

滇西北普上含矿斑岩体的岩石地球化学及蚀变特征研究

莫雷^{1,2}, 冷成彪^{1,2}, 邢新龙³, 李凯旋^{1,2}, 陈喜连^{1,2}, 余海军⁴, 王艳军^{1,2},
陈加杰^{1,2}

(1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3. 江西省地质局第三地质大队, 江西 九江 332100; 4. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216)

摘要: 滇西北中甸斑岩铜多金属成矿带是我国重要的铜资源基地, 普上为该成矿带新发现的斑岩型铜点, 含矿复式岩体主要由石英闪长玢岩和石英二长斑岩组成。为探讨该岩体成因、构造背景、物质迁移过程及成矿潜力等问题, 本文对新鲜石英闪长玢岩和蚀变石英闪长玢岩分别开展了岩石化学和蚀变组分特征研究。结果显示, 蚀变石英闪长玢岩的 SiO_2 (61.16%) 和 K_2O (4.20%) 含量较新鲜石英闪长玢岩 (分别为 58.24% 和 3.06%) 有所升高, 而 Al_2O_3 和 Na_2O 的含量明显降低, 但都具有大离子亲石元素 (Rb、Ba、K、Sr) 富集、高场强元素 (Zr、Nb、Ta、Ti) 亏损的特征, 且具有较高的 Ba/Nb 值 (分别为 75.7 和 93.2) 和较低的 Ce/Pb 值 (分别为 3.16 和 5.70), 显示典型弧环境花岗岩的特征。普上新鲜石英闪长玢岩的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值较高 (平均 8.18), 无明显的 Eu 负异常, SiO_2 与 Rb/Zr/Sm 值之间表现出一定的正相关性, 表明其经历了角闪石的分离结晶作用; Ba/Rb (<50) 和 Nb/La (<1) 值较低, Th/La 值 (>0.25) 相对较高, Rb/Sr 值 (0.09) 介于上地幔 (0.034) 与地壳 (0.35) 之间, 表明岩浆源区与俯冲作用有关, 岩浆来源为壳幔混源。蚀变石英闪长玢岩中大量迁入的组分包括 Fe_2O_3 、CaO、 K_2O 、Th、Ta、HREE 和 Cu、Mo、W、Ag 等成矿元素, 迁出的组分有 Na_2O 、MgO、MnO、Sr、Ba、U 和 LREE 等, 表明普上蚀变石英闪长玢岩受到了以钾交代为主的碱性蚀变作用的影响, 引起矿物蚀变的成矿热液富含 Cu、Mo 等成矿金属。普上石英闪长玢岩中普遍发育角闪石斑晶且 Sr/Y 和 V/Sc 值较高, 表明原始岩浆具有富水和高氧逸度的特征; 蚀变岩中绢云母化广泛发育, Cu 巨量迁入, 在岩石化学组成与金属成矿专属性判别图解中, 所有样品均在 Cu-Au 成矿区域。综合以上特征, 认为普上石英闪长玢岩体具有形成 Cu-Au 矿床的潜力。

关键词: 普上; 石英闪长玢岩; 地球化学; 热液蚀变; 物质迁移

中图分类号: P618.41; P588.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)06-1339-22

Petrographic geochemistry and alteration characterization of ore-bearing porphyry bodies in Pushang, Northwest Yunnan, China

MO Lei^{1,2}, LENG Cheng-biao^{1,2}, XING Xin-long³, LI Kai-xuan^{1,2}, CHEN Xi-lian^{1,2}, YU Hai-jun⁴,
WANG Yan-jun^{1,2} and CHEN Jia-jie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. The Third Geological Brigade of Jiangxi Geological Bureau, Jiujiang 332100, China; 4. Yunnan Geological Survey, Kunming 650216, China)

收稿日期: 2024-03-02; 接受日期: 2024-09-11; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2021QZKK0301); 国家自然科学基金项目 (42022021, 92062101); 云南迪庆有色金属责任公司科研项目 [DQYS-SCB-08-(2022) 031]; 江西省青年基金 (20224BAB213051); 东华理工大学博士启动基金 (DHBK2019297); 东华理工大学研究生创新基金 (YC2023-S550)

作者简介: 莫雷 (1999-), 男, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业, E-mail: 519905629@qq.com; 通讯作者: 冷成彪 (1982-), 男, 教授, 从事矿床地球化学方面的科研与教学工作, E-mail: lcb8207@163.com。

Abstract: The Zhongdian porphyry copper polymetallic metallogenic belt in northwestern Yunnan is an important copper resource base in China. Pushang is a newly discovered porphyry copper spot in the metallogenic belt. The ore-bearing composite rock mass is mainly composed of quartz diorite porphyrite and quartz monzonite porphyry. In order to explore the genesis, tectonic setting, material migration process and metallogenic potential of the rock mass, this paper studies the petrochemistry and alteration component characteristics of fresh quartz diorite porphyrite and altered quartz diorite porphyrite respectively. The results show that the contents of SiO_2 (61.16%) and K_2O (4.20%) in the altered quartz diorite porphyrite are higher than those in the fresh quartz diorite porphyrite (58.24% and 3.06%, respectively), while the contents of Al_2O_3 and Na_2O are significantly lower. However, they all have the characteristics of enrichment of large ion lithophile elements (Rb, Ba, K, Sr) and depletion of high field strength elements (Zr, Nb, Ta, Ti), and have higher Ba/Nb values (75.7 and 93.2, respectively) and lower Ce/Pb values (3.16 and 5.70, respectively). It shows the characteristics of granite in typical arc environment. The $(\text{La}/\text{Sm})_N$ of the fresh quartz diorite porphyrite is high (average value is 8.18), and there is no obvious negative Eu anomaly. There is a positive correlation between SiO_2 and Rb, Zr/Sm ratios, indicating that it has experienced the fractional crystallization of hornblende. The ratios of Ba/Rb (<50) and Nb/La (<1) are low, the ratio of Th/La (>0.25) is relatively high, and the ratio of Rb/Sr (0.09) is between the upper mantle (0.034) and the crust (0.35), indicating that the magma source area is related to subduction, and the magma source is crust-mantle mixed source. A large number of components in the altered quartz diorite porphyrite include Fe_2O_3^T , CaO, K_2O , Th, Ta, HREE, Cu, Mo, W, Ag and other ore-forming elements, and the migrated components include Na_2O , MgO, MnO, Sr, Ba, U and LREE, indicating that the Pushang altered quartz diorite porphyrite was affected by alkaline alteration dominated by potassium metasomatism, and the ore-forming hydrothermal fluid causing mineral alteration was rich in Cu, Mo and other ore-forming metals. The hornblende phenocrysts with high Sr/Y and V/Sc ratios are widely developed in the quartz diorite porphyrite, indicating that the original magma is characterized by rich water and high oxygen fugacity. Sericitization is widely developed in altered rocks, and Cu migrates in a large amount. All samples are in the Cu-Au mineralized area in the lithochemical composition and metal mineralization exclusivity discrimination illustration. Based on the above characteristics, the Pushang quartz diorite porphyrite has the potential to form Cu-Au deposits.

Key words: Pushang; quartz diorite porphyrite; geochemistry; hydrothermal alteration; material migration

Fund support: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2021QZKK0301); National Natural Science Foundation of China (42022021, 92062101); The Scientific Research Project of Yunnan Diqing Nonferrous Metals Co., Ltd. [DQYS-SCB-08-(2022)031]; The Jiangxi Provincial Youth Fund (20224BAB213051); Doctoral Start-up Fund of East China University of Technology (DHBK2019297); Graduate Innovation Fund of East China University of Technology (YC2023-S550)

中甸弧位于义敦岛弧南段,是我国三江特提斯成矿域内最重要的铜多金属矿集区,区内广泛发育印支期和燕山晚期岩浆岩和与之相关的斑岩-矽卡岩型、热液脉型 Cu(-Au-Mo-W)矿床(李建康等, 2007; 张向飞等, 2017; 莫雷等, 2024a)。其中,印支期以铜(金)矿床为主,如普朗、雪鸡坪、浪都、春都等斑岩型和斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床;燕山晚期以铜、钼、钨矿床为主,如红山、铜厂沟、休瓦促、热林等斑岩-矽卡岩型和岩浆热液型 Cu-Mo、W-Mo 矿床(Hou *et al.*, 2009; 李文昌等, 2011; 邓军等, 2011; Li *et al.*, 2017; Leng *et al.*, 2018a, 2018b,

2023; 李凯旋等, 2019; Chen *et al.*, 2021)。有关该区的岩浆岩、成矿过程和年代学、成矿流体和物质来源、构造背景等已有大量研究(侯增谦等, 2004; 范玉华等, 2006; 曾普胜等, 2006; 冷成彪等, 2007; 王守旭等, 2007; 任江波等, 2011; Wang *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2014, 2017; Leng *et al.*, 2018a)。区内广泛出露印支期中酸性斑(玢)岩,如闪长玢岩、石英闪长玢岩和石英二长斑岩等,与区域铜多金属成矿作用关系密切,其形成均与洋壳俯冲弧岩浆作用有关。区域印支期岩浆活动发生在 249~206 Ma(曾普胜等, 1999, 2004; 庞振山等, 2009; Leng

et al., 2018a; 董涛等, 2021), 集中成矿时间为 221~213 Ma (Li *et al.*, 2017), 产出的侵入岩体集中分布在以红山-属都蛇绿岩带为界划分的东、西两个斑岩成矿带 (李文昌等, 2007; 刘学龙等, 2013, 2014)。东斑岩成矿带分布于普朗-松诺-沃迪措一带及其北东方向的休瓦促和沙都格勒地区, 岩体分布较为分散, 发育普朗、红山、松诺、浪都等为代表的斑岩-矽卡岩型铜矿床和亚杂、卓玛、休瓦促等为代表的 Cu-Pb-Zn 矿床和 W-Mo 矿床 (曾普胜等, 2004; 庞振山等, 2009; 任涛等, 2011; 刘学龙等, 2014; 冷成彪, 2017; Leng *et al.*, 2018a; 董涛等, 2020); 西斑岩带分布于阿热-雪鸡坪-高赤平一带, 岩体分布密集, 发育雪鸡坪、春都、烂泥塘为代表的斑岩型铜矿床 (曾普胜等, 2003; 冷成彪等, 2008; 曹殿华等, 2009; 刘学龙等, 2018)。

普上铜矿点为中甸弧西斑岩带新发现的斑岩型铜矿点, 与烂泥塘大型铜矿床比邻, 该矿点仅董涛等 (2021) 开展了锆石 U-Pb 年代学 (217.6~215.9 Ma) 和岩石地球化学分析, 总体研究程度还很低, 严重制约了矿区找矿勘查的深入。围岩蚀变是成矿流体与围岩相互作用的结果, 而斑 (玢) 岩型矿床的围岩蚀变是极为普遍的现象 (Richards, 2003; Sillitoe, 2010; 李建平等, 2019; 林振文等, 2023), 并且与成矿关系密切。就热液蚀变而言, 宏观上重点是对蚀变矿物组合的描述, 而微观上主要研究物质迁移 (定性或定量计算) (林振文等, 2023)。普上斑 (玢) 岩体形成于晚三叠世 (董涛等, 2021), 受后期成矿热液的影响而发生强烈的蚀变。研究该岩体的岩石成因、构造背景以及在热液蚀变过程中的元素迁移规律, 对揭示该区岩浆演化特征和成矿物质沉淀机理等具有重要意义。为此, 本文以普上新鲜石英闪长玢岩和蚀变石英闪长玢岩为研究对象, 开展了全岩地球化学分析工作, 并利用标准化 Isocon 法查明了蚀变石英闪长玢岩热液蚀变过程中的元素迁移规律, 进一步探讨了该矿床的岩石成因和岩浆演化、构造背景、元素迁移与热液蚀变机理及其与铜矿化的关系, 希望对该区的找矿勘查有指导作用。

1 区域地质背景及矿床地质特征

1.1 区域地质背景

义敦岛弧南缘的中甸弧位于我国西南三江造山带北段, 东以甘孜-理塘缝合带为界, 西以乡城-格咱

大断裂为界, 向南延伸至扬子板块西缘 (图 1a), 是中晚三叠世甘孜-理塘洋壳西向俯冲的产物 (侯增谦等, 2001; 曲晓明等, 2003; 李文昌等, 2011; Leng *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2014; 王新松等, 2015; 董涛等, 2021)。中甸弧主要发育三叠系地层, 自下而上有中三叠统尼汝组火山岩和灰岩; 上三叠统曲嘎寺组绢云母板岩、杂砂岩和火山碎屑岩, 图姆沟组板岩、砂岩、英安岩和安山岩, 喇嘛垭组粉砂质板岩和石英砂岩 (杨岳清等, 2002; 侯增谦等, 2004; 任涛等, 2011; 莫雷等, 2024a)。区内主要发育三组断裂构造, 早期近 SN 向断裂控制了中三叠系沉积地层和印支期侵入岩体的展布; 中期 NW 向断裂控制了晚白垩世花岗质岩浆的侵入; 晚期 NE 向构造主要表现为喜山期左行或右行走滑断裂 (Li *et al.*, 2011; 任涛等, 2011; 董涛等, 2021)。

中甸弧的发育和演化大致经历了三期构造-岩浆-成矿作用: 印支期的洋壳俯冲 (235~210 Ma), 发育钙碱性中-酸性侵入岩, 岩性以石英二长斑岩、花岗闪长斑岩和石英闪长玢岩为主, 同时形成斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床 (如普朗、雪鸡坪、浪都) (侯增谦等, 2004; 冷成彪等, 2008; 任涛等, 2011; 李文昌等, 2013; Li *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2019; 董涛等, 2021); 燕山期的陆陆碰撞 (88~80 Ma), 发育酸性侵入岩, 岩性以二长花岗斑岩和花岗闪长斑岩为主, 同时形成斑岩-矽卡岩-热液型 Cu-Mo-W 多金属矿床 (如红山、休瓦促、铜厂沟) (李建康等, 2007; Wang *et al.*, 2014; 王新松等, 2015; 张向飞等, 2017; 李凯旋等, 2019; 李守奎等, 2023); 喜山期的陆内汇聚 (53~28 Ma), 发育中酸性和碱性花岗质侵入岩, 同时形成斑岩型铜金矿床 (如陆家村) (薛传东等, 2010; 任涛等, 2011; 董涛等, 2021)。

1.2 矿床特征

普上斑岩型铜矿点位于中甸弧西斑岩成矿带 (图 1b), 矿区出露地层为上三叠统曲嘎寺组二段 (T_3q^2) 和图姆沟组二段 (T_3t^2) (图 2)。曲嘎寺组二段岩性主要为粉砂质板岩和变质砂岩, 其含矿斑岩附近具有较强的角岩化; 图姆沟组二段岩性主要为板岩、变质砂岩、英安岩和安山岩。普上复式岩体由 NNW 向展布的闪长玢岩、石英闪长玢岩和石英二长斑岩组成, 出露面积约 2 km² (董涛等, 2021), 其中石英闪长玢岩和石英二长斑岩均为致矿岩体。

矿区目前已圈定出 2 条铜矿体 (图 2), 其中, KT1 为产于片理化英安岩中的热液脉型铜矿体, 矿

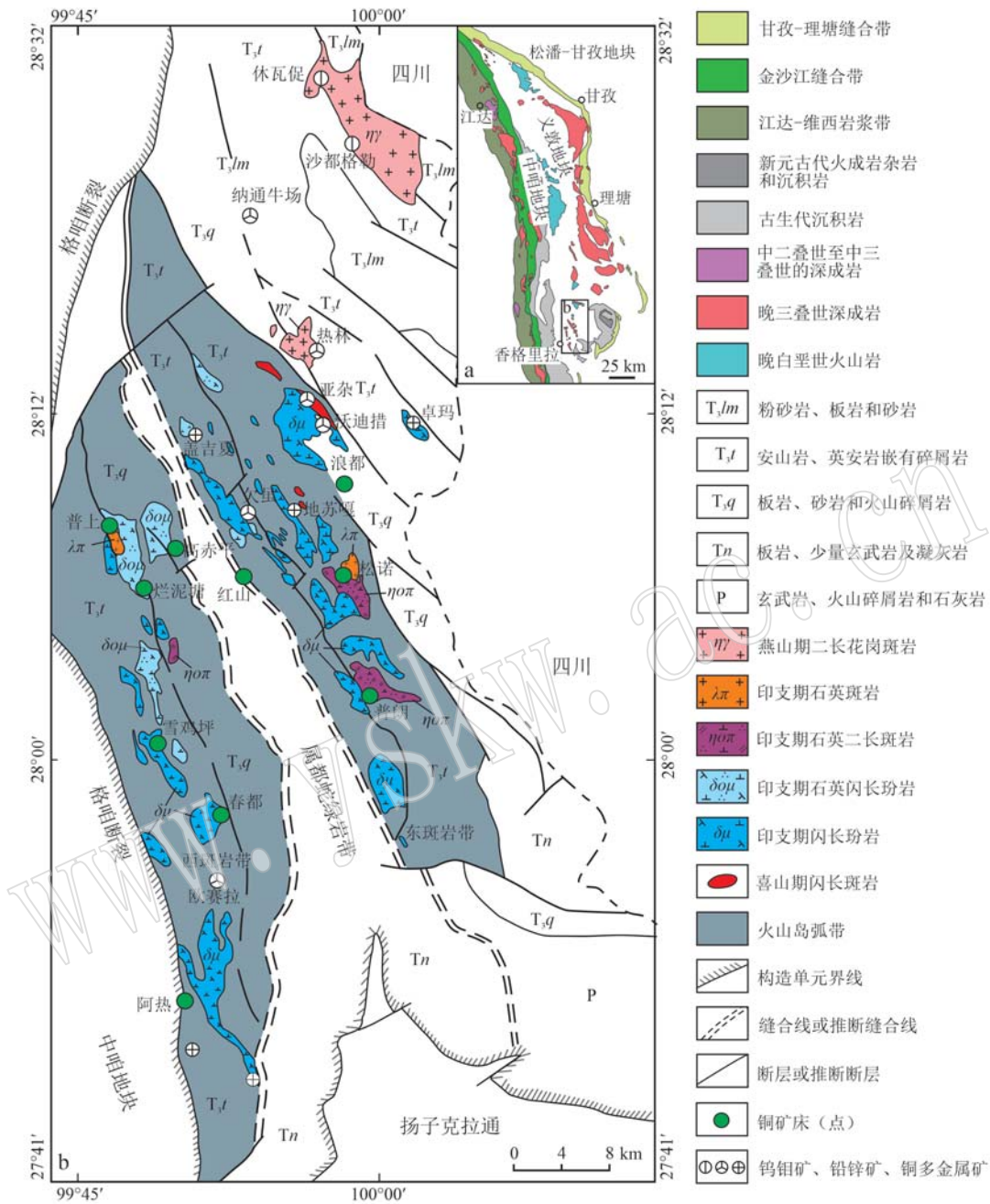


图 1 中甸地区大地构造位置(a, 据 Wang *et al.*, 2022 修改)和地质简图(b, 据 Li *et al.*, 2011; Leng *et al.*, 2012; 董涛等, 2021 修改)

Fig. 1 Geotectonic position (a, modified after Wang *et al.*, 2022) and geological map (b, modified after Li *et al.*, 2011; Leng *et al.*, 2012; Dong Tao *et al.*, 2021) of Zhongdian area

体长 260 m, 厚 6~25.8 m, 铜品位 0.21%~0.53%; KT2 是产于石英闪长玢岩和石英二长斑岩中的斑岩型铜金矿体, 厚 35 m, 铜品位 0.13%~4.66%, 伴生金 0.24~0.78 g/t(董涛等, 2021)。矿石矿物以黄铜矿、黄铁矿和磁铁矿为主, 矿石结构主要为他形粒状结构和包含结构, 矿石构造以细脉浸染状、脉状和块状构造为主; 围岩蚀变类型有绿泥石化、绿帘石

化、绢云母化、阳起石化、角岩化、碳酸盐化和硅化等。

2 样品特征及分析方法

2.1 样品特征

本次研究对普上岩体中代表性的岩相(石英闪

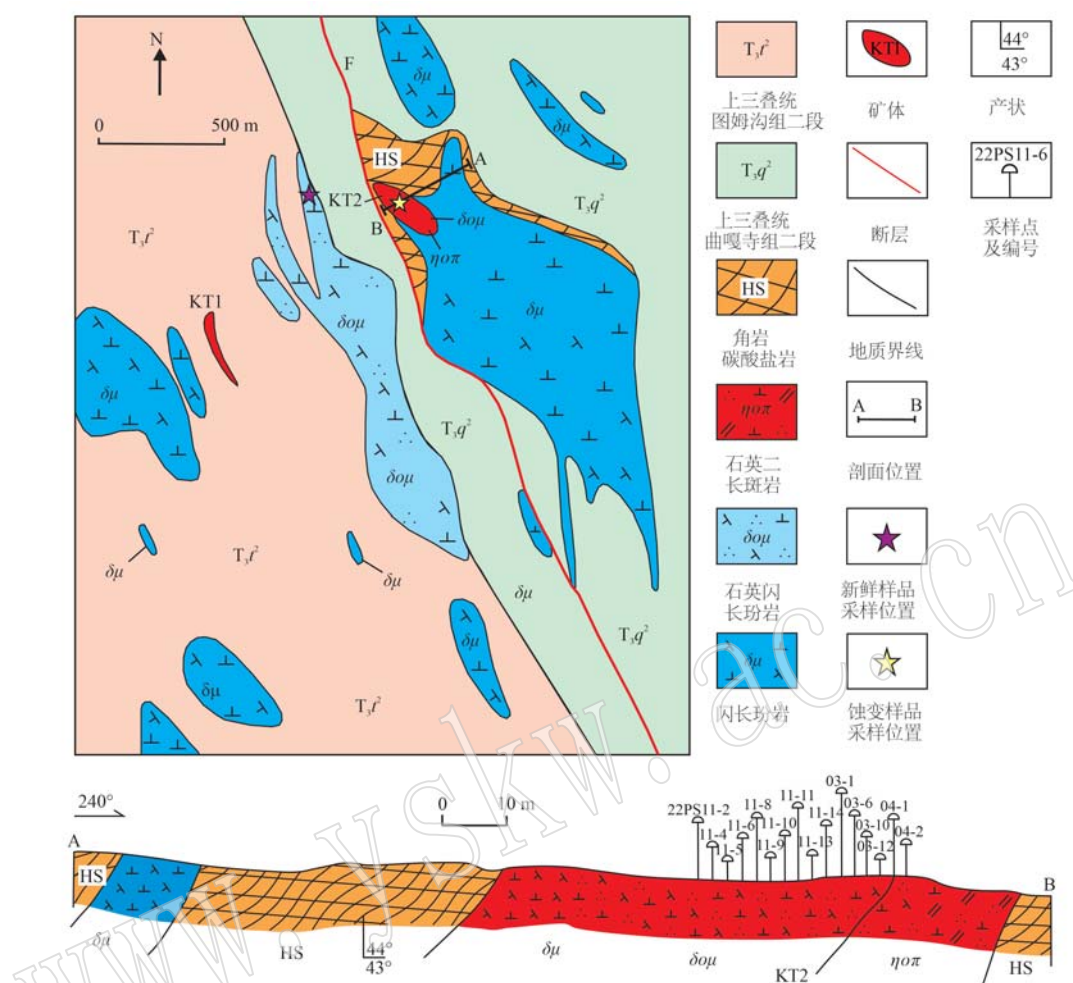


图2 普上矿区地质简图和A-B实测地质剖面图(据董涛等, 2021 修改)

Fig. 2 Geological map of the Pushang mine area and A-B measured geological profile (modified after Dong Tao et al., 2021)

长玢岩)进行了详细的手标本和显微镜下观察,主要选取了新鲜石英闪长玢岩(图3a)和蚀变石英闪长玢岩(图3d、3g)作为观察对象。采样位置及剖面见图2。新鲜样品采自新鲜岩脉(图3j);蚀变样品采自一个蚀变岩脉(图3k),岩脉整体矿化,但矿化不均匀,无蚀变分带,样品蚀变无差异(主要为绢云母化,局部绿泥石化),野外及镜下没有观察到矿化后期叠加现象,矿化应为蚀变过程中形成。

新鲜石英闪长玢岩:岩石呈灰白-灰绿色,斑状结构。斑晶由斜长石(粒径0.5~5 mm,含量20%~45%)、角闪石(粒径0.2~3 mm,含量15%~30%)、石英(粒径0.1~1 mm,含量5%~15%)及少量碱性长石和黑云母组成,斜长石斑晶和角闪石斑晶呈自形-半自形。基质主要由斜长石和石英组成,副矿物为锆石、磷灰石、金红石、钛铁矿、独居石等。

蚀变石英闪长玢岩:岩石呈灰白色、灰色,风化后为浅肉红色或浅棕色,斑状结构,粒度在0.2~5 mm之间,部分样品见暗色包体。岩石具细脉浸染状、网脉状和脉状黄铜矿、黄铁矿和磁铁矿化,地表风化后见孔雀石化和蓝铜矿化(图3l),蚀变强烈。斑晶和基质成分含量与新鲜石英闪长玢岩相似,但斑晶和基质中均伴有绿帘石和绿泥石等蚀变矿物混杂分布。斜长石斑晶板状晶型保存较好,但绢云母化十分严重,无法区分长石种类,仅见其假象。角闪石斑晶发生不同程度的蚀变,部分颗粒晶型保存不完整,常沿两组解理发育绿泥石化,部分颗粒被绿泥石、绿帘石和碳酸盐类矿物等集合体完全取代。

2.2 分析方法

样品测试均在澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素采用碱熔玻璃片XRF法分析,使用

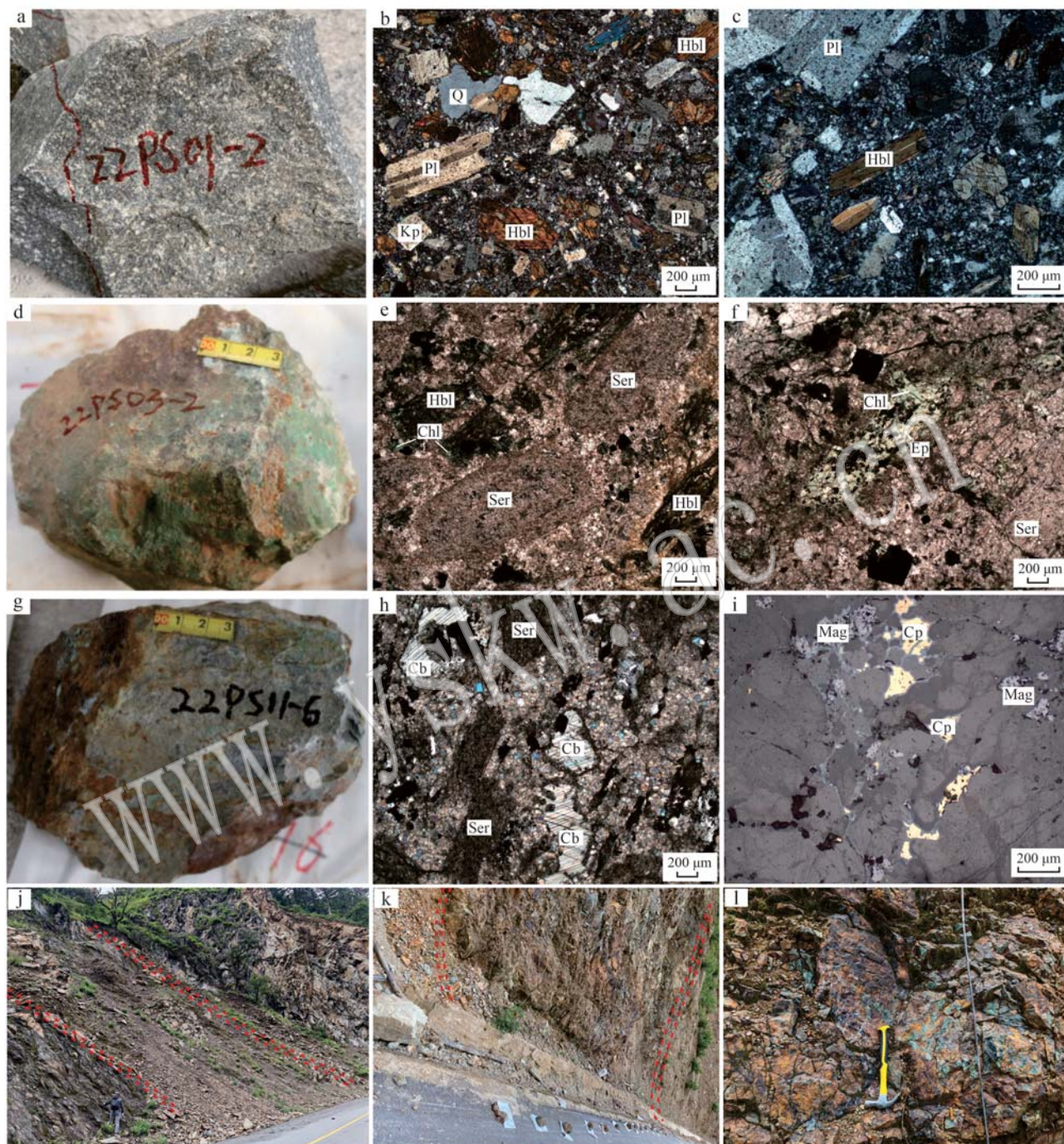


图3 普上石英闪长玢岩岩石学特征及显微特征照片

Fig. 3 Petrological and microscopic characteristics of Pushang quartz diorite porphyrite

a—新鲜石英闪长玢岩; b, c—新鲜石英闪长玢岩正交光镜下照片; d, g—蚀变石英闪长玢岩; e, f, h—蚀变石英闪长玢岩单偏光镜下照片; i—反射光下金属矿物照片; j, k—新鲜岩脉和蚀变岩脉; l—蚀变岩脉中的矿化露头; Cp—黄铜矿; Mag—磁铁矿; Pl—斜长石; Kp—钾长石; Hbl—角闪石; Ser—绢云母; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Cb—碳酸盐矿物; Q—石英

a—fresh quartz diorite porphyrite; b, c—orthogonal photomicrographs of fresh quartz diorite porphyrite; d, g—altered quartz diorite porphyrite; e, f, h—single-polarized photomicrographs of altered quartz diorite porphyrite; i—single-polarized photomicrographs of metallic minerals; j, k—fresh dykes and altered dykes; l—mineralized outcrops in altered dykes; Cp—chalcopyrite; Mag—magnetite; Pl—plagioclase feldspar; Kp—potassium feldspar; Hbl—hornblende; Ser—sericite; Chl—chlorite; Ep—epidote; Cb—carbonate minerals; Q—quartz

P2424 型 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 和 CP64 型电子天平 (LOI) 进行测定, 分析精度优于 5%。微量元素采用 ME-MS61r 四酸消解法电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-AES) 酸溶法测定, 分析精度优于 10%。稀土元素采用 ME-MS81 熔融法电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 测定, 分析精度优于 10%。详细的实验程序及分析方法见莫雷等 (2024b)。

3 分析结果

3.1 主量元素

本次工作共对普上 9 件新鲜石英闪长玢岩、16 件蚀变石英闪长玢岩样品进行了主、微量元素分析, 结果见表 1。此外, 还收集了中甸地区具有代表性的矿床 (普朗、雪鸡坪) 和近年新发现矿化点 (地苏嘎) 前人已发表数据作为参考值进行对比。

普上新鲜石英闪长玢岩 SiO_2 含量为 56.84%~58.94% (均值 58.24%), 属中-酸性岩, 具有高 Al_2O_3 (15.84%~16.33%, 均值 16.08%)、 K_2O (2.73%~3.54%, 均值 3.06%) 和全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 7.01%~8.39%, 均值 7.57%), $\text{Mg}^\#$ (44.56~46.81, 均值 45.82) 相对较高, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.28~1.62 (均值 1.48)。里特曼指数 (σ) 介于 3.19~4.63 之间 (均值 3.78, >3.3), 为碱性-钙碱性岩; 铝饱和指数 (A/CNK) 为 0.84~0.93 (均值 0.87), 属于准铝质岩; 镁铁指数 MF 为 69.45~71.33 (均值 70.28), 固结指数 (SI) 为 15.79~17.70 (均值 17)。

蚀变石英闪长玢岩的 SiO_2 含量为 58.56%~64.10% (均值 61.16%), Al_2O_3 含量为 11.64%~15.93% (均值 13.73%), K_2O 含量为 1.19%~6.69% (均值 4.20%), 全碱含量为 3.32%~8.76% (均值 6.76%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 0.25~4.16 (均值 0.92), $\text{Mg}^\#$ 在 11.5~49.5 (均值 29.6)。相对于新鲜石英闪长玢岩, 该蚀变岩中 SiO_2 和 K_2O 含量有所升高, Al_2O_3 和 Na_2O 的含量明显降低。

3.2 稀土、微量元素

新鲜石英闪长玢岩稀土元素总量 (ΣREE) 较高, 为 $188.70 \times 10^{-6} \sim 255.16 \times 10^{-6}$ (均值 226.08×10^{-6}), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 17.27~25.82 (均值 21.34), 表明轻稀土元素较富集, 重稀土元素相对亏损, 岩石轻、重稀土元素分馏程度中等; δEu 为 0.89~0.94 (平均 0.91), δCe 为 1.01~1.04 (平均 1.03), 无明显的 Eu 异常和 Ce 异常; 稀土元素配分模式图 (图 4a) 表现

出右倾变化趋势。在微量元素组成上, 具有高 Sr 含量 ($762 \times 10^{-6} \sim 1\,165 \times 10^{-6}$)、低 Y 含量 ($19.8 \times 10^{-6} \sim 22.3 \times 10^{-6}$)、高 Sr/Y 值 (36.5~57.1); 微量元素蛛网图 (图 4b) 上显示岩石 K、Rb、Ba、Sr、U 等大离子亲石元素 (LILE) 相对富集, Nb、Ta、Ti 等较不活泼的高场强元素 (HFSE) 相对亏损。

蚀变石英闪长玢岩的稀土元素分布曲线与新鲜石英闪长玢岩相似, 表现为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的“右倾型” (图 4a)。 ΣREE 值为 $78.55 \times 10^{-6} \sim 275.54 \times 10^{-6}$ (均值 148.34×10^{-6}), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 5.77~14.29 (均值 10.12)。与新鲜石英闪长玢岩相比, 蚀变岩 ΣREE 含量更低, 轻重稀土元素分馏程度更弱。 δEu 值变化于 0.66~0.87 (均值 0.80), 表现为 Eu 弱负异常, δCe 值在 0.79~1.11 (均值 1.02) 之间, 总体 Ce 异常不明显。在微量元素组成上, 蚀变石英闪长玢岩同样具有 LILE 富集, HFSE 相对亏损的特征 (图 4b), 与新鲜石英闪长玢岩相似。

4 元素质量迁移计算

大部分地质过程是在开放环境中进行的, 伴随着热液蚀变, 原岩会有一定程度的总质量变化, 因而直接对比岩石蚀变前后同一组分的含量并不能准确获得该组分迁移规律 (张可清等, 2002; 郭顺等, 2013)。为消除总质量变化带来的影响, 本文以质量平衡计算方法 (Gresens, 1967; Maclean, 1990) 进行元素迁移计算。Grant (1986) 建立的质量平衡标准化 Isocon 图解法是目前研究体系开放过程中物质迁移质量平衡分析的主要方法 (Grant, 2005)。其方程如下: $C_i^A = (M^0/M^A)(C_i^0 + \Delta C_i)$, $(\Delta C_i/C_i^0) \times 100\% = [(M^A/M^0)(C_i^A/C_i^0) - 1] \times 100\%$, 其中 $M^0/M^A = C_i^A/C_m^0$, M^A 、 M^0 为蚀变岩和原岩的质量, C_i^A 、 C_i^0 为蚀变岩与原岩中元素 i 的含量, C_m^0 为不活动元素 m 的含量, ΔC_i 为元素 i 从原岩到蚀变岩的质量迁移量, $(\Delta C_i/C_i^0)$ 为元素质量变化率。上述公式计算结果可以用图解法表示, 即通过不活动元素来拟合一条经过原点的 Isocon 线。在 Isocon 线上方的元素在蚀变过程中处于迁入状态, 而下方的元素处于迁出状态。

4.1 不活动元素的选择

确定不活动组分是利用 Isocon 图解法进行元素质量迁移计算的前提 (Grant, 1986, 2005)。大量研究

表 1 普上石英闪长玢岩主量 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果

Table 1 Analysis results of major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of Pushang quartz diorite porphyrite													
岩性 样号	新鲜石英闪长玢岩												
	22PS01-1	22PS01-2	22PS01-5	22PS01-7	22PS01-8-1B	22PS01-11-1	22PS01-15	22PS02-1	22PS02-2	22PS11-2	22PS03-1	22PS11-4	22PS11-5-3
SiO ₂	58.10	57.96	58.65	58.94	58.78	58.19	58.41	56.84	58.27	61.17	59.45	60.07	62.08
TiO ₂	1.07	1.08	1.06	1.06	1.05	1.06	1.03	1.08	1.08	0.70	0.70	0.64	0.68
Al ₂ O ₃	16.08	16.24	16.33	16.11	16.01	16.20	16.03	15.84	15.87	12.98	12.88	11.64	12.66
Fe ₂ O ₃ ^T	7.16	7.21	6.96	6.94	7.15	6.97	7.15	7.29	7.03	9.72	11.44	11.28	9.93
MnO	0.21	0.16	0.17	0.17	0.14	0.22	0.19	0.21	0.21	0.07	0.06	0.07	0.07
MgO	3.15	3.16	3.00	2.96	2.98	2.88	2.92	2.93	3.03	2.06	1.83	1.30	1.87
CaO	3.82	4.05	3.94	4.01	5.02	4.15	4.93	3.82	4.42	4.38	3.82	5.62	4.59
Na ₂ O	4.75	4.45	4.85	4.90	4.13	4.85	3.93	4.28	4.40	2.04	1.68	1.28	1.76
K ₂ O	3.35	3.03	3.00	3.03	2.97	3.54	3.08	2.84	2.73	5.01	6.63	4.47	5.06
P ₂ O ₅	0.33	0.32	0.32	0.32	0.31	0.32	0.30	0.33	0.33	0.21	0.17	0.19	0.20
LOI	1.48	1.90	1.53	1.37	1.60	1.46	1.76	4.13	2.30	1.66	0.82	2.27	0.99
Total	99.50	99.56	99.81	99.81	100.14	99.84	99.73	99.59	99.67	100.00	99.48	98.83	99.89
FeO	3.44	3.56	3.36	3.34	3.56	3.31	3.58	3.68	3.51	4.76	5.39	5.86	4.87
Fe ₂ O ₃	3.33	3.26	3.22	3.23	3.19	3.29	3.17	3.20	3.13	4.43	5.44	4.77	4.51
Mg [#]	46.81	46.71	46.30	46.03	45.46	45.25	44.96	44.56	46.29	29.77	24.24	18.73	27.36
Rb	85.7	79.5	79.3	79.8	81.9	92.8	91.2	79.1	69.7	87.7	121	75.8	88.7
Ba	2130	1760	1810	1770	1705	2180	1930	2100	1925	941	1020	1425	891
Th	18.6	17.9	18.3	17.8	18.7	18.4	18.3	17.6	19.8	18.2	13.2	16.2	16.8
U	3.77	3.61	3.74	3.63	4.07	3.89	3.98	3.90	4.43	2.15	2.17	1.98	2.27
Nb	20.9	20.6	20.1	20.0	20.6	20.8	20.4	20.0	22.4	13.4	16.2	10.1	12.8
Ta	1.40	1.40	1.50	1.40	2.10	1.60	1.60	1.40	1.70	1.50	1.50	1.40	1.50
Pb	26.9	6.40	20.0	43.8	7.10	51.2	18.9	64.4	41.8	20.1	28.2	33.3	19.4
Sr	794	1010	880	883	1165	762	1025	772	1130	566	423	733	618
V	1450	1470	1470	1430	1430	1450	1460	1520	1570	980	790	840	960
Sc	160	151	155	162	163	175	175	183	177	132	115	162	135
Zr	17.5	18.0	18.4	17.8	16.6	17.2	17.5	18.8	17.8	12.6	14.2	10.8	12.4
Hf	220	207	200	212	189	196	202	188	235	147	164	146	146
Y	5.10	4.90	4.70	5.20	4.60	4.80	4.80	4.70	5.50	3.70	4.10	3.60	3.70
La	20.6	19.8	19.8	20.0	20.4	20.9	20.8	20.7	22.3	15.8	25.8	18.3	15.0
Ce	53.4	41.4	51.8	49.9	63.0	55.1	52.1	50.3	57.8	18.8	23.2	26.7	20.8
Pr	102	81.2	98.5	94.7	116	105	99.3	95.3	112	45.1	60.5	52.1	49.2
Nd	10.8	9.02	10.6	10.3	12.0	11.5	11.0	10.7	12.1	5.61	7.80	6.56	6.25
Sm	38.5	33.7	36.9	36.4	40.8	40.5	38.5	37.9	42.3	21.7	30.1	24.6	23.3
Eu	6.43	5.81	6.21	6.08	6.56	6.73	6.55	6.41	7.12	4.18	6.00	4.24	4.22
Gd	1.67	1.58	1.67	1.62	1.78	1.73	1.67	1.67	1.84	1.05	1.25	1.05	1.07
Tb	4.96	4.79	5.01	4.89	5.10	5.14	4.97	5.01	5.31	3.49	5.41	3.80	3.48
Dy	0.71	0.68	0.71	0.71	0.72	0.73	0.70	0.73	0.75	0.51	0.83	0.55	0.48
Ho	3.99	3.84	3.94	3.83	3.90	4.05	3.98	4.02	4.37	3.03	4.79	3.01	2.84
Er	0.73	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.73	0.73	0.78	0.55	0.91	0.56	0.53
Tm	2.00	1.92	1.96	1.95	1.96	2.01	2.01	2.03	2.16	1.48	2.52	1.50	1.46
Yb	0.30	0.29	0.29	0.30	0.29	0.31	0.30	0.30	0.33	0.23	0.39	0.24	0.22
Lu	1.79	1.72	1.74	1.74	1.75	1.78	1.76	1.78	1.89	1.39	2.27	1.34	1.32
ΣREE	0.30	0.29	0.28	0.30	0.29	0.31	0.30	0.30	0.32	0.23	0.38	0.23	0.22
(La/Yb) _N	227.89	187.70	220.98	214.15	255.16	236.46	224.71	217.89	249.74	110.10	150.63	130.16	118.60
δEu	21.4	17.3	21.4	20.6	25.8	22.2	21.2	20.3	21.9	9.70	7.33	14.3	11.3
δCe	0.90	0.92	0.92	0.91	0.94	0.90	0.89	0.90	0.91	0.84	0.67	0.80	0.85

续表 1
Continued Table 1

岩性	蚀变石英闪长玢岩													
	22PS11-6	22PS03-6	22PS11-9	22PS11-10	22PS11-11-2	22PS11-13	22PS11-14	22PS11-8	22PS03-10	22PS03-12	22PS04-1	22PS04-2		
SiO ₂	59.02	60.21	62.02	63.47	64.10	60.06	58.56	62.56	60.07	61.61	61.89	62.26		
TiO ₂	0.60	0.72	0.82	0.73	0.75	0.79	1.36	0.65	0.74	0.69	0.91	0.90		
Al ₂ O ₃	14.98	13.48	15.22	13.64	13.10	14.16	14.95	12.15	13.36	12.77	15.93	15.82		
Fe ₂ O ₃ ^T	10.54	10.04	5.52	7.11	8.66	9.03	6.09	10.29	10.24	10.26	6.16	6.02		
MnO	0.07	0.07	0.10	0.07	0.06	0.07	0.11	0.06	0.07	0.06	0.11	0.11		
MgO	2.44	1.92	1.25	0.46	1.29	2.14	2.99	1.63	2.06	1.85	2.42	2.29		
CaO	0.96	4.69	5.11	9.33	4.08	4.56	7.80	5.01	4.86	4.60	2.89	3.42		
Na ₂ O	2.07	1.71	4.67	1.67	2.91	2.39	4.95	1.74	2.12	2.41	3.73	3.82		
K ₂ O	6.69	5.66	2.13	1.65	2.23	5.56	1.19	4.59	5.40	4.38	3.27	3.21		
P ₂ O ₅	0.11	0.22	0.25	0.22	0.21	0.23	0.18	0.18	0.19	0.18	0.27	0.27		
LOI	2.10	1.08	2.66	1.29	1.90	0.96	1.45	0.98	0.85	1.05	2.24	1.88		
Total	99.58	99.80	99.75	99.64	99.29	99.95	99.63	99.84	99.96	99.86	99.82	100.00		
FeO	4.89	4.89	2.71	3.94	4.47	4.30	3.15	5.13	4.96	5.06	3.00	2.92		
Fe ₂ O ₃	5.10	4.60	2.50	2.73	3.69	4.25	2.59	4.59	4.72	4.63	2.82	2.77		
Mg [#]	31.65	27.67	31.17	11.46	22.95	32.16	49.54	24.06	28.69	26.50	44.00	43.21		
Rb	124	96.7	37.9	26.5	38.1	95.4	23.0	78.9	93.3	75.1	64.6	58.6		
Ba	2 220	975	776	287	982	1 225	293	732	934	774	1 935	1 830		
Th	13.6	18.8	20.6	17.7	17.3	17.5	10.1	16.2	18.0	17.5	23.9	23.0		
U	1.98	2.45	2.22	2.18	1.39	2.74	2.71	2.23	2.37	2.45	3.30	3.02		
Nb	13.3	13.9	20.5	16.7	15.5	15.2	24.4	12.3	15.3	13.0	18.0	17.6		
Ta	1.30	1.80	1.60	1.80	1.50	1.50	2.00	1.50	1.40	1.50	1.60	1.60		
Pb	11.1	16.3	17.4	18.0	34.8	12.3	72.1	31.6	20.6	23.7	11.4	13.3		
Sr	293	616	758	1 145	747	554	612	675	591	622	825	835		
V	520	1 010	1 180	1 000	980	1 040	850	850	870	810	1 270	1 240		
Sc	95.0	127	136	147	135	123	153	130	115	126	174	169		
Zr	14.8	12.4	13.8	12.5	12.4	13.2	20.5	13.8	13.6	12.7	15.8	15.5		
Hf	197	160	171	148	151	158	230	142	152	146	198	185		
Y	5.00	4.00	4.20	3.70	3.70	3.90	5.80	3.50	3.80	3.70	4.90	4.60		
La	17.0	16.2	62.6	20.9	23.5	15.4	33.5	14.0	17.4	14.9	24.3	25.3		
Ce	14.8	23.4	51.6	30.2	32.5	18.9	35.1	18.4	19.8	17.8	45.8	37.4		
Pr	28.4	53.6	109	71.3	78.7	46.0	82.9	42.9	49.0	43.1	76.9	65.4		
Nd	3.64	6.44	14.9	9.79	9.49	5.66	9.61	5.32	6.18	5.42	12.5	9.62		
Sm	14.0	24.4	56.9	35.6	35.6	22.3	36.0	20.0	23.5	20.7	46.5	36.4		
Eu	2.81	4.40	10.1	6.40	6.38	4.47	7.27	3.79	4.44	3.93	8.97	6.96		
Gd	0.61	1.05	2.40	1.46	1.59	1.05	1.77	0.97	1.11	0.99	2.21	1.82		
Tb	2.83	3.64	9.88	4.94	5.65	3.28	6.20	3.09	3.82	3.22	7.26	6.28		
Dy	0.44	0.53	1.42	0.73	0.86	0.48	0.97	0.48	0.56	0.49	1.06	0.89		
Ho	2.71	3.03	8.24	4.26	5.00	2.73	5.84	2.62	3.30	2.85	5.91	5.31		
Er	0.55	0.57	1.62	0.78	0.94	0.53	1.20	0.49	0.61	0.52	1.05	0.96		
Tm	1.68	1.52	4.47	2.18	2.68	1.50	3.35	1.37	1.76	1.48	2.85	2.75		
Yb	0.28	0.24	0.62	0.33	0.42	0.22	0.52	0.21	0.26	0.23	0.44	0.41		
Lu	1.84	1.41	3.31	1.95	2.56	1.44	3.21	1.29	1.55	1.33	2.67	2.30		
ΣREE	0.34	0.24	0.56	0.32	0.42	0.23	0.51	0.21	0.25	0.22	0.43	0.38		
(La/Yb) _N	78.55	128.08	275.54	171.33	183.65	111.42	194.73	104.06	118.93	104.32	215.50	177.84		
δEu	5.77	11.9	11.2	11.1	9.11	9.41	7.84	10.2	9.16	9.60	12.3	11.7		
δCe	0.66	0.80	0.73	0.79	0.81	0.84	0.81	0.87	0.82	0.85	0.84	0.84		

注: Fe₂O₃^T 为全铁含量, FeO 和 Fe₂O₃ 为计算值。

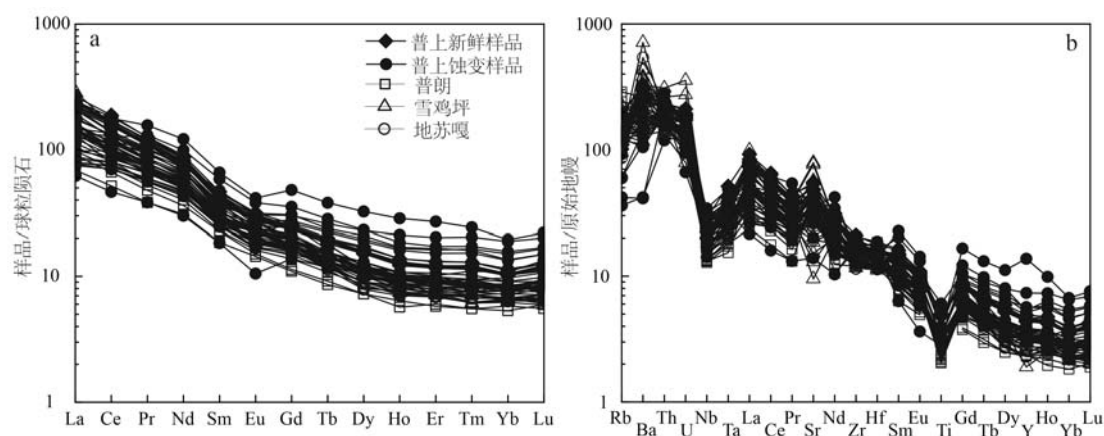


图4 普上石英闪长玢岩稀土元素球粒陨石标准化图(a)和微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonouth, 1989)

Fig. 4 Normalized map of rare earth element globular meteorites (a) and trace element spiderweb map (b) for quartz diorite porphyrite in Pushang (normalized values after Sun and McDonouth, 1989)

图中普朗数据来自 Wang *et al.* (2018) 和周晓丹等(2018), 地苏嘎数据来自 Chen *et al.* (2021), 雪鸡坪数据来自 Wang *et al.* (2011)、李雪峰(2016)、Chen *et al.* (2021), 图6、图7、图9数据来源同此图

the Pulang data in the figure is from Wang *et al.* (2018) and Zhou Xiaodan *et al.* (2018); the Disuga data is from Chen *et al.* (2021); the Xuejiaping data is from Wang *et al.* (2011), Li Xuefeng (2016), and Chen *et al.* (2021); the data sources for Fig. 6, Fig. 7, and Fig. 9 are the same as in this figure

表明,视具体矿床、矿化蚀变、矿物岩石类型等因素,Al、Ti、Zr、Nb、Th 和 REE 等在热液蚀变过程中大多是“不活动元素”(Grant, 1986; Brauhart *et al.*, 2001; 王睿等, 2010),尤其是 Al 和 Ti 在大多数热液矿床蚀变中均可作为惰性元素(艾金彪等, 2013)。根据 Grant(1986)建立的质量平衡 Isocon 图解法,不活动元素投影点拟合的通过原点的直线即是 Isocon 线,在 Isocon 回归线上或其附近的元素可视为不活动元素。鉴于选择组分在所研究的地质体系中含量不能太低的原则(郭顺等, 2013; 李守奎等, 2023),本文选择在主量元素中确定不活动组分。本次研究,采用 9 件新鲜石英闪长玢岩数据平均值代表原岩背景数据,避免了以单个样品作为原岩背景数据时存在个别元素极端值的影响;采用 16 件蚀变石英闪长玢岩平均值代表蚀变岩原始数据,避免了单个样品数据波动较大对质量平衡计算过程的影响,用平均值作为原始数据更具代表性。为了更直观在 Isocon 图解上观察各元素得到分布情况,本文对不同元素的含量作一定倍率处理后进行投影,绘制普上原岩及蚀变岩的各元素 Isocon 图解(图 5),主量元素中 Al_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 均在 Isocon 回归线上,说明这些组分是不活动组分,但 TiO_2 、 P_2O_5 在岩石中含量远小于 Al_2O_3 含量,为防止相对偏差过大而影响计算结果的准确性,故本文选用 Al_2O_3 作为蚀变过程

中的不活动元素 m。

4.2 元素质量迁移结果

主量元素、微量元素和稀土元素等浓度线斜率分别为 0.86、0.78、0.97,均小于 1,表明在蚀变过程中各元素发生了整体上的带入(王承洋等, 2023)。从标准化 Isocon 图解(图 5)可以看出,普上蚀变石英闪长玢岩中表现为迁入的成分有 SiO_2 、 K_2O 、 CaO 、 Fe_2O_3^T ,其中, K_2O 和 Fe_2O_3^T 带入量较大,分别达 60.36% 和 46.79%;迁出的组分有 MnO 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 ,其中 MnO 迁出量最大,达 51.78%(图 5a, 表 2)。微量元素中的 Cu、Ag、Zn、W、Mo 等成矿元素有强烈带入趋势,Cu 的迁入率达 2736%,除此之外,Th、Rb、Y 等元素也有明显的带入,迁出的微量元素包括 Sr、Ta、Ba、U、Nb 等(图 5b, 表 2)。轻稀土元素表现为大量迁出(La、Ce、Eu、Nd),重稀土元素相对迁入(Tm、Dy、Ho、Yb)(图 5c, 表 2)。

5 讨论

5.1 岩石成因及构造背景

普上新鲜石英闪长玢岩整体具有较高 SiO_2 (平均值 58.24%)、高 Al_2O_3 (平均值 16.08%)、高 Sr (平均值 936×10^{-6})、较高 Sr/Y (36.5~57.1),亏损 Y (平均值 20.6×10^{-6}) 和重稀土元素 [$(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值

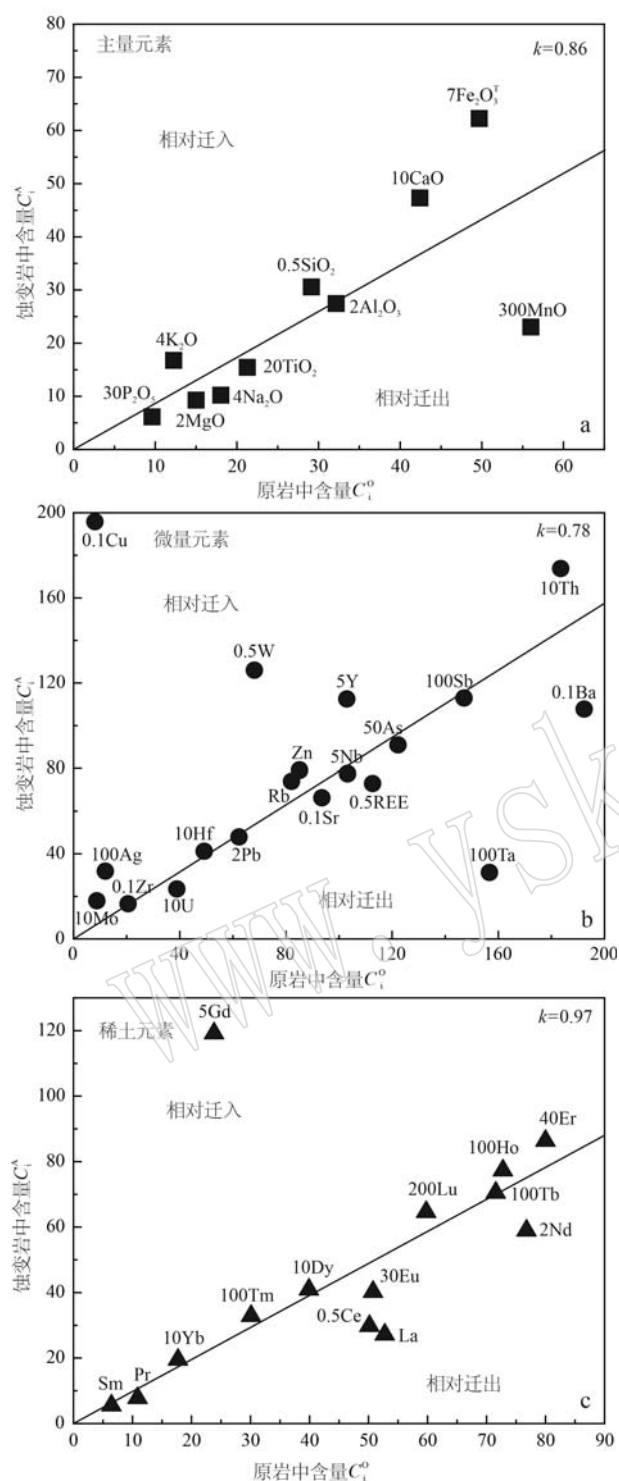


图5 普上蚀变石英闪长玢岩等浓度线 Isocon 图解
Fig. 5 Isoconcentration line Isocon illustration of Pushang altered quartz diorite porphyrite

为 21.34] 特征,部分地球化学特征与板片熔融形成的埃达克岩(冷成彪等, 2007; 任江波等, 2011; Wang *et al.*, 2011) 极为相似,但在 Sr/Y-Y 图解(图

6a) 和 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图解(图 6b) 中样品均在经典岛弧岩石区域,并非埃达克岩区域。此外,普上新鲜石英闪长玢岩的 Na_2O 含量(平均值 4.50%) 和 K_2O 含量(平均值 3.06%)、 Na_2O/K_2O 值(平均值 1.48) 及 Rb 含量(平均值 82.1×10^{-6}) 等特征也与板片熔融形成的埃达克岩(Richards and Kerrich, 2007; 曹康等, 2014) 有很大差异。普上新鲜石英闪长玢岩强烈亏损 Nb、Ta、Ti, 富集 Rb、Ba、Th、U、K、Zr 和 Hf, 具有高 MF(平均值 70.28) 和 SI(平均值 17), 高 Ba/Nb 值(平均值 93.2) 和低 Ce/Pb 值(平均值 5.70), 表现出典型的岛弧型花岗岩特征(Stern, 2002; 任涛等, 2011; Wang *et al.*, 2015; Xie *et al.*, 2022)。董涛等(2021) 对普上石英闪长玢岩测得锆石 U-Pb 年龄为 215.9 ± 1.4 Ma, 与区域甘孜-理塘洋壳俯冲峰期(220~210 Ma) 的岩浆事件吻合(侯增谦等, 2004; 曾普胜等, 2006; 曹殿华等, 2009; 刘学龙等, 2013)。在 Rb-(Nb+Y) 图解中(图 6c), 样品均落入火山弧花岗岩区域, 表明其形成于弧环境; 在 Ta-Yb 构造环境判别图解中(图 6d), 样品落入同碰撞花岗岩和火山弧花岗岩范围内, 揭示岩浆岩的形成与弧造山作用相关。以上特征表明普上石英闪长玢岩是与板块俯冲增生造山作用密切相关的岛弧型花岗质岩石。

一般情况下,斜长石富含轻稀土元素(LREE), 角闪石和石榴子石分别富含中稀土元素(MREE) 和重稀土元素(HREE), 通常用 La 和 Yb 来指示 LREE 和 HREE 的地球化学行为, 用 Sm 和 Dy 来指示 MREE 的地球化学行为(曹康等, 2014)。岩浆中斜长石的分离结晶将导致 $(La/Sm)_N$ 和 $(La/Yb)_N$ 值的减小, 形成轻稀土元素略右倾和中重稀土元素平缓的 REE 配分模式; 石榴子石的分离结晶或岩浆源区石榴子石残留将导致 $(La/Yb)_N$ 值的增加, 使 REE 配分曲线具有一定斜率; 而角闪石的分离结晶将导致 $(La/Sm)_N$ 值增大, 形成相对平缓或铲状的 REE 配分模式(Castillo *et al.*, 1999; Rooney *et al.*, 2011; 曹康等, 2014)。普上新鲜石英闪长玢岩的 LREE 和 MREE 分异明显 [$(La/Sm)_N = 7.13 \sim 9.60$], 但 MREE 和 HREE 的分异不明显 [$(Dy/Yb)_N = 2.20 \sim 2.31$] (图 4b), REE 配分模式表现为与角闪石而非石榴子石分离结晶有关的平缓状或铲状。同时, SiO_2 与 Rb、Zr/Sm 值之间表现出一定的正相关性(图 7a、7b), 反映出角闪石的分离结晶在普上石英

表2 普上蚀变石英闪长玢岩元素质量迁移计算结果

Table 2 Calculation results of element mass migration of Pushang altered quartz diorite porphyrite

	C_i^0	C_i^A	C_i^A/C_i^0	scale	ΔC_i	$(\Delta C_i/\Delta C_i^0)/\%$
SiO ₂	58.24	61.16	1.05	0.5	13.38	22.97
TiO ₂	1.06	0.77	0.73	20	-0.16	-14.8
Al ₂ O ₃	16.08	13.73	0.85	2	0	0
Fe ₂ O ₃ ^T	7.1	8.9	1.25	7	3.32	46.79
MnO	0.19	0.08	0.42	300	-0.1	-51.78
MgO	3	1.86	0.62	5	-0.82	-27.34
CaO	4.24	4.73	1.12	10	1.3	30.69
Na ₂ O	4.5	2.56	0.57	4	-1.51	-33.47
K ₂ O	3.06	4.2	1.37	4	1.85	60.36
P ₂ O ₅	0.32	0.21	0.66	30	-0.08	-24.99
Cu	80.8	1 958	24.23	0.1	2 212	2 736
Zn	85.1	79.2	0.93	1	7.61	8.94
Mo	0.88	1.79	2.03	10	1.22	139.1
Ag	0.12	0.32	2.67	100	0.25	211.01
W	136	252	1.85	0.5	159	116.6
Rb	82.1	74	0.9	1	4.55	5.55
Sr	936	663	0.71	0.1	-159	-17
Zr	205	165	0.8	0.1	-12.2	-5.93
Nb	20.6	15.5	0.75	5	-2.48	-12.02
Ta	1.57	1.56	0.99	100	0.26	16.77
Y	20.6	22.5	1.09	5	5.75	27.92
Sb	1.47	1.13	0.77	100	-0.15	-10.11
Ba	1 923	1 078	0.56	0.1	-662	-34.41
Hf	4.92	4.12	0.84	10	-0.1	-2.03
Pb	31.2	24	0.77	2	-3.1	-9.93
Th	18.4	17.4	0.95	10	2	10.91
U	3.89	2.35	0.6	10	-1.14	-29.27
La	52.8	27.2	0.52	1	-20.9	-39.63
Ce	100	59.6	0.6	0.5	-30.5	-30.41
Pr	10.9	7.8	0.72	1	-1.73	-15.97
Nd	38.4	29.5	0.77	2	-3.88	-10.1
Sm	6.43	5.54	0.86	1	0.05	0.74
Eu	1.69	1.34	0.79	30	-0.12	-7.24
Gd	5.02	4.77	0.95	5	0.56	11.18
Tb	0.72	0.71	0.99	100	0.11	15.36
Dy	3.99	4.09	1.03	10	0.8	20.04
Ho	0.73	0.77	1.05	100	0.18	24.38
Er	2	2.16	1.08	40	0.53	26.42
Tm	0.3	0.33	1.1	100	0.08	27.83
Yb	1.77	1.95	1.1	10	0.51	28.75
Lu	0.3	0.32	1.07	200	0.08	26.58
LREE	210.47	130.98	0.62	-	-57.11	-27.13
HREE	14.83	15.1	1.02	-	2.85	19.22
ΣREE	225	146	0.65	-	-54.3	-24.08

注: C_i^0 、 C_i^A 分别代表原岩和蚀变岩元素含量平均值(单个样品元素含量见表1),原岩 $n=9$, 蚀变岩 $n=16$; scale 为等浓度线 Isocon 图中元素倍率。 ΔC_i 和 $(\Delta C_i/\Delta C_i^0)$ 为蚀变岩平均值计算结果, ΔC_i 表示 1 g 原岩蚀变后元素的质量分数的变化, $(\Delta C_i/\Delta C_i^0)$ 表示元素质量分数的百分率; $(\Delta C_i/\Delta C_i^0)$ 为负值表示元素迁出,正值表示元素迁入。主量元素单位 $w_B/\%$, 微量元素单位 $w_B/10^{-6}$ 。

闪长玢岩演化过程中具有重要作用(曹康等, 2014)。Eu 存在 Eu^{3+} 和 Eu^{2+} 两种价态。 Eu^{2+} 通常呈类质同象替代斜长石中的 Ca^{2+} , 且 Eu 在斜长石中的分配系数远高于其他稀土元素, 故明显的负 Eu 异常可以作为岩浆演化过程中斜长石分离结晶或源区有斜长石残留的标志(曹康等, 2014)。普上新鲜石英闪长玢岩具有的高 Sr/Y 值(36.5 ~ 57.1, 平均 45.4), 无明显的负 Eu 异常, 表明岩浆演化过程中未出现明显的斜长石分离结晶; 这可能与岩浆的高含水量抑制斜长石分离结晶有关(Loucks, 2014; Wang *et al.*, 2014a; Cao *et al.*, 2021; 莫雷等, 2024a), 同时与普上石英闪长玢岩中常见的角闪石斑晶要求岩浆具有较高的水含量一致。另外, 普上新鲜石英闪长玢岩 δEu 与 Ba 和 Rb/Sr 值之间弱的负相关性(图 7c、7d)以及极弱负 Eu 异常可能为岩浆演化后期微弱的斜长石分离结晶所致。总体而言, 角闪石的分离结晶可能是普上石英闪长玢岩形成的一个重要因素。

普上新鲜石英闪长玢岩的亲岩浆元素 Co 为 $34.5 \times 10^{-6} \sim 49.0 \times 10^{-6}$ 、Ni 为 $16.6 \times 10^{-6} \sim 24.9 \times 10^{-6}$, 含量较高; 锆石具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282 607 ~ 0.282 682), $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -1.09 ~ 1.52 (平均值 0.23, 大部分具正值)(董涛等, 2021), 表明源区为地幔或新生地壳(Wang *et al.*, 2015; 侯增谦等, 2018), 部分 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 负值说明石英闪长玢岩形成过程中有少量陆壳物质的加入, 是壳幔相互作用的结果; Rb/Sr 值为 0.06 ~ 0.12 (平均值 0.09), 介于上地幔值(0.034)与地壳值(0.35)之间(董涛等, 2021), 也反映出壳幔混源的特点。普上新鲜石英闪长玢岩的 $\text{Mg}^\#$ 值(均值 45.82)较低, Rb-SiO₂ 图解(图 7a)反映了 AFC 过程, 低的 $\text{Mg}^\#$ 值可能是岩浆演化的 AFC 过程中地壳物质的混染导致(曹康等, 2014)。Th/La 值为 0.30 ~ 0.43 (>0.25), 反映了俯冲带流体交代作用及壳源物质加入对研究区岩浆源区的影响(任涛等, 2011); Ba/Rb 值为 20.8 ~ 27.6 (<50)、Nb/La 值为 0.33 ~ 0.50 (<1)、Ba/La 值为 27.1 ~ 42.5, 显示其成因与岛弧环境有关, 原始岩浆可能源于受俯冲板片脱水融熔交代的亏损地幔楔(任涛等, 2011; 曹康等, 2014; 董涛等, 2021)。综合以上分析认为: 普上石英闪长玢岩岩石成因可能为晚三叠世甘孜-理塘大洋板片向西俯冲导致上覆地幔楔遭受流体交代, 被流体交代的地幔楔发生部分熔融形成初始岩浆, 然后在岩浆侵位过程中有地壳物质混染。

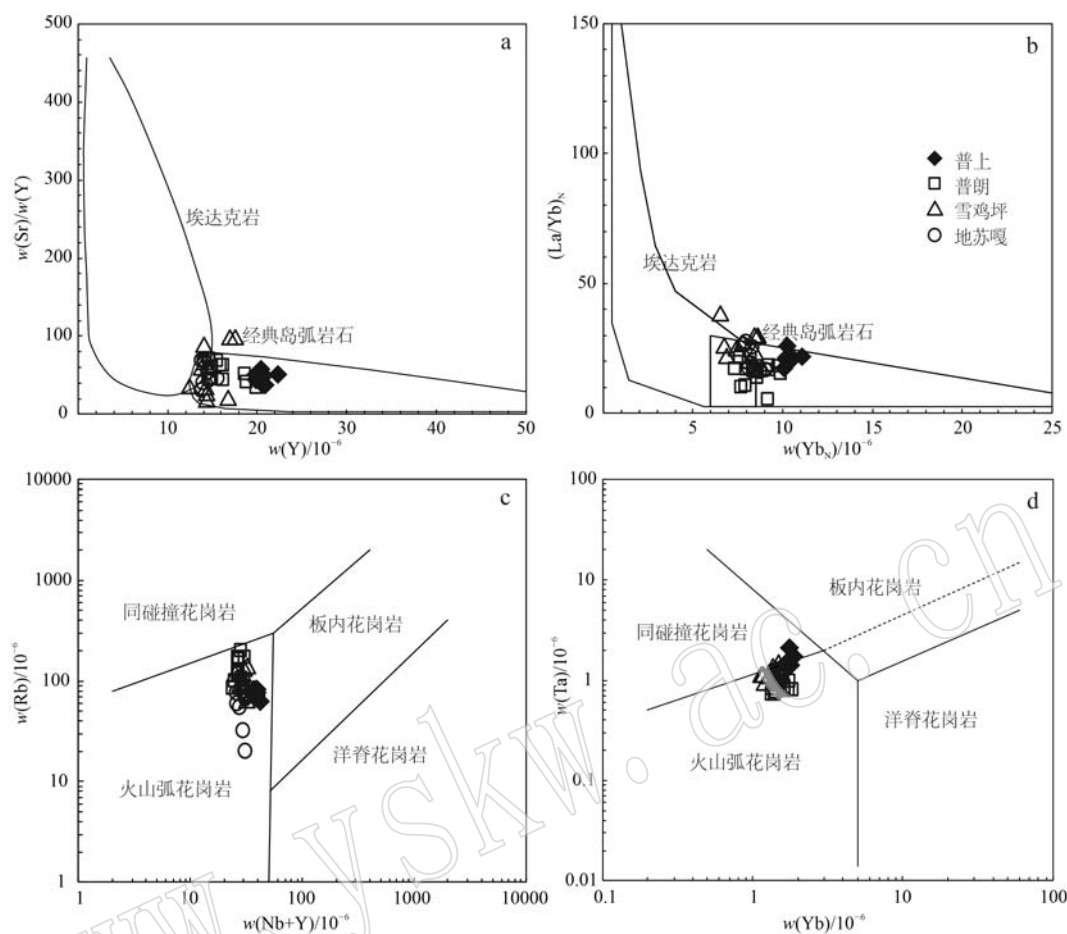


图6 普上新鲜石英闪长玢岩 Sr/Y-Y 图解(a, 据 Defant and Drummond, 1990)、 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图解(b, 据 Drummond and Defant, 1990)、Rb-(Nb+Y) 图解(c, 据 Pearce *et al.*, 1984) 和 Ta-Yb 图解(d, 据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 6 The Sr/Y-Y diagram (a, after Defant and Drummond, 1990), $(La/Yb)_N$ - Yb_N diagram (b, after Drummond and Defant, 1990), Rb-(Nb+Y) diagram (c, after Pearce *et al.*, 1984) and Ta-Yb diagram (d, after Pearce *et al.*, 1984) of the Pushang fresh quartz diorite porphyrite

5.2 热液蚀变过程中不同元素的行为

元素通常呈不同形式和含量赋存于矿物中,不同的矿物组合元素含量变化也不同(艾金彪等, 2013)。一般而言,各矿物中的元素赋存情况为:斜长石主要赋存 Na、Ca、Sr,角闪石和黑云母主要赋存 Fe、Mg、Sc,钾长石、黑云母主要赋存 K、Ba、Rb、Cs,锆石、榍石、褐帘石中含大量 Zr、Hf、Th、U,而 Ta、REE(Ce~Lu) 主要赋存于榍石中。成矿元素 Cu、Mo、Pb、Zn、Ag、Fe 等常以独立金属矿物或者金属矿物中类质同象的形式存在(王翠云等, 2012; 李守奎等, 2023)。普上蚀变石英闪长玢岩大量发育绿泥石化和绢云母化,绿泥石化表现为角闪石和黑云母被绿泥石、绿帘石交代,主要控制 Fe、Mg 元素行为;绢云母化主要是由热液带入 K 交代斜长石,形成绢

云母,主要控制 Na、K 元素行为,且绢云母化时通常会伴有黄铁矿生成。

热液蚀变过程中元素的活化、迁移与流体、矿物间的离子交换、矿物的分解等有密切关系(王翠云等, 2012; 杜泽忠等, 2020)。对于主量元素,在普上蚀变石英闪长玢岩中,随着热液蚀变作用的持续进行,与新鲜石英闪长玢岩相比, SiO_2 明显增加, MgO 、 MnO 明显减少(见章节 3.1),可能是斜长石、角闪石等在热液作用下发生分解、交代作用,形成热液黑云母,导致 MgO 、 MnO 的流失以及 SiO_2 的带入(林振文等, 2023)。角闪石和黑云母等富铁矿物在蚀变为绿泥石等矿物的过程中 Fe 通常会发生强烈的迁移丢失,这与普上蚀变石英闪长玢岩 $Fe_2O_3^T$ 表现为大量迁入不符,表明 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 赋存于多种矿物

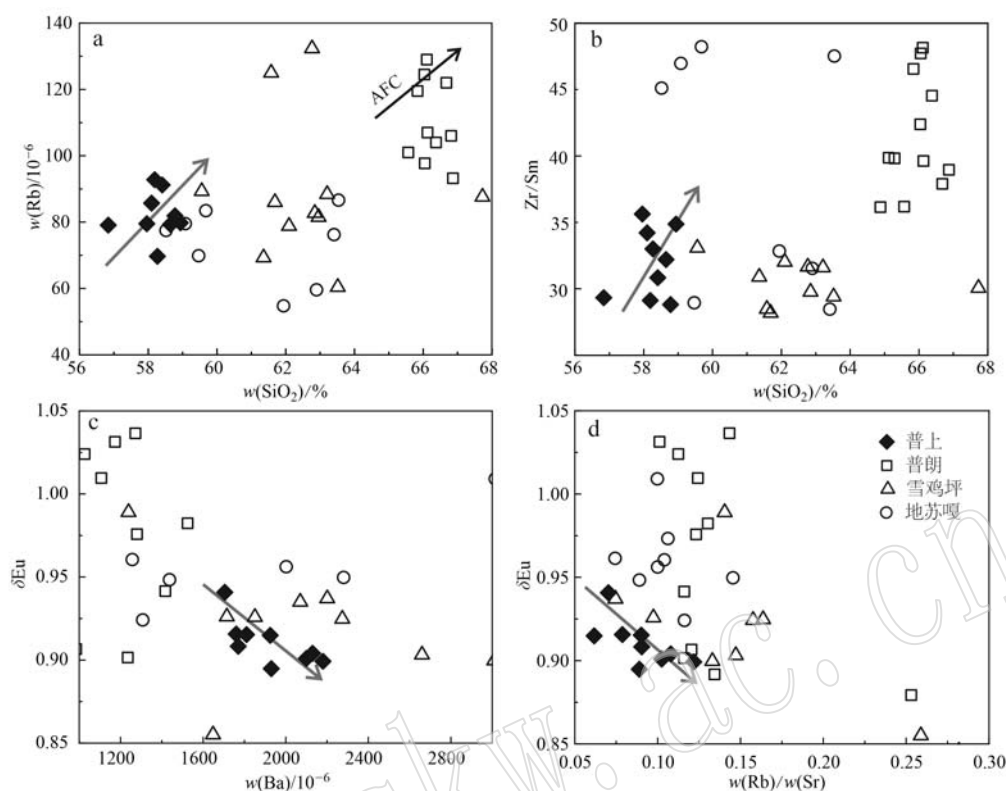


图 7 普上新鲜石英闪长玢岩 Rb-SiO₂ 图解(a, 据 Castillo *et al.*, 1999)、Zr/Sm-SiO₂ 图解(b)、δEu-Ba 图解(c)和 δEu-Rb/Sr(d) 图解

Fig. 7 The Rb-SiO₂ diagram (a, after Castillo *et al.*, 1999), Zr/Sm-SiO₂ diagram (b), δEu-Ba diagram (c) and δEu-Rb/Sr diagram (d) of the Pushang fresh quartz diorite porphyry

中。花岗质岩石中 Na⁺ 主要赋存在斜长石(钠长石、钙长石)中,而 K⁺ 主要赋存在钾长石和云母中,普上蚀变石英闪长玢岩中 K₂O 大量迁入,而 Na₂O 明显迁出(图 8a),与斜长石蚀变为绢云母有关,表明蚀变热液为碱性且富含 K⁺; CaO 表现为明显的带入,表明蚀变过程受到了碳酸盐化作用的影响;而 P₂O₅ 的迁出可能与副矿物磷灰石的分解有关。上述表明普上蚀变石英闪长玢岩受到了以钾交代为主的碱性蚀变作用的影响,成矿流体是碱性、富硅的。

对于微量元素, Rb 与 K 的性质相近, 常以类质同象的形式赋存在含 K 矿物中, 在普上蚀变石英闪长玢岩中都表现为迁入, 可能与含 K 矿物不同程度的绢云母化和绿泥石化有关; Sr 主要赋存在长石和云母中, 随着斜长石的蚀变交代而迁出; Ba 主要赋存在黑云母和角闪石中, Ba 的迁出与早阶段斜长石和角闪石分解、交代形成的热液黑云母的绢云母化蚀变有关(王翠云等, 2012)。Hf、Th、Nb、Ta 等高场强元素主要存在于一些化学稳定性较好的副矿物中, 表现出类似惰性或弱活动性特征(迁入或者迁出

量较少), 这些元素含量相比原岩出现轻微的变化(表 1), 可能是由于这些元素在母岩中的含量差异远大于热液蚀变作用引起的蚀变前后含量差异造成。Cu、Zn、Mo、Ag、W 等成矿元素的迁入, 特别是 Cu 的巨量迁入(迁入量 2 736.51%)(图 8b), 表明热液蚀变过程带入了这些成矿元素, 推测造成围岩蚀变的热液与成矿流体可能为同一流体体系。

对于稀土元素, 一般被认为是热液作用过程中的惰性组分, 但也有研究表明 REE 具有活性, 不能完全作为不活动组分(王翠云等, 2012; 林振文等, 2023)。普上蚀变石英闪长玢岩中 ΣREE 表现为迁出的特点(图 8b), 其中, 轻稀土元素表现为迁出, 重稀土元素表现为迁入(图 8c), 且轻稀土元素迁出率要高于重稀土元素的迁入率, 表明在热液作用过程中 REE 并不完全属于惰性组分, 轻稀土元素迁移能力比重稀土元素更强。另外, 岩浆岩中 REE 的含量主要受控于副矿物, 因此, 副矿物(磷灰石、榍石、锆石等)分解可能是普上蚀变石英闪长玢岩中 ΣREE 迁出的主要原因(Sawka, 1998; 王承洋等, 2023)。

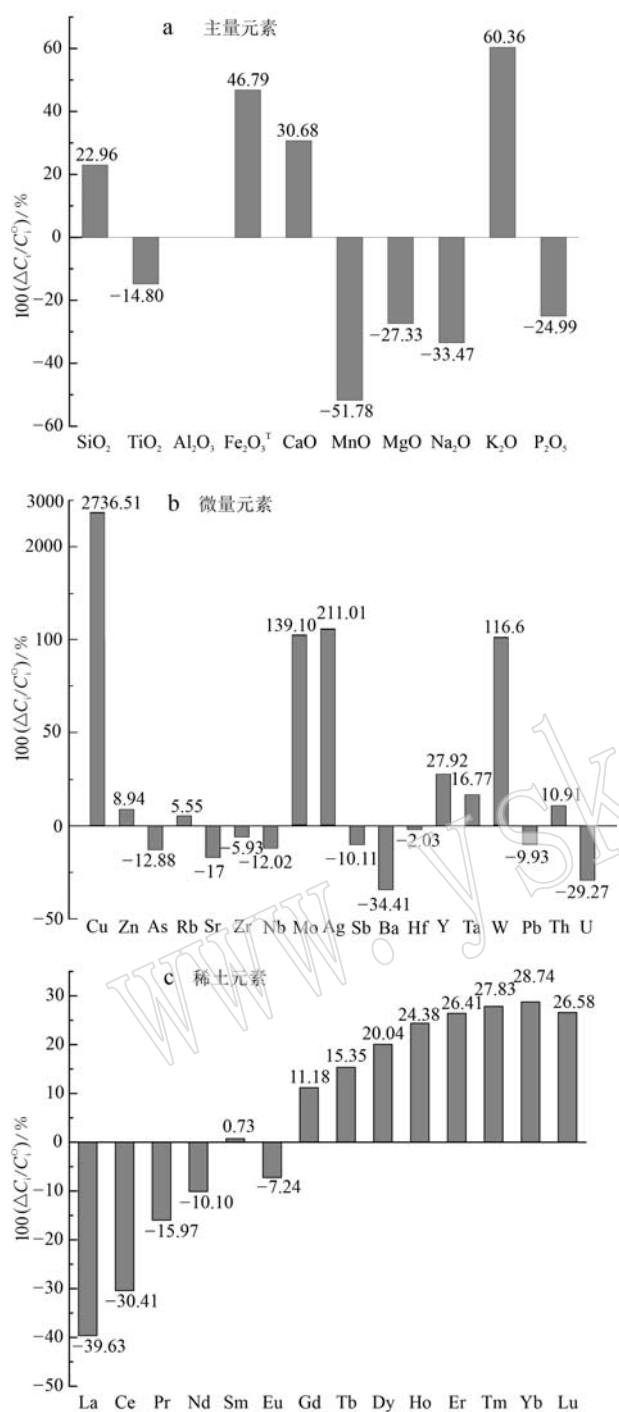


图8 普上蚀变石英闪长玢岩元素质量迁移对比图

Fig. 8 Comparison diagram of element mass transfer of Pushang altered quartz diorite porphyrite

5.3 成矿意义

通常而言,斑岩矿床成矿岩体的矿物成分或岩性与成矿专属性是相对应的(冷成彪等, 2020): Cu-Au 成矿岩体通常是中-低程度分异的石英闪长玢岩和闪长玢岩($\text{SiO}_2 = 54\% \sim 66\%$); Cu 成矿岩体

为中酸性的石英二长斑岩和花岗闪长斑岩($\text{SiO}_2 = 62\% \sim 66\%$); Cu-Mo 成矿岩体多数为偏酸性的花岗闪长岩-石英二长岩($\text{SiO}_2 = 65\% \sim 70\%$), Mo-W 成矿岩体常为高分异的花岗岩($\text{SiO}_2 \geq 70\%$)。另外, H_2O 含量、氧逸度和矿物结晶分离是制约斑岩型矿床的重要因素,而氧逸度和矿物结晶分离更是控制成矿专属性的两个重要因素(Kelley and Cottrell, 2009; Schütte *et al.*, 2012; Richards, 2014; 冷成彪等, 2020)。在高氧逸度环境下,大部分 S 以 SO_4^{2-} 、 SO_2 等形态存在,仅有少数 S^{2-} 能形成硫化物,硫化物很难达到饱和,因此, Cu、Au、Mo 等在残留岩浆中逐步富集,并最终被带入岩浆流体,有利于形成铜多金属矿床(Mungall, 2002; Li and Ripley, 2009; Richards, 2011; 曹康等, 2014); 在氧逸度较低的情况下, S 主要以 S^{2-} 的形态赋存,导致亲硫元素形成硫化物过饱和而提前析出,不利于残余岩浆中 Cu、Au 的富集(Richards and Kerrich, 2007; 董涛等, 2021)。普上石英闪长玢岩具较高 V/Sc 值(8.39~10.2),且发育有磁铁矿,表明母岩浆氧逸度较高(Wang *et al.*, 2014b); 其氧化还原指数 ΔOx 大于 0.3(图 9a),显示强氧化(SO)特征(Blevin, 2004),有利于形成斑岩型 Cu-Au 矿床。同时,普上石英闪长玢岩中含有角闪石等大量含水矿物,其 Sr/Y 值较高,表明原始岩浆含水量较高(Richards, 2011; Loucks, 2014; Wang *et al.*, 2014a; Cao *et al.*, 2021),为后期岩浆-热液过程创造了有利条件。

对于热液蚀变过程,岩浆出溶的含有酸性挥发组分(HCl 、 HF 、 CO_2 等)的流体与斜长石、黑云母等造岩矿物发生持续交代反应,促进其他组分持续大量地被带入或迁出,从而改变了热液的物化特性和组分。与此同时,硫逸度和 H^+ 含量也会逐渐升高,还原性硫的增多会使 Cu 等金属元素以金属硫化物形式析出, H^+ 含量的升高能促使蚀变由钾化向绢云母化转变,从而增加 Cu、Au、Mo、W 等成矿元素在流体中的溶解度,有利于成矿元素的富集(黄智龙等, 1997; 孟祥金等, 2004; 王承洋等, 2023)。随着挥发分的大量迁入和消耗,不断形成更多的含水矿物,加之蚀变的不均匀性以及挥发分的持续聚集,使部分围岩发生破裂而释放压力,产生大量的裂隙,为含矿热液运移提供了通道(Hezarkhani *et al.*, 1999; 李守奎等, 2023)。普上石英闪长玢岩在热液蚀变过程中发育大量绢云母化,发生 Cu、Mo、W 等成矿元素的迁入,特别是 Cu 发生巨量迁入,在 ΔOx -K/Rb 图

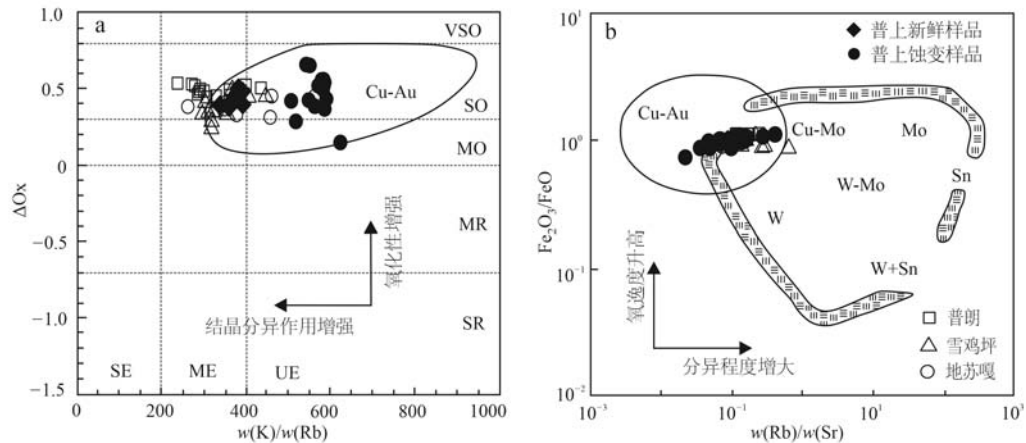


图 9 普上石英闪长玢岩岩石化学组成与金属成矿专属性判别图解

Fig. 9 The discrimination diagram of rock chemical composition and metal mineralization specificity of Pushang quartz diorite porphyry

a— $\Delta\text{Ox}-\text{K/Rb}$ 图(底图据冷成彪等, 2020, $\Delta\text{Ox} = \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}) + 0.3 + 0.03\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$, 表示岩浆氧化还原状态(Blevin, 2004), $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 代表岩石中的全铁含量($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$), $\Delta\text{Ox} < -0.7$ 表示强还原(SR)、 $-0.7 \sim 0$ 表示中等还原(MR)、 $0 \sim 0.3$ 表示中等氧化(MO)、 $0.3 \sim 0.8$ 表示强氧化(SO)、 $\Delta\text{Ox} > 0.8$ 表示超强氧化(VSO); K/Rb 用来反映岩浆分异程度(Blevin, 2004), 小于 200 表示高分异(SE)、200~400 表示中等分异(ME)、大于 400 表示低分异(UE); b— $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}-\text{Rb/Sr}$ 图(底图据张向飞等, 2017; 冷成彪等, 2020)

a— $\Delta\text{Ox}-\text{K/Rb}$ diagram [after Leng Chengbiao *et al.*, 2020; $\Delta\text{Ox} = \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}) + 0.3 + 0.03\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$, it represents the redox state of magma (Blevin, 2004), $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ denotes the total iron content ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$) in rocks. $\Delta\text{Ox} < -0.7$ indicate strong reduction (SR), values between -0.7 and 0 indicate moderate reduction (MR), values between 0 and 0.3 indicate moderate oxidation (MO), values between 0.3 and 0.8 indicate strong oxidation (SO), and $\Delta\text{Ox} > 0.8$ indicate very strong oxidation (VSO); the K/Rb ratio is used to reflect the degree of magma differentiation (Blevin, 2004), with values less than 200 indicating high differentiation (SE), values between 200 and 400 indicating moderate differentiation (ME), and values greater than 400 indicating low differentiation (UE)]; b— $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}-\text{Rb/Sr}$ diagram (after Zhang Xiangfei *et al.*, 2017; Leng Chengbiao *et al.*, 2020)]

解(图 9a)和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}-\text{Rb/Sr}$ 图解中(图 9b), 所有样品均在 Cu-Au 成矿区域, 说明该矿点具有形成斑岩型 Cu-Au 矿床的潜力, 值得进行更深层次的研究与勘探工作。

6 结论

(1) 普上新鲜石英闪长玢岩整体具有高 SiO_2 和 Al_2O_3 含量、高 Sr/Y、Th/La 和 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值, 低 Ba/Rb、Nb/La 值, 说明岩浆为壳幔成因的弧岩浆, 演化过程以角闪石的分离结晶为主, 无明显斜长石分离结晶, 这与岩浆具有高水含量相关。

(2) 普上石英闪长玢岩具有高 H_2O 含量、高氧逸度特征说明其较强的成矿潜力; 热液蚀变过程中 Ag、Mo、W、Zn 等成矿元素被大量带入, Cu 更是巨量迁入, 表明石英闪长玢岩体具有寻找斑岩型 Cu-Au 矿床的潜力。

References

- Ai Jinbiao, Ma Shengming, Zhu Lixin, *et al.* 2013. Major elements migration regularity and mass change quantification of alteration zones in Matou porphyry Mo-Cu deposit, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 32(6): 1 262~1 274 (in Chinese with English abstract).
- Blevin P L. 2004. Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid metallogeny of Eastern Australia: Implications for gold-rich ore systems[J]. Resource Geology, 54(3): 241~252.
- Brauhart W C, Huston L D and Groves I D. 2001. Geochemical mass-transfer patterns as indicators of the architecture of a complete volcanic-hosted massive sulfide hydrothermal alteration system, Panorama District, Pilbara, Western Australia[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 96(5): 1 263 ~ 1 278.
- Cao Dianhua, Wang Anjian, Huang Yufeng, *et al.* 2009. SHRIMP geo-

- chronology and Hf isotope composition of zircons from Xuejiping porphyry copper deposit, Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1 430~1 435 (in Chinese with English abstract).
- Cao K, Yang Z M, Hou Z Q, *et al.* 2021. Contrasting porphyry Cu fertilities in the Yidun arc, eastern Tibet: Insights from zircon and apatite compositions and implications for exploration[J]. *Society of Economic Geologists, Inc (SEG Special Publications)*, 24(2): 231~255.
- Cao K, Yang Z M, Mavrogenes J, *et al.* 2019. Geology and genesis of the giant Pulang porphyry Cu-Au district, Yunnan, Southwest China[J]. *Economic Geology*, 114(2): 275~301.
- Cao Kang, Xu Jifeng, Chen Jianlian, *et al.* 2014. Origin of porphyry intrusions hosting superlarge Pulang porphyry copper deposit in Yunnan Province: Implications for metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 33(2): 307~322 (in Chinese with English abstract).
- Castillo P R, Janney P E and Solidum R U. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33~51.
- Chen Bin, He Jingbo, Chen Changjian, *et al.* 2013. Nd-Sr-Os isotopic data of the Baishiquan mafic-ultramafic complex from east Tianshan, and implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 294~302 (in Chinese with English abstract).
- Chen X L, Leng C B, Zou S H, *et al.* 2021. Geochemical compositions of apatites from the Xuejiping and Disuga porphyries in Zhongdian arc: Implications for porphyry Cu mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 130: 103 954.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some morden arc magmas by of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662~665.
- Deng J, Wang Q F, Li G J, *et al.* 2014. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. *Gondwana Research*, 26: 419~437.
- Deng Jun, Yang Liqiang, Wang Changming, *et al.* 2011. Research advances of superimposed orogenesis and metallogenesis in the Sanjiang Tethys[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2 501~2 509 (in Chinese with English abstract).
- Dong Tao, Jiang Xiaojun, Li Chao, *et al.* 2021. Geochronological and geochemical characteristics of the Pushang ore-bearing porphyry in the Zhongdian area of the northwestern Yunnan and its geological significances[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(4): 871~888 (in Chinese with English abstract).
- Dong Tao, Yu Haijun, Duan Zhaoyan, *et al.* 2020. Geochronology, geochemistry, and zircon Hf isotope characteristics and their geological significances of the Gaijixia ore-bearing intrusive rocks in the Shangri-La region, NW Yunnan, SW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(5): 1 369~1 388 (in Chinese with English abstract).
- Drummond M S and 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(B13): 21 503~21 521.
- Du Zehong, Cheng Zhizhong, Yao Xiaofeng, *et al.* 2020. Element migration regularity during hydrothermal alteration in the Xiejiagou gold deposit, Eastern Shandong Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(8): 1 137~1 152 (in Chinese with English abstract).
- Fan Yuhua and Li Wenchang. 2006. Geological characteristics of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan[J]. *Geology in China*, 33(2): 352~362 (in Chinese with English abstract).
- Grant J A. 1986. The isocon diagram—A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration[J]. *Economic Geology*, 81(8): 1 976~1 982.
- Grant J A. 2005. Isocon analysis: A brief review of the method and applications[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(17~18): 997~1 004.
- Gresens R L. 1967. Composition-volume relationships of metasomatism[J]. *Chemical Geology*, 2: 47~65.
- Guo Shun, Ye Kai, Chen Yi, *et al.* 2013. Introduction of mass-balance calculation method for component transfer during the opening of a geological system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1 486~1 498 (in Chinese with English abstract).
- Hezarkhani A, Williams-Jones A E and Gammons C H. 1999. Factors controlling copper solubility and chalcopyrite deposition in the Sungun porphyry copper deposit, Iran[J]. *Mineralium Deposita*, 34(8): 770~783.
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Zhou Jirong, *et al.* 2001. Collision-orogenic processes of the Yidun arc in the Sanjiang region: Record of granites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 484~497 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, *et al.* 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1~3): 25~51.
- Hou Zengqian and Wang Tao. 2018. Isotopic mapping and deep material probing (II): Imaging crustal architecture and its control on mineral systems[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 20~41 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, *et al.* 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang

- region, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78 (1): 109~120 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhilong and Wang Liankui. 1997. The Regularity of element activity during the alteration and mineralization of lamprophyres in the Laowangzhai gold deposit, Yunnan province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(1): 11~22 (in Chinese with English abstract).
- Kelley K A and Cottrell E. 2009. Water and the oxidation state of subduction zone magmas[J]. *Science*, 325(5 940): 605~607.
- Leng Chengbiao. 2017. Genesis of Hongshan Cu polymetallic large deposit in the Zhongdian area, NW Yunnan: Constraints from LA-ICPMS trace elements of pyrite and pyrrhotite[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(6): 162~175 (in Chinese with English abstract).
- Leng Chengbiao, Chen Xilian, Zhang Jingjing, *et al.* 2020. Litho-geochemical and mineral chemical footprints of porphyry Cu±Mo±Au deposits: A review[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3 189~3 212 (in Chinese with English abstract).
- Leng C B, Cooke D R, Hou Z Q, *et al.* 2018a. Quantifying exhumation at the giant Pulang porphyry Cu-Au deposit using U-Pb-He dating [J]. *Economic Geology*, 113(5): 1 077~1 092.
- Leng C B, Gao J F, Chen W T, *et al.* 2018b. Platinum-group elements, zircon Hf-O isotopes, and mineralogical constraints on magmatic evolution of the Pulang porphyry Cu-Au system, SW China[J]. *Gondwana Research*, 62: 163~177.
- Leng C B, Wang D Z, Yu H J, *et al.* 2023. Mapping hydrothermal alteration zones with short wavelength infrared (SWIR) spectra and magnetic susceptibility at the Pulang porphyry Cu-Au deposit, Yunnan, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 59: 699~716.
- Leng C B, Zhang X C, Hu R Z, *et al.* 2012. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on the genesis of the Xuejiping porphyry copper deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 31~48.
- Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, *et al.* 2007. Geochemical characteristics of porphyry copper deposits in the Zhongdian area, Yunnan as exemplified by the Xuejiping and Pulang porphyry copper deposits[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(3~4): 414~422 (in Chinese with English abstract).
- Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, *et al.* 2008. Sulfur and lead isotope compositions of the Xuejiping porphyry copper deposit in northwest Yunnan, China: Tracing for the source of metals[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(4): 80~88 (in Chinese with English abstract).
- Li C and Ripley E M. 2009. Sulfur contents at sulfide-liquid or anhydrite saturation in silicate melts: Empirical equations and example applications[J]. *Economic Geology*, 104(3): 405~412.
- Li Jiankang, Li Wenchang, Wang Denghong, *et al.* 2007. Re-Os dating for ore-forming event in the late of Yanshan Epoch and research of ore-forming regularity in Zhongdian Arc[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2 415~2 422 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianping, Chen Huayong, Su Long, *et al.* 2019. Experimental study of high to intermediate temperature alteration in porphyry copper systems and geological implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 62: 550~570 (in Chinese with English abstract).
- Li Kaixuan, Liang Huangying, Huang Wenting, *et al.* 2019. Highly oxidized characteristics of Tongchanggou porphyry associated with skarn-porphyry Mo-Cu mineralization and key factors controlling the elemental association of porphyry deposits in northwestern Yunnan Province [J]. *Geochimica*, 48(2): 101~113 (in Chinese with English abstract).
- Li Shoukui, Chen Jianhang, Liu Xuelong, *et al.* 2023. The law of ore-forming hydrothermal alteration and element transfer enrichment in the Tongchanggou porphyry Mo-Cu deposit in Shangri-La, Northwest Yunnan[J]. *Geology in China*, 50(6): 1 745~1 763 (in Chinese with English abstract).
- Li W C, Yu H J, Gao X, *et al.* 2017. Review of mesozoic multiple magmatism and porphyry Cu-Mo (W) mineralization in the Yidun Arc, eastern Tibet Plateau[J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 795~812.
- Li W C, Zeng P S, Hou Z Q, *et al.* 2011. The Pulang porphyry copper deposit and associated felsic intrusions in Yunnan province, southwest China[J]. *Economic Geology*, 106(1): 79~92.
- Li Wenchang, Liu Xuelong, Zeng Pusheng, *et al.* 2011. The characteristics of metallogenic rocks in the Pulang porphyry copper deposit of Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 38(2): 403~414 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenchang, Yu Haijun and Yin Guanghou. 2013. Porphyry metallogenic system of Geza arc in the Sanjiang region, southwestern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1 129~1 144 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenchang and Zeng Pusheng. 2007. Characteristics and metallogenic model of the Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 34(4): 436~446 (in Chinese with English abstract).
- Li Xuefeng. 2016. Geochemistry and Ore-bearing Potential Research of the Indo-porphyries in Zhongdian Arc, SN Yunnan [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1~95 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Li X F, Dong G C, He W Y, *et al.* 2014. Geochronology and geochemistry of the porphyries in Xuejiping deposit in northwestern Yunnan: Petrogenesis and implication for mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica~English Edition*, 88(S2): 563~564.
- Lin Zhenwen, Liang Zhipeng, Zhuang Wenming, *et al.* 2023. Characteristics of wall-rock alteration and element migration of the Yuanzhuding porphyry Cu-Mo deposit, Guangdong Province, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 42(2): 325~339 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xuelong, Li Wenchang, Yin Guanghouy, *et al.* 2013. The geochronology, mineralogy and geochemistry study of the Pulang porphyry copper deposits in Geza arc of Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3 049~3 064 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xuelong, Li Wenchang, Zhang Na, *et al.* 2014. Geochronological, geochemical characteristics of Disuga ore-forming I-type granitic porphyries in the Geza arc, Yunnan Province, and their geological significance[J]. *Geological Review*, 60(1): 103~114 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xuelong, Yang Fucheng, Zhang Changzhen, *et al.* 2018. Structural characteristics and mineralization of Xuejiping porphyry copper deposit in Northwest Yunnan[J]. *Gold Science and Technology*, 26(4): 473~480 (in Chinese with English abstract).
- Loucks R R. 2014. Distinctive composition of copper-ore-forming arc magmas[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(1): 5~16.
- Maclean W H. 1990. Mass change calculations in altered rock series[J]. *Mineralium Deposita*, 25: 44~49.
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, *et al.* 2004. The alteration zoning model of porphyry copper deposit in collisional orogeny: Case studies of porphyry copper deposits in gangdise belt, Xizang(Tibet) [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 201~214 (in Chinese with English abstract).
- Mo Lei, Leng Chengbiao, Chen Xilian, *et al.* 2024a. Zircon trace elements and Hf-O isotopes of porphyries in the Zhongdian area of Yunnan Province and their implications for petrogenesis and mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(4): 1 163~1 184 (in Chinese with English abstract).
- Mo Lei, Shen Qiwu, Chen Xilian, *et al.* 2024b. Petrogeochemistry, chronology, Sr-Nd-Pb isotopic compositions, and geological significance of the ore-causative intrusion in the Langdu skarn deposit, northwest Yunnan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 44(2): 421~436 (in Chinese with English abstract).
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits[J]. *Geology*, 30(10): 915~918.
- Pang Zhenshan, Du Yangsong, Wang Gongwen, *et al.* 2009. Single-grain zircon U-Pb isotopic ages, geochemistry and its implication of the Pulang complex in Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 159~165 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian and Tang Shaohua. 2003. Age of intraplate volcanism in the back-arc area of Yidun island arc and its significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(2): 131~137 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jiangbo, Xu Jifeng, Chen Jianlin, *et al.* 2011. Geochemistry and petrogenesis of Pulang porphyries in Sanjiang region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 581~592 (in Chinese with English abstract).
- Ren Tao, Zhong Hong, Chen Jinfa, *et al.* 2011. Geochemical characteristics of the Langdu high-K intermediate-acid intrusive rocks in the Zhongdian area, northwest Yunnan province, P. R. China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(1): 43~54 (in Chinese with English abstract).
- Richards J P and Kerrich R. 2007. Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis[J]. *Economic Geology*, 102(4): 537~576.
- 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. 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: Just add water[J]. *Economic Geology*, 106(7): 1 075~1 081.
- Richards J P. 2014. The oxidation state, and sulfur and Cu contents of arc magmas: Implications for metallogeny[J]. *Lithos*, 233: 27~45.
- Rooney T O, Franceschi P and Hall C M. 2011. Water-saturated magmas in the Panama Canal region: A precursor to adakite-like magma generation? [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(3): 373~388.
- Sawka W N. 1998. REE and trace element variations in accessory minerals and hornblende from the strongly zoned MaMurry Meadows pluton, California[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 79(2~3): 157168.
- Schütte P, Chiaradia M, Barra F, *et al.* 2012. Metallogenic features of Miocene porphyry Cu and porphyry-related mineral deposits in Ecuador

- dor revealed by Re-Os, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and U-Pb geochronology [J]. *Mineralium Deposita*, 47(4): 383~410.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems [J]. *Economic Geology*, 105(1): 3~41.
- Stern R J. 2002. Subduction zones [J]. *Reviews of Geophysics*, 40: 1 012.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D and Norry M J. *Magnetism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Wang B Q, Zhou M F, Li J W, *et al.* 2011. Late Triassic porphyritic intrusions and associated volcanic rocks from the Shangri-La region, Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: Adakitic magmatism and porphyry copper mineralization [J]. *Lithos*, 127(1~2): 24~38.
- Wang Chengyang, Zhang Ziwei, Huang Jingyi, *et al.* 2023. Elements mobilization of the Early Triassic altered porphyry in the Shuangjianzishan deposit in Inner Mongolia, China [J]. *Mineral Exploration*, 14(4): 553~562 (in Chinese with English abstract).
- Wang Cuiyun, Li Xiaofeng, Xiao Rong, *et al.* 2012. Elements mobilization of mineralized porphyry rocks during hydrothermal alteration at Zhushahong porphyry copper deposit, Dexing district, South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3 869~3 886 (in Chinese with English abstract).
- Wang P, Dong G C, Zhao G C, *et al.* 2018. Petrogenesis of the Pulang porphyry complex, southwestern China: Implications for porphyry copper metallogenesis and subduction of the Paleo-Tethys Oceanic lithosphere [J]. *Lithos*, 304: 280~297.
- Wang R, Richards J P, Hou Z Q, *et al.* 2014a. Increased magmatic water content-the key to Oligo-Miocene porphyry Cu-Mo Au formation in the eastern Gangdese belt, Tibet [J]. *Economic Geology*, 109: 1 315~1 339.
- Wang R, Richards J P, Hou Z Q, *et al.* 2014b. Increasing magmatic oxidation state from Paleocene to Miocene in the Eastern Gangdese belt, Tibet: Implication for collision-related porphyry Cu-Mo-Au mineralization [J]. *Economic Geology*, 109: 1 943~1 965.
- Wang R, Richards J P, Hou Z Q, *et al.* 2015. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf-O isotope geochemistry of the Paleocene-Eocene igneous rocks in western Gangdese: Evidence for the timing of Neo-Tethyan slab breakoff [J]. *Lithos*, 224~225: 179~194.
- Wang Rui, Li Xia, Dong Cheng, *et al.* 2010. Migration regularity of major elements and REE in Wenglang structural altered rock type gold deposit, Congjiang County [J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 489~500 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shouxu, Zhang Xingchun, Qin Chaojian, *et al.* 2007. Fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit, Zhongdian, northwestern Yunnan, China [J]. *Geochimica*, 36(5): 467~478 (in Chinese with English abstract).
- Wang T R, Peng H J, Xia Y, *et al.* 2022. Magmatic processes of granitoids in the Hongniu-Hongshan porphyry-skarn copper deposit, southern Yidun Terrane, China: Evidence from mineral geochemistry [J]. *Minerals*, 12(12): 1 559.
- Wang X S, Hu R Z, Bi X W, *et al.* 2014. Petrogenesis of Late Cretaceous I-type granites in the southern Yidun Terrane: New constraints on the Late Mesozoic tectonic evolution of the eastern Tibetan Plateau [J]. *Lithos*, 208~209: 202~219.
- Wang Xinsong, Bi Xianwu, Hu Ruizhong, *et al.* 2015. S-Pb isotopic geochemistry of Xiuwacu magmatic hydrothermal Mo-W deposit in Zhongdian area, NW Yunnan: Constrains on the sources of metal [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3 171~3 188 (in Chinese with English abstract).
- Xie B, Song H, Song S W, *et al.* 2022. Geochemical, zircon U-Pb-Hf-O isotopic evidence and molybdenite Re-Os dating from the Cuojiaoma batholith, eastern Tibetan Plateau: Implications for molybdenum potential and tectonic evolution [J]. *Ore Geology Reviews*, 144: 104810.
- Xue Chuandong, Luo Shaoyong, Song Yucai, *et al.* 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological significance of Lujiacun quartz-monzonite porphyry in Shangri-la County, northwestern Yunnan Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1 845~1 855 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueqing, Hou Zengqian, Huang Dianhao, *et al.* 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian Arc [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 17~24 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Pusheng, Li Wenchang, Wang Haiping, *et al.* 2006. The Indosinian Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China: Petrology and chronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 989~1 000 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Pusheng, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 1999. Preliminary research on the intermediate-acidic porphyries and their ore-bearing in Zhongdian area, northwest Yunnan [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(Z): 359~366 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Pusheng, Wang Haiping, Mo Xuanxue, *et al.* 2004. Tectonic setting and prospects of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc belt [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(5): 535~540 (in Chinese with English abstract).

- Zeng Pusheng, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2003. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, northwestern Yunnan [J]. *Mineral Deposits*, 22(4): 393~400 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Keqing and Yang Yong. 2002. Multiple precursor systems and mass balance of alteration [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 21(2): 61~64 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiangfei, Li Wenchang, Yin Guanghou, *et al.* 2017. Geological and mineralized characteristics of the composite complex in Xiuwacu W-Mo mining district, NW Yunnan, China: Constraints by geochronology, oxygen fugacity and geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 2 018~2 036 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaodan, Yang Fan, Wu Jing, *et al.* 2018. Petrogenesis of porphyry body in the periphery of Pulang porphyry copper deposit, Yunnan [J]. *Geological Science and Technology Information*, 37(4): 39~50 (in Chinese with English abstract).
- 艾金彪, 马生明, 朱立新, 等. 2013. 安徽马头斑岩型铜矿床蚀变带常量元素迁移规律及其定量计算 [J]. *矿床地质*, 32(6): 1 262~1 274.
- 曹殿华, 王安建, 黄玉凤, 等. 2009. 中甸孤雪鸡坪斑岩铜矿含矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成 [J]. *地质学报*, 83(10): 1 430~1 435.
- 曹 康, 许继峰, 陈建林, 等. 2014. 云南普朗超大型斑岩铜矿床含矿斑岩成因及其成矿意义 [J]. *矿床地质*, 33(2): 307~322.
- 陈 斌, 贺敬博, 陈长健, 等. 2013. 东天山白石泉镁铁-超镁铁杂岩体的 Nd-Sr-Os 同位素成分及其对岩浆演化的意义 [J]. *岩石学报*, 29(6): 294~302.
- 邓 军, 杨立强, 王长明. 2011. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展 [J]. *岩石学报*, 27(9): 2 501~2 509.
- 董 涛, 江小均, 李 超, 等. 2021. 滇西北中甸地区普上含矿斑岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其地质意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 40(4): 871~888.
- 董 涛, 余海军, 段召艳, 等. 2020. 云南香格里拉盖夏含矿石英二长闪长岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 36(5): 1 369~1 388.
- 杜泽忠, 程志中, 姚晓峰, 等. 2020. 胶东谢家沟金矿热液蚀变作用过程的元素迁移规律 [J]. *地质通报*, 39(8): 1 137~1 152.
- 范玉华, 李文昌. 2006. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征 [J]. *中国地质*, 33(2): 352~362.
- 郭 顺, 叶 凯, 陈 意, 等. 2013. 开放地质体系中物质迁移质量平衡计算方法介绍 [J]. *岩石学报*, 29(5): 1 486~1 498.
- 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等. 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录 [J]. *地质学报*, 75(4): 484~497.
- 侯增谦, 王 涛. 2018. 同位素填图与深部物质探测(II): 揭示地壳三维架构与区域成矿规律 [J]. *地学前缘*, 25(6): 20~41.
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等. 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统 [J]. *地质学报*, 78(1): 109~120.
- 黄智龙, 王联魁. 1997. 云南老王寨金矿煌斑岩蚀变、矿化过程中元素活动规律 [J]. *岩石矿物学杂志*, 16(1): 11~22.
- 冷成彪. 2017. 滇西北红山铜多金属矿床的成因类型: 黄铁矿和磁黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素制约 [J]. *地学前缘*, 24(6): 162~175.
- 冷成彪, 陈喜连, 张静静, 等. 2020. 斑岩型 $\text{Cu}\pm\text{Mo}\pm\text{Au}$ 矿床的勘查标志: 岩石化学和矿物化学指标 [J]. *地质学报*, 94(11): 3 189~3 212.
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等. 2007. 云南中甸地区两个斑岩铜矿容矿斑岩的地球化学特征——以雪鸡坪和普朗斑岩铜矿床为例 [J]. *矿物学报*, 27(3~4): 414~422.
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等. 2008. 滇西北雪鸡坪斑岩铜矿 S、Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪 [J]. *矿物岩石*, 28(4): 80~88.
- 李建康, 李文昌, 王登红, 等. 2007. 中甸孤燕山晚期成矿事件的 Re-Os 定年及成矿规律研究 [J]. *岩石学报*, 23(10): 2 415~2 422.
- 李建平, 陈华勇, 苏 龙, 等. 2019. 斑岩型铜矿床高-中温蚀变过程实验研究及其地质意义 [J]. *中国科学: 地球科学*, 49(4): 611~634.
- 李凯旋, 梁华英, 黄文婷, 等. 2019. 滇西北铜厂沟夕卡岩-斑岩型 Mo-Cu 矿床成矿岩体的高氧逸度特征及区内斑岩矿床成矿元素组合差异控制因素分析 [J]. *地球化学*, 48(2): 101~113.
- 李守奎, 陈建航, 刘学龙, 等. 2023. 滇西北香格里拉铜厂沟斑岩型铜矿成矿热液蚀变与元素迁移富集规律 [J]. *中国地质*, 50(6): 1 745~1 763.
- 李文昌, 刘学龙, 曾普胜, 等. 2011. 云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体的基本特征 [J]. *中国地质*, 38(2): 403~414.
- 李文昌, 余海军, 尹光候. 2013. 西南“三江”格咱岛弧斑岩成矿系统 [J]. *岩石学报*, 29(4): 1 129~1 144.
- 李文昌, 曾普胜. 2007. 云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 34(4): 436~446.
- 李雪峰. 2016. 滇西北中甸弧印支期斑岩地球化学特征及含矿性研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1~95.
- 林振文, 梁志鹏, 庄文明, 等. 2023. 广东圆珠顶斑岩型铜矿床蚀

- 变及元素迁移特征分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 42(2): 325~339.
- 刘学龙, 李文昌, 尹光侯, 等. 2013. 云南格咱岛弧普朗斑岩型铜矿年代学、岩石矿物学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 29(9): 3 049~3 064.
- 刘学龙, 李文昌, 张 娜, 等. 2014. 云南格咱岛弧地苏嘎成矿岩体 I 型花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 60(1): 103~114.
- 刘学龙, 杨富成, 张昌振, 等. 2018. 滇西北雪鸡坪斑岩型铜矿构造特征与成矿作用研究[J]. 黄金科学技术, 26(4): 473~480.
- 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 等. 2004. 碰撞造山型斑岩铜矿蚀变分带模式——以西藏冈底斯斑岩铜矿带为例[J]. 地学前缘, 11(1): 201~214.
- 莫 雷, 冷成彪, 陈喜连, 等. 2024a. 云南中甸地区斑岩体锆石微量元素与 Hf-O 同位素特征及其对成岩成矿的启示[J]. 岩石学报, 40(4): 1 163~1 184.
- 莫 雷, 沈啟武, 陈喜连, 等. 2024b. 滇西北浪都夕卡岩矿床致矿岩体的岩石地球化学、年代学、Sr-Nd-Pb 同位素组成及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 44(2): 421~436.
- 庞振山, 杜杨松, 王功文, 等. 2009. 云南普朗复式岩体锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(1): 159~165.
- 曲晓明, 侯增谦, 唐绍华. 2003. 义敦岛弧带弧后区板内岩浆作用的时代及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 22(2): 131~137.
- 任江波, 许继峰, 陈建林, 等. 2011. “三江”地区中甸弧普朗成矿斑岩地球化学特征及其成因[J]. 岩石矿物学杂志, 30(4): 581~592.
- 任 涛, 钟 宏, 陈金法, 等. 2011. 云南中甸地区浪都高钾中酸性侵入岩的地球化学特征[J]. 矿物学报, 31(1): 43~54.
- 王承洋, 张紫薇, 黄静宜, 等. 2023. 内蒙古双尖子山矿区早三叠世蚀变斑岩的物质迁移特征研究[J]. 矿产勘查, 14(4): 553~562.
- 王翠云, 李晓峰, 肖 荣, 等. 2012. 德兴朱砂红斑岩铜矿热液蚀变作用及元素地球化学迁移规律[J]. 岩石学报, 28(12): 3 869~3 886.
- 王 睿, 李 霞, 董 成, 等. 2010. 从江翁浪地区蚀变岩型金矿床常量元素及稀土元素迁移规律研究[J]. 矿床地质, 29(3): 489~500.
- 王守旭, 张兴春, 秦朝建, 等. 2007. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿流体包裹体初步研究[J]. 地球化学, 36(5): 467~478.
- 王新松, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 2015. 滇西北中甸地区休瓦促岩浆热液型 Mo-W 矿床 S、Pb 同位素对成矿物质来源的约束[J]. 岩石学报, 31(11): 3 171~3 188.
- 薛传东, 骆少勇, 宋玉财, 等. 2010. 滇西北中甸陆家村石英二长斑岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 岩石学报, 26(6): 1 845~1 855.
- 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 等. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. 地球学报, 23(1): 17~24.
- 曾普胜, 李文昌, 王海平, 等. 2006. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征[J]. 岩石学报, 22(4): 989~1 000.
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 等. 1999. 滇西北中甸地区中-酸性斑岩及其含矿性初步研究[J]. 地球学报, 20(增刊): 359~366.
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J]. 矿床地质, 22(4): 393~400.
- 曾普胜, 王海平, 莫宣学, 等. 2004. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景[J]. 地球学报, 25(5): 535~540.
- 张可清, 杨 勇. 2002. 蚀变作用的多原岩系统及质量平衡[J]. 地质科技情报, 21(2): 61~64.
- 张向飞, 李文昌, 尹光侯, 等. 2017. 滇西北休瓦促钨钼矿区复式岩体地质及其成矿特征——来自年代学、氧逸度和地球化学的约束[J]. 岩石学报, 33(7): 2 018~2 036.
- 周晓丹, 杨 帆, 吴 静, 等. 2018. 云南普朗斑岩型铜矿床外围斑岩体成因探讨[J]. 地质科技情报, 37(4): 39~50.