	0.006 2	0.018 6	0.000 5	0.005 8	0.000 2	117.7	5.6	118.9	3.1	117.4	4.5	
QCS23-6-1-6	54	690	2 830	0.24	0.123 0	0.005 8	0.018 7	0.000 6	0.005 8	0.000 3	117.4	5.2	119.6	3.7	115.9	5.2	
QCS23-6-1-8	46	454	2 523	0.18	0.119 2	0.005 7	0.018 4	0.000 5	0.005 9	0.000 4	114.0	5.2	117.3	3.4	118.3	7.1	
QCS23-6-1-9	43	382	2 342	0.16	0.120 8	0.005 8	0.018 5	0.000 5	0.005 7	0.000 3	115.4	5.2	117.8	3.4	115.3	6.2	
QCS23-6-1-10	37	551	1 940	0.28	0.123 5	0.007 3	0.018 7	0.000 6	0.005 5	0.000 2	117.6	6.5	119.1	3.8	111.2	4.6	
QCS23-6-1-11	49	508	2 637	0.19	0.120 5	0.005 4	0.018 6	0.000 5	0.005 9	0.000 3	115.2	4.8	118.9	3.4	119.1	5.5	
QCS23-6-1-12	36	556	1 910	0.29	0.120 8	0.007 1	0.018 5	0.000 6	0.005 5	0.000 3	115.2	6.4	117.9	4.0	111.7	5.2	
QCS23-6-1-13	48	561	2 550	0.22	0.128 1	0.007 0	0.018 5	0.000 6	0.005 8	0.000 3	121.8	6.3	117.9	4.0	117.2	5.3	
QCS23-6-1-14	44	416	2 368	0.18	0.122 1	0.006 2	0.018 6	0.000 6	0.005 7	0.000 3	116.5	5.6	120.8	3.9	115.3	5.9	
QCS23-6-1-15	43	386	2 325	0.17	0.126 5	0.006 2	0.019 0	0.000 6	0.005 7	0.000 4	120.5	5.5	118.9	4.0	126.7	7.9	
QCS23-6-1-16	62	787	3 340	0.24	0.130 4	0.006 3	0.019 0	0.000 6	0.005 7	0.000 3	124.0	5.6	121.1	4.0	115.7	5.2	
QCS23-23-1-1	92	2 583	4 600	0.56	0.116 9	0.004 3	0.017 9	0.000 4	0.005 5	0.000 1	112.6	4.0	114.6	2.8	110.1	2.7	
QCS23-23-1-4	94	2 859	4 700	0.61	0.116 3	0.004 6	0.018 0	0.000 6	0.005 5	0.000 2	111.4	4.2	115.0	3.5	111.2	3.0	
QCS23-23-1-5	142	5 300	6 680	0.79	0.12 2 3	0.004 7	0.018 5	0.000 5	0.005 5	0.000 1	116.9	4.2	118.2	2.9	110.8	2.5	
QCS23-23-1-6	108	3 410	5 200	0.66	0.119 6	0.003 9	0.018 5	0.000 4	0.005 6	0.000 2	114.5	3.5	118.1	2.7	115.4	3.3	
QCS23-23-1-7	74	2 121	3 670	0.58	0.119 3	0.004 5	0.018 1	0.000 5	0.005 8	0.000 2	114.2	4.1	115.5	2.9	117.0	3.9	
QCS23-23-1-8	20	657	992	0.66	0.124 4	0.008 5	0.018 1	0.000 5	0.005 7	0.000 2	118.2	7.6	115.5	3.2	115.2	4.7	
QCS23-23-1-9	47	1 136	2 374	0.48	0.121 4	0.005 9	0.018 3	0.000 5	0.005 6	0.000 2	115.9	5.3	117.1	3.0	112.4	3.6	
QCS23-23-1-11	81	2 132	4 080	0.52	0.120 8	0.004 4	0.017 8	0.000 5	0.005 8	0.000 2	115.6	4.0	113.9	2.8	117.0	3.9	
QCS23-23-1-12	48	1 156	2 504	0.46	0.119 5	0.005 7	0.017 7	0.000 4	0.005 6	0.000 2	114.2	5.1	112.9	2.5	112.1	4.0	
QCS23-23-1-13	83	2 685	4 040	0.66	0.117 0	0.004 6	0.017 7	0.000 5	0.005 6	0.000 2	112.1	4.2	113.2	2.9	113.5	3.0	
QCS23-23-1-14	13	496	591	0.84	0.114 0	0.011 0	0.017 7	0.000 6	0.005 5	0.000 3	109.0	10.0	112.7	4.1	110.6	6.3	
QCS23-23-1-16	80	2 671	3 860	0.69	0.121 2	0.004 8	0.017 8	0.000 4	0.005 8	0.000 2	115.9	4.4	113.6	2.8	116.2	3.4	
QCS23-16-1-2	59	739	3 193	0.23	0.121 7	0.004 3	0.018 3	0.000 4	0.005 8	0.000 2	116.4	3.8	116.7	2.3	117.7	4.8	
QCS23-16-1-5	36	354	1 898	0.19	0.127 6	0.006 3	0.019 0	0.000 3	0.006 1	0.000 4	121.5	5.6	121.3	2.0	123.1	8.0	
QCS23-16-1-6	43	413	2 285	0.18	0.119 2	0.005 3	0.018 9	0.000 3	0.006 2	0.000 3	114.0	4.8	120.4	2.0	125.3	6.7	
QCS23-16-1-7	48	473	2 556	0.19	0.121 7	0.005 0	0.018 8	0.000 3	0.005 9	0.000 3	116.3	4.6	120.1	2.0	119.2	6.2	
QCS23-16-1-8	55	693	2 979	0.23	0.123 7	0.004 8	0.018 1	0.000 3	0.005 7	0.000 2	118.1	4.4	115.8	2.0	114.2	4.7	
QCS23-16-1-10	42	352	2 316	0.15	0.124 6	0.005 2	0.018 5	0.000 3	0.005 8	0.000 4	118.9	4.7	118.0	1.8	117.0	7.0	
QCS23-16-1-14	43	495	2 335	0.21	0.127 1	0.004 9	0.018 8	0.000 3	0.006 0	0.000 3	121.2	4.4	119.8	2.1	121.5	5.5	
QCS23-16-1-15	40	723	2 103	0.34	0.121 1	0.005 7	0.018 2	0.000 3	0.005 6	0.000 2	115.7	5.1	116.5	1.8	112.6	4.7	
QCS23-16-1-16	45	727	2 380	0.31	0.122 1	0.005 3	0.018 7	0.000 3	0.005 9	0.000 2	116.7	4.7	119.4	2.2	118.6	4.6	
QCS23-69-1-1	25	227	1 206	0.19	0.123 5	0.004 3	0.018 8	0.000 2	0.005 8	0.000 3	118.0	3.9	119.7	1.0	116.9	6.4	
QCS23-69-1-3	18	108	898	0.12	0.125 6	0.007 1	0.018 8	0.000 3	0.005 7	0.000 6	119.9	6.4	120.2	2.2	114.0	12.0	
QCS23-69-1-4	26	257	1 184	0.22	0.126 6	0.005 7	0.018 9	0.000 2	0.005 5	0.000 3	120.9	5.2	120.9	1.4	110.2	5.2	
QCS23-69-1-5	24	214	1 155	0.19	0.126 0	0.003 3	0.018 9	0.000 2	0.005 5	0.000 2	120.4	3.0	120.7	0.9	110.2	4.3	
QCS23-69-1-6	26	232	1 283	0.18	0.125 7	0.004 1	0.018 9	0.000 2	0.005 4	0.000 3	120.7	3.8	120.7	1.1	108.6	5.3	
QCS23-69-1-7	20	144	1 030	0.14	0.129 2	0.006 2	0.018 9	0.000 2	0.005 7	0.000 3	123.2	5.5	120.4	1.5	114.9	6.6	
QCS23-69-1-8	26	281	1 237	0.23	0.124 1	0.004 0	0.018 8	0.000 2	0.005 5	0.000 2	118.6	3.6	119.8	1.3	111.1	4.3	
QCS23-69-1-9	36	453	1 743	0.26	0.128 1	0.004 5	0.019 0	0.000 2	0.005 8	0.000 3	122.3	4.0	121.0	1.3	117.4	4.9	
QCS23-69-1-11	23	229	1 190	0.19	0.125 2	0.003 5	0.018 9	0.000 1	0.005 5	0.000 2	119.6	3.1	120.8	0.9	110.2	3.5	
QCS23-69-1-13	25	301	1 330	0.23	0.126 9	0.004 5	0.018 9	0.000 2	0.005 6	0.000 2	121.2	4.1	120.4	1.3	112.3	4.2	
QCS23-69-1-14	32	334	1 538	0.22	0.126 4	0.004 8	0.018 8	0.000 2	0.005 6	0.000 2	120.6	4.3	120.3	1.1	112.6	3.7	
QCS23-69-1-15	29	398	1 327	0.30	0.125 5	0.003 6	0.018 8	0.000 1	0.005 5	0.000 2	119.9	3.2	120.2	0.9	111.1	3.2	
QCS23-69-1-16	21	206	1 149	0.18	0.127 6	0.004 4	0.018 9	0.000 2	0.005 6	0.000 3	121.8	4.0	120.4	1.3	112.5	5.4	
QCS23-69-1-18	21	139	1 074	0.13	0.125 7	0.004 5	0.018 9	0.000 2	0.006 0	0.000 4	120.0	4.1	120.6	1.5	121.6	7.0	

点获得谐和年龄为 118.6 ± 1.1 Ma (MSWD = 0.4, $n = 11$)。

闪长玢岩(QCS23-16-1)共获得9个有效测试点,锆石中U含量变化于 $1.898 \times 10^{-6} \sim 3.193 \times 10^{-6}$ 之间,Th含量变化于 $352 \times 10^{-6} \sim 739 \times 10^{-6}$ 之间。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上(图4c),锆石有效点获得谐和年龄为 117.9 ± 1.1 Ma (MSWD = 1.3, $n = 9$)。

细晶岩(QCS23-23-1)共获得12个有效测试点,锆石中U含量变化于 $591 \times 10^{-6} \sim 6.680 \times 10^{-6}$ 之间,Th含量变化于 $657 \times 10^{-6} \sim 5.300 \times 10^{-6}$ 之间。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上(图4d),锆石有效点获得谐和年龄为 114.8 ± 1.2 Ma (MSWD = 0.81, $n = 12$)。

4.2 全岩主、微量元素特征

本文针对花岗闪长斑岩、闪长玢岩进行了全岩主、微量元素分析,详细结果见表2和图5。

闪长玢岩 SiO_2 含量变化于59.96%~60.42%之间,平均值为60.12%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量介于5.31%~5.60%之间,平均值为5.43%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.76 \sim 0.78$,平均值为0.77; Al_2O_3 含量介于16.20%~16.33%之间,平均值为16.27%;铝饱和指数 $A/\text{CNK} = 0.94 \sim 0.99$ 。闪长玢岩的MgO含量为3.42%~3.48%, TiO_2 含量为0.64%~0.66%,Y含量为 $19.4 \times 10^{-6} \sim 21.8 \times 10^{-6}$,Sr/Y值变化范围为14.0~17.2, LREE/HREE = 12.93~13.78, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 10.96 \sim 11.33$, δEu 变化范围为0.77~0.84。

花岗闪长斑岩 SiO_2 含量变化于65.89%~66.15%之间,平均值为66.02%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量介于7.21%~7.50%之间,平均值为7.36%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.73 \sim 2.06$,平均值为1.89; Al_2O_3 含量介于15.52%~15.67%之间,平均值为15.60%;铝饱和指数 $A/\text{CNK} = 0.95 \sim 0.97$;MgO含量为1.21%~1.24%, TiO_2 含量为0.38%~0.40%;Y含量为 $14.7 \times 10^{-6} \sim 16.1 \times 10^{-6}$,Sr/Y值变化范围为20.6~22.7, LREE/HREE = 17.37~19.50, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 14.69 \sim 17.30$, δEu 变化范围为0.81~0.96。

在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中,闪长玢岩和花岗闪长斑岩大部分属于高钾钙碱性系列,闪长玢岩有少部分落入钾玄岩系列(图5b), $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ 显示它们为准铝质-弱过铝质花岗岩(图5c);同时,在

$(\text{La}/\text{Yb})_N-\text{Yb}_N$ (图5d)和 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ (图5e)中,与多龙矿集区一致,两套岩石均具有弧岩浆岩属性;这些岩石在稀土元素和微量元素组成上也与多龙矿集区的含矿斑岩相似(图6),它们普遍富集Rb和Th元素,同时亏损Nb、Ta和P等元素,进一步证实了它们的弧岩浆岩特征。

4.3 全岩 Sr-Nd 同位素特征

本文针对闪长玢岩及花岗闪长斑岩进行了Sr-Nd同位素分析,详细结果见表3。

闪长玢岩的Sr含量为 $305 \times 10^{-6} \sim 339 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.710314~0.710724,计算出的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为0.7091~0.7093,Nd含量为 $22.3 \times 10^{-6} \sim 24.2 \times 10^{-6}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为0.512215~0.512237,计算出的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为-7.1~-6.7。花岗闪长斑岩中的Sr含量为 $332 \times 10^{-6} \sim 333 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.709713~0.710088,计算出的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为0.7074~0.7075,Nd含量为 $20.5 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为0.512289~0.512295,计算出的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为-5.5~-5.3。在 $\epsilon\text{Nd}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解上(图7),闪长玢岩和花岗闪长斑岩均位于亏损地幔与下地壳演化线之间,闪长玢岩受到了更多地壳物质的混染。与多龙矿集区相比较,青草山地区的岩浆岩呈现出更加明显的地壳物质混合特征。

4.4 锆石的微量元素特征

表4为锆石的LA-ICP-MS原位微量元素分析结果。从各标准锆石的稀土元素球粒陨石标准化曲线分布图可以看出,4套岩石的锆石具有相同的配分模式,明显的亏损轻稀土元素,富集重稀土元素,具有明显的正Ce异常和负Eu异常(图8)。

4套岩石 δEu 变化范围都较小,二长花岗斑岩、闪长玢岩、细晶岩、花岗闪长斑岩 δEu 值分别为0.29~0.50、0.31~0.49、0.11~0.29和0.28~0.44;而 δCe 变化范围较大,对应 δCe 值为23.28~197.42、6.23~161.99、29.79~67.36和68.44~145.44。锆石稀土元素配分曲线呈现出左倾向上走势,总量变化范围大,整体上细晶岩($2.018.72 \times 10^{-6} \sim 4.924.3 \times 10^{-6}$)>二长花岗斑岩($1.529.91 \times 10^{-6} \sim 2.748.82 \times 10^{-6}$)>闪长玢岩($1.275.13 \times 10^{-6} \sim 2.700.73 \times 10^{-6}$)>花岗闪长斑岩($562.8 \times 10^{-6} \sim 925.7 \times 10^{-6}$)。

表2 青草山矿化区岩浆岩主量元素 ($w_B/\%$) 及微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 组成
 Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) compositions of the magmatic rocks in Qingcaoshan mining area

分析项目	闪长玢岩				花岗闪长斑岩	
	QCS23-16-1-1	QCS23-16-1-2	QCS23-16-1-3	QCS23-16-1-4	QCS23-69-1	QCS23-69-4
SiO ₂	59.99	59.96	60.42	60.13	65.89	66.15
TiO ₂	0.66	0.66	0.64	0.66	0.40	0.38
Al ₂ O ₃	16.28	16.33	16.20	16.26	15.67	15.52
TFe ₂ O ₃	6.73	6.48	6.36	6.69	3.98	3.95
FeO	1.90	1.76	1.74	1.84	2.70	2.70
MnO	0.12	0.11	0.12	0.13	0.06	0.06
MgO	3.43	3.42	3.44	3.48	1.24	1.21
CaO	4.80	5.49	5.32	4.97	3.97	3.59
Na ₂ O	3.09	2.99	3.02	3.19	2.65	2.45
K ₂ O	2.34	2.31	2.36	2.41	4.57	5.05
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
LOI	1.96	1.74	2.01	1.78	0.75	0.85
SUM	99.53	99.64	100.03	99.83	99.30	99.35
Li	34.4	27.9	33.6	32.9	14.6	15.1
Be	1.81	2.01	2.02	2.02	2.12	2.09
Sc	18.10	17.80	17.90	17.80	5.58	5.74
V	97.6	97.3	96.2	95.1	40.3	40.3
Cr	61.9	65.6	61.9	67.7	17.3	18.1
Co	10.90	12.70	11.50	13.10	7.35	6.58
Ni	16.10	11.20	10.10	12.10	8.20	6.03
Cu	36.40	22.50	8.41	28.80	52.90	83.20
Zn	75.7	62.2	80.9	65.8	33.2	28.4
Ga	18.5	18.6	18.6	18.4	17.4	17.5
Rb	88.8	84.1	78.2	89.8	156.0	173.0
Sr	305	339	313	308	333	332
Y	21.8	19.6	19.4	20.3	14.7	16.1
Zr	136	135	146	143	122	120
Nb	10.7	10.8	10.6	10.5	11.7	11.3
Sn	7.12	2.49	2.11	3.14	5.62	5.57
Cs	8.44	3.66	7.34	5.49	4.46	4.84
Ba	422	423	412	401	493	496
La	31.6	30.4	31.1	30.5	31.1	40.7
Ce	57.5	56.6	57.8	56.5	56.7	70.5
Pr	6.87	6.31	6.35	6.34	6.04	7.70
Nd	24.2	22.3	23.1	22.8	20.5	25.0
Sm	4.79	4.48	4.78	4.63	3.81	4.27
Eu	1.24	1.13	1.10	1.19	1.06	0.98
Gd	4.35	3.97	4.02	4.07	3.02	3.26
Tb	0.71	0.62	0.59	0.64	0.48	0.52
Dy	3.92	3.40	3.45	3.48	2.61	2.95
Ho	0.76	0.72	0.70	0.74	0.53	0.56
Er	2.02	2.03	1.97	1.96	1.42	1.58
Tm	0.30	0.27	0.27	0.29	0.21	0.25
Yb	2.06	1.92	2.04	1.99	1.52	1.69
Lu	0.31	0.30	0.29	0.31	0.26	0.27
Hf	3.81	3.89	4.10	3.85	3.49	3.40
Ta	0.78	0.79	0.83	0.80	1.14	1.17
Tl	1.04	0.96	0.77	0.93	0.97	1.17
Pb	15.4	17.7	16.6	18.1	9.17	9.46
Th	11.2	11.2	11.7	11.1	15.1	21.3
U	2.10	2.09	2.27	2.11	2.92	3.37
ΣREE (不含 Y)	140.59	134.37	137.54	135.52	129.27	160.19
LREE	130.50	125.12	128.24	126.12	122.24	152.38
HREE (不含 Y)	10.09	9.25	9.31	9.40	7.04	7.81
LREE/HREE	12.93	13.52	13.78	13.42	17.37	19.50
(La/Yb) _N	10.99	11.33	10.96	11.00	14.69	17.30
δEu	0.83	0.82	0.77	0.84	0.96	0.81
δCe	0.96	1.00	1.01	1.00	1.01	0.98

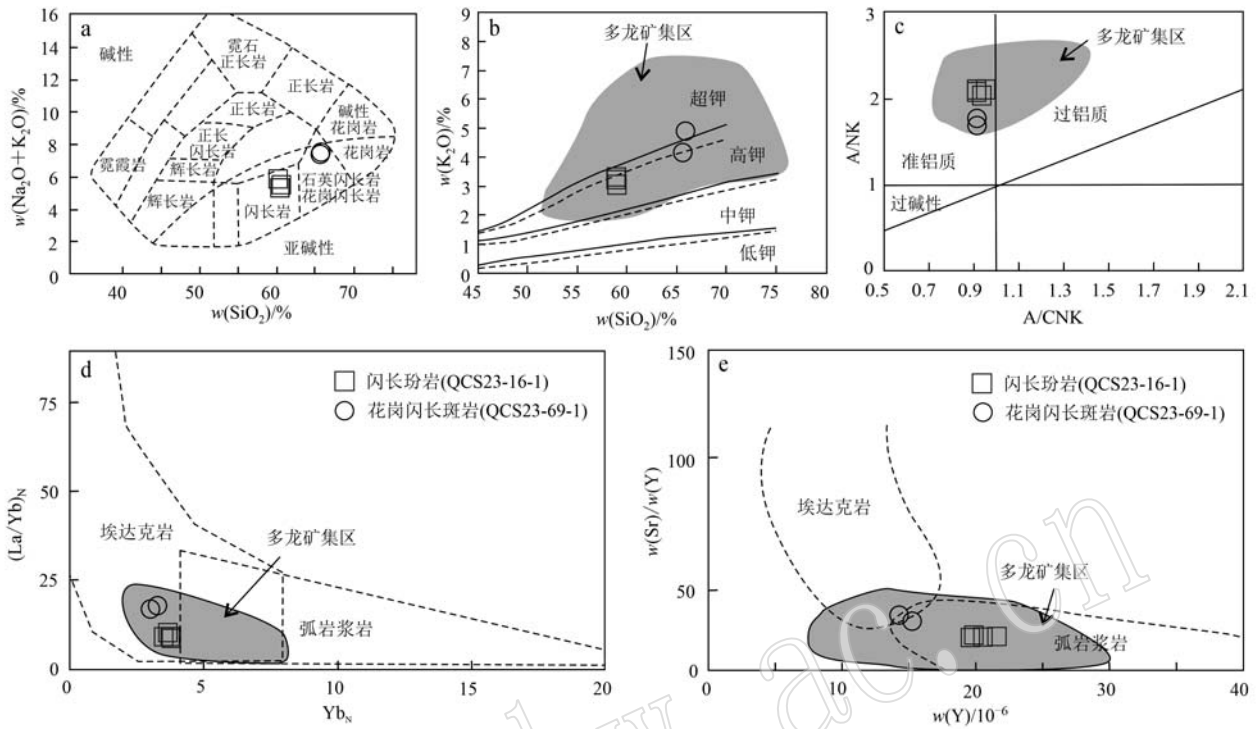


图 5 青草山地区岩浆岩 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (a)、 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (b)、 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ (c)、 $(\text{La}/\text{Yb})_N-\text{Yb}_N$ (d) 和 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ (e) 图解 [底图据 Irvine 和 Baragar (1971)、Cox 等 (1979)、Defant 和 Drummond (1990)、Hou 等 (2004)；多龙矿集区数据来自孙嘉 (2015)、祝向平等 (2015b) 和林彬等 (2019)]

Fig. 5 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (a), $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (b), $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ (c), $(\text{La}/\text{Yb})_N-\text{Yb}_N$ (d) and $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ (e) diagrams of the magmatic rocks in the Qingcaoshan area (adapted from Irvine and Baragar, 1971; Cox *et al.*, 1979; Defant and Drummond, 1990 and Hou *et al.*, 2004; Data for Duolong metallogenic district are from Sun Jia (2015); Zhu Xiangping *et al.*, 2015b; Lin Bin *et al.*, 2019]

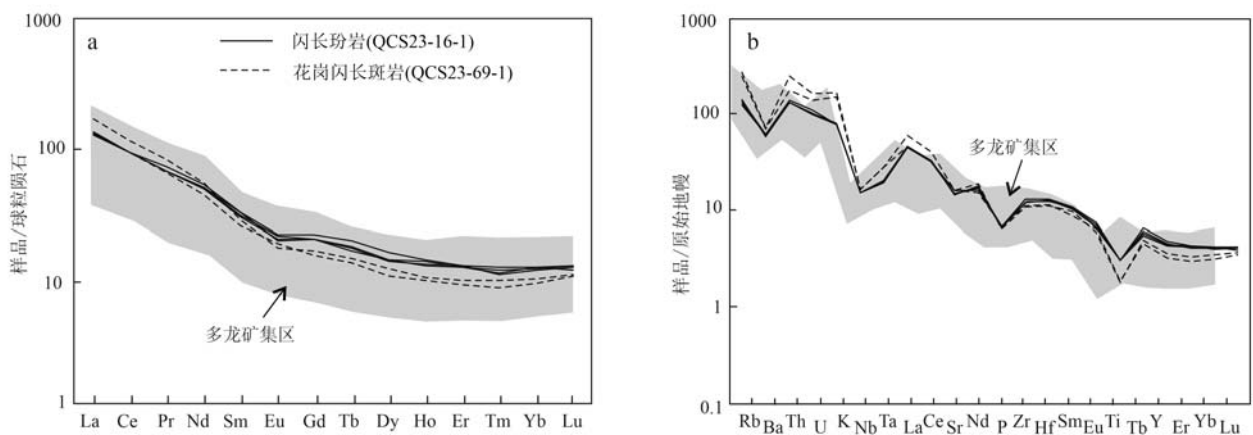


图 6 青草山地区岩浆岩稀土元素球粒陨石标准化图解 (a) 和微量元素原始地幔标准化图解 (b) (球粒陨石和原始地幔数据来自于 Sun 和 McDonough, 1989, 多龙矿集区含矿斑岩数据来源与图 5 一致)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE (a) and primitive mantle-normalized trace elements (b) variation diagrams for magmatic rocks in Qingcaoshan mining area (chondrite and primitive mantle values are from Sun and McDonough, 1989, data for Duolong metallogenic district are the same as Fig. 5)

表3 青草山矿化区岩浆岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of the magmatic rocks in Qingcaoshan mining area

样品	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma
闪长	QCS23-16-1-1	0.840 4	0.710 724	0.709 3	0.119 818 375	0.512 215	-0.39	0.512 120 93	-7.1	1 515 1 489
玢岩	QCS23-16-1-2	0.716 5	0.710 314	0.709 1	0.121 651 135	0.512 237	-0.38	0.512 141 491	-6.7	1 509 1 456
花岗闪	QCS23-69-1	1.347 7	0.709 713	0.707 4	0.112 521 329	0.512 289	-0.43	0.512 200 659	-5.5	1 296 1 363
长斑岩	QCS23-69-4	1.503 0	0.710 088	0.707 5	0.103 517 579	0.512 295	-0.47	0.512 213 728	-5.3	1 182 1 343

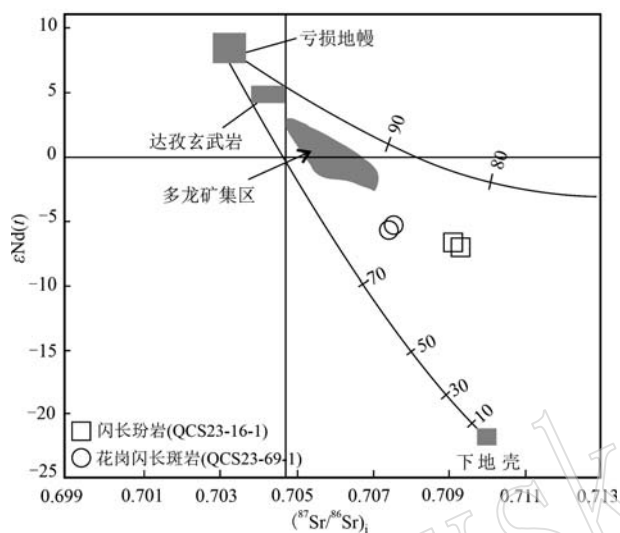


图7 青草山矿化区岩浆岩 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解
(多龙矿集区含矿斑岩数据来源与图5一致)

Fig. 7 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram for magmatic rocks in Qingcaoshan mining area (data for Duolong metallogenic district are the same as Fig. 5)

4.5 角闪石电子探针分析

表5为角闪石的电子探针化学成分和相关计算结果。其中,以23个氧原子为标准计算角闪石的阳离子数,采用电价差值法(郑巧荣,1983)求出 Fe^{3+} 的值,可知角闪石阳离子特征为: $\text{Ca}_B = 1.72 \sim 1.92$, $(\text{Na}+\text{K})_A = 0.10 \sim 0.44$ 。按国际矿物学协会角闪石专业委员会提出的命名原则,青草山矿化区闪长玢岩和花岗闪长斑岩中的角闪石属于钙质角闪石($\text{Ca}_B \geq 1.50$)。按钙质角闪石的进一步分类,闪长玢岩中角闪石 $\text{Si} = 6.31 \sim 6.73$, $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) = 0.60 \sim 0.78$,投影到角闪石 $\text{Si}-\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 分类命名图解上主要落在钙镁角闪石范围内,少部分落入镁角闪石范围内;花岗闪长斑岩中角闪石 $\text{Si} = 6.39 \sim 6.63$, $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) = 0.39 \sim 0.43$,投影到角闪石 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})-\text{Si}$ 分类命名图解上主要落在铁钙角闪石-铁钙镁角闪石范围内(图9a; Leake *et al.*, 1997)。在 $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 图解中(图9b),闪长玢岩和

花岗闪长斑岩中的角闪石主要为幔源,少部分显示壳幔混源的特征。

5 讨论

5.1 西羌塘地体早白垩世岩浆活动

青草山矿化区成矿期的闪长玢岩、花岗闪长斑岩、二长花岗斑岩3套岩石成矿年龄基本一致,锆石U-Pb谐和年龄分别为 117.9 ± 1.1 、 120.43 ± 0.32 和 118.6 ± 1.1 Ma。细晶岩则为成矿期后岩浆活动的岩石,锆石U-Pb谐和年龄为 114.8 ± 1.2 Ma。成矿期3套岩石的锆石U-Pb年龄集中在120~118 Ma之间,与多龙矿集区含矿斑岩的成岩时代在误差范围内基本一致,例如,多不杂斑岩铜矿床花岗闪长斑岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄为 121.6 ± 1.9 Ma(李金祥等,2008),拿若三期花岗闪长斑岩锆石U-Pb测年结果显示岩浆在120 Ma集中侵位(祝向平等,2015a),铁格隆南花岗闪长斑岩的SHRIMP锆石U-Pb年代学厘定花岗闪长斑岩侵位时代为 121.2 ± 2.4 Ma(林彬等,2019)。由此可见,青草山矿化区成岩时代与多龙矿集区近于一致,均为早白垩世晚期酸性岩浆活动的产物,表明青草山矿化区与多龙矿集区成岩-成矿具有相似的深部成矿动力学背景,受控于班公湖-怒江洋的俯冲影响(耿全如等,2011; Li *et al.*, 2016)。此外,青草山矿化区与多龙矿集区内的岩石组成、蚀变分带及矿化、形成环境相似,且空间位置相近,进一步支持矿床形成于俯冲阶段的陆缘弧环境(周金胜等,2013; 符家骏等,2014; 丁帅等,2017)。

5.2 青草山矿化区岩石成因及岩浆源区讨论

目前关于班公湖怒江成矿带早白垩世岩浆的起源,主要有两种认识,一是俯冲板片熔体/流体交代楔形地幔区(Li *et al.*, 2013; 丁帅等,2017; 林彬等,2019),二是被幔源物质底侵作用的新生下地壳

表4 青草山矿化区锆石 LA-ICP-MS 原位微量元素分析 ($w_B/10^{-6}$) 及相关计算结果
Table 4 Zircon LA-ICP-MS trace elements data ($w_B/10^{-6}$) and related calculation results for the Qingcaoshan mining area

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	δCe	δEu	$t/^\circ C$	$lg(f_{O_2})$	ΔFMQ
二长花	0.8	34.4	0.4	3.3	5.2	1.9	38.9	14.8	204.4	91.3	526.0	126.8	1381.0	319.0	2748.2	118.39	0.36	730	-10.98	5.11
岗斑岩	0.7	17.7	0.4	3.7	8.2	1.9	47.2	16.5	231.2	97.2	532.0	129.7	1359.0	303.4	2748.8	40.74	0.30	663	-18.69	-0.87
	0.0	15.7	0.1	1.0	3.5	1.1	28.0	10.8	161.8	73.9	429.0	109.6	1198.0	282.1	2314.7	168.12	0.37	697	-11.44	5.48
	-	9.8	0.1	1.1	2.9	0.8	22.0	8.8	126.3	57.2	328.1	83.3	898.0	208.0	1746.4	97.42	0.30	667	-15.20	2.53
	0.1	23.7	0.1	1.5	3.2	1.6	25.0	9.8	150.6	67.4	394.0	100.8	1085.0	257.0	2119.8	197.72	0.50	702	-10.54	6.24
	-	15.2	0.0	1.6	3.8	1.1	30.4	12.5	181.0	79.9	469.0	117.3	1285.0	280.3	2477.1	111.47	0.29	673	-14.30	3.24
	0.1	11.4	0.2	4.1	8.0	2.0	39.7	13.5	181.6	75.7	427.0	104.1	1102.0	246.5	2215.9	23.28	0.33	719	-17.68	-1.32
	-	16.4	0.1	1.4	3.5	1.0	26.8	10.5	147.9	62.9	357.0	90.6	957.0	207.8	1882.8	119.38	0.31	663	-14.66	3.17
	-	12.7	0.0	1.2	3.4	1.0	27.6	11.0	163.2	71.5	414.0	102.5	1137.0	255.3	2200.5	115.21	0.32	683	-13.59	3.67
	0.4	13.8	0.1	1.3	2.8	0.9	19.6	7.9	118.4	48.5	287.0	72.7	829.0	174.5	1529.9	115.71	0.34	660	-14.97	2.95
	-	14.3	0.1	0.9	3.6	0.9	24.3	9.6	134.3	57.7	319.0	79.5	782.0	185.0	1658.1	137.85	0.34	666	-13.96	3.79
	0.0	84.2	0.4	7.9	22.1	1.7	134.1	45.6	576.0	216.0	1022.0	215.6	1959.0	374.0	4658.7	53.10	0.11	748	-13.08	2.58
	0.6	86.1	0.6	8.9	19.9	2.0	122.4	42.3	541.0	204.9	958.0	204.5	1865.0	346.0	4402.2	52.17	0.13	771	-12.02	3.11
	0.3	117.9	0.7	11.5	25.2	2.3	153.0	51.6	649.0	231.8	1100.0	226.1	1993.0	362.0	4924.3	49.56	0.12	778	-11.87	3.09
	0.0	80.1	0.4	8.0	17.6	1.6	106.1	37.1	480.0	179.6	854.0	175.5	1623.0	303.0	3866.0	54.05	0.12	764	-12.22	3.06
	3.4	92.4	1.7	13.1	18.9	2.2	101.7	33.4	436.0	170.4	837.0	179.9	1670.0	322.0	3882.1	43.50	0.14	759	-13.28	2.12
细晶岩	-	53.7	0.3	5.1	11.0	2.3	56.1	18.9	244.0	96.4	494.0	109.9	1061.0	220.4	2373.0	65.27	0.29	855	-7.45	5.93
	-	47.3	0.3	5.1	11.4	2.0	68.0	22.6	287.2	112.1	577.0	129.4	1245.0	245.7	2753.1	57.59	0.24	773	-11.55	3.53
	0.0	56.4	0.4	7.9	18.8	1.7	117.6	40.7	517.0	189.6	923.0	199.4	1787.0	341.0	4200.4	38.43	0.12	740	-14.68	1.16
	-	55.2	0.3	5.1	11.5	1.7	69.8	23.9	317.0	121.6	601.0	136.7	1306.0	252.9	2902.6	67.36	0.19	764	-11.39	3.89
	0.0	77.6	0.4	7.4	16.2	1.8	88.3	31.0	388.0	143.6	695.0	146.6	1346.0	250.7	3192.6	54.92	0.15	759	-12.41	2.99
	5.8	68.1	2.1	13.2	13.3	1.4	59.0	18.9	229.0	85.5	419.0	87.7	851.0	164.7	2018.7	29.79	0.14	877	-9.52	3.45
	-	81.5	0.5	8.2	16.6	2.4	96.0	32.8	426.0	159.9	780.0	171.1	1580.0	303.0	3658.0	57.23	0.19	778	-11.33	3.63
	0.1	21.9	0.1	1.6	5.0	1.3	34.7	12.6	180.9	80.2	457.0	115.3	1269.0	277.6	2457.2	130.88	0.31	676	-13.54	3.93
	0.0	7.8	0.1	3.3	9.9	3.3	74.5	24.2	251.7	71.8	285.0	50.3	417.0	76.2	2175.1	6.23	0.49	741	-21.47	-5.66
	0.0	11.9	0.0	1.2	3.4	1.0	23.8	9.5	138.3	61.5	343.0	88.8	967.0	221.5	1871.1	107.18	0.35	635	-16.74	1.87
	0.1	14.4	0.1	1.6	4.5	1.2	31.7	11.7	161.1	71.3	394.0	101.6	1090.0	250.4	2133.6	88.94	0.33	656	-16.17	1.85
闪长玢岩	-	12.4	0.1	1.9	5.4	1.4	36.9	14.2	193.9	84.6	463.0	114.1	1165.0	256.1	2349.0	59.13	0.32	707	-14.80	1.85
	-	11.0	0.0	0.7	3.3	0.8	23.6	9.4	139.4	61.8	362.0	93.2	1023.0	227.8	1956.0	161.99	0.34	662	-13.57	4.28
	-	11.6	0.1	1.3	4.2	1.2	27.4	10.1	146.7	63.6	359.0	89.4	959.0	213.8	1887.3	80.44	0.36	704	-13.78	2.94
	0.1	16.6	0.2	2.5	6.5	1.8	42.3	15.9	207.0	86.2	474.0	114.0	1189.0	250.5	2406.7	53.72	0.35	726	-14.15	2.03
	0.2	19.6	0.3	5.3	8.7	2.5	51.2	17.4	232.0	96.7	513.0	127.8	1337.0	289.0	2700.7	31.59	0.35	697	-17.72	-0.80
	0.1	6.2	0.1	0.9	1.8	0.7	9.8	4.2	59.6	26.5	156.1	39.8	434.0	103.1	842.7	78.23	0.44	603	-20.07	-0.45
	0.0	3.3	0.0	0.3	0.8	0.3	6.7	2.8	41.4	19.2	119.9	31.4	356.5	83.8	666.4	134.94	0.42	601	-18.16	1.53
	0.0	5.4	0.0	0.5	0.9	0.4	7.9	3.2	46.1	20.2	121.8	30.5	333.9	79.5	650.3	145.44	0.38	617	-16.80	2.38
	0.1	4.2	0.0	0.4	1.0	0.3	7.4	3.0	43.0	19.1	112.2	28.7	311.8	73.5	604.7	132.09	0.33	616	-17.20	1.99
	0.0	4.5	0.0	0.6	1.1	0.4	8.4	3.3	49.0	21.6	126.3	32.1	347.6	80.5	675.4	98.92	0.33	579	-20.87	-0.46
	0.0	3.8	0.0	0.4	1.2	0.4	7.9	3.2	49.0	23.0	138.3	36.6	407.3	94.8	765.9	113.63	0.36	583	-20.04	0.23
	0.0	5.7	0.0	0.4	1.1	0.4	8.6	3.3	46.7	20.7	118.3	29.7	320.2	75.0	630.2	143.88	0.43	591	-18.62	1.39
	0.1	6.5	0.1	0.6	1.4	0.4	8.9	3.6	49.8	21.8	123.1	31.0	326.5	74.3	648.1	115.61	0.34	608	-18.25	1.20
	0.4	6.0	0.1	1.1	1.5	0.5	10.7	4.5	62.2	28.0	163.5	41.2	455.0	102.2	876.8	68.44	0.28	645	-17.82	0.51
	0.0	5.4	0.1	0.6	1.4	0.4	9.9	3.9	56.6	23.1	138.6	35.8	390.0	87.2	752.9	94.26	0.29	593	-20.02	-0.09
	0.0	6.8	0.0	0.6	2.0	0.5	12.0	4.9	69.0	30.3	176.7	43.8	471.3	107.8	925.7	108.90	0.32	630	-17.02	1.75
	0.0	6.5	0.0	0.5	1.6	0.4	11.2	4.3	62.9	28.2	164.8	41.1	434.5	100.4	856.4	131.84	0.34	613	-17.42	1.88
	0.0	3.9	0.0	0.3	1.2	0.3	7.7	2.9	40.8	18.2	103.7	26.3	292.2	65.3	562.8	118.97	0.33	615	-17.67	1.57
	0.0	3.7	0.0	0.3	1.1	0.3	7.8	3.4	50.9	23.4	144.5	38.1	428.5	101.3	803.3	149.41	0.35	567	-20.15	0.65

注: -表示低于检测限。

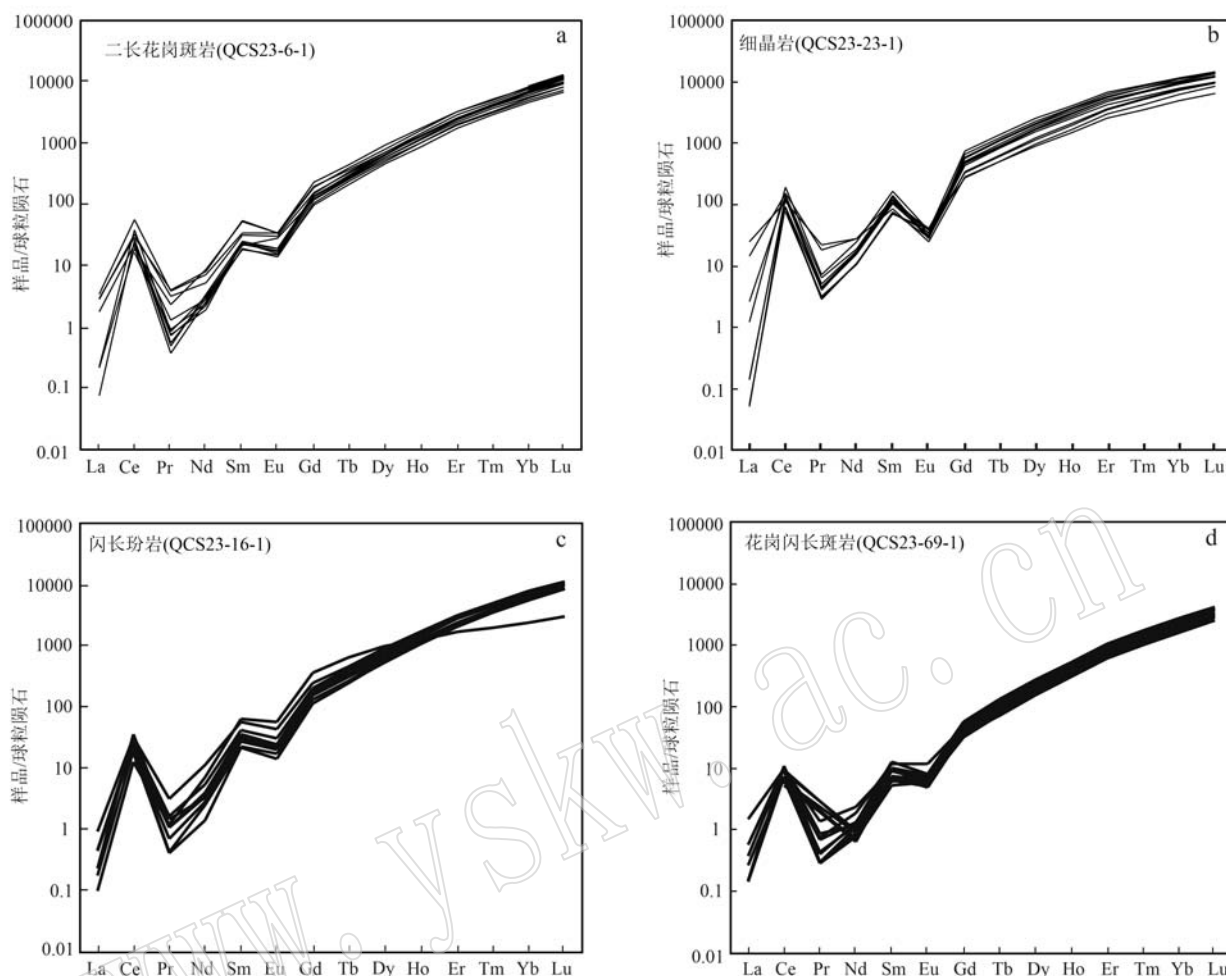


图8 青草山矿化区锆石的稀土元素球粒陨石标准化图解(球粒陨石数据来自于Sun和McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE pattern for zircon in Qingcaoshan mining area (chondrite values are from Sun and McDonough, 1989)

的部分熔融(辛洪波等, 2009; 祝向平等, 2015b)。

青草山矿化区内的花岗闪长斑岩、闪长玢岩、二长花岗斑岩和细晶岩均形成于早白垩世,且花岗闪长斑岩和闪长玢岩具有相似的 Sr-Nd 同位素组成,都具有较高的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值和较低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值,且 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值均为负值(-7.1~-5.3),处于亏损地幔和下地壳两个端员演化线之间的区域。但是相比较于多龙矿集区的含矿斑岩,青草山矿化区显示出更多壳源物质的加入。

青草山中酸性侵入体的成岩时代集中于 120~118 Ma,具有活动大陆边缘俯冲背景的岩石地球化学特征,不同学者对青草山矿化区岩浆源区的研究有不同的认识,周金胜等(2013)认为青草山斑岩铜金矿岩浆源区源于俯冲板片流体交代的上覆楔形地幔区;刘洪等(2016)认为青草山斑岩体的岩浆源区

为壳源;郑海涛等(2018)认为青草山斑岩体源区为下地壳,并有少量幔源物质加入;张腾蛟等(2017)认为青草山北部花岗闪长岩岩石源区为幔源。

本文研究认为,青草山矿化区岩浆起源于俯冲板片交代地幔楔部分熔融,岩浆在演化过程中受到了地壳物质的混染。根据地球化学特征显示,青草山岩体闪长玢岩和花岗闪长斑岩具高钾钙碱性-钾玄岩系列特征,属于准铝质-弱过铝质岩石,在 $(\text{La}/\text{Yb})_N-\text{Yb}_N$ (图 5d) 和 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ (图 5e) 数据中表明,岩石富集轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素(LILE),亏损重稀土元素(HREE)和 Nb、Ta、Zr、Ti 等高场强元素,均显示出弧岩浆岩特征,与多龙矿集区一致。形成的岩石亏损 Nb、Ta、Ti 可能是因为亏损 Nb、Ta、Ti 的俯冲板片流体(熔体)与楔形地幔发生相互作用(王强等, 2003),也可能是源区中残留有

表 5 角闪石电子探针分析结果和相关计算结果
Table 5 Electron probe microanalysis (EPMA) and related calculation results of hornblendes

以 23 个氧原子为基准计算

样品	wt/%														Mg/(Mg+Fe ²⁺)										t/°C	w(H ₂ O _{meht})/%					
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	F	Cl	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca _B	Na _A	K _A			OH	F	Cl		
闪长玢岩																															
QCS23-16-1-2-01	44.43	1.44	10.82	0.01	18.71	0.44	9.76	10.34	1.50	0.63	0.10	0.08	6.50	1.50	0.37	0.16	0.00	1.03	1.26	0.05	2.13	1.62	0.38	0.12	1.93	0.04	0.02	0.63	846.59	8.1	
QCS23-16-1-2-03	46.09	1.04	9.63	0.02	17.30	0.54	11.20	10.11	1.32	0.57	0.10	0.12	6.67	1.33	0.31	0.11	0.00	1.19	0.91	0.07	2.42	1.57	0.37	0.11	1.93	0.04	0.03	0.73	825.38	7.3	
QCS23-16-1-2-04	44.10	1.81	11.05	0.02	18.17	0.42	9.68	10.49	1.53	0.75	0.11	0.08	6.48	1.52	0.39	0.20	0.00	0.84	1.39	0.05	2.12	1.65	0.35	0.14	1.93	0.05	0.02	0.60	859.80	7.9	
QCS23-16-1-2-05	43.43	1.83	11.71	0.02	17.99	0.41	9.67	10.52	1.60	0.83	0.13	0.10	6.38	1.62	0.41	0.20	0.00	0.87	1.34	0.05	2.12	1.66	0.34	0.15	1.91	0.06	0.02	0.61	880.04	8.0	
QCS23-16-1-2-06	43.70	2.38	12.13	0.04	12.87	0.22	12.94	11.03	1.64	0.83	0.10	0.03	6.31	1.69	0.37	0.26	0.00	0.77	0.78	0.03	2.78	1.71	0.29	0.15	1.94	0.05	0.01	0.78	924.03	7.0	
QCS23-16-1-2-07	46.42	1.55	9.01	0.03	15.96	0.35	11.96	10.80	1.29	0.70	0.10	0.07	6.73	1.27	0.27	0.17	0.00	0.82	1.12	0.04	2.58	1.68	0.32	0.13	1.94	0.05	0.02	0.70	820.59	6.4	
QCS23-16-1-2-08	44.51	1.93	11.30	0.04	15.88	0.23	11.50	10.51	1.52	0.81	0.14	0.07	6.43	1.57	0.36	0.21	0.00	0.95	0.97	0.03	2.48	1.63	0.37	0.15	1.92	0.06	0.02	0.72	875.70	7.3	
QCS23-16-1-2-09	44.38	1.84	10.99	0.06	16.58	0.27	11.06	10.49	1.47	0.77	0.40	0.08	6.46	1.54	0.34	0.20	0.01	0.96	1.05	0.03	2.40	1.63	0.37	0.14	1.80	0.19	0.02	0.69	866.68	7.3	
QCS23-16-1-2-10	46.49	1.30	8.98	0.05	17.13	0.44	11.42	10.36	1.23	0.53	0.08	0.07	6.73	1.27	0.26	0.14	0.01	1.06	1.01	0.05	2.46	1.61	0.35	0.10	1.94	0.04	0.02	0.71	813.42	7.0	
花岗闪长斑岩																															
QCS23-69-1-01	42.91	1.33	10.12	0.01	21.97	0.65	7.31	11.05	1.34	1.30	0.43	0.16	6.51	1.49	0.32	0.15	0.00	0.63	2.16	0.08	1.65	1.80	0.20	0.25	1.75	0.21	0.04	0.43			
QCS23-69-1-02	43.21	1.30	9.94	0.01	21.89	0.76	7.28	11.17	1.31	1.19	0.49	0.12	6.55	1.45	0.33	0.15	0.00	0.57	2.20	0.10	1.65	1.81	0.19	0.23	1.73	0.23	0.03	0.43			
QCS23-69-1-03	43.79	1.26	9.52	0.00	22.27	0.62	7.21	11.04	1.26	1.22	0.42	0.17	6.63	1.37	0.33	0.14	0.00	0.56	2.26	0.08	1.63	1.79	0.21	0.23	1.76	0.20	0.04	0.42			
QCS23-69-1-04	43.03	1.26	9.82	0.00	21.84	0.67	7.24	11.17	1.36	1.22	0.40	0.15	6.57	1.43	0.33	0.14	0.00	0.52	2.27	0.09	1.65	1.83	0.17	0.24	1.77	0.19	0.04	0.42			
QCS23-69-1-05	43.56	1.26	9.52	0.00	21.99	0.68	7.47	11.13	1.35	1.19	0.41	0.15	6.60	1.40	0.30	0.14	0.00	0.58	2.21	0.09	1.69	1.81	0.19	0.23	1.76	0.20	0.04	0.43			
QCS23-69-1-06	42.02	1.67	10.86	0.01	22.19	0.72	6.89	11.15	1.48	1.37	0.40	0.16	6.39	1.61	0.33	0.19	0.00	0.56	2.26	0.09	1.56	1.82	0.18	0.27	1.77	0.19	0.04	0.41			
QCS23-69-1-07	42.52	1.42	10.53	0.02	21.79	0.66	7.16	11.23	1.42	1.38	0.46	0.14	6.47	1.53	0.35	0.16	0.00	0.51	2.27	0.08	1.62	1.83	0.17	0.27	1.74	0.22	0.04	0.42			
QCS23-69-1-08	42.02	1.46	10.80	0.01	22.63	0.62	6.65	11.24	1.29	1.46	0.42	0.16	6.41	1.59	0.35	0.17	0.00	0.56	2.32	0.08	1.51	1.84	0.16	0.28	1.76	0.20	0.04	0.39			
QCS23-69-1-09	42.24	1.46	10.85	0.00	22.06	0.66	6.94	11.11	1.46	1.39	0.41	0.18	6.42	1.58	0.37	0.17	0.00	0.55	2.25	0.08	1.57	1.81	0.19	0.27	1.76	0.20	0.05	0.41			
QCS23-69-1-10	42.96	1.50	10.12	0.02	21.93	0.63	7.07	11.20	1.41	1.26	0.45	0.15	6.54	1.46	0.35	0.17	0.00	0.45	2.34	0.08	1.60	1.83	0.17	0.24	1.74	0.22	0.04	0.41			

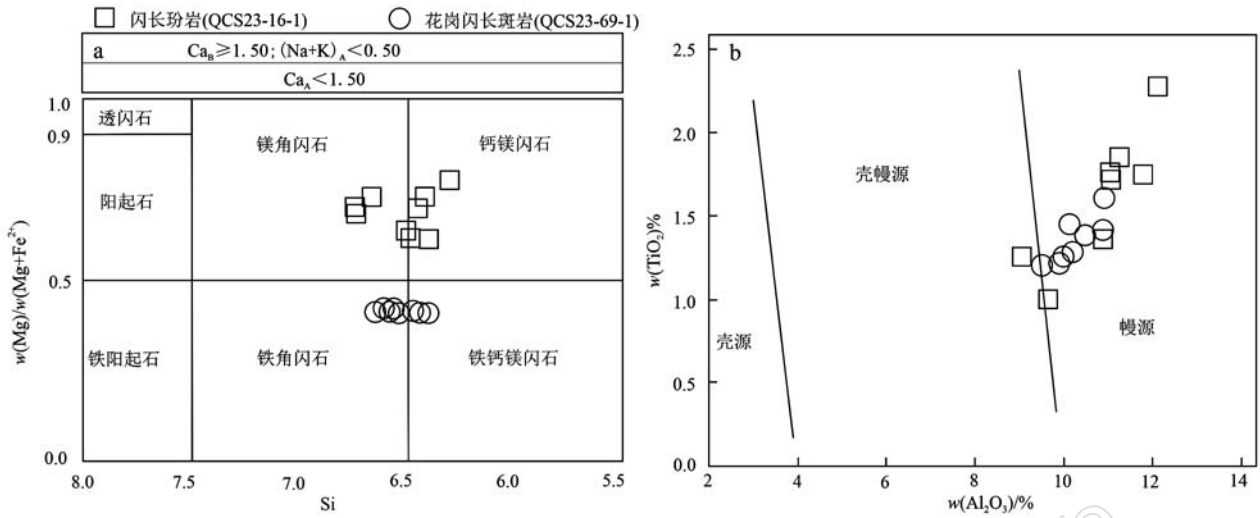


图9 青草山矿化区岩浆岩中角闪石分类图 (a, Leake *et al.*, 1997) 和 $TiO_2-Al_2O_3$ 图解 (b, Giret *et al.*, 1980)
 Fig. 9 Classification of hornblendes (a, Leake *et al.*, 1997) and $TiO_2-Al_2O_3$ diagram for magmatic rocks in Qingcaoshan mining area (b, Giret *et al.*, 1980)

金红石、榍石、钛铁矿等矿物结晶体或是源区内残留有石榴石、角闪石和辉石等 (Davidson *et al.*, 2007)。岩石 Eu 异常不明显或呈弱的负异常, 指示了岩浆演化过程中弱的角闪石结晶分异, 并可能指示了岩浆的富水特征, 角闪石的结晶抑制了斜长石的结晶, 说明源区可能存在少量斜长石残留。不同类型的地幔交代形成的岩浆通常被认为是不同交代介质壳幔相互作用的产物, 通常 Ba/La 和 Ba/Th 值与 Th/Nd、Th/U 和 Th/Yb 值是判断地幔交代的介质是熔体或/和流体, 流体交代形成的岩浆的 Ba/La 和 Ba/Th 值较高, 而熔体交代形成的岩浆则是 Th/Nd、Th/U 和 Th/Yb 值较高 (Xu *et al.*, 2016)。图 10 显示闪长玢

岩、花岗闪长斑岩源区受到来自板片熔体的交代。由此可知, 青草山矿化区与其成矿有关的斑岩形成于班公湖-怒江特提斯洋壳早白垩世北向俯冲背景下, 由俯冲板片熔体交代楔形地幔区发生部分熔融形成原始岩浆, 并且在上升过程中伴随有地壳物质的混染。

5.3 氧逸度及含水量对成矿潜力的指示作用

高氧逸度环境是斑岩矿床形成的关键。在岩浆形成过程中, 高氧逸度条件可以将硫化物 (S^{2-}) 氧化为硫酸盐 (S^{6+}), 以硫酸根的形式被熔出, 抑制硫化物的形成, 使得初始岩浆的金属含量大幅度提高, 促进岩浆中 S 和金属元素富集, 将金属元素和 S 携

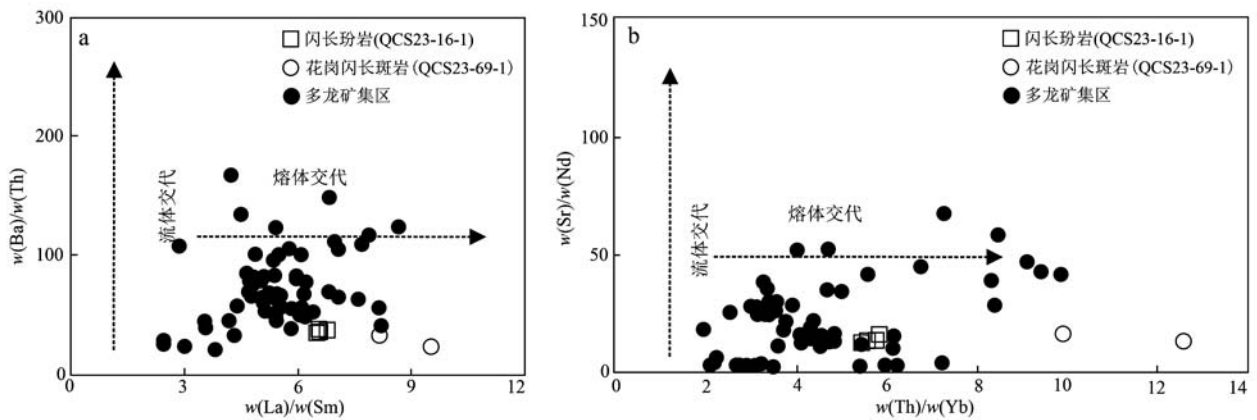


图 10 青草山矿化区岩浆岩 Ba/Th-La/Sm (a) 和 Sr/Nd-Th/Yb (b) 图解 (据 Xu *et al.*, 2016; 多龙矿集区含矿斑岩数据来源与图 5 一致)
 Fig. 10 Ba/Th-La/Sm (a) and Sr/Nd-Th/Yb (b) diagrams for magmatic rocks in Qingcaoshan mining area (after Xu *et al.*, 2016; data for Duolong metallogenic district are the same as Fig. 5)

带到地壳浅部从而形成斑岩型矿床(赵晓燕, 2015)。

本文通过锆石中Ti的含量计算成矿期3套岩石以及成矿期后细晶岩的结晶温度,其中花岗闪长斑岩中锆石的结晶温度为567~645℃,平均值为604℃;闪长玢岩中锆石的结晶温度为635~741℃,平均值为689℃;二长花岗斑岩中锆石的结晶温度为660~730℃,平均值为684℃;细晶岩中锆石的结晶温度为740~877℃,平均值为780℃。由此计算出

对应氧逸度 $\lg(f_{O_2})$ 平均值分别为-18.58、-15.77、-14.18、-11.73,对应 ΔFMQ 变化范围分别为 $\Delta FMQ -0.46 \sim \Delta FMQ + 2.38$ 、 $\Delta FMQ -5.66 \sim \Delta FMQ + 4.28$ 、 $\Delta FMQ -1.32 \sim \Delta FMQ + 6.24$ 、 $\Delta FMQ + 1.16 \sim \Delta FMQ + 5.93$ 。在 $\lg(f_{O_2}) - t$ 图解(图11b)上(Qiu *et al.*, 2013),大部分测试点落在FMQ(铁橄榄石-磁铁矿-石英)氧逸度线之上,少部分落入MH(磁铁矿-赤铁矿)上方(Trail *et al.*, 2011),显示出高氧逸度的特征。

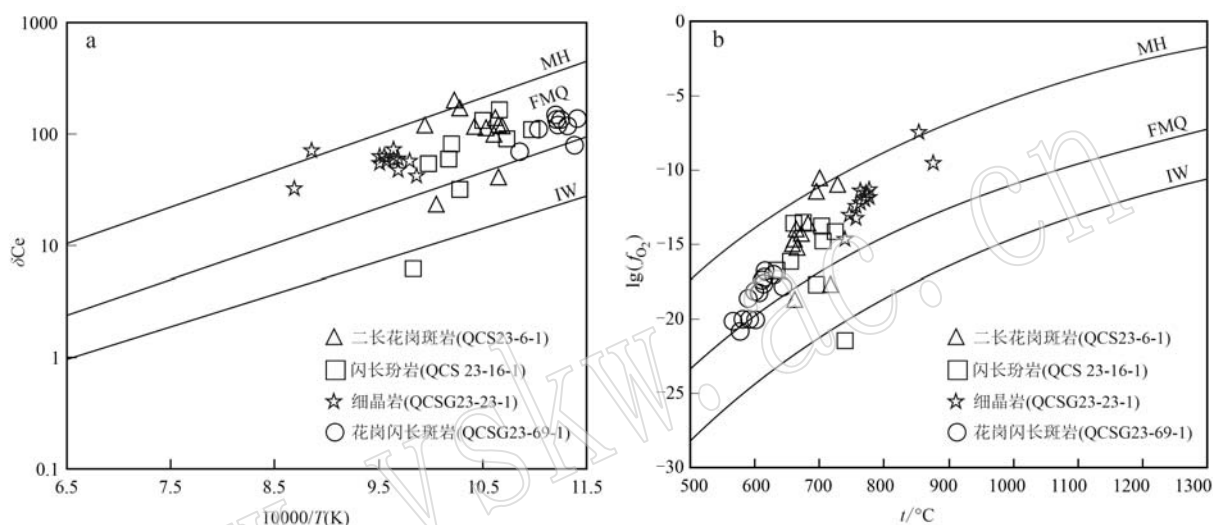


图11 青草山矿化区含矿斑岩的 $\delta Ce - 10\ 000/T$ (a)及 $\lg(f_{O_2}) - t$ (b)图解(底图据 Qiu *et al.*, 2013)

Fig. 11 $\delta Ce - 10\ 000/T$ (a) and $\lg(f_{O_2}) - t$ (b) diagrams for mineralized porphyry in the Qingcaoshan mineralized zone (according to Qiu *et al.*, 2013)

岩浆富水是控制斑岩铜矿床形成的另一重要因素(Richards, 2003; Rohrlach *et al.*, 2005; Kelley and Cottrell, 2009),富水岩浆有利于铜、金等金属元素组分进入流体相进行大量迁移(Candela and Holland, 1984; Richards, 2009)。

角闪石的化学成分在很大程度上受到岩浆的结晶条件(温度、压力、氧逸度和含水量等)的影响(Ridolfi *et al.*, 2008, 2010),因此本文对闪长玢岩和花岗闪长斑岩的角闪石进行了电子探针测试分析,但花岗闪长斑岩中的角闪石未能计算出有效的结晶温度和含水量,因此本文只讨论闪长玢岩的结晶温度和含水量,为进一步探究青草山矿化区内的岩浆演化过程和成矿作用提供支撑。

Ridolfi 等(2008)通过实验模拟研究提出根据角闪石分子式计算其结晶温度的公式,并且随后对公式进行了校正(Ridolfi *et al.*, 2010),根据该公式计

算出闪长玢岩结晶温度为813~924℃,平均值为857℃。

Ridolfi 等(2008)通过实验研究提出根据角闪石成分计算含水量的公式,并且随后对公式进行了校正(Ridolfi *et al.*, 2010),根据该公式计算出闪长玢岩含水量为7.0%~8.1%,平均值为7.4%(图12),属于高含水量(>4.0%; Naney, 1983)岩浆。

由此可知,斑岩铜矿系统的成矿潜力主要受斑岩体中的含水量、硫含量及氧逸度的影响,特别是高含水量、高氧逸度($\Delta FMQ > 1.5$)以及挥发分(F、Cl、S)是促成斑岩铜矿床形成的关键(Richards, 2003; Hou *et al.*, 2004; Cooke *et al.*, 2005; Grondahl and Zajacz, 2022; Wang *et al.*, 2022)。青草山矿化区位于班怒带北缘多龙矿集区的西北侧,地表出露大面积的白垩纪岩浆岩,且发育大面积的钾化和硅化带;含矿斑岩体的组成与多龙矿集区高度相似,具有高

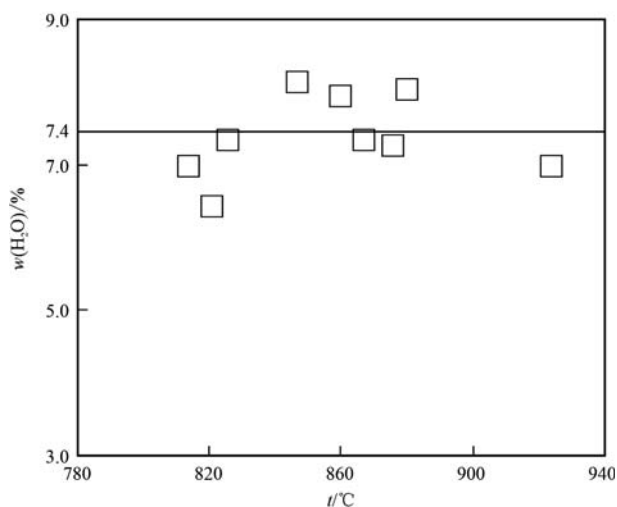


图 12 青草山闪长玢岩 H_2O-t 图(Ridolfi *et al.*, 2010)

Fig. 12 H_2O-t diagram of Qingcaoshan diorite porphyrite (Ridolfi *et al.*, 2010)

氧逸度、高含水量的特征。因此,认为青草山矿化区具有良好的斑岩铜矿床的成矿潜力。

6 结论

(1) 青草山矿化区地表发育大面积的岩浆岩,成矿期岩浆岩主要包括花岗闪长斑岩、闪长玢岩、二长花岗斑岩,锆石 U-Pb 年龄集中在 120~118 Ma,具有与多龙矿集区一致的成岩时代,均为早白垩世岩浆活动的产物。

(2) 花岗闪长斑岩、闪长玢岩岩石地球化学特征显示出弧岩浆岩的特点, Sr-Nd 同位素处于亏损地幔与下地壳演化线之间的区域,表明岩石均起源于俯冲板片交代地幔楔部分熔融,并受到地壳物质的混染。

(3) 通过计算青草山矿化区成矿期的花岗闪长斑岩、闪长玢岩、二长花岗斑岩 ΔFMQ 变化范围分别为 $\Delta FMQ = -0.46 \sim \Delta FMQ + 2.38$ 、 $\Delta FMQ = -5.66 \sim \Delta FMQ + 4.28$ 、 $\Delta FMQ = -1.32 \sim \Delta FMQ + 6.24$, 显示出高氧逸度的特征。青草山闪长玢岩含水量平均值为 7.4%, 表现出具有高含水量特点, 这些特征都显示出青草山矿化区具有良好的斑岩铜矿成矿潜力。

致谢 特别鸣谢第二次青藏高原综合科学考察研究(2021QZKK0302)和中国地质调查局深部地质调查项目(DD20230008, DD20230230)联合资助,衷

心感谢所有在本研究中给予支持和帮助的老师,以及审稿人提出宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢!感谢编辑部老师对本文的辛勤付出。

References

- Allégre C J, Courtillot V, Tapponnier P, *et al.* 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt[J]. *Nature*, 307(5 946): 17~22.
- Belousova E, Griffin W, 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.
- Candela P A and Holland H D. 1984. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(2): 373~380.
- Chen Hongqi, Qu Xiaoming and Fan Shufang. 2015. Geological characteristics and metallogenic prospecting model of Duolong porphyry copper-gold ore concentration area in Gerze County, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 34(2): 321~332 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hua'an, Zhu Xiangping, Ma Dongfang, *et al.* 2013. Geochronology and geochemistry of the Bolong porphyry Cu-Au deposit, Tibet and its mineralizing significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1 593~1 611 (in Chinese with English abstract).
- Cooke D R, Hollings P and Walshe J L. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. *Economic Geology*, 100(5): 801~818.
- Cox K G, Bell J D and Pankhurst R J. 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*[M]. Dordrecht: Springer.
- Davidson J, Turner S, Handley H, *et al.* 2007. Amphibole "sponge" in arc crust? [J]. *Geology*, 35(9): 787.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662~665.
- Ding Shuai, Tang Juxing, Zheng Wenbao, *et al.* 2017. Geochronology and geochemistry of Naruo porphyry Cu(Au) deposit in Duolong ore-concentrated area, Tibet, and their geological significance[J]. *Earth Science*, 42(1): 1~23 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jiajun, Zhao Yuanyi and Guo Shuo. 2014. Geochemical characteristics and significance of granodiorite porphyry in the Duolong ore concentration area, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(6): 1 039~1 051 (in Chinese with English abstract).
- Geng Quanru, Mao Xiaochang, Zhang Zhang, *et al.* 2015. New under-

- standing of magmatic arc in the middle and west section of Bangonghu-Nujiang metallogenic belt and its enlightenment to prospecting[J]. Geological Survey of China, 2(2): 1~11 (in Chinese).
- Geng Quanru, Pan Guitang, Wang Liquan, *et al.* 2011. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co-Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 30(8): 1 261~1 274 (in Chinese with English abstract).
- Giret A, Bonin B and Léger J. 1980. Amphibole compositional trends in oversaturated and undersaturated alkaline plutonic ring-composition [J]. Canadian Mineralogist, 18: 481~495.
- Grondahl C and Zajacz Z. 2022. Sulfur and chlorine budgets control the ore fertility of arc magmas [J]. Nature Communications, 13(1): 4 218.
- Kapp P, Yin A, Harrison T M, *et al.* 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 117(7): 865.
- 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 [J]. Earth and Planetary Science Letters, 220(1~2): 139~155.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 8(5): 523~548.
- Kelley K A and Cottrell E. 2009. Water and the oxidation state of subduction zone magmas[J]. Science, 325(5 940): 605~607.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names[J]. European Journal of Mineralogy, 9(3): 623~651.
- Li Guangming, Duan Zhiming, Liu Bo, *et al.* 2011. The discovery of Jurassic accretionary complexes in Duolong area, northern Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet, and its geologic significance[J]. Geological Bulletin of China, 30(8): 1 256~1 260 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinxiang, Li Guangming, Qin Kezhang, *et al.* 2008. Geochemistry of porphyries and volcanic rocks and ore-forming geochronology of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in Bangonghu belt, Tibet: Constraints on metallogenic tectonic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 24(3): 531~543 (in Chinese with English abstract).
- Li J X, Qin K Z, Li G M, *et al.* 2011. Magmatic-hydrothermal evolution of the Cretaceous Duolong gold-rich porphyry copper deposit in the Bangongco metallogenic belt, Tibet: Evidence from U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41(6): 525~536.
- Li J X, Qin K Z, Li G M, *et al.* 2013. Petrogenesis of ore-bearing porphyries from the Duolong porphyry Cu-Au deposit, central Tibet: Evidence from U-Pb geochronology, petrochemistry and Sr-Nd-Hf-O isotope characteristics[J]. Lithos, 160: 216~227.
- Li J X, Qin K Z, Li G M, *et al.* 2016. Petrogenesis of Cretaceous igneous rocks from the Duolong porphyry Cu-Au deposit, central Tibet: Evidence from zircon U-Pb geochronology, petrochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotope characteristics[J]. Geological Journal, 51(2): 285~307.
- Li X K, Chen J, Wang R C, *et al.* 2018. Temporal and spatial variations of late Mesozoic granitoids in the SW Qiangtang, Tibet: Implications for crustal architecture, meso-Tethyan evolution and regional mineralization[J]. Earth-Science Reviews, 185: 374~396.
- Li X K, Li C, Sun Z M, *et al.* 2017. Origin and tectonic setting of the giant Duolong Cu-Au deposit, South Qiangtang terrane, Tibet: Evidence from geochronology and geochemistry of Early Cretaceous intrusive rocks[J]. Ore Geology Reviews, 80: 61~78.
- Li Yubin, Duoji, Zhong Wanting, *et al.* 2012. An exploration model of the Duobuza porphyry Cu-Au deposit in Gaize country, northern Tibet [J]. Geology and Exploration, 48(2): 274~287 (in Chinese with English abstract).
- Lin Bin, Fang Xiang, Wang Yiyun, *et al.* 2019. Petrologic genesis of ore-bearing porphyries in Tiegelongnan giant Cu (Au, Ag) deposit, Tibet and its implications for the dynamic of Cretaceous mineralization, Duolong[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(3): 642~664 (in Chinese with English abstract).
- Lin B, Tang J X, Chen Y C, *et al.* 2017. Geochronology and genesis of the Tiegelongnan porphyry Cu (Au) deposit in Tibet: Evidence from U-Pb, Re-Os dating and Hf, S, and H-O isotopes[J]. Resource Geology, 67(1): 1~21.
- Liu Hong, Zhang Hui, Li Guangming, *et al.* 2016. Petrogenesis of the Early Cretaceous Qingcaoshan strongly peraluminous S-type granitic pluton, southern Qiangtang, northern Tibet: Constraints from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb geochronology[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 52(5): 848~860 (in Chinese with English abstract).
- Naney M T. 1983. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems[J]. American Journal of Science, 283(10): 993~1 033.
- Qiu J T, Yu X Q, Santosh M, *et al.* 2013. Geochronology and magmatic oxygen fugacity of the Tongcun molybdenum deposit, northwest Zhe-

- jiang, SE China[J]. *Mineralium Deposita*, 48(5): 545~556.
- Qu Xiaoming, Fan Shufang, Ma Xudong, *et al.* 2015. Post-collisional copper ore deposits along Bangong Co-Nujiang metallogenic belt, Tibetan Plateau[J]. *Mineral Deposits*, 34(3): 431~448 (in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation [J]. *Economic Geology*, 98(8): 1 515 ~ 1 533.
- Richards J P. 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere [J]. *Geology*, 37(3): 247~250.
- Ridolfi F, Puerini M, Renzulli A, *et al.* 2008. The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andean zone, Ecuador) constrained by texture, mineralogy and thermobarometry of the 2002 erupted products[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1): 94~106.
- Ridolfi F, Renzulli A and Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45~66.
- Rohrlach B D, Loucks R R and Porter T M. 2005. Multi-million-year cyclic ramp-up of volatiles in a lower crustal magma reservoir trapped below the Tampakan copper-gold deposit by Mio-Pliocene crustal compression in the southern Philippines[J]. *Super porphyry copper and gold deposits; A global perspective*, 2: 369~407.
- Rui Zongyao, Li Guangming, Zhang Lisheng, *et al.* 2004. The response of porphyry copper deposits to important geological events in Xizang [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 145~152 (in Chinese with English abstract).
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, *et al.* 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3): Q0AA06.
- Song Yang, Tang Juxing, Qu Xiaoming, *et al.* 2014. Progress in the study of mineralization in the Bangongco-Nujiang metallogenic belt and some new recognition[J]. *Advances in Earth Science*, 29(7): 795~809 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jia. 2015. Study on Magma Genesis and Mineralization in Duolong Ore Concentration Area of Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Sun J, Mao J, Beaudoin G, *et al.* 2017. Geochronology and geochemistry of porphyritic intrusions in the Duolong porphyry and epithermal Cu-Au district, central Tibet: Implications for the genesis and exploration of porphyry copper deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 1 004~1 019.
- Sun Jia, Mao Jingwen, Yao Fojun, *et al.* 2017. Relation between magmatic processes and porphyry copper-gold ore formation, the Duolong district, central Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3 217~3 238 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and 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: 313~345.
- Sun Zhenming. 2015. Copper-gold Mineralization and Metallogenic Regularity in Duolong Ore Concentration Area in the Western Section of Ban-Nu Metallogenic Belt, Tibet[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Song Yang, Wang Qin, *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 Juxing, Sun Xingguo, Ding Shuai, *et al.* 2014. Discovery of the epithermal deposit of Cu(Au-Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(1): 6~10 (in Chinese with English abstract).
- Trail D, Watson E B and Tailby N D. 2011. The oxidation state of Hadean magmas and implications for early Earth's atmosphere [J]. *Nature*, 480(7 375): 79~82.
- Wang Q, Zhao Z H, Bai Z H, *et al.* 2003. Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basaltic rocks association in the Alataw mountains, North Xinjiang: Interactions between slab melt and mantle peridotite and implications for crustal growth[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(19): 2 108~2 115.
- Wang R, Weinberg R F, Zhu D C, *et al.* 2022. The impact of a tear in the subducted Indian plate on the Miocene geology of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 134(3~4): 681~690.
- Wu Denghao, Gao Shunbao, Zheng Youye, *et al.* 2018. Sulfur and lead isotopic composition and their ore-forming material source of skarn copper polymetallic deposits in southern Tibet Bangonghu-Nujiang metallogenic belt[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(1): 70~86 (in Chinese with English abstract).

- Xin Hongbo, Qu Xiaoming, Wang Ruijiang, *et al.* 2009. Geochemistry and Pb, Sr, Nd isotopic features of ore-bearing porphyries in Bangong Lake porphyry copper belt, western Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 785~792 (in Chinese with English abstract).
- Xu L L, Bi X W, Hu R Z, *et al.* 2016. Redox states and genesis of magmas associated with intra-continental porphyry Cu-Au mineralization within the Jinshajiang-Red River alkaline igneous belt, SW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 330~345.
- Zhang Tengjiao, Chen Ying and Li Youguo. 2017. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry characteristics of the north Qingcaoshan granodiorite in the southern margin of Qiangtang, Tibet, and their metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(8): 1 729~1 742 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhi, Chen Yuchuan, Tang Juxing, *et al.* 2015. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of volcanic rocks in Gaerqiong-Galale Cu-Au ore district, Tibet[J]. *Earth Science*, 40(1): 77~97 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhi, Song Junlong, Tang Juxing, *et al.* 2017. Petrogenesis, diagenesis and mineralization ages of Galale Cu-Au deposit, Tibet: Zircon U-Pb age, Hf isotopic composition and molybdenite Re-Os dating [J]. *Earth Science*, 42(6): 862~880 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiaoyan. 2015. Geological Characteristics and Genesis of Bangpu Porphyry-skarn Mo-Cu-Pb-Zn Deposit in Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zheng Haitao, Zheng Youye, Xu Jing, *et al.* 2018. Zircon U-Pb ages and petrogenesis of ore-bearing porphyry for Qingcaoshan porphyry Cu-Au deposit, Tibet[J]. *Earth Science*, 43(8): 2 858~2 874 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Qiaorong. 1983. Calculation of the Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in silicate and Ti-Fe oxide minerals from EPMA data[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 3(1): 55~62 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jinsheng, Meng Xiangjin, Zang Wenshuan, *et al.* 2013. Zircon U-Pb geochronology and trace element geochemistry of the ore-bearing porphyry in Qingcaoshan porphyry Cu-Au deposit, Tibet, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3 755~3 766 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangping, Chen Hua'an, Liu Hongfei, *et al.* 2015a. Geochronology and geochemistry of porphyries from the Naruo porphyry copper deposit, Tibet and their metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 109~128 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangping, Chen Hua'an, Liu Hongfei, *et al.* 2015b. Zircon U-Pb ages, geochemistry of the porphyries from the Duobuza porphyry Cu-Au deposit, Tibet and their metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 534~548 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangping, Chen Hua'an, Ma Dongfang, *et al.* 2011. Re-Os dating for the molybdenite from Bolong porphyry copper-gold deposit in Tibet, China and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2 159~2 164 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈红旗, 曲晓明, 范淑芳. 2015. 西藏改则县多龙矿集区斑岩型铜金矿床的地质特征与成矿-找矿模型[J]. *矿床地质*, 34(2): 321~332.
- 陈华安, 祝向平, 马东方, 等. 2013. 西藏波龙斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义[J]. *地质学报*, 87(10): 1 593~1 611.
- 丁帅, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 2017. 西藏拿若斑岩型铜(金)矿含矿岩体年代学、地球化学及地质意义[J]. *地球科学*, 42(1): 1~23.
- 符家骏, 赵元艺, 郭 硕. 2014. 西藏多龙矿集区花岗闪长斑岩地球化学特征及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(6): 1 039~1 051.
- 耿全如, 毛晓长, 张 璋, 等. 2015. 班公湖-怒江成矿带中、西段岩浆弧新认识及其对找矿的启示[J]. *中国地质调查*, 2(2): 1~11.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等. 2011. 班公湖-怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. *地质通报*, 30(8): 1 261~1 274.
- 李光明, 段志明, 刘 波, 等. 2011. 西藏班公湖-怒江结合带北缘多龙地区侏罗纪增生杂岩的特征及意义[J]. *地质通报*, 30(8): 1 256~1 260.
- 李金祥, 李光明, 秦克章, 等. 2008. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩-火山岩的地球化学特征与时代: 对成矿构造背景的制约[J]. *岩石学报*, 24(3): 531~543.
- 李玉彬, 多 吉, 钟婉婷, 等. 2012. 西藏改则县多不杂斑岩型铜金矿床勘查模型[J]. *地质与勘探*, 48(2): 274~287.
- 林 彬, 方 向, 王艺云, 等. 2019. 西藏铁格隆南超大型铜(金、银)矿含矿斑岩岩石成因及其对多龙地区早白垩世成矿动力学机制的启示[J]. *岩石学报*, 35(3): 642~664.
- 刘 洪, 张 晖, 李光明, 等. 2016. 藏北羌塘南缘早白垩世青草山强过铝质S型花岗岩的成因: 来自地球化学和锆石 U-Pb 年代学的约束[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 52(5): 848~860.
- 曲晓明, 范淑芳, 马旭东, 等. 2015. 西藏班公湖-怒江成矿带上的碰撞后铜矿床[J]. *矿床地质*, 34(3): 431~448.

- 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.
- 宋 扬, 唐菊兴, 曲晓明, 等. 2014. 西藏班公湖-怒江成矿带研究进展及一些新认识[J]. 地球科学进展, 29(7): 795~809.
- 孙 嘉. 2015. 西藏多龙矿集区岩浆成因与成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 孙 嘉, 毛景文, 姚佛军, 等. 2017. 西藏多龙矿集区岩浆成因与成矿作用关系研究[J]. 岩石学报, 33(10): 3 217~3 238.
- 孙振明. 2015. 西藏班-怒成矿带西段多龙矿集区铜金成矿作用与成矿规律[D]. 长春: 吉林大学.
- 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.
- 唐菊兴, 孙兴国, 丁 帅, 等. 2014. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床[J]. 地球学报, 35(1): 6~10.
- 王 强, 赵振华, 白正华, 等. 2003. 新疆阿拉套山石炭纪埃达克岩、富 Nb 岛弧玄武质岩: 板片熔体与地幔橄榄岩相互作用及地壳增生[J]. 科学通报, 48(12): 1 342~1 349.
- 伍登浩, 高顺宝, 郑有业, 等. 2018. 西藏班公湖-怒江成矿带南侧矽卡岩型铜多金属矿床 S、Pb 同位素组成及成矿物质来源[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 48(1): 70~86.
- 辛洪波, 曲晓明, 王瑞江, 等. 2009. 藏西班牙湖斑岩铜矿带成矿斑岩地球化学及 Pb、Sr、Nd 同位素特征[J]. 矿床地质, 28(6): 785~792.
- 张腾蛟, 陈 颖, 李佑国. 2017. 西藏羌塘南缘青草山北花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其成矿意义[J]. 地质学报, 91(8): 1 729~1 742.
- 张 志, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 2015. 西藏尕尔穷-嘎拉勒铜金矿集区火山岩年代学及地球化学[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 40(1): 77~97.
- 张 志, 宋俊龙, 唐菊兴, 等. 2017. 西藏嘎拉勒铜金矿床的成岩成矿时代与岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及辉钼矿 Re-Os 定年[J]. 地球科学, 42(6): 862~880.
- 赵晓燕. 2015. 西藏邦铺斑岩-矽卡岩铜铅锌矿床地质特征及矿床成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 郑海涛, 郑有业, 徐 净, 等. 2018. 西藏青草山斑岩铜金矿床含矿斑岩锆石 U-Pb 年代学及岩石成因[J]. 地球科学, 43(8): 2 858~2 874.
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. 矿物学报, 3(1): 55~62.
- 周金胜, 孟祥金, 臧文栓, 等. 2013. 西藏青草山斑岩铜金矿含矿斑岩锆石 U-Pb 年代学、微量元素地球化学及地质意义[J]. 岩石学报, 29(11): 3 755~3 766.
- 祝向平, 陈华安, 刘鸿飞, 等. 2015a. 西藏拿若斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义[J]. 地质学报, 89(1): 109~128.
- 祝向平, 陈华安, 刘鸿飞, 等. 2015b. 西藏多不杂斑岩铜矿斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其成矿意义[J]. 地质学报, 89(3): 534~548.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 等. 2011. 西藏波龙斑岩铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 27(7): 2 159~2 164.