

文章编号: 1000-4734(2017)04-0434-09

滇西北羊拉铜矿床里农—路农接合段 构造地球化学与找矿预测

杜丽娟^{1,2}, 黄智龙¹, 李波^{3*}, 周家喜¹, 邹国富⁴, 严再飞¹, 孙海瑞⁵

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明, 650093; 4. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院, 云南 昆明 650051; 5. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 羊拉铜矿床是金沙江构造带内的代表性铜矿床, 其矿体产出明显受到断裂及层间破碎带控制。本文重点对羊拉矿床里农—路农接合段的 3450 m 中段进行了构造地球化学研究, R 型聚类分析和因子分析表明: 该中段断裂构造岩微量元素主要表现为地层岩石微量元素组合 (Nb、Hf、Ta、Zr、Rb、V、Sc、Th、Cs、Be、Ga、Li、REE、Ba、Cr、U、Co、Tl、Ge、(Ag、In、Sn、Cu)), 中-高温成矿元素组合 (Cd、Pb、Bi、Ag、As、Sn、In、Sb、Cu、Zn、Ge、Tl、Mo、U、(Co、Ga)) 和地质意义不明元素组合 (Ni、Sr), 揭示羊拉矿床的形成可能经历了成矿前期成矿元素的初步富集和成矿期退夕卡岩化过程中成矿元素的沉淀成矿。构造地球化学异常的分布则指示了找矿预测靶区。

关键词: 构造地球化学; 找矿预测; 羊拉铜矿床; 滇西北

中图分类号: P612; P618.41

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2017.04.009

作者简介: 杜丽娟, 女, 1989 年生, 博士研究生, 从事矿物学、岩石学、矿床学及矿床地球化学研究. E-mail: dulijuan891107@163.com

Tectono-Geochemical Features and Orientation Prognosis of Concealed Ores of Yangla Cu Deposit, Yunnan Province, SW China

DU Li-juan^{1,2}, HUANG Zhi-long¹, LI Bo^{3*}, ZHOU Jia-xi¹, ZOU Guo-fu⁴, YAN Zai-fei¹, Sun Hai-rui⁵

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 4. Yunnan Copper Group, Kunming Prospecting Design Inst China Nonferrous, Kunming 650051, China; 5. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: Yangla Cu deposit is the most representative deposit in Jinshajiang tectonic belt. Its orebodies are obviously controlled by fault and interformational fracture zones. This study focuses on the tectono-geochemistry of the junction area between Linong and Lunong ore sections, and shows three element associations, i.e., the strata rock elements (Nb, Hf, Ta, Zr, Rb, V, Sc, Th, Cs, Be, Ga, Li, REE, Ba, Cr, U, Co, Tl, Ge and (Ag, In, Sn, Cu)), medium-high temperature ore-forming elements (Cd, Pb, Bi, Ag, As, Sn, In, Sb, Cu, Zn, Ge, Tl, Mo, U and (Co, Ga)) and elements with unclear geological implication (Ni and Sr), based on cluster and factor analyses. This result indicates that Yangla orebodies formed mainly by retrograde skarn alteration in the ore stage, and the ore-forming elements probably enriched in the pre-ore stage. Besides, the distribution of tectonic geochemical anomalies provides a target for further exploration engineering.

Keywords: tectono-geochemistry; prospecting prediction; Yangla Cu deposit; SW China

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 中国科学院矿床地球化学国家重点实验室第 12 个五年计划项目 (批准号: SKLOGD-ZY125-02); 国家自然科学基金项目 (批准号: 41402072); 昆明理工大学重点学科建设项目 (批准号: 14078384)

* 通讯作者, E-mail: libo8105@qq.com

Sorby 于 1863 年提出了构造地球化学的思想^[1]。自 20 世纪 50 年代以来, 诸多学者注意到物质成分与构造作用之间的联系和对应关系^[2-6]。孙岩等提出构造地球化学是研究各种构造作用与地壳化学元素的分配和迁移、分散和富集等关系的科学^[7], 是一门介于构造地质学和地球化学之间的边缘学科^[7]。在构造活动过程中, 往往伴随矿化作用的发生, 二者在时间上具有一致性, 因此, 构造地球化学一方面可探讨各种构造活动过程中元素和同位素的活化、迁移、富集或贫化规律, 并根据元素和同位素的迁移指示构造运动的性质; 另一方面可为认识矿床成因和成矿规律提供依据, 并指导找矿勘探和隐伏矿的定位预测^[8-9]。近年来, 构造地球化学在理论和方法方面均取得了显著研究进展^[9-15], 并在矿床(体)的隐伏矿预测方面取得了卓越成果^[8,16-25]。

“三江”特提斯成矿域是指怒江、澜沧江和金沙江并流的横断山脉地区, 在构造上隶属全球特提斯-喜马拉雅构造域东段, 地处冈瓦纳古陆与欧亚古陆碰撞结合带^[26-29]。因此, 西南“三江”地区地质构造复杂多样, 成矿条件极为有利, 是我国最为重要的贵金属和有色金属矿集区及成矿远景区之一^[26,30-31]。金沙江构造带位于“三江”地区中部, 其东侧为中咱微陆块, 西侧为昌都一思茅微陆块; 带内成矿地质条件优越, 是“三江”地区重要的以 Cu、Pb、Zn 为主的成矿带之一^[26]。羊拉铜矿床位于金沙江成矿带中部, 根据云南省地质调查院(2004)和云南地矿资源股份有限公司(2005)资料, 矿床远景储量超过 130 万吨, 为目前该带发现的最大且最具代表性的铜矿床。因此, 该矿床吸引了众多学者注意。前人在区域地质及岩浆岩演化^[27,30,32-40]、矿床地质特征^[41-49]、矿床地球化学^[50-55]及矿床成因认识^[45,49,51,56-58]等方面取得了大量研究成果, 为认识区域及羊拉铜矿床的成矿作用奠定了基础。此外, 随着找矿勘探和研究程度的不断提升, 羊拉铜矿床铜矿化与构造活动的关系也引起学者关注^[46,59-60]。

羊拉铜矿床的构造控矿特征显著, 区域性构造控制着本区的沉积建造、变质作用、岩浆活动及其有关矿产; 矿区范围内, 次级 NE 向“入”字型断裂将羊拉矿床错断, 形成贝吾、尼吕、江边、里农、路农、通吉格、加仁等七个矿段; 岩体接触构造及层间断裂则控制着矿体的形态(图 1)。因此, 运用构造地球化学方法对羊拉铜矿床深部和外围进行找矿预测, 具有良好的理论依据和现实基础。本文在总结羊拉铜矿床地质特征的基础上, 重点探讨矿区里农一路农接合段的构造地球化学及异常特征, 为在里农一路农矿接合段的找矿预测提供依据。

1 矿床地质概况

羊拉铜矿床在空间上被金沙江断裂和羊拉断裂限制在一个南北向的狭长区域内, 矿区自北向南由贝吾、尼吕、江边、里农、路农、通吉格和加仁等七个矿段组成; 其中, 里农、路农和江边为主要矿段, 以里农矿段规模最大(图 1)。区内出露地层主要为志留系片岩、泥盆系大理岩、变质石英砂岩及砂质板岩, 赋矿地层主要为泥盆系江边组三段(D_{1j}³)及里农组一段(D₂₊₃¹)角岩化变质石英砂岩、绢云砂质板岩夹透辉石-石榴石夕卡岩。围岩蚀变以夕卡岩化为主, 其次为角岩化、硅化、绢云母化等(图 1、2)。

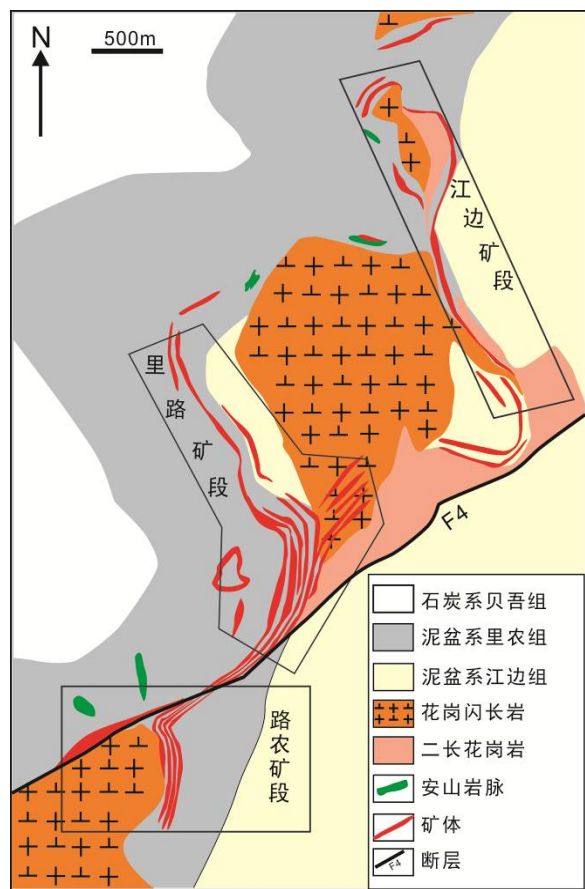


图 1 羊拉铜矿床矿区地质图(据云南铜业集团, 2004 修改)

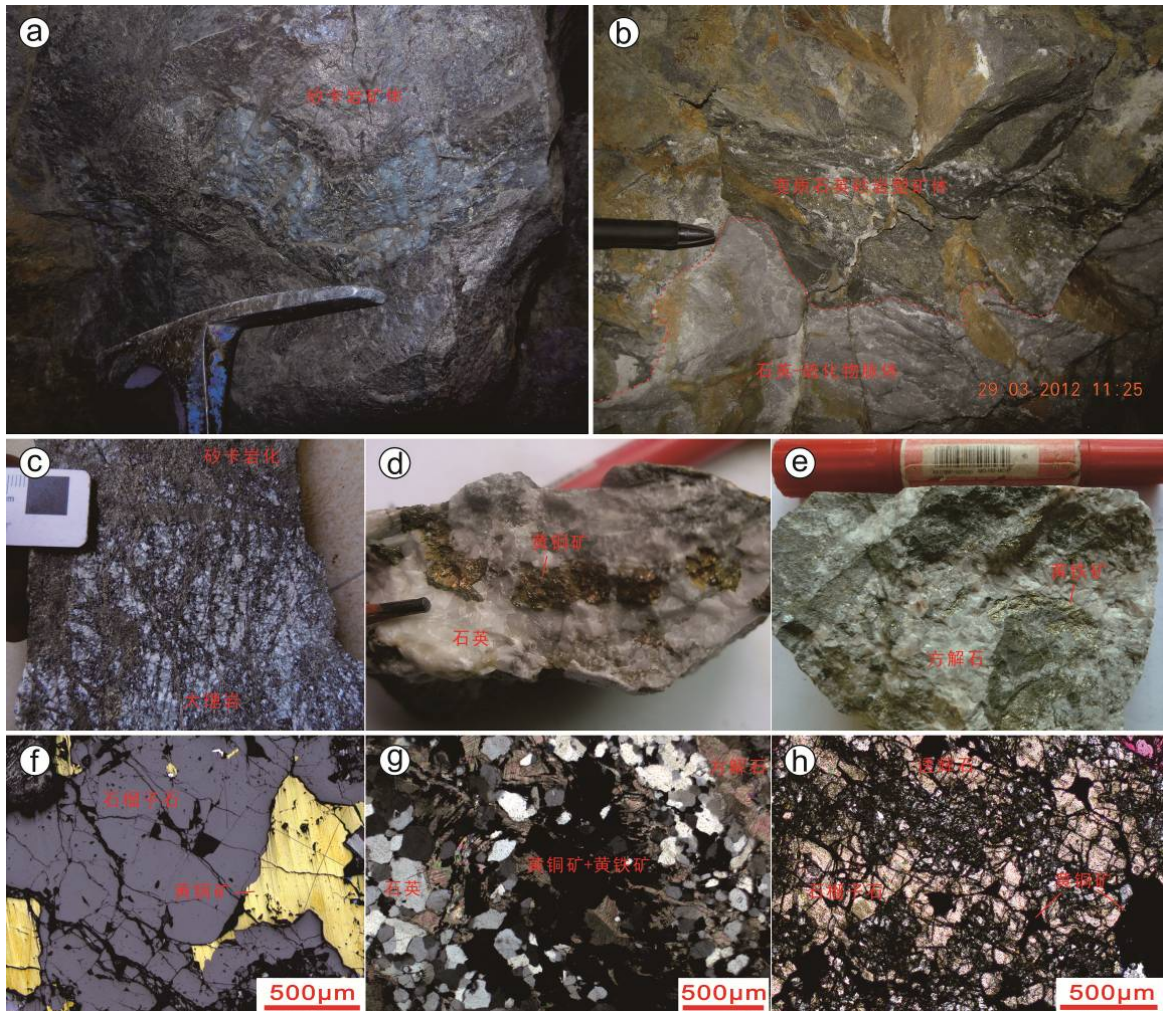
Fig. 1. Geologic map of Yangla Cu deposit (modified after Yunnan Copper Group, 2004).

矿区构造活动强烈, 除区域性金沙江断裂和羊拉断裂外, 北东向主断层(F₄)斜穿矿区中部, 为金沙江断裂的次级断裂。区内还发育一组近北东向的平移断层。此外, 次级褶皱、节理带、层间破碎带和滑脱带发育, 是重要的成矿流体运移通道和容矿构造。矿区内岩浆活动强烈, 侵入岩体分布广泛,

由北向南依次分布有贝吾、江边、里农和路农岩体，岩性主要为花岗闪长岩、石英闪长岩、(黑云母)二长花岗岩等，岩石成因类型多认为是 I 型花岗岩，具有“壳幔”混合来源，成岩年龄限定于印支期(约 230 Ma)(Rb-Sr 年龄: 227 Ma^[39]; 锆石 U-Pb 年龄: 约 232 Ma^[37-38])。此外，矿区花岗闪长岩体的侵位年龄与铜矿化年龄(辉钼矿 Re-Os 年龄: 约 232 Ma^[53,56]) 在误差范围内一致，暗示羊拉矿床铜矿化可能与花岗闪长岩体有成因联系。

羊拉铜矿床的矿体主要呈层状、似层状，少量呈脉状、透镜状产于花岗闪长岩与围岩的接触带附近以及远离岩体的层间破碎带内，严格受地层、岩体和构造破碎带控制(图 2)。矿体总体走向近南北，

向西缓倾，一般倾角 18°~35°。矿石类型多样，有夕卡岩型、角岩化变质石英砂岩及绢云砂质板岩型、构造角砾岩型和大理岩型等。矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿、磁黄铁矿、白铁矿、毒砂、磁铁矿等，其次为方铅矿、闪锌矿、辉钼矿、黝铜矿、辉铋矿、褐铁矿、铜蓝、孔雀石、自然铜、蓝铜矿等；脉石矿物有钙铁榴石、透辉石、钙铁辉石、阳起石、绿帘石、绢云母、绿泥石、透闪石、石英、方解石等。矿石结构以交代结构、填隙结构和粒状结构为主，其次为包含结构、压碎结构、似斑状结构、同心环结构、凝胶结构、纤维状变晶结构等。矿石构造主要为浸染状构造、块状构造、网脉状构造等。



a-夕卡岩矿体；b-变质石英砂岩矿体与产于层间破碎带的石英-硫化物脉；c-夕卡岩型矿石与大理岩型矿石，在二者接触部位发育夕卡岩细脉，黄铜矿、黄铁矿呈浸染状分布；d-石英-硫化物型矿石，自形粗粒黄铜矿与细粒辉钼矿、黄铁矿分布在石英脉中；e-构造角砾岩型矿石，方解石充填于构造角砾间，细粒黄铁矿浸染状分布；f-黄铜矿充填于石榴子石颗粒间隙，形成填隙结构；g-自形-半自形黄铁矿、黄铜矿与石英和方解石共生，穿插后期方解石细脉；h-黄铜矿充填于石榴子石、透辉石间隙，局部见硫化物交代石榴子石和透辉石。

图 2 羊拉铜矿床矿体和矿石特征

Fig. 2. Photographs of Yangla Cu deposit, showing the characteristics of orebodies and ores.

综合羊拉铜矿床热液蚀变特征、矿体和矿石特征以及矿物共生组合关系的研究。本文将羊拉铜矿床的形成划分为成矿前期、成矿期和表生期 3 个阶段, 其中成矿期又划分为早期成矿阶段和晚期成矿阶段 (图 3)。

成矿前期: 以形成大量无水硅酸盐矿物为特征。随着花岗闪长岩体的侵位, 围岩中碳酸盐岩等含钙质岩石与岩体中分异的岩浆流体发生交代变质作用, 形成 Ca、Mg、Al、Fe 的硅酸盐矿物, 如石榴子石、透辉石等。该阶段对应夕卡岩化过程中的进夕卡岩化蚀变阶段, 没有硫化物和石英出现。

成矿期: 以形成大量含水硅酸盐矿物、石英、方解石和铁的氧化物、铁-铜-钼的硫化物等金属矿物为特征。根据薄片观察到的切穿关系, 成矿期矿物的形成可划分为早期成矿阶段和晚期成矿阶段两个亚阶段。早期成矿阶段与退夕卡岩化蚀变相对应, 形成绿帘石、绿泥石、阳起石等大量含水硅酸盐岩矿物、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿等硫化物、磁铁矿以及石英和少量方解石。它形黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿及磁铁矿多与石英、方解石共生, 并充填于早期石榴子石、辉石等夕卡岩矿物间隙或交代早期夕卡岩矿物而形成浸染状、块状夕卡岩矿石。该阶段形成的石英和方解石多呈它形粒状、充填于夕卡岩矿物间隙中。晚期成矿阶段对应于矿区的大规模硅化和碳酸盐化, 以形成大量石英-方解石硫化物大

脉为特征。石英、方解石呈脉状产出; 黄铁矿、黄铜矿、方铅矿及闪锌矿等金属硫化物呈半自形-自形粒状结构, 浸染状分布于石英脉、方解石脉或石英-方解石脉体中。

表生期: 矿区表生作用强烈, 黄铜矿、斑铜矿等矿物被氧化形成孔雀石、蓝铜矿等矿物。

2 基本方法

2.1 构造地球化学勘查技术应用的主要依据

羊拉铜矿床明显受构造控制。区域构造控制着本区的成岩、成矿带, 南北向断裂控制着金沙江基性、超基性岩带、加仁—贝吾花岗岩带、浅成-超浅成酸性斑岩带、奔子栏—羊拉火山岩带、拱卡蛇绿混杂岩带等 5 大南北向岩浆岩带及其相关矿产的空间分布。矿区范围内的次级 NE 向“入”字型断裂将羊拉矿床错断, 形成贝吾、尼吕、江边、里农、路农、通吉格、加仁等 7 个矿段。层间断裂构造控制着层状夕卡岩和层状矿体的形态: 羊拉矿区层间断裂分布较多, 大多为向西倾缓倾斜断层, 在里农矿段深部, 随着地层变得陡倾, 里农段里农组二段 ($D_{2+3}I^2$) 与里农组一段 ($D_{2+3}I^1$) 地层接触部位, 层间断裂分布较为稳定; 这些层间断裂是成矿流体和成矿物质运移沉淀的通道和场所。岩体侵位接触构造控制着接触带附近夕卡岩型矿体的形态, 岩体

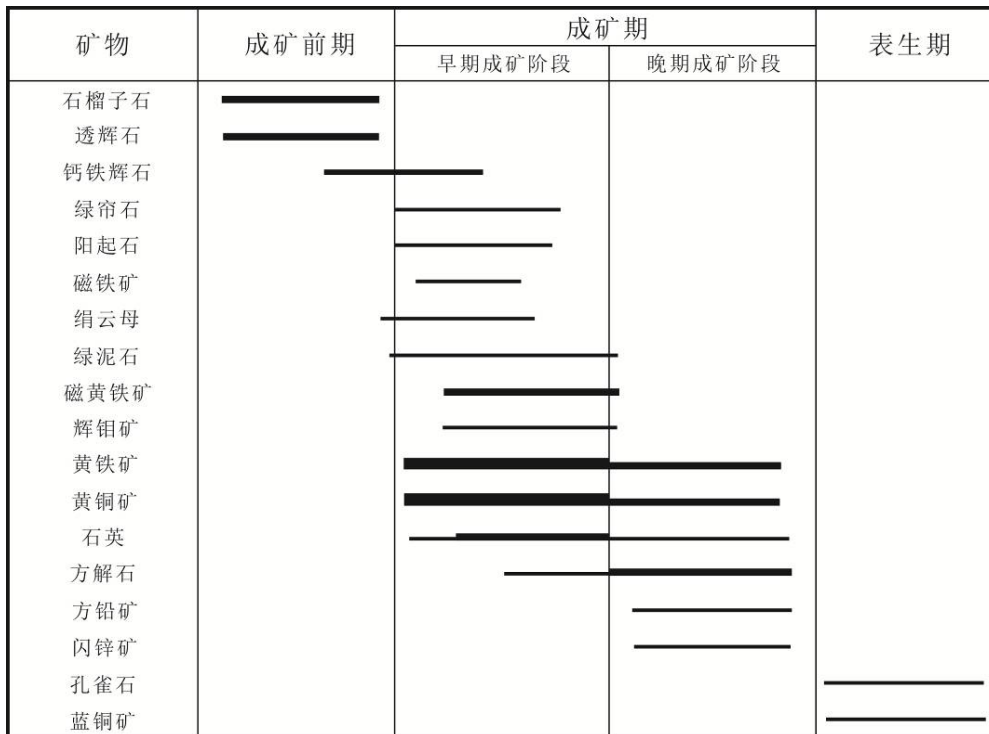


图 3 羊拉铜矿床成矿期次及主要矿物生成顺序
Fig. 3. Mineral paragenesis for Yangla Cu deposit.

内裂隙构造则控制着脉状矿体的形态。后期 NE、NW 向断裂构造控制着矿体的空间定位。因此,羊拉铜矿床构造带岩石蕴藏着丰富的成矿物质迁移富集的信息。此外,深部矿体与地表的矿化原生晕通过断裂、裂隙相联系,并具有一致性和对应性^[16]。因此,通过构造地球化学研究,能够指示深部矿致异常,为预测隐伏矿提供可靠信息。韩润生等^[16]指出,运用多元素组合可以显示单矿化不能确定的异常,而线性数据分析则可以强化矿致异常的显示。

2.2 采样及测试方法

本次研究对羊拉矿区里农矿段和路农矿段结合部位的 3450 m 中段进行了构造地球化学填图和构造地球化学样采集,采样方法见胡彬(2004)^[61]。3450 m 中段共采集 118 件样品,全部样品进行微量元素测试。构造岩样品的微量元素测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,分析仪器为 ELEMENT 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),分析精度优于 5%。实验流程如下:准确称取 200 目以下样品 50 mg,放入 Teflon 中,加 1 mL HF,在电热板上蒸干;再加入 1 mL HF 和 0.5 mL HNO₃,加盖拧紧后放入烘箱中,升温至 200 °C 分解 48 h;取出冷却后低温蒸干;加 1 mL HNO₃ 后蒸干,重复一次;最后加入 2 mL HNO₃、5 mL 蒸馏水,加盖后放入烘箱,在 130 °C 溶解 4 h 左右;取出冷却后,加入 1 mL 1 μg/mL Rh 的内标溶液,移至离心管中并稀释到 50 mL 待测。详细分析方法和流程见文献^[62]。

2.3 研究方法

聚类分析法常用于研究元素共生组合并划分元素分类,其是根据研究对象的多种特征在数值上可能存在的相似性程度,将他们聚合为多个类别的一种多元统计分析方法^[23,63-66]。R 型聚类分析可以用相关系数,定量化衡量元素的相似程度;利用相关系数,可将元素按其相似程度划分不同类别,从而揭示元素之间的本质联系^[23,67]。因子分析法是在尽量减少地质信息损失的前提下,通过对大量数据的分析浓缩,提炼出少量的新变量—因子,以便对地质对象进行简明分析^[23,68]。运用因子分析法,一方面能够归纳和提炼元素组合,并通过分析元素组合特征推算、解释成矿元素的迁移、富集规律^[23,68];另一方面,因为工业矿体的原生异常分布与矿化因子得分的异常区(构造地球化学异常区)一致,故

可用因子得分异常区特征来描述矿化的原生异常分布特征,从而推断有利成矿部位,达到隐伏矿定位预测的目的^[16]。因此,本文分别对羊拉矿区 3450m 中段构造地球化学样品中 Li、Be、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Ge、As、Rb、Sr、Zr、Nb、Mo、Ag、Cd、In、Sn、Sb、Cs、Ba、REE、Hf、Ta、Tl、Pb、Bi、Th、U 等 32 个微量元素进行聚类分析和因子分析,得到聚类分析谱系图(图 4)和方差极大旋转因子载荷矩阵(表 1)。

表 1 羊拉铜矿床 3450m 中段最大方差旋转因子载荷矩阵

Table 1. Varimax rotation factor load matrix for 3450m level of Yangla Cu deposit.

元素	因子			
	Fa ₁	Fa ₂	Fa ₃	Fa ₄
Li	<u>0.854</u>	0.312	0.109	0.117
Be	<u>0.866</u>	0.357	0.063	0.097
Sc	<u>0.912</u>	0.122	-0.277	-0.099
V	<u>0.915</u>	0.286	0.034	0.125
Cr	<u>0.786</u>	0.368	0.002	0.120
Co	<u>0.650</u>	0.464	0.112	0.041
Ni	0.212	-0.352	<u>-0.705</u>	-0.080
Cu	0.442	<u>0.758</u>	0.216	0.034
Zn	0.396	<u>0.752</u>	0.006	0.406
Ga	<u>0.864</u>	0.427	0.096	0.122
Ge	<u>0.616</u>	<u>0.665</u>	0.306	0.077
As	0.174	<u>0.790</u>	0.169	0.002
Rb	<u>0.915</u>	0.238	0.105	0.026
Sr	0.019	-0.263	-0.066	<u>-0.667</u>
Zr	<u>0.933</u>	0.283	-0.032	-0.037
Nb	<u>0.963</u>	0.146	-0.036	0.025
Mo	0.323	<u>0.558</u>	-0.070	0.280
Ag	0.477	<u>0.800</u>	-0.028	0.028
Cd	0.035	<u>0.836</u>	-0.066	0.232
In	0.473	<u>0.784</u>	0.160	0.017
Sn	0.456	<u>0.787</u>	0.204	0.041
Sb	0.349	<u>0.778</u>	0.188	0.202
Cs	0.890	<u>0.285</u>	0.089	-0.004
Ba	0.815	<u>0.189</u>	0.022	0.149
REE	0.823	<u>0.335</u>	-0.199	-0.076
Hf	0.941	<u>0.253</u>	-0.076	-0.026
Ta	0.939	<u>0.089</u>	-0.134	-0.034
Tl	0.635	<u>0.624</u>	0.130	0.159
Pb	0.071	<u>0.825</u>	-0.155	0.155
Bi	0.221	<u>0.825</u>	0.273	-0.173
Th	0.900	<u>0.222</u>	-0.013	-0.026
U	0.750	<u>0.510</u>	0.029	0.064
解释方差	14.995	<u>9.258</u>	1.099	0.995
总百分比	0.469	<u>0.289</u>	0.034	0.031

注:下划线表示 R 型因子分析得出的对应主因子元素组合中的元素。

3 结果及讨论

3.1 元素组合特征

如图4所示,在距离系数为0.86时,3450 m中段构造岩样品微量元素可分为3组元素组合:第1组 Li、Be、V、Ga、Rb、Cs、Zr、Hf、Th、Nb、Ta、Sc、REE、Cr、U、Ba、Co,代表岩石微量元素组合;第2组 Cu、Sn、Bi、Ge、Tl、Ag、In、Sb、As、Zn、Pb、Cd、Mo,代表成矿元素组合;第3组 Ni、Sr,其指示的地质意义不明。

对所有样品进行R型因子分析,当累计方差贡献率达82.33%时,可以得出4个主因子元素组合(表1):

Fa₁因子: Nb、Hf、Ta、Zr、Rb、V、Sc、Th、Cs、Be、Ga、Li、REE、Ba、Cr、U、Co、Tl、Ge²、(Ag²、In²、Sn²、Cu²);

Fa₂因子: Cd、Pb、Bi、Ag、As、Sn、In、Sb、Cu、Zn、Ge、Tl²、Mo、U²、(Co²、Ga²);

Fa₃因子: -Ni;

Fa₄因子: -Sr。

3450 m中段坑道揭露岩性主要为里农组二段灰白色大理岩,夹薄层状绢云砂质板岩;里农组一段地层少量出露,岩性为绢云砂质板岩;未揭露到花岗闪长岩。Fa₁为赋矿岩石微量元素组合,Fa₂为中-高温成矿元素组合,Fa₃和Fa₄地质意义不明。成矿元素Ag、In、Sn和Cu同时出现在Fa₁和Fa₂

两个主因子元素组合内,反映羊拉铜矿床的形成经历了成矿前期成矿元素的初步富集和成矿期退夕卡岩化过程中成矿元素的沉淀成矿作用。

3.2 构造地球化学异常

3450 m中段坑道位于里农矿段和路农矿段接合部,坑道揭露地层主要为里农组二段(D₂₊₃l²),里农组一段(D₂₊₃l¹)地层较少。该坑道内断裂发育,1处揭露到矿体、2处揭露到矿化现象(图5):①3450-C5点处,黄褐色碎裂状大理岩中发育网脉状方铅矿化,Pb品位26.31%、Zn品位2.52%;矿化沿大理岩的内部裂隙分布,不具矿体规模,为后期热液矿化作用产物;②点3450-C80处附近,大理岩破碎带内的硫化矿,矿石矿物主要为黄铁矿和黄铜矿,Cu品位0.17%~0.87%;矿体规模较小,可能为F₄断裂带内的卷入小矿体,并经历了后期构造改造作用,发育后期方解石脉,且矿体内发育成矿后断裂(产状:NE72°∠63°NW);③点3450-C116—C117处,里农组一段(D₂₊₃l¹)绢云砂质板岩内的夕卡岩型矿体,矿石具褐铁矿化、孔雀石化,矿石矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿,层间断裂发育。

Fa₂因子得分等值线异常-地质图反映的是中--高温成矿元素异常,可圈出4个异常区(图5)。I异常区对应点3450-C5处矿化位置,为单点矿化异常;II异常区对应点3450-C80附近小矿体,异常走

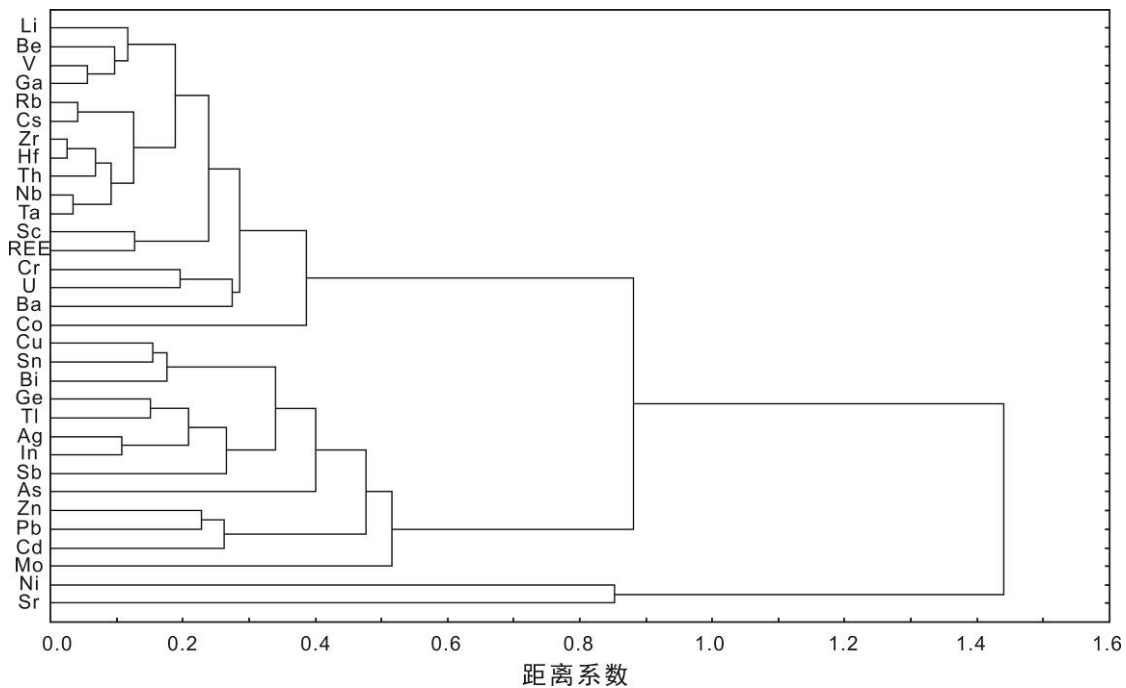


图4 羊拉铜矿床3450m中段构造岩样品R型聚类分析谱系图
Fig. 4. Dendrogram of R-cluster analysis for 3450m level of Yangla Cu deposit.

向 NNW, 向 NE 发散, 且与 III 异常区隔开, 也反映该矿体可能为构造带内卷入的小矿体。III 异常区 (47[#]—49[#]勘探线之间) 由两个异常中心组成: NW 侧异常中心对应着 3450-C116—C117 处夕卡岩型矿体, 异常总体走向 NEE, 与矿体走向一致, 异常发散方向不明显, 反映矿体产状较陡; SE 侧异常为断裂带内黄褐色断层泥, 肉眼未见矿化现象。III 异常区 (47[#]—49[#]勘探线之间) 的两个异常中心相分离, 之间疑被 NW 向断裂所错动; 坑道编录过程中, 确有多条 NW 向断裂存在; 反映矿体在被 NEE 向断裂破坏和改造作用之后, 再次遭受了 NW 向断裂活动的错动; III 异常区深部是有

利的找矿靶区。IV 异常区位于坑道 SW 端, 为 F₄ 断裂带内的黄褐色断层泥, 肉眼未见矿化现象; 异常总体走向近 SN-NNE, 南端未封闭。IV 异常区及其南部处于 F₄ 断裂带内及下盘, 具有有利的构造条件; 推测其岩性为里农组一段 (D₂₊₃l¹) 绢云砂质板岩、江边组三段 (D_{1j}³) 大理岩和路农花岗闪长岩, 具有形成夕卡岩型矿体的岩浆岩和围岩条件; 因此 IV 异常区南部地段是重要的找矿靶区 (图 5)。为验证 III 异常区, 矿山在 3390 m 中段实施坑道验证工程, 在 47+1[#]穿脉中揭露到两段夕卡岩型矿体 (图 6), 证实了本文对 III 异常区的推论。

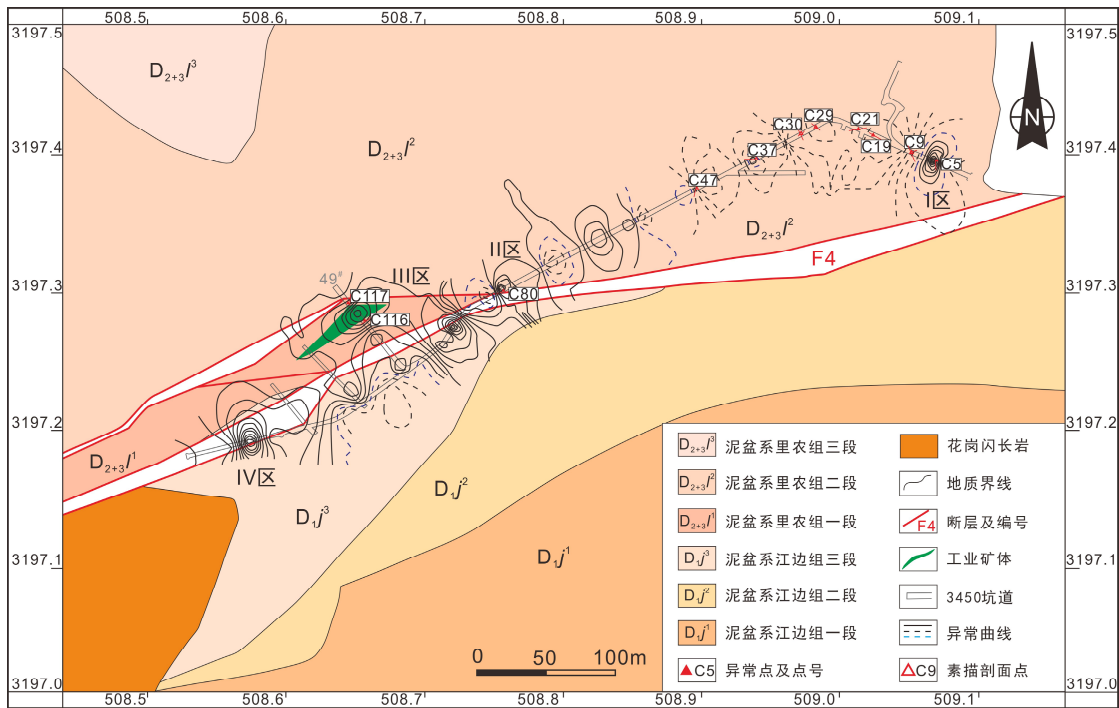
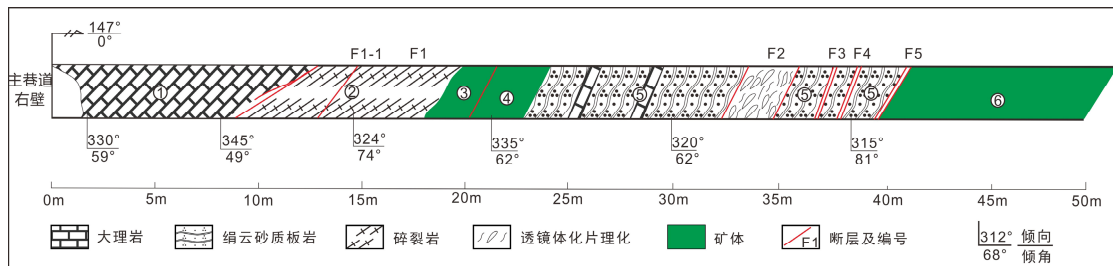


图 5 羊拉铜矿床 3450 m 中段 Fa₂ 因子异常图

Fig. 5. Tectono-geochemical anomaly map of Fa₂ factor for 3450 m level of Yangla Cu deposit.



①白色中层状粗晶大理岩, 可见方解石团块, 解理裂隙发育, 裂隙面见褐铁矿化, 表面具强碳酸盐化, 靠近裂面, 岩石较破碎。
 ②断裂破碎带, 发育多条裂面, 裂面见明显擦痕, 显示为扭压性断层, 具强褐铁矿化、孔雀石化。
 ③氧化矿, 呈红褐色, 表面见孔雀石化、方解石化及强褐铁矿化。
 ④硫化物矿体, 呈稠密浸染状产出, 矿体中见方解石脉, 脉宽 1~2 cm, 赋矿岩性为夕卡岩化绢云砂质板岩。
 ⑤灰-浅灰绿色绢云砂质板岩, 局部夹大理岩, 见零星矿化, 发育多处断裂。
 ⑥铜矿体, 呈块状、稠密浸染状产出, 表面见孔雀石化、褐铁矿化、方解石化, 表面见团块状方解石。

图 6 羊拉铜矿床 3390 m 中段 47+1[#]坑道编录图

Fig. 6. Geological record compiling map for 47+1[#] exploration line in 3390 m level of Yangla Cu deposit.

4 结论

(1)中高温成矿元素组合异常能较好地反映矿体的形态,且异常形态与断裂构造产状一致,反映矿体产出明显受构造的控制。

(2)构造地球化学异常可以提供重要的找矿靶区,3450 m 中III异常区的深部和IV异常区的南部地段为重要的找矿靶区,前者已在深部的3390 m 中段

得到了证实,后者还有待后续勘查工程的验证。

(3)构造地球化学勘查技术可作为隐伏矿定位预测的主要技术之一,可在找矿勘查中发挥重要作用。

致谢:野外工作得到云南迪庆矿业开发有限责任公司地质人员的大力支持与帮助,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Sorby H C. On the direct correlation of mechanical and chemical forces[J]. Proceedings of Royal Society, 1863,12: 538-550.
- [2] Fyfe W S. Geochemistry of Solids: An Introduction[M]. New York: McGraw-hill, 1964.
- [3] Beach A, Fyfe WS. Fluid transport and shear zones at Scourie, Southerland: Evidence of overthrusting?[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1972, 36(3): 175-180.
- [4] Beach A. A geochemical investigation of pressure and the formation solution and the formation of veins in a deformed greywacke[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1974, 46(1): 61-68.
- [5] Durney D W. Early theories and hypotheses on pressure-solution-redeposition[J]. Geology, 1978,6(6): 369-372.
- [6] 涂光炽. 构造与地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 1984, 3(1): 1-2.
- [7] 孙岩, 戴春森. 论构造地球化学研究[J]. 地球科学进展, 1993, 8(3): 1-6.
- [8] 李波, 韩润生, 文文明, 等. 滇东北巧家松梁铅锌矿床构造特征及构造地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 855-865.
- [9] 韩润生. 隐伏矿定位预测的矿田(床)构造地球化学方法[J]. 地质通报, 2005, 24(10-11): 978-984.
- [10] 吕古贤, 孙岩, 刘德良, 等. 构造地球化学的回顾与展望[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(4): 479-494.
- [11] 吴学益, 钟德义, 梁宁, 等. 构造地球化学高温高压模拟试验及其初步结果[J]. 大地构造与成矿学, 1984(3): 251-260.
- [12] 吴学益, 钟德义, 周文华. 构造地球化学(构造成矿)实验研究[J]. 地球与环境, 1986(11): 65-68.
- [13] 孙岩. 断裂构造地球化学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [14] 韩润生, 陈进, 高德荣, 等. 构造地球化学在隐伏矿定位预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2003, 39(6): 25-28.
- [15] 钱建平. 构造地球化学找矿方法及其在微细浸染型金矿中的应用[J]. 地质与勘探, 2009, 45(2): 60-67.
- [16] 韩润生, 陈进, 李元, 等. 云南会泽麒麟厂铅锌矿床构造地球化学及定位预测[J]. 矿物学报, 2001, 21(4): 667-673.
- [17] 邓军, 孙忠实, 杨立强, 等. 吉林夹皮沟金矿带构造地球化学特征分析[J]. 高校地质学报, 2000, 6(3): 405-411.
- [18] 马德云, 韩润生. 北衙金矿床构造地球化学特征及靶区优选[J]. 地质与勘探, 2001, 37(2): 64-68.
- [19] Han R S, Liu C Q, Huang Z L, et al. Geological features and origin of the Huize carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag) District, Yunnan, South China[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31(1-4): 360-383.
- [20] 李波. 云南巧家松梁铅锌矿床地质特征及构造地球化学异常模式[D]. 昆明: 昆明理工大学(硕士论文), 2008:1-123.
- [21] 钱建平, 孙涛, 陈宏毅, 等. 山东招远市前孙家金矿构造控矿规律和构造地球化学找矿[J]. 地质与勘探, 2010, 46(1): 10-19.
- [22] 高星. 胶西北典型金矿控矿构造及构造地球化学异常分析[D]. 长沙: 中南大学(硕士论文), 2012, 1-96.
- [23] 畅捷. 青海省加吾金矿构造地球化学特征及深部成矿潜力分析[D]. 西安: 长安大学(硕士论文), 2015, 1-123.
- [24] 王明志, 韩润生, 王雷, 等. 滇西北北衙金矿床万洞山—笔架山矿段构造地球化学特征[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 238-248.
- [25] 韩润生. 构造地球化学近十年主要进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(2): 198-203.
- [26] 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [27] 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [28] 刘增乾, 李兴振, 叶庆同, 等. 三江地区构造岩浆带的划分与矿产分布规律[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [29] 李兴振. 西南三江地区特提斯构造演化与成矿: 总论[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [30] Deng J, Wang C M, Santosh M. Orogenesis and metallogensis in the Sanjiang Tethyan domain, China: Preface[J]. Gondwana Research, 2014, 26(2): 415-418.
- [31] Hou Z Q, Zhang H R. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 70: 346-384.
- [32] Deng J, Wang Q F, Li G J, et al. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. Gondwana Research, 2014(2): 419-437.
- [33] Wang X F, Metcalfe I, Jian P, et al. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(6): 675-690.
- [34] 李定谋, 王立全, 须同瑞, 等. 金沙江构造带铜金矿成矿与找矿[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [35] 王立全, 潘桂棠, 李定谋, 等. 金沙江弧—盆系时空结构及地史演化[J]. 地质学报, 1999, 73(3): 206-218.

- [36] Yang X A, Liu J J, Li D P, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the linong granitoid and its relationship to Cu mineralization in the Yangla Copper Deposit, Yunnan, China[J]. Resource Geology, 2013, 63(2): 224-238.
- [37] Zhu J J, Hu R Z, Bi X W, et al. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of granitoids in the Jinshajiang suture zone, SW China: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the Paleo-Tethys Ocean[J]. Lithos, 2011, 126(3-4): 248-264.
- [38] 高睿, 肖龙, 何琦, 等. 滇西维西-德钦-带花岗岩年代学、地球化学和岩石成因[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2010, 35(2): 186-200.
- [39] 魏君奇, 战明国, 路远发, 等. 滇西德钦羊拉矿区花岗岩类地球化学[J]. 华南地质与矿产, 1997(4): 50-56.
- [40] 王彦斌, 韩娟, 曾普胜, 等. 云南德钦羊拉大型铜矿区花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1833-1844.
- [41] 何龙清, 战明国, 路远发. 滇西羊拉铜矿区层序地层划分及赋矿层位研究[J]. 华南地质与矿产, 1998(3): 37-41.
- [42] 李石磊, 苏昌学, 燕永锋, 等. 羊拉铜矿矿床地质特征与成矿规律的研究[J]. 矿业快报, 2008, 24(12): 27-30.
- [43] 路远发, 战明国, 陈开旭, 等. 羊拉地区含矿夕卡岩流体包裹体特征及其成因意义[J]. 矿床地质, 1998, 17(4): 331-341.
- [44] 潘家永, 张乾, 马东升, 等. 滇西羊拉铜矿区硅质岩特征及与成矿的关系[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(1): 10-16.
- [45] 曲晓明, 杨岳清, 李佑国. 从赋矿岩系岩石类型的多样性论羊拉铜矿的成因[J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 431-442.
- [46] 魏君奇, 陈开旭, 魏福玉. 滇西羊拉地区构造-岩浆-成矿作用分析[J]. 华南地质与矿产, 2000(1): 59-62.
- [47] 杨镇, 杨立强, 刘江涛, 等. 云南羊拉铜矿床磁黄铁矿标型矿物学特征及成矿意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2669-2680.
- [48] 赵江南. 滇西羊拉铜矿床地质地球化学特征及深部找矿预测[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉)(博士论文), 2012: 1-161.
- [49] 朱经经. 滇西北羊拉铜矿成矿地质背景及成因机制[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所(博士论文), 2012: 1-185.
- [50] Du L J, Li B, Huang Z L, et al. Carbon-oxygen isotopic geochemistry of the Yangla Cu skarn deposit, SW China: Implications for the source and evolution of hydrothermal fluids[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 88: 809-821.
- [51] Yang X A, Liu J J, Han S Y, et al. Isotope geochemistry and its implications in the origin of Yangla copper deposit, western Yunnan, China[J]. Geochemical Journal, 2014, 48(1): 19-28.
- [52] Yang X A, Liu J J, Cao Y, et al. Geochemistry and S, Pb isotope of the Yangla copper deposit, western Yunnan, China: Implication for ore genesis[J]. Lithos, 2012, 144-145: 231-240.
- [53] Zhu J J, Hu R Z, Richards J P, et al. Genesis and magmatic-hydrothermal evolution of the Yangla skarn Cu deposit, Southwest China[J]. Economic Geology, 2015, 110(3): 631-652.
- [54] 陈思尧, 顾雪祥, 程文斌, 等. 滇西北羊拉铜矿床稳定同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1290-1300.
- [55] 路远发, 陈开旭, 黄惠兰. 云南羊拉地区不同类型铜矿床流体包裹体研究[J]. 地质科技情报, 2004, 23(2): 13-20.
- [56] Yang X A, Liu J J, Zhai D G, et al. Geochemistry of the Yangla volcanic rocks and its relationship to Cu mineralization in the Yangla copper deposit, western Yunnan, China[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2012, 243-244: 38-44.
- [57] 路远发, 陈开旭, 战明国. 羊拉地区含矿夕卡岩成因的地球化学证据[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1999, 24(3): 298-303.
- [58] 杨喜安. 滇西羊拉成矿带叠加成矿作用及找矿模式[D]. 北京: 中国地质大学(北京)(博士论文), 2012: 1-155.
- [59] 甘金木, 战明国, 余凤鸣, 等. 滇西德钦羊拉铜矿区构造变形特征及其控矿作用分析[J]. 华南地质与矿产, 1998(4): 59-65.
- [60] 余凤鸣, 战明国, 甘金木, 等. 滇西羊拉大型铜矿床石英构造岩微观构造与动力学分析[J]. 中国区域地质, 2000, 19(1): 92-100.
- [61] 胡彬. 云南昭通毛坪铅锌矿床地质地球化学特征及隐伏矿预测[D]. 昆明: 昆明理工大学(硕士论文), 2004: 1-139.
- [62] Liang Q, Jing H, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Talanta, 2000, 51(3): 507-513.
- [63] 刘如英, 李同军, 童霆. 区域化探中应用因子分析方法的探讨[J]. 物探与化探, 1988, 12(3): 182-192.
- [64] 李文昌, 李丽辉, 尹光候. 西南三江南段地球化学数据不同方法处理及应用效果[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 501-510.
- [65] 陈志军, 成秋明, 陈建国. 利用样本排序方法比较化探异常识别模型的效果[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2009, 34(2): 353-364.
- [66] 胡以铿. 地球化学中的多元分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [67] 王崇云. 地球化学找矿基础[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [68] 钱建平, 黄德阳, 谢彪武, 等. 西藏谢通门县斯弄多铅锌矿区矿床地质特征和构造地球化学找矿研究[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(1): 29-41.