

# 川南早三叠世砂页岩型铜矿床沉积环境、成矿模式及对峨眉山幔柱成矿系统的补充\*

文俊<sup>1,2,3</sup>, 张航飞<sup>1,2</sup>, 刘治成<sup>4</sup>, 赵伟<sup>1</sup>, 竹合林<sup>1,2</sup>, 赵俊兴<sup>3</sup>, 刘洪<sup>5,6</sup>, 李复勇<sup>1</sup>,  
赵凯莉<sup>1</sup>, 何永刚<sup>1</sup>, 张金元<sup>1,2</sup>, 钟强生<sup>1</sup>

(1 四川省第七地质大队, 四川 乐山 614000; 2 四川省地质矿产勘查开发局张金元劳模(专家)创新工作室, 四川 乐山 614000; 3 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 4 四川省国土资源科学技术研究院, 四川 成都 610045; 5 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 6 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

**摘要** 峨眉山幔柱一直以来是国内外学者的研究热点之一, 近年来对峨眉山幔柱的成矿效应的关注度持续升高, 但对提供成矿物源的矿床类型研究较少, 特别是对砂页岩型铜矿的研究极少, 砂页岩型铜矿稳定分布在沐川西部及西南部的飞仙关组底部, 以往开展了大量的勘查工作, 取得了较好的找矿成果, 但其成矿物质来源还有较大争议。为厘清沐川地区飞仙关组底部砂页岩型铜矿床的富集规律、沉积环境和成因机制, 本研究开展了野外实地调查、矿物学、岩相古地理与岩石地球化学等系统性研究, 探讨其物源、富集规律、沉积环境, 建立了成矿模式。研究结果表明, 沐川地区砂页岩型铜矿体产于早三叠世飞仙关组底部的一套灰绿色细碎屑岩中, 主要矿石类型有粉砂质条带黏土岩型铜矿、泥质条带粉砂岩型铜矿、粉砂岩型铜矿和细砂岩型铜矿, 矿石矿物以黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿为主; 沐川地区飞仙关组底部的沉积相属于有障壁型海岸相潮坪亚相, 可识别出潮上泥坪微相、潮间混合坪微相、潮下砂坪微相和潮渠微相 4 种微相, Cu 元素主要富集于粉砂质条带黏土岩和泥质条带粉砂岩等水动力条件较弱的潮间混合坪微相中, 铜的富集严格受岩相古地理及沉积相的控制; Cu 元素主要来源于峨眉山高钛玄武岩, 西部的康滇古陆是主要的物源区; 沐川地区飞仙关组底部砂页岩型铜矿属同生沉积型矿床, 其成矿模式可分为峨眉山玄武岩喷溢(矿源层形成)阶段、风化剥蚀搬运阶段、沉积富集阶段和成岩保存阶段。上述成果, 对西南地区进一步实现战略性矿产找矿突破和补充完善峨眉山幔柱成矿系统具有重要意义。

**关键词** 地质学; 砂页岩型铜矿; 峨眉山幔柱; 成矿模式; 沉积环境; 岩石地球化学; 飞仙关组; 沐川

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

## Sedimentary environment and metallogenic model of Early Triassic sandstone-shale-hosted copper deposits in southern Sichuan and its supplement to Emeishan mantle plume metallogenic system

WEN Jun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG HangFei<sup>1,2</sup>, LIU ZhiCheng<sup>4</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, ZHU HeLin<sup>1,2</sup>, ZHAO JunXing<sup>3</sup>, LIU Hong<sup>5,6</sup>,  
LI FuYong<sup>1</sup>, ZHAO KaiLi<sup>1</sup>, HE YongGang<sup>1</sup>, ZHANG JinYuan<sup>1,2</sup> and ZHONG QiangSheng<sup>1</sup>

(1 The 7th Geological Brigade of Sichuan, Leshan 614000, Sichuan, China; 2 Zhang Jinyuan Model Worker(Expert) Innovation Studio of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Leshan 614000, Sichuan, China; 3 Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 4 Sichuan Institute of Territorial Science and Technology, Chengdu 610045, Sichuan, China; 5 Chengdu Geological Survey Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 6 College of Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

\* 本文得到四川省自然资源厅省政府性投资地质勘查项目(编号: DZ202002)和四川省地质矿产勘查开发局张金元劳模(专家)创新工作室科技项目(编号: 207 队科-2022-2 号)资助

第一作者简介 文俊, 男, 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要从事战略性关键金属矿产调查研究。Email: wjun9936@sina.com

收稿日期 2022-08-17; 改回日期 2023-04-02。秦思婷编辑。

### Abstract

The Emeishan mantle plume has always been one of the research hotspots of scholars at home and abroad. Increasing attention to the metallogenic effect of the Emeishan mantle plume in recent years, but there are few studies on the types of deposits providing metallogenic sources, in particular, there are very few studies on sandstone-shale-hosted copper deposits. Sandstone-shale-hosted copper deposits are stably distributed at the bottom of the Feixianguan Formation in the West and Southwest of Muchuan. In the past, a lot of exploration work has been carried out and good prospecting results have been achieved, but ore-forming material sources is still controversial. In order to clarify the enrichment regularity, sedimentary environment and genetic mechanism of the sandstone-shale-hosted copper deposit at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area, this study carried out systematic studies such as field investigation, mineralogy, lithofacies paleogeography and Lithogeochemistry, discussed its ore-forming material sources, enrichment regularity, sedimentary environment, and established metallogenic model. The results show that the sandstone-shale-hosted copper ore body in Muchuan area occurs in a set of grey-green fine clastic rocks at the bottom of the Early Triassic Feixianguan Formation. The main ore types are silty strip clay rock type copper ore, pelitic striped siltstone type copper ore, siltstone type copper ore and fine sandstone type copper ore, and the ore minerals are mainly chalcopyrite, bornite and chalcocite. The sedimentary facies at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area belongs to the tidal flat subfacies of the barrier coastal facies, which can be identified as four microfacies: Supratidal mud flat microfacies, intertidal mixed flat microfacies, subtidal sand flat microfacies and tidal channel microfacies. The copper element is mainly enriched in the intertidal mixed flat microfacies with weak hydrodynamic conditions such as silty strip clay rock and argillaceous strip siltstone. The enrichment of copper is strictly controlled by lithofacies palaeogeography and sedimentary facies. The copper element mainly comes from the Emeishan high titanium basalt, and the Kangdian Ancient Land in the west is the main provenance area. Sandstone-shale-hosted copper deposit at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area belongs to syngenetic sedimentary deposit. Its metallogenic model can be divided into four stages: Emeishan basalt flooding(source bed formation) stage, weathering and denudation stage, sedimentary enrichment stage and diagenetic preservation stage. The above results are of great significance to further realize the strategic mineral prospecting breakthrough and supplement and improve the metallogenic system of the Emeishan mantle plume in southwestern China.

**Key words:** geology, sandstone-shale-hosted copper ore, Emeishan mantle plume, metallogenic model, sedimentary environment, lithogeochemistry, Feixianguan Formation, Muchuan

1929年,赵亚曾将在峨眉山地区发现的一套厚度超过400 m的基性火山岩(其下伏地层为茅口组灰岩,上覆地层为宣威组/龙潭组煤系地层)命名为峨眉山玄武岩之后(四川省地质矿产局,1997),国内外学者对其开展了大量研究,直到21世纪初期地幔柱成因被学者们广泛接受(徐义刚,2002;何斌等,2003;张招崇,2009)。在加里东晚期—海西早期,峨眉地幔柱的快速上涌,引发了大规模的岩浆侵入和火山喷发事件,形成了广泛分布在四川、云南、贵州等相邻地区的溢流玄武岩及主要分布在攀西地区的镁铁-超镁铁质岩体和中酸性碱性岩体(张云湘等,1988),其分布面积超过 $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ (何

斌等,2003),被国际地学界一致称为峨眉山大火成岩省(ELIP)。

峨眉山大火成岩省(ELIP)一直以来是国内外学者的研究热点之一,特别是对其喷发时限、分布空间、高低钛玄武岩成因、层状岩体与玄武岩的关系、成矿效应、生物大灭绝以及与地幔柱的成因联系等方面开展了大量的研究,并取得了丰硕的成果。但从总体上来看,学者们对峨眉山大火成岩省的成矿效应的研究相对偏少。在大火成岩省成矿效应方面,张招崇等(2022)按照成矿作用是否发生在地幔柱事件的时间范围内,将成矿作用划分为“与地幔柱直接相关的成矿作用”和“与地幔

柱间接相关的成矿作用”2种类型。对于峨眉山大火成岩省而言,与峨眉山地幔柱直接相关的矿床包括岩浆矿床和与岩浆作用有关的热液矿床2个大类,前者包括与镁铁质-超镁铁质岩浆硫化物熔离作用有关的Cu-Ni-PGE岩浆硫化物矿床、与镁铁质-超镁铁质岩浆结晶分异作用有关的V-Ti-Fe岩浆氧化物矿床及与溢流玄武岩火山喷气作用有关的火山岩型Fe矿床(王焰等,2017),后者为与正长岩脉有关的Nb-Ta-Zr-REE矿床(王汾连等,2013);与峨眉山地幔柱间接相关的矿床包括“提供成矿物源”、“提供运矿通道”和“提供成矿环境和沉淀场所”3种类型(张招崇等,2022),但学者们对这些矿床类型及与峨眉山地幔柱的成因联系的研究甚少。尤其是提供成矿物源的矿床类型在与峨眉山地幔柱间接相关的矿床之中占主导地位,学者们目前对提供成矿物源的矿床类型的归纳和总结较为零散。

与峨眉山地幔柱有关的内生成矿作用和外生成矿作用的总和,可以称之为“峨眉山地幔柱成矿系统”。综合各类文献可以看出,峨眉山地幔柱成矿系统孕育了丰富的战略性关键矿产,矿床类型多样,成矿潜力大,成矿效应显著。值得一提的是,峨眉山玄武岩喷发形成以后,扬子陆块西缘处于持续抬升阶段,康滇古陆成为高地剥蚀区,为康滇古陆东部的沉积盆地提供了丰富的沉积物源(缪宇等,2021),同时也孕育了矿产。已有研究显示,在峨眉山玄武岩形成过程中铜已有初步富集,在很多地区的玄武岩中肉眼可见零星分布的自然铜矿物(Zhang et al., 2006),具有铜高背景值的峨眉山玄武岩为沉积型铜矿的形成提供了大量的成矿物质。统计资料显示,沉积型铜矿在四川铜矿床中占主导地位,为四川省铜矿床的第二大矿床类型(李仕荣等,2016)。尤其是产出于飞仙关组底部的砂页岩沉积型铜矿稳定分布在乐山沙湾-峨眉山-沐川-马边-美姑一带,特别是沐川地区显示出较好的成矿地质条件,现有一座生产矿山和3处探矿权,具有良好的找矿潜力。对于此类型的沉积型铜矿的勘查评价最早可以追溯到20世纪60年代,四川省地质局乐山地质队(1961)在沐川地区五指山背斜开展了铜矿勘查工作,明确了沐川地区具有较大的铜矿找矿潜力;2009年~2012年,四川省地矿局二零七地质队(2012)完成了沐川县喻家坪铜矿详查工作,累计施工钻孔9505.44 m,查明控制和推断的铜

金属资源量61 568 t,伴生Ag金属资源量49 t,目前该矿山为正常生产矿山,直接证实了沐川地区砂页岩型铜矿床具有可观的经济开采价值。2008~2019年,四川省地矿局二零七地质队(2019)陆续开展了沐川县周家湾铜矿普查和生基坪铜矿详查,累计施工钻孔31 425.68 m,研究认为沐川地区砂页岩型铜矿具有层位稳定、分布广泛、厚度和品位变化小的特点,预测沐川地区五指山背斜铜金属潜在资源可达100万t。由此可见,沐川地区铜矿找矿潜力较大,以往的地质工作主要是侧重于勘查评价,而对沐川地区砂页岩型铜矿的富集规律、物源、成因的研究较欠缺,使铜矿勘查工作缺乏理论指导。为此,本次以沐川地区飞仙关组底部含铜地层为研究对象,通过野外实地调查和样品采集及测试分析工作,结合矿物学特征、岩石地球化学特征,探讨其沉积环境、物源和成因,旨在补充和完善峨眉山地幔柱成矿系统,对实现铜矿找矿突破具有指导意义。

## 1 区域地质背景

沐川地区位于扬子陆块西缘(图1a),地层区划属扬子地层区,上扬子地层分区之峨嵋地层小区。区域上,沐川地区及周边地区广泛分布二叠纪、三叠纪、侏罗纪、白垩纪地层,由古到新主要发育上二叠统峨眉山玄武岩组、宣威组、下三叠统飞仙关组、铜街子组、嘉陵江组、中三叠统雷口坡组、上三叠统须家河组、下侏罗统自流井组、中侏罗统沙溪庙组、上侏罗统遂宁组、蓬莱镇组、下白垩统夹关组及零星分布第四系。

从地质演化历史来看,扬子陆块在晚二叠世时期发生了峨眉山地幔柱快速上涌,发生了玄武岩岩浆喷溢,在西南地区形成了广泛分布的玄武岩(He et al., 2006)。此时,康滇古陆形成了玄武岩堆积而成的高地,后受东吴运动影响,扬子陆块西缘大部分区域处于隆升状态,遭受了风化剥蚀作用,风化产物被搬运至古陆东部地区,为古陆东部地区的沉积地质体提供物源,便由老到新形成了宣威组和飞仙关组等地层(邵龙义等,2013)。伴随着玄武岩的风化剥蚀作用,玄武岩中的含铜物质被解析了出来,随着水流被带到了古陆东部的沉积盆地中,其中飞仙关组一段(卡以头段,即飞仙关组底部)形成了含铜地层(图1b)。

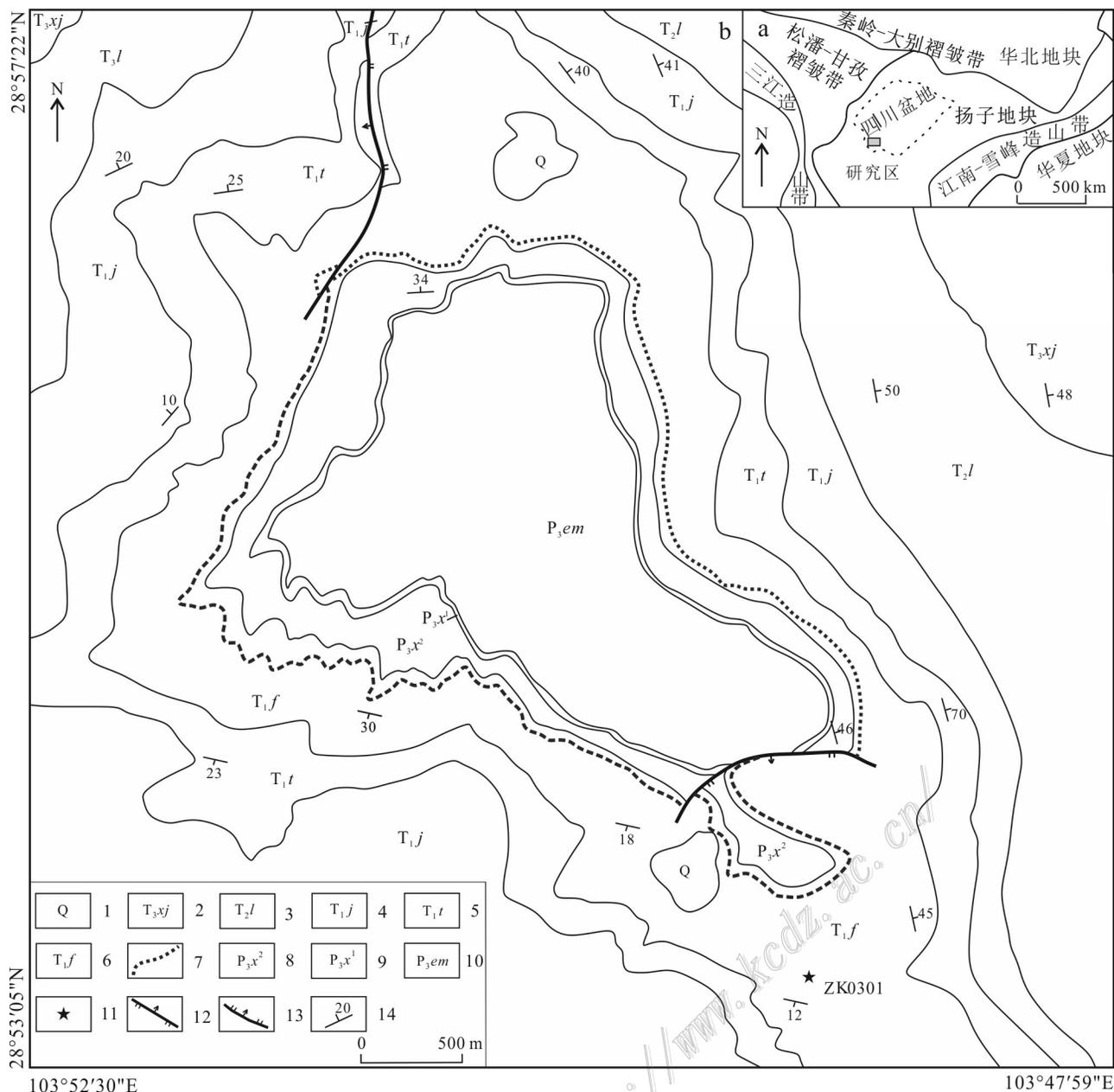


图 1 沐川地区构造位置图(a, 据文俊等, 2021 修改)和沐川地区铜矿区地质图(b)

1—第四系; 2—上三叠统须家河组; 3—中三叠统雷口坡组; 4—下三叠统嘉陵江组; 5—下三叠统铜街子组; 6—下三叠统飞仙关组; 7—铜矿体; 8—上二叠统宣威组二段; 9—上二叠统宣威组一段; 10—上二叠统峨眉山玄武岩; 11—采样点位置; 12—逆断层; 13—正断层; 14—地层产状

Fig.1 Tectonic setting of Muchuan area (a, modified after Wen et al., 2021) and geological map of copper deposit in Muchuan area (b)

1—Quaternary; 2—Xujiahe Formation of Upper Triassic; 3—Leikoupo Formation of Middle Triassic; 4—Jialingjiang Formation of Lower Triassic; 5—Tongjiezi Formation of Lower Triassic; 6—Feixianguan Formation of Lower Triassic; 7—Copper ore body; 8—The second member of Xuanwei Formation of Upper Permian; 9—The first member of Xuanwei Formation of Upper Permian; 10—Emeishan basalt of Upper Permian; 11—Location of sampling points; 12—Reverse fault; 13—Normal fault; 14—Stratum occurrence

## 2 样品采集与测试

样品采集于沐川县沐溪镇庙坪村 ZK0301 钻孔,

采集对象为铜矿体及顶底板岩芯, 采集点位如图 1b 及图 2a 所示。岩芯采样是在切割 1/2 后, 用清水洗净后再装袋, 以保证样品干净, 采集样品沿钻孔剖面自上而下顺序排号。测试主量元素分析 12 件, 微量

元素分析12件,稀土元素分析12件,在澳实分析检测(广州)有限公司完成。选取部分样品进行薄片及光片磨制,通过偏光显微镜镜下观察并照相。

主微量稀土元素的测试方法如下:样品碎样至200目以下,采用荷兰生产的PANalytical PW2424型X射线荧光光谱仪测量主量元素。首先,称取2份试样,一份试样中加入含硝酸锂的硼酸锂-硝酸锂熔融助熔剂,充分混合后,高温熔融,熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后,再用X射线荧光光谱仪分析主量元素含量;另一份试样放入马弗炉中,于1000°C灼烧,冷却后称重,样品加热前后的重量差即是烧失量,采用美国生产的Agilent 5110型电感耦合等离子体发射光谱与Agilent 7900型电感耦合等离子体质谱测量微量元素,试样用高氯酸、硝酸、氢氟酸和盐酸消解后,用稀盐酸定容,再用电感耦合等离子体发射光谱进行分析,若Bi、Hg、Mo、Ag、W元素含量较高,需要做相应稀释,再用等离子体发射光谱与等离子体质谱进行分析,元素之间的光谱干扰得到矫正后,即是最后的分析结果。采用美国生产的Agilent 7900型电感耦合等离子体质谱测量稀土元素,往试样中加入硼酸锂( $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ )熔剂,混合均匀,在熔炉中于1025°C熔融。待熔融液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸消解并定容,然后用等离子体质谱仪分析得到稀土元素含量。澳实分析检测(广州)有限公司采用上述测试方法、仪器和流程能够保证样品测试精度。主量元素分析精度和准确度优于5%,微量、稀土元素分析精度和准确度均优于10%。

### 3 研究结果

#### 3.1 含铜地层特征

飞仙关组一段( $T_1^f$ )厚度14.63~27.21 m。顶部为灰绿色夹少量紫红色泥质条带的薄-中层状泥质粉砂岩(图2a)。其下为含铜层位,铜矿层顶板为灰绿色中层状含铜细砂岩、含铜泥质粉砂岩,铜矿层主要为灰绿色薄层状粉砂质条带黏土岩型铜矿(图2b),其次为灰绿色薄层状泥质条带粉砂岩型铜矿(图2c),少量为灰绿色粉砂岩型铜矿(图2d)及灰绿色细砂岩型铜矿(图2e)。硫化矿的矿石矿物主要为黄铜矿、斑铜矿,少量为辉铜矿、蓝辉铜矿,脉石矿石主要由黏土矿物、岩屑、方解石、微粒石英等组成,含少量海绿石,地表氧化矿石中见孔雀石(图2f)。粉砂质条带黏土岩型铜矿石及泥质条带粉砂岩型铜矿

石发育砂纹层理、波状层理、脉状层理、透镜状层理(图2b、c),条带宽2~10 mm,赋存双壳(图2h)及舌形贝(*Lingula*)腕足化石(图2i)。黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿等矿石矿物呈星点状富集在粉砂质条带中,其他形粒状结构,星点状构造。铜矿层底板为灰绿色中层状粉砂岩。

飞仙关组一段( $T_1^f$ )顶部以灰绿色夹少量紫红色泥质条带的薄-中层状泥质粉砂岩与上覆地层飞仙关组二段( $T_1^g$ )紫红色夹少量灰绿色条带的粉砂质黏土岩分界,两者呈整合接触(图2m)。飞仙关组一段( $T_1^f$ )底部以灰绿色泥质粉砂岩与宣威组( $P_3^x$ )深灰色碳质黏土岩分界,两者呈整合接触(图2n)。

#### 3.2 矿物组成及结构构造

##### 3.2.1 矿物组成

矿石矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝、孔雀石,含量约0.30%~0.75%,其他金属矿物主要为褐铁矿、黄铁矿(图3c、f、i、l、o);脉石矿物主要为黏土矿物(水云母、高岭石等)、岩屑(硅质岩岩屑、泥质岩岩屑和玄武岩岩屑)、方解石、石英,少量白云母、绢云母、绿泥石,含量约占98%~99%。从薄片镜下鉴定照片(图3b、e、h、k、n)可以看出,碎屑颗粒呈棱角状,磨圆度较差,分选中等,可见少量玄武岩岩屑分布。硫化矿的矿石矿物主要为黄铜矿、斑铜矿,少量辉铜矿、蓝辉铜矿,其中,黄铜矿呈他形粒状,粒径0.01~3.50 mm,分布在脉石矿物中;斑铜矿呈他形粒状集合体,集合体呈不规则状、细条状,粒径0.005~0.400 mm,分布于脉石矿物中;辉铜矿呈隐晶质烟灰状,部分发生铜蓝蚀变,呈细团状分布于部分脉石矿物之间,粒径介于0.01~0.25 mm;蓝辉铜矿,粒径介于0.01~0.13 mm。褐铁矿为粉末状,呈细脉状、不规则团状分布于部分脉石矿物之间。从岩矿鉴定结果与矿石矿物的垂向分布来看,矿石矿物在空间上存在矿化分带现象,从下到上的矿化次序为辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿,可见研究区铜矿具有砂页岩型铜矿的典型特征。

氧化矿石主要见于地表浅部矿层,地表至浅表以下约30~50 m,矿石中铜矿物主要为孔雀石,次为黄铜矿、斑铜矿,孔雀石呈粒状集合体,普遍小于1 mm,呈绿色薄膜状覆盖于矿石裂隙表面。

##### 3.2.2 结构构造

研究区铜矿石以灰绿色粉砂质条带黏土岩型铜矿、灰绿色泥质条带粉砂岩型铜矿为主,少量为灰绿色粉砂岩型铜矿及细砂岩型铜矿。矿石矿物主要为

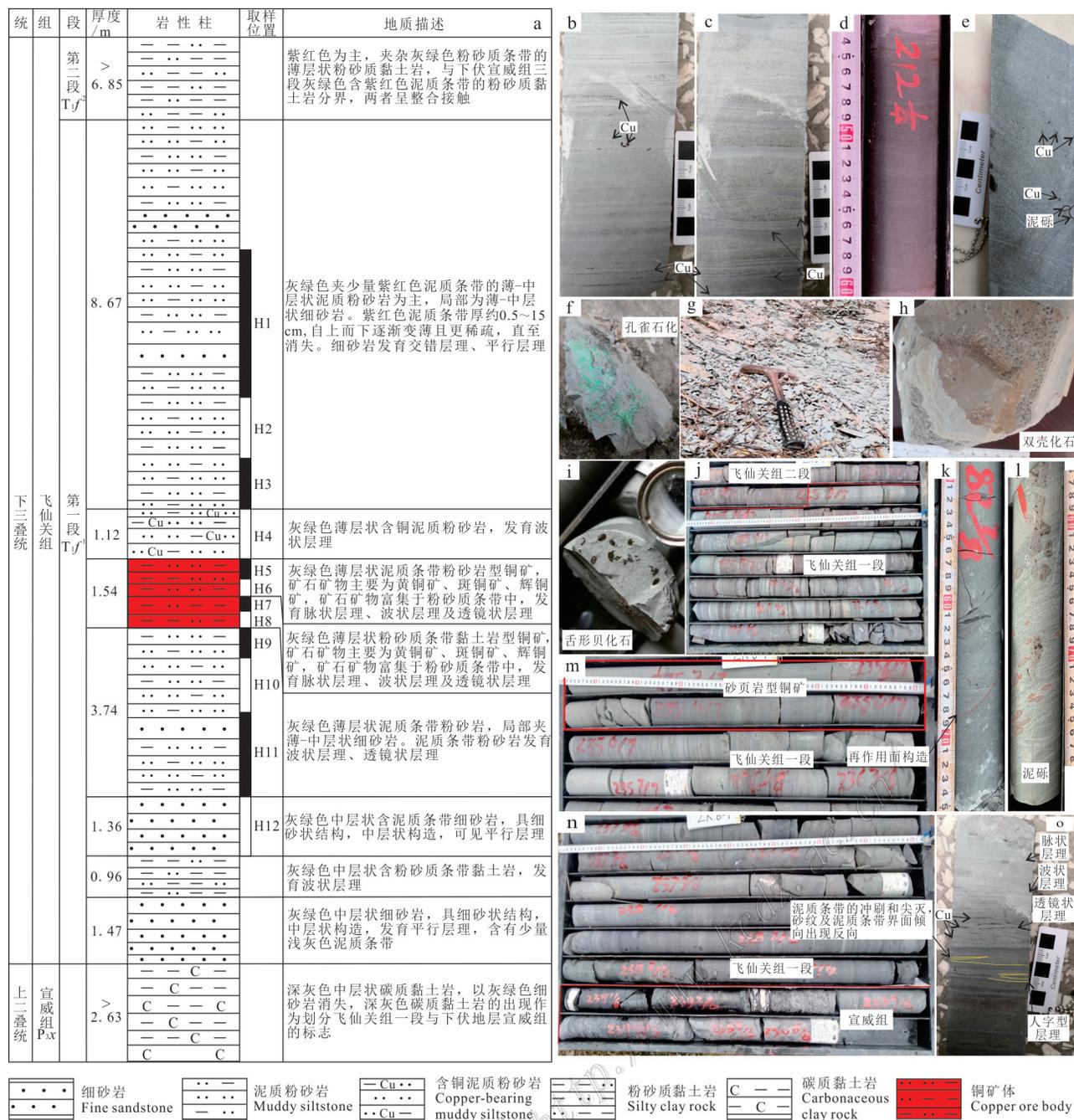


图 2 沐川地区 ZK0301 钻孔柱状图(a)及飞仙关组底部含铜地层特征(b~o)

b. 粉砂质条带黏土岩型铜矿, 发育透镜状层理, 矿石矿物呈星点状分布在粉砂质条带中; c. 泥质条带粉砂岩型铜矿, 发育脉状层理和波状层理, 矿石矿物呈星点状分布在粉砂沉积物中; d. 粉砂岩型铜矿, 发育水平层理, 矿石矿物呈星点状分布在粉砂沉积物中; e. 细砂岩型铜矿, 发育平行层理, 矿石矿物以较小的砾石形态分散在细砂沉积物中; f. 氧化矿石中的孔雀石, 呈翠绿色; g. 黏土岩, 发育水平层理; h. 层面上完整的双壳化石; i. 层面上完整的舌形贝化石; j. 飞仙关组二段紫红色夹少量灰绿色条带的粉砂质黏土岩与飞仙关组一段灰绿色夹少量紫红色泥质条带的泥质粉砂岩界线, 呈整合接触; k. 再作用面构造; l. 细砂岩中的泥砾; m. 产出于飞仙关组一段的砂页岩型铜矿; n. 飞仙关组一段灰绿色泥质粉砂岩与宣威组深灰色碳质黏土岩界线, 呈整合接触; o. 泥质条带粉砂岩型铜矿, 发育潮汐层理及人字型层理

Fig.2 Column diagram of borehole ZK0301(a) and characteristics of copper-bearing strata at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area(b~o)

b. Silty strip clay rock type copper deposit, which develops lenticular bedding, and ore minerals are distributed in the silty strip in a star-shaped manner; c. Pelitic striped siltstone-type copper deposit, developed vein bedding and wavy bedding, and ore minerals are distributed in silt sediments in a star-shaped manner; d. Siltstone-type copper deposit, developed horizontal bedding, and ore minerals are dotted in silt sediments; e. Fine sandstone-

type copper deposit, developed parallel bedding, ore minerals dispersed in fine sand sediments in the form of smaller gravel; f. Malachite in oxidized ore, emerald green; g. Clay rock, developed horizontal bedding; h. Complete Bivalve fossils on the rock level; i. Complete Lingula fossils on the rock level; j. The boundary between the silty clay rock of the second member of the Feixianguan Formation with a small amount of purple-red bands and the argillaceous siltstone of the first member of the Feixianguan Formation with a small amount of purple-red bands, showing an integrated contact; k. Rework surface structure; l. Mud gravel in fine sandstone; m. Sandstone shale-type copper deposits occurring in the first member of the Feixianguan Formation; n. First Member of Feixianguan Formation-gray green argillaceous siltstone and Xuanwei Formation dark grey carbonaceous argillaceous rock boundary, showing integrated contact; o. Pelitic striped siltstone-type copper deposit, developed tidal bedding and herringbone bedding

黄铜矿、斑铜矿,其次为辉铜矿,铜矿物呈星散状、浸染状分布于粉砂质条带或粉砂、细砂沉积物中。4种矿石类型的结构构造如下:

灰绿色粉砂质条带黏土岩型铜矿,矿石主要由黏土矿物、粉砂粒级碎屑和黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿组成,黏土岩中含较多粉砂质条带及透镜体,粉砂质条带厚度0.5~5.0 mm,以1.0~2.0 mm为主,发育透镜状层理(图2b)。矿石矿物主要富集于粉砂质条带中,呈星点状分布,具他形粒状结构,星点状构造。

灰绿色泥质条带粉砂岩型铜矿,矿石主要由粉砂粒级碎屑、黏土矿物和黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿组成,岩石中含较多泥质条带,泥质条带厚度1.0~8.0 mm,以1.0~4.0 mm为主,泥质条带中见较多炭屑,发育脉状层理、波状层理(图2c)。矿石矿物主要富集于粉砂沉积物中,特别在粉砂沉积物与其下的泥质条带的接触面上最为富集,呈星点状分布,具他形粒状结构,星点状构造。

灰绿色粉砂岩型铜矿,矿石主要由粉砂粒级碎屑、黏土矿物和黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿组成,发育水平层理(图2d)。矿石矿物呈星点状分布在粉砂沉积物中,具他形粒状结构,星点状构造。

灰绿色细砂岩型铜矿,矿石主要由细砂粒级碎屑、黏土矿物和黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿组成,岩石中含较多炭屑,发育平行层理(图2e)。矿石矿物以较小的砾石形态分散富集于细砂沉积物中,具砾状结构,块状构造。

### 3.3 岩石地球化学特征

从表1可以看出,ZK0301钻孔含铜地层12件样品 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为13.64%~17.13%,平均15.61%; $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为12.14%~16.91%,平均14.90%; $w(\text{SiO}_2)$ 为33.70%~52.68%,平均45.92%; $w(\text{TiO}_2)$ 为2.78%~3.57%,平均3.20%; $w(\text{MnO})$ 为0.10%~0.37%,平均0.18%; $w(\text{CaO})$ 为1.74%~12.40%,平均5.18%; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为0.07%~0.14%,平均0.10%; $w(\text{MgO})$ 为2.72%~4.34%,平均3.77%; $w(\text{K}_2\text{O})$ 为1.48%~2.48%,平均1.81%; $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为0.32%~0.45%,平均0.37%; $w(\text{CuO})$ 为0.01%~

1.59%,平均0.48%。综上所述,飞仙关组含铜地层中的MnO、CaO、Na<sub>2</sub>O、MgO、K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量较低,SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>含量较高,并与Cu含量没有相关性,碱性金属元素如K、Na、Ca、Mg普遍偏低。

微量元素数据(表2)显示,ZK0301钻孔含铜地层12件样品 $w(\text{Ga})$ 为22.6~30.2 μg/g,平均27.4 μg/g; $w(\text{Sc})$ 为22.3~26.0 μg/g,平均25.0 μg/g; $w(\text{V})$ 为301~414 μg/g,平均356 μg/g; $w(\text{Ni})$ 为61.6~78.3 μg/g,平均70.9 μg/g; $w(\text{Co})$ 为37.0~48.3 μg/g,平均43.9 μg/g; $w(\text{Zn})$ 为141~182 μg/g,平均161 μg/g; $w(\text{Cd})$ 为0.04~2.26 μg/g,平均0.60 μg/g; $w(\text{In})$ 为0.10~0.14 μg/g,平均0.10 μg/g; $w(\text{Sb})$ 为0.17~3.46 μg/g,平均0.80 μg/g。微量元素蛛网图(图4a)显示,Ba、Sr、P、Y、Yb、Lu有一定程度的富集,Th、U、La、Ce、Nd、Zr、Ti存在一定程度的亏损。

稀土元素分析结果(表3)表明,不同岩性样品的ΣREE(稀土元素总量)差别较小,介于224.35~344.98 μg/g,平均262.27 μg/g,LREE介于195.94~312.03 μg/g,平均232.82 μg/g,HREE介于24.28~33.58 μg/g,平均29.46 μg/g,轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)为6.89~9.47,反映了研究区含铜地层样品轻稀土元素比重稀土元素更为富集的特征。 $\text{La}_N/\text{Yb}_N$ 介于8.07~12.37,δEu为0.83~1.05,平均0.93,显示含铜地层样品有微弱的Eu负异常,δCe为0.99~1.05,平均1.03,表明含铜地层样品基本无Ce异常。由稀土元素配分图(图4b)可知,沐川地区飞仙关组底部含铜地层样品与区域上的玄武岩的稀土配分模式极为相近,暗示含铜地层的物源与玄武岩具有较高的亲缘性。

### 3.4 岩相古地理

#### 3.4.1 古地理背景

在约260 Ma时期,峨眉地幔柱的快速上涌,地幔物质上隆,便在康滇古陆发生了玄武岩喷溢,形成了玄武岩堆积的高地,区域上形成了西高东低的古地貌(文俊等,2019)。

此后,康滇古陆作为东部沉积盆地的主要物源

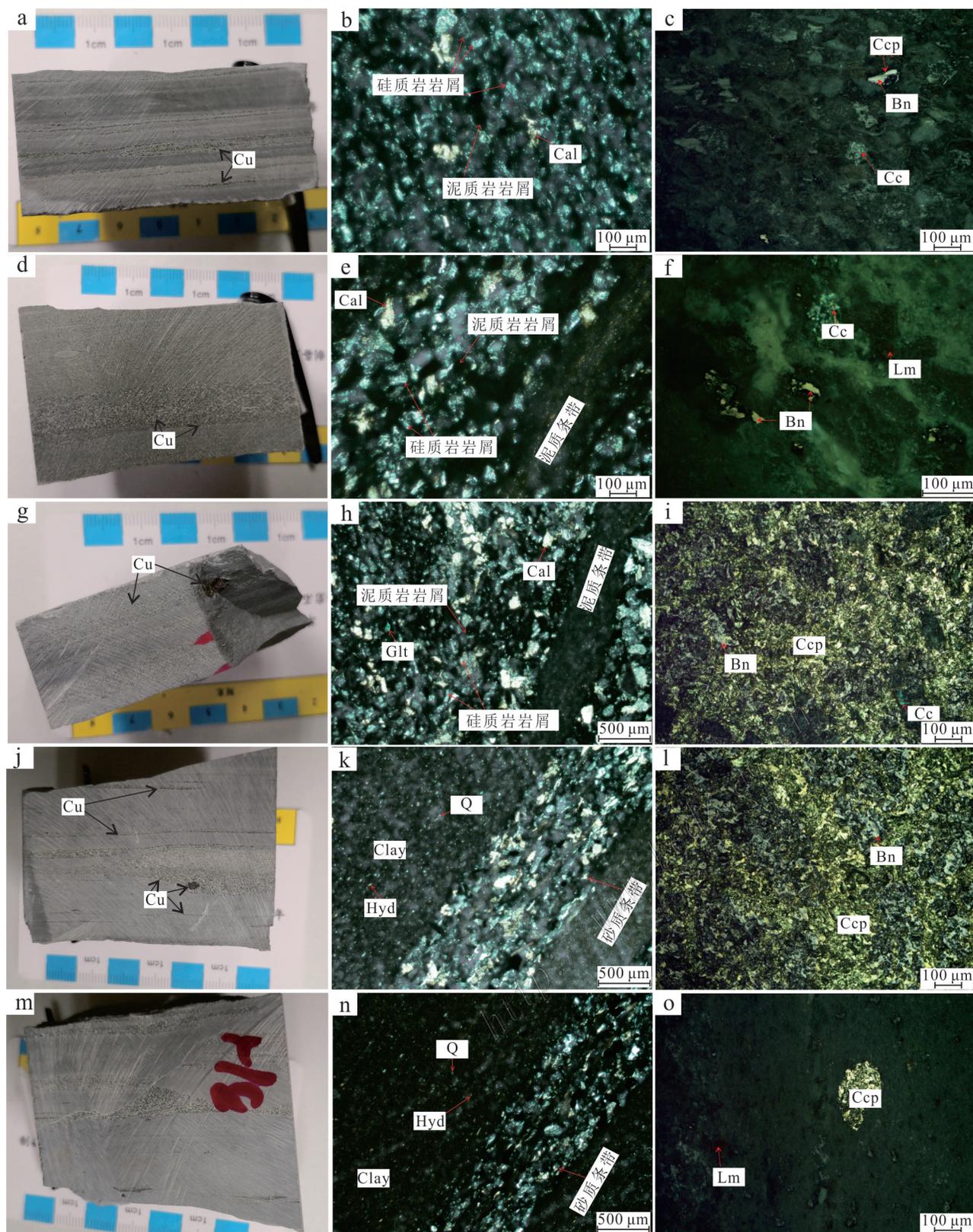


图3 沐川地区ZK0301钻孔飞仙关组底部砂页岩型铜矿石特征及薄片、光片镜下照片

a. 粉砂质条带黏土岩型铜矿石; b. 图3a的薄片镜下照片; c. 图3a的光片镜下照片; d. 粉砂岩型铜矿石; e. 图3d的薄片镜下照片; f. 图3d的光片镜下照片; g. 泥质条带粉砂岩型铜矿石; h. 图3g的薄片镜下照片; i. 图3g的光片镜下照片; j. 粉砂质条带黏土岩型铜矿石; k. 图3j的薄片镜下照片; l. 图3j的光片镜下照片; m. 粉砂质条带黏土岩型铜矿石; n. 图3m的薄片镜下照片; o. 图3m的光片镜下照片

Q—微粒石英; Clay—黏土矿物; Hyd—水云母; Cal—方解石; Glt—海绿石; Lm—褐铁矿; Ccp—黄铜矿; Bn—斑铜矿; Cc—辉铜矿

Fig.3 Characteristics of sandstone-shale-hosted copper ore at the bottom of the Feixianguan Formation of borehole ZK0301 in Muchuan area and microscopic photos of thin sections and polished sections

a. Silty strip clay rock type copper ore; b. Photomicrograph of sample a under transmitted light; c. Photomicrograph of sample a under reflected light; d. Siltstone copper ore; e. Photomicrograph of sample d under transmitted light; f. Photomicrograph of sample d under reflected light; g. Pelitic striped siltstone-type copper ore; h. Photomicrograph of sample g under transmitted light; i. Photomicrograph of sample g under reflected light; j. Silty strip clay rock type copper ore; k. Photomicrograph of sample j under transmitted light; l. Photomicrograph of sample j under reflected light; m. Silty strip clay rock type copper ore; n. Photomicrograph of sample m under transmitted light; o. Photomicrograph of sample m under reflected light
Q—Particle quartz; Clay—Clay minerals; Hyd—Hydromica; Cal—Calcite; Glt—Glauconite; Lm—Limonite; Ccp—Chalcopryrite; Bn—Bornite; Cc—Chalcocite

表1 沐川地区ZK0301钻孔铜矿体及顶底板样品主量元素(w(B)/%)和微量元素(w(B)/(μg/g))特征表

Table 1 Characteristics of major(w(B)/%) and trace elements(w(B)/(μg/g)) of copper ore body and wall rock samples from borehole ZK0301 in Muchuan area

Table with 13 columns (H1-H12) and 20 rows of chemical elements and ratios. Columns represent different lithological types: H1 (泥质粉砂岩), H2 (泥质粉砂岩), H3 (泥质粉砂岩), H4 (含铜泥质粉砂岩), H5 (泥质条带粉砂岩型铜矿), H6 (泥质条带粉砂岩型铜矿), H7 (粉砂质条带黏土岩型铜矿), H8 (粉砂质条带黏土岩型铜矿), H9 (泥质粉砂岩), H10 (泥质粉砂岩), H11 (泥质粉砂岩), H12 (细砂岩). Rows include SiO2, TiO2, Al2O3, TFe2O3, MnO, MgO, CaO, Na2O, K2O, P2O5, CuO, 烧失量, 总量, CIA, CIW, ICV, and Al2O3/TiO2.

注:比值单位为1。

区,在峨眉山玄武岩顶部的古风化壳之上沉积形成了宣威组含煤地层。早三叠世初期,海水由南向北大规模入侵,结束了宣威组近海的湖沼相沉积。由于沐川地区及周边早三叠世初期的古地形具有东低西高、南低北高的特点(四川省地质矿产局,1977),便在飞仙关组底部沉积形成了有障壁型海岸陆源沉积相、潮坪亚相。

3.4.2 岩相特征

从薄片镜下鉴定照片(图3b、e)中可以看出,飞仙关组底部含铜地层岩石以细粒沉积物为主,岩石中的碎屑呈棱角状,磨圆度较差,分选中等,矿物以

黏土矿物、岩屑为主,只含少量微粒石英,见较多完整的海生动物化石,显然不属于无障壁滨岸相的沉积产物,无障壁滨岸相的岩石往往具有以下特点:石英含量较高,分选、磨圆度较好,含生物碎片,交错层理发育。从野外露头及岩芯观察来看,飞仙关组底部含铜地层岩石发育潮汐层理及反映水流双向性的层理,沉积物以细粒为主,丰富完整的双壳及舌形贝化石,说明水动力条件较弱,因此判定飞仙关组底部含铜地层属于有障壁型海岸相潮坪亚相。

沐川地区飞仙关组底部含铜地层可识别出灰绿色黏土岩相、灰绿色粉砂质条带黏土岩相、灰绿色泥

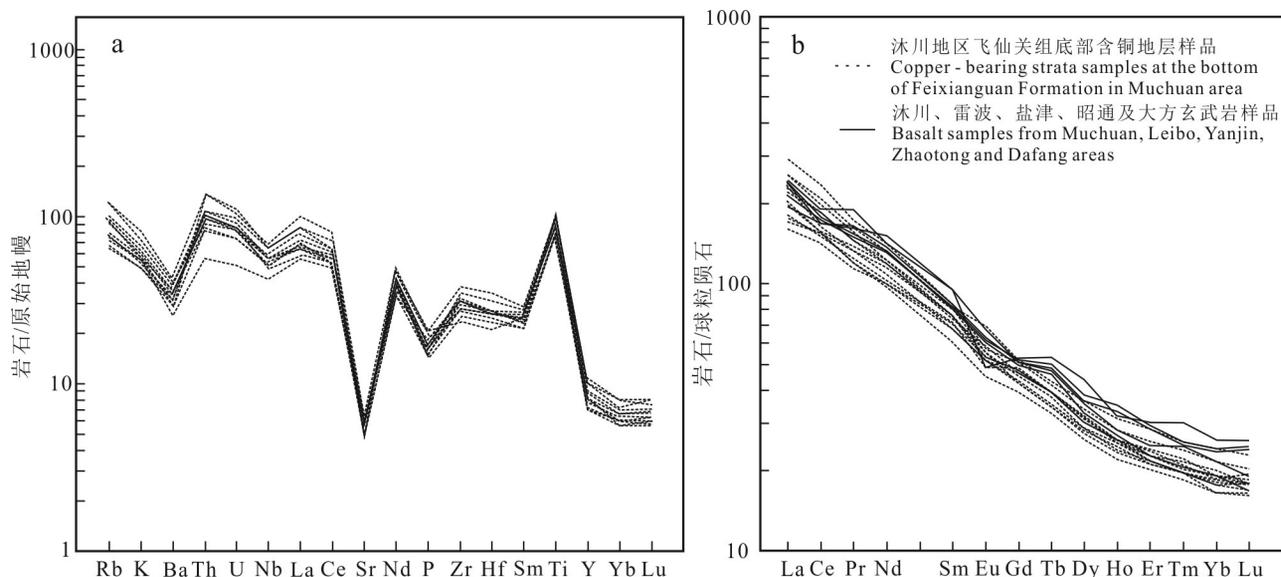


图4 沐川地区飞仙关组底部含铜地层微量元素蛛网图(a)和稀土元素配分图(b)

稀土、微量元素标准化数值据 Sun et al.,1989;沐川玄武岩稀土元素数值据程文斌等,2019;雷波玄武岩稀土元素数值据刘建清等,2019;盐津玄武岩稀土元素数值据马建飞等,2019;昭通玄武岩稀土元素数值据任光明等,2018;大方玄武岩稀土元素数值据赵兵等,2015

Fig.4 Trace element spider diagrams(a) and REE patterns(b) of the copper-bearing strata at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area

Standardized values of rare earth and trace elements after Sun et al.,1989;REE value of Muchuan basalt after Cheng et al., 2019;REE value of Leibo basalt after Liu et al., 2019;REE value of Yanjin basalt after Ma et al., 2019;REE value of Zhaotong basalt after Ren et al., 2018;REE value of Dafang basalt after Zhao et al., 2015

质条带粉砂岩相、灰绿色粉砂岩相和灰绿色细砂岩相5种类型,现简述其主要特征如下。

**灰绿色黏土岩相:**主要由黏土矿物组成,极少有粉砂纹层,几乎全部由泥质沉积物组成,发育水平层理(图2g),为潮坪亚相潮上泥坪微相沉积。此岩相中铜的含量极少。

**灰绿色粉砂质条带黏土岩相:**此岩相绝大多数是泥质沉积物,见较多水平状及波状粉砂纹层,粉砂质纹层厚度多为1.0~4.0 mm,发育透镜状层理(图2b、o),在层面上可见丰富、完整的双壳(图2h)及舌形贝化石(图2i),说明水动力条件较弱的海相环境,但又不是全部由泥质沉积物组成,故此岩相属于典型的潮坪亚相潮间混合坪微相沉积。矿石矿物呈星点状分布在粉砂质条带及透镜体中,粉砂质条带及透镜体中的碎屑颗粒粒度由下到上逐渐变细。该岩相中的Cu元素富集程度最高。

**灰绿色泥质条带粉砂岩相:**此岩相中含较多泥质条带,泥质条带中见较多炭屑,发育透镜状层理、波状层理、脉状层理、交错纹层(图2c、o)等典型的潮间混合坪沉积构造,属于潮汐环境的典型特征,也可

见双向共轭层系的人字型层理(图2o),反映水流方向具有双向性,是潮汐环境的直接证明,同时也可见砂纹或泥质条带界面倾向的反向变化,以及泥质条带的冲刷和尖灭(图2o),也反映了潮汐环境的水流方向具有双向性,见少量完整的双壳及舌形贝化石,指示为海相环境,为潮坪亚相潮间混合坪微相沉积。矿石矿物呈星点状分布在粉砂沉积物中,特别在粉砂沉积物的底部最为密集。此岩相中的Cu元素富集程度仅次于粉砂质条带黏土岩相。

**灰绿色粉砂岩相:**此岩相主要由粉砂粒级碎屑组成,矿石矿物呈星点状分布在粉砂沉积物中,见水平层理(图2d),化石少,为潮坪亚相潮下砂坪微相环境。此岩相中的Cu元素富集程度低于粉砂质条带黏土岩相和泥质条带粉砂岩相。

**灰绿色细砂岩相:**此岩相主要由细砂粒级碎屑组成,岩石中夹有较多炭屑及泥质层,局部见钙质结核,含少量灰绿色泥砾(图21),粒径4~10 mm,发育平行层理、交错层理,还可见到再作用面构造(图2k),为潮坪亚相潮渠微相沉积。矿石矿物以较小的砾石形态分散于细砂沉积物中(图2e)。此岩相中的

表2 沐川地区ZK0301钻孔铜矿体及顶底板样品微量元素(w(B))/(μg/g)特征表

Table 2 Characteristics of trace elements(w(B))/(μg/g) of copper ore body and wall rock samples from borehole ZK0301 in Muchuan area

组分	H1 泥质粉砂岩	H2 泥质粉砂岩	H3 泥质粉砂岩	H4 含铜泥质粉砂岩	H5 泥质条带粉砂岩型铜矿	H6 泥质条带粉砂岩型铜矿	H7 粉砂质条带黏土岩型铜矿	H8 粉砂质条带黏土岩型铜矿	H9 泥质粉砂岩	H10 泥质粉砂岩	H11 泥质粉砂岩	H12 细砂岩	平均值
Li	6.60	5.80	5.90	6.70	6.70	6.90	6.90	6.60	6.00	6.10	7.00	7.10	6.50
Be	2.06	2.53	1.94	2.24	1.90	1.82	2.19	3.08	1.71	1.86	2.31	1.65	2.10
Sc	22.3	24.8	25.7	25.1	25.8	25.0	24.2	25.9	26.0	23.5	25.9	25.2	25.0
V	301	358	371	353	385	377	328	326	414	363	347	343	356
Cr	180	160	160	160	150	160	130	120	200	160	130	140	154
Co	37.0	39.7	44.1	47.2	45.0	47.4	45.9	39.1	45.5	42.9	44.5	48.3	43.9
Ni	61.6	65.1	71.2	73.4	71.7	73.1	72.6	70.1	78.3	70.2	70.7	73.0	70.9
Zn	153	147	154	182	169	178	161	141	172	164	157	155	161
Ga	22.6	27.6	27.0	29.8	28.1	26.6	27.8	30.2	24.3	28.0	29.1	27.5	27.4
Rb	56.0	76.0	61.5	53.7	49.2	42.4	55.0	77.8	41.4	50.7	57.7	41.2	55.2
Sr	112	123	115	128	118	103	110	129	131	122	120	127	120
Mo	0.29	0.36	0.27	0.72	2.28	2.35	4.58	3.30	0.23	0.88	2.54	0.58	1.50
Cd	0.25	0.20	0.11	0.14	1.00	2.26	1.66	0.84	0.13	0.05	0.04	0.07	0.60
In	0.10	0.10	0.11	0.14	0.11	0.10	0.12	0.11	0.11	0.10	0.12	0.11	0.10
Sb	3.46	1.79	0.88	0.92	0.49	0.21	0.17	0.30	0.20	0.23	0.27	0.24	0.80
Cs	1.68	2.17	1.83	1.62	1.46	1.42	1.78	2.51	1.36	1.54	1.80	1.26	1.70
Ba	201	284	247	212	207	178	208	297	215	229	217	216	226
W	2.40	1.70	2.50	1.60	1.10	1.10	1.30	1.00	0.80	0.80	0.90	0.80	1.30
Tl	0.17	0.21	0.18	0.16	0.14	0.13	0.17	0.23	0.11	0.14	0.17	0.16	0.20
Pb	66.0	40.5	21.3	27.2	13.9	16.3	11.4	13.4	9.10	8.90	8.10	8.20	20.4
Bi	0.07	0.08	0.07	0.13	0.13	0.08	0.10	0.14	0.03	0.08	0.11	0.17	0.10
Th	6.88	7.41	6.99	11.8	7.24	7.43	8.91	11.6	4.80	7.49	8.75	7.70	8.10
U	1.62	1.76	1.57	2.37	1.87	1.60	1.74	2.18	1.07	1.61	1.82	1.85	1.80
Nb	36.6	39.3	39.0	47.6	37.8	39.3	43.5	49.1	30.0	38.7	40.9	33.5	39.6
Ta	2.30	2.40	2.40	2.90	2.30	2.50	2.70	3.10	1.70	2.40	2.70	2.20	2.50
Zr	291	332	325	404	333	337	376	427	263	344	372	326	344
Hf	7.30	8.40	8.20	10.2	8.20	8.50	8.90	10.8	6.40	8.50	9.30	8.40	8.60

Cu元素的富集程度最低。

### 3.4.3 古地理特征、沉积相类型及氧化还原环境

本次收集沐川及周边地区早三叠世飞仙关组一段(底部)地层资料(四川省地质矿产局,1977),以飞仙关组一段的颜色、厚度、岩性、粒度为划分依据,制作了沐川及周边地区早三叠世初期岩相古地理图,结果显示自西往东依次为康滇古陆玄武岩剥蚀区、潮坪等环境(图5)。沐川地区飞仙关组底部为有障壁型海岸相潮坪亚相沉积,可识别出潮上泥坪微相、潮间混合坪微相、潮下砂坪微相和潮渠微相4种。

Cu元素主要富集于潮间混合坪微相,即粉砂质条带黏土岩相和泥质条带粉砂岩相是主要含铜岩相,铜矿体受沉积相的控制。

另外,利用对氧化还原示踪性强的元素进行沉积环境分析,是目前常用的手段。前人研究显示,由于受Th元素放射性衰变减少或U元素热液活动增加的影响,采用U/Th比值判别较为古老地层的沉积环境,效果往往不佳,采用V/Cr、V/(V+Ni)、Ce/La等微量元素比值作为判别标志则相对准确,其比值分别大于4.25、0.84和2.0指示为缺氧还原环境,小于

表3 沐川地区ZK0301钻孔铜矿体及顶底板样品稀土元素(w(B)/(μg/g))特征表

Table 3 Characteristics of REE(w(B)/(μg/g)) of copper ore body and wall rock samples from borehole ZK0301 in Muchuan area

组分	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
	泥质粉砂岩	泥质粉砂岩	泥质粉砂岩	含铜泥质粉砂岩	泥质条带粉砂岩型铜矿	泥质条带粉砂岩型铜矿	粉砂质条带黏土岩型铜矿	粉砂质条带黏土岩型铜矿	泥质粉砂岩	泥质粉砂岩	泥质粉砂岩	细砂岩
La	43.1	45.9	43.1	60.3	41.1	42.5	51.9	70.0	37.9	46.1	54.5	40.4
Ce	93.1	95.9	93.0	128.0	93.0	94.0	113.5	143.5	86.5	103.5	112.0	95.0
Pr	11.30	12.25	11.70	15.15	11.90	11.90	13.95	16.45	10.85	13.05	13.75	12.60
Nd	45.5	50.8	48.1	61.4	47.8	50.2	57.1	65.8	46.4	55.1	55.6	53.6
Sm	9.25	10.30	10.30	12.85	10.90	10.75	11.70	13.00	10.80	11.90	11.30	12.25
Eu	2.61	2.99	3.30	3.98	2.88	2.85	2.91	3.28	3.49	3.47	3.10	3.61
Gd	8.17	8.87	8.92	10.90	9.95	9.88	9.93	10.35	10.25	10.65	9.78	10.75
Tb	1.22	1.30	1.31	1.60	1.49	1.48	1.46	1.49	1.47	1.52	1.45	1.55
Dy	6.63	7.29	7.43	9.22	8.28	7.90	8.28	9.33	7.95	8.43	8.22	8.67
Ho	1.25	1.36	1.34	1.76	1.58	1.51	1.56	1.76	1.43	1.52	1.55	1.62
Er	3.34	3.76	3.54	4.75	4.23	4.00	4.15	4.70	3.58	4.13	4.18	4.25
Tm	0.47	0.52	0.51	0.66	0.58	0.56	0.60	0.66	0.50	0.58	0.60	0.61
Yb	2.79	3.10	2.97	4.11	3.42	3.24	3.51	4.06	2.81	3.40	3.46	3.59
Lu	0.41	0.46	0.43	0.58	0.50	0.47	0.52	0.60	0.42	0.50	0.52	0.52
ΣREE	229.14	244.80	235.95	315.26	237.61	241.24	281.07	344.98	224.35	263.85	280.01	249.02
LREE	204.86	218.14	209.50	281.68	207.58	212.20	251.06	312.03	195.94	233.12	250.25	217.46
HREE	24.28	26.66	26.45	33.58	30.03	29.04	30.01	32.95	28.41	30.73	29.76	31.56
LREE/HREE	8.44	8.18	7.92	8.39	6.91	7.31	8.37	9.47	6.90	7.59	8.41	6.89
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	11.08	10.62	10.41	10.52	8.62	9.41	10.61	12.37	9.67	9.73	11.30	8.07
δEu	0.92	0.96	1.05	1.03	0.85	0.85	0.83	0.86	1.01	0.94	0.90	0.96
δCe	1.03	0.99	1.02	1.04	1.03	1.02	1.03	1.04	1.05	1.03	1.00	1.03

注:比值单位为1。

2、0.6和1.5代表富氧化环境,比值分别介于二者之间说明其为过渡环境或贫氧环境(据代鸿章等,2018)。在V/Cr判别图(图6a)中,除1个样品落在富氧化环境外,其余11个样品均落在贫氧过渡环境区域;在V/(V+Ni)判别图(图6b)中,12个样品落在了贫氧过渡环境与缺氧还原环境的交界线附近;在Ce/La判别图(图6c)中,12个样品均落在了缺氧还原环境区域。由此,沐川地区飞仙关组底部含铜地层总体上处于贫氧过渡-缺氧还原环境。

从地质特征来看,沐川地区飞仙关组底部含铜地层岩性由灰绿色中层状粉砂质黏土岩、粉砂岩夹灰绿色细砂岩及顶部的灰绿色夹少量紫红色泥质条带的薄-中层状泥质粉砂岩组成,粉砂质黏土岩中见丰富的双壳、舌形贝(Lingula)腕足化石(图2h),显示海相环境,加之舌形贝常生活于多泥、缺氧的海洋环境。粉砂质黏土岩及泥质粉砂岩中发育潮汐层理,指示沉积环境为潮坪亚相。综合岩石地球化学、

岩性及古生物特征,沐川地区飞仙关组底部含铜地层形成于潮坪亚相的贫氧过渡-缺氧还原沉积环境。

## 4 讨论

### 4.1 铜的富集规律

为了反映岩相与铜矿富集的关系,对灰绿色细砂岩相、灰绿色粉砂岩相、灰绿色泥质条带粉砂岩相和灰绿色粉砂质条带黏土岩相4种含铜岩相的80件样品的Cu元素含量分析数据进行了统计。结果显示,灰绿色细砂岩相w(Cu)为0.11%~0.37%,平均0.19%;灰绿色粉砂岩相w(Cu)为0.13%~0.71%,平均0.28%;灰绿色泥质条带粉砂岩相w(Cu)为0.10%~0.95%,平均0.38%;灰绿色粉砂质条带黏土岩相w(Cu)为0.11%~1.19%,平均0.50%(表4)。从表4和图7可以看出,Cu元素主要富集于灰绿色粉砂质条带黏土岩相(平均0.50%)中,其次富集于灰绿色泥



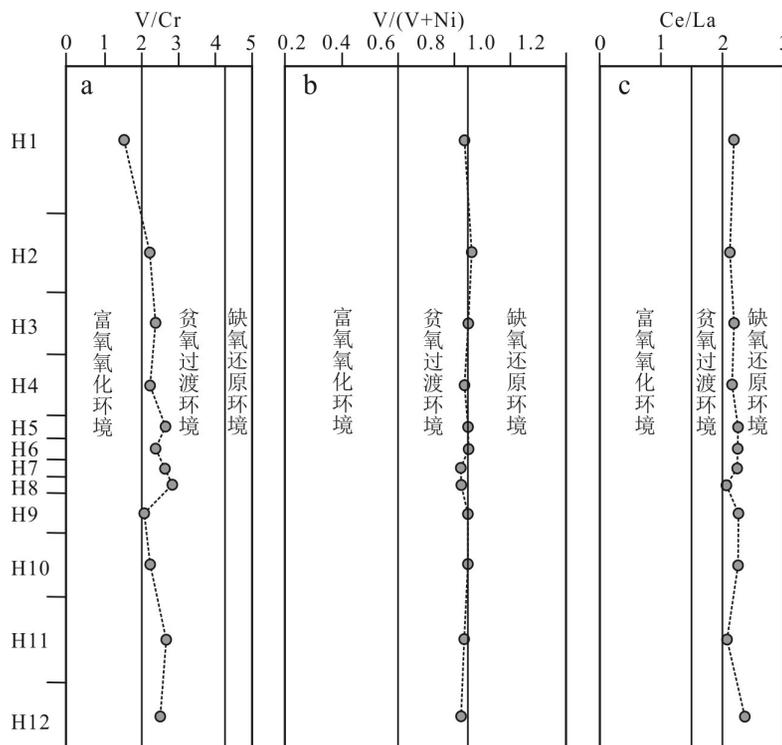


图 6 沐川地区飞仙关组底部含铜地层 V/Cr(a)、V/(V + Ni)(b)和 Ce/La(c)沉积环境判别图(据代鸿章等,2018)

Fig.6 Sedimentary environment discrimination diagrams of V/Cr(a), V/(V + Ni)(b) and Ce/La(c) for copper-bearing strata at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area(after Dai et al.,2018)

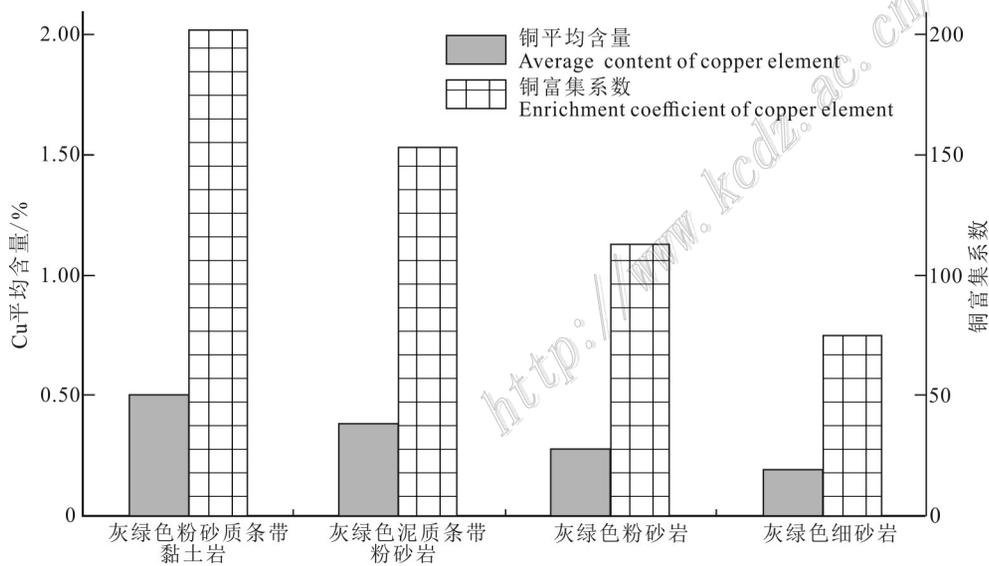


图 7 沐川地区飞仙关组底部含铜地层岩相与 Cu 元素平均含量、富集系数的关系柱状图

Fig.7 Column diagram of the relationship between lithofacies and the average content , enrichment coefficient of copper element of copper-bearing strata at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area

质条带粉砂岩相(平均 0.38%)和灰绿色粉砂岩相(平均 0.28%)中,而在灰绿色细砂岩相中富集程度较差(平均 0.19%)。从富集系数来看,灰绿色细砂

岩相的富集系数为 44~148,平均 75;灰绿色粉砂岩相的富集系数为 52~283,平均 113;灰绿色泥质条带粉砂岩相的富集系数为 40~380,平均 153;灰绿色粉

表4 沐川地区飞仙关组底部铜元素富集与岩相关系

Table 4 The relationship between copper enrichment and lithofacies at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area

岩相类型	$w(\text{Cu})$ 极小值~极大值/%	Cu富集系数极小值~极大值
	平均值(样品数)	平均值(样品数)
灰绿色细砂岩相	0.11~0.37	44~148
	0.19(7)	75(7)
灰绿色粉砂岩相	0.13~0.71	52~283
	0.28(9)	113(9)
灰绿色泥质条带粉砂岩相	0.10~0.95	40~380
	0.38(23)	153(23)
灰绿色粉砂质条带黏土岩相	0.11~1.19	46~476
	0.50(41)	202(9)

砂质条带黏土岩相的富集系数为46~476,平均202,富集系数结果依然显示灰绿色粉砂质条带黏土岩相中的Cu元素富集程度最高,其次是灰绿色泥质条带粉砂岩相和灰绿色粉砂岩相,灰绿色细砂岩相中的Cu元素富集程度最差。

从铜矿物的光片镜下鉴定结果(图3c、f、i、l、o)来看,矿石矿物主要为黄铜矿、斑铜矿,少量为辉铜矿,矿石矿物呈他形粒状、细团状主要富集于黏土矿物、岩屑、方解石、微粒石英等脉石矿物之间。从标本尺度来看,矿石矿物主要呈粒状分布于粉砂质条带或粉砂沉积物中,而从岩相与铜矿富集的关系来看,铜在粉砂质条带黏土岩相的富集程度最高,其次是泥质条带粉砂岩相,这个规律与光片镜下鉴定结果(图3i、l)是吻合的,即光片镜下鉴定结果显示,黄铜矿和斑铜矿主要富集于粉砂质条带黏土岩相和泥质条带粉砂岩相中的粉砂质条带或粉砂沉积物中。Samama(1980)研究表明,铜的沉淀需要安静稳定的低能水动力条件,而大量粗碎屑相参与的高能沉积环境不利于铜的沉积成矿。由此不难发现,沐川地区飞仙关组底部含铜地层中的铜元素沉积富集在中等能量的潮间混合坪地带,特别是在能量更弱一些的粉砂质条带黏土岩相中最为富集。

#### 4.2 物源分析

前人对上扬子西南地区下三叠统飞仙关组的物源进行了一系列研究,多数学者认为飞仙关组的物源与峨眉山玄武岩有关。近年来,多位学者通过碎屑锆石U-Pb年龄研究显示,中国西南地区飞仙关组的物源主要为峨眉山高钛玄武岩(缪宇等,2021;张衡等,2019;张英利等,2016;周寅生等,2022;朱民等,2016),这些研究成果为本文研究飞仙关组底部

(一段)含铜地层的物源提供了支撑,但以往均是针对飞仙关组二段至四段中的紫红色碎屑岩而开展的研究,飞仙关组底部的沉积时代早于紫红色碎屑岩,其物源是否与峨眉山高钛玄武岩有关值得探讨。

笔者通过对飞仙关组底部含铜地层开展岩石地球化学特征研究,对其物源有了明晰的指示。Hayashi等(1997)研究表明,典型的铁镁质、中性和长英质岩石的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值分别是3~8、8~21和21~70,研究区飞仙关组底部含铜地层 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值为4.43~5.60,暗示研究区飞仙关组底部的物源原始岩浆可能是基性,同时位于峨眉山高钛玄武岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值范围(2.7~8.1)内(Fan et al., 2008)。另外,化学蚀变风化指数(CIA)和化学风化指数(CIV)可判别物源区的化学风化程度,笔者采用CIA(计算方法参照Feng et al., 2003)和CIW(计算方法参照Harnois, 1988)进行不同样品风化程度研究。CIA值越高指示硅酸盐矿物中Na、K、Ca矿物从母岩中失越多,化学风化越强(Nesbitt et al., 1984)。计算结果(表1)表明,沐川地区飞仙关组底部含铜地层样品的CIA值为86.38~90.16,CIW值为0.98~0.99,说明飞仙关组底部含铜地层遭受了强烈的化学风化,同时也代表炎热、潮湿的环境。Li等(2009)研究表明,成分成熟度低的泥质岩石含有较高比例的非黏土硅酸盐矿物,具有高的ICV值;相反,含非黏土硅酸盐矿物少或以高岭石矿物占优势成分成熟度高的泥质岩,其ICV值低。沐川地区飞仙关组底部含铜地层样品的ICV指数在1.37~2.43之间,平均值1.87,均大于1,表明其物源基本上未经历过风化-沉积成岩的过程,为第一次循环碎屑,遭受的化学风化总体较强,成分成熟度低,表明为近源沉积。Sc在地表风化

作用和蚀变过程中不易发生迁移,可以作为物源的地球化学指示剂(Zhou et al., 1994),研究区样品的平均 $w(\text{Sc})$ 25.0  $\mu\text{g/g}$ 接近中国基性岩浆岩中 $w(\text{Sc})$ 平均值(29.0  $\mu\text{g/g}$ , Chi et al., 2007),也与研究区玄武岩样品的 $w(\text{Sc})$ (21.9~27.1  $\mu\text{g/g}$ )接近(文俊等, 2021),也暗示其物源与基性岩有关。

从判别函数F1-判别函数F2图解(图8a)可以看出,除了2件样品落在石英质火成物源区外,其余10件样品均落在了铁镁质火成物源区;La/Yb- $\Sigma\text{REE}$ 图解(图8b)显示,大部分样品落在了沉积岩、碱性玄武岩与拉斑玄武岩的重叠区域;在Th/Sc-Zr/Sc图解(图9)中,12件样品全部落在了峨眉山高钛玄武岩区域;这3个图解表明飞仙关组底部含铜地层的物源主要为峨眉山高钛玄武岩,可能有少量中酸性火山岩的混入。由稀土元素配分图(图4b)可以看出,沐川地区飞仙关组底部含铜地层样品与区域上的玄武岩的稀土配分模式极为相近,暗示含铜地层的物源与玄武岩具有较高的亲缘性。研究区样品 $w(\text{TiO}_2)$ 为2.78%~3.57%, $\Sigma\text{REE}$ 介于224.35~344.98  $\mu\text{g/g}$ ,继承了高钛玄武岩的地球化学特征(姜寒冰等,2009)。

另外,从成矿地质背景来看,晚古生代峨眉山地幔柱上涌形成了峨眉山大火成岩省,从壳幔深部带来了大量成矿元素,使峨眉山玄武岩中的平均 $w(\text{Cu})$ 达到170  $\mu\text{g/g}$ 的高铜背景值,为宣威组底部的沉积型铜矿提供了丰富的物源(Wang et al., 2011)。另

外,Zhang等(2006)报道在多地玄武岩中发现了肉眼可见零星分布的自然铜矿物,在苦橄岩橄榄石斑晶中也发现了自然铜颗粒,说明铜元素已在峨眉山玄武岩中初步富集,有的经过后期热液的改造而进一步富集成矿(李厚民等,2006),此类矿床称为玄武岩铜矿床。可见,玄武岩多个层位都有铜的初始富集,玄武岩经过风化剥蚀,玄武岩的新、老剥蚀层位分别为沉积区的老、新地层提供成矿物源。

已有的研究显示,沐川地区宣威组底部的物源主要为峨眉山高钛玄武岩(Wang et al., 2011;文俊等,2021),而区域上飞仙关组底部之上的紫红色碎屑岩的物源也主要为峨眉山高钛玄武岩(张英利等,2016;张衡等,2019;周寅生等,2022),再加上通过薄片镜下鉴定发现了少量玄武岩岩屑,这是证实其物源为峨眉山玄武岩的最直接的证据。综上所述,按照碎屑锆石U-Pb测年、岩石地球化学、岩石学、峨眉山玄武岩的喷发沉积序列及剥蚀序列等证据,那么飞仙关组底部含铜地层的物源也应主要为峨眉山高钛玄武岩。

### 4.3 成矿模式

沐川地区飞仙关组底部的砂页岩型铜矿床是典型的层状铜矿床,学者们对层状铜矿床的成矿模式归纳为沉积-成岩成矿、沉积-改造成矿、地下卤水成矿和萨布哈成矿4种成矿模式(高辉等,2012)。沐川地区飞仙关组底部砂页岩型铜矿的矿石类型主要

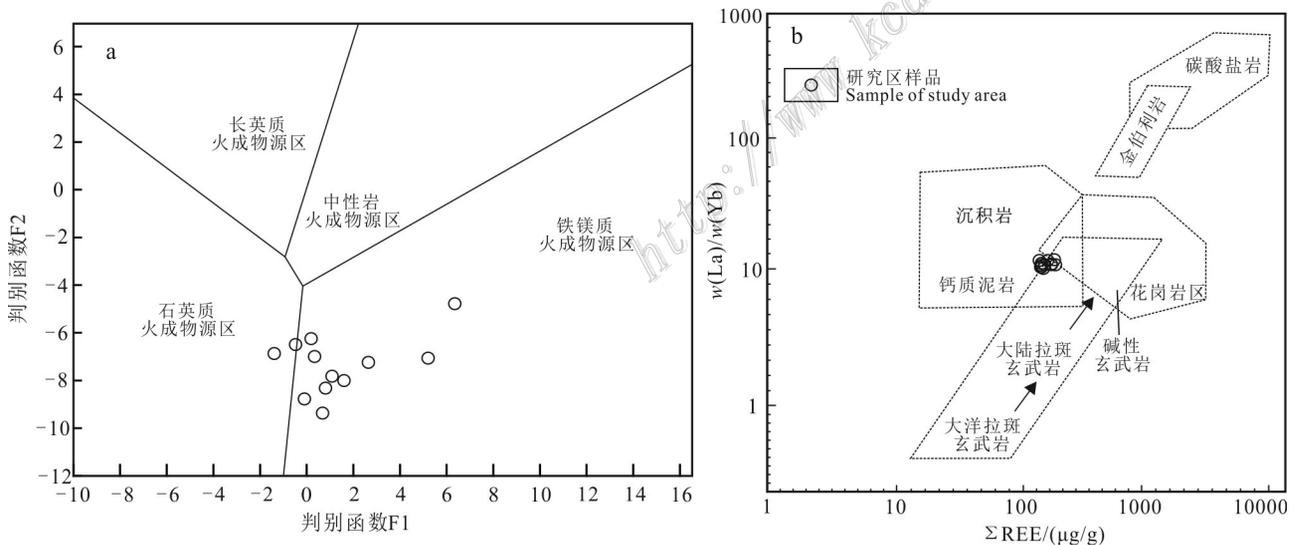


图8 沐川地区飞仙关组底部含铜地层判别函数F1-判别函数F2图解(a,据Roser,1988)和La/Yb- $\Sigma\text{REE}$ 图解(b,据Floyd,1987)  
Fig.8 Discriminant function F1-discriminant function F2 diagram(a, after Roser, 1988) and La/Yb- $\Sigma\text{REE}$  diagram(b, after Floyd, 1987) of copper-bearing strata at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area

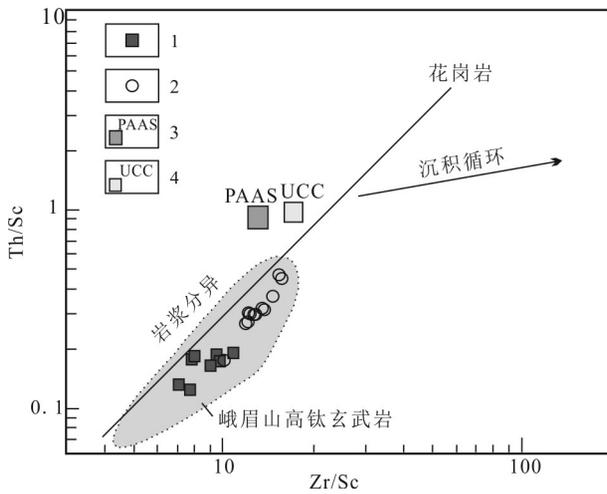


图9 沐川地区飞仙关组底部含铜地层Th/Sc-Zr/Sc图解(底图据 Mclennan et al.,1993;峨眉山玄武岩数据引自 Xu et al., 2001)

1—玄武岩;2—飞仙关组底部含铜地层样品;3—澳大利亚后太古代页岩标准值;4—上陆壳平均化学组成

Fig.9 Th/Sc-Zr/Sc diagram of copper-bearing strata at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area(base map after Mclennan et al.,1993; data on the Emeishan basalts are quoted from Xu et al., 2001)

1—Basalt; 2—Copper-bearing strata samples at the bottom of the Feixianguan Formation; 3—Australian Post-Archean shale standard value; 4—Average chemical composition of upper continental crust

为粉砂质条带黏土岩型铜矿、泥质条带粉砂岩型铜矿、粉砂岩型铜矿及细砂岩型铜矿,矿石矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿,前两者矿石类型发育砂纹层理、波状层理、脉状层理、透镜状层理,矿石矿物呈

星点状富集在粉砂质条带或粉砂沉积物中,矿石矿物呈碎屑颗粒状分布在粉砂沉积物中,可见矿石矿物与粉砂沉积物是几乎同时沉积形成的,沐川地区飞仙关组底部砂页岩型铜矿的成矿模式应为沉积-成岩成矿模式,即同生成因。

根据以上研究成果,笔者认为沐川地区飞仙关组底部砂页岩型铜矿的成矿模式可分为峨眉山玄武岩喷溢(矿源层形成)阶段、风化剥蚀搬运阶段、沉积阶段和成岩阶段(图10)。

峨眉山玄武岩喷溢(矿源层形成)阶段:中-晚二叠世,扬子板块西缘的峨眉山地区发生地幔柱上升活动,岩浆喷溢形成大规模的高钛玄武岩,造就了沐川地区晚二叠世西高东低的古地理格局,沐川地区西部的玄武岩高地就是康滇古陆。已有的研究表明,Cu元素已在峨眉山玄武岩中初步富集,使峨眉山玄武岩具有高铜背景值,能够为后期的沉积型铜矿床提供物源(李厚民等,2006)。

风化剥蚀搬运阶段:由于康滇古陆属于高地,早三叠世初期处于热带-亚热带气候条件,潮湿多雨,地形排水条件好,在此环境下,峨眉山玄武岩长期暴露地表遭受风化、剥蚀,将玄武岩中的铜呈溶解状态或呈矿物微粒被悬浮状态的黏土矿物等所吸附(Sholkovitz, 1978),而搬运到康滇古陆东侧的近海岸地带沉积。

沉积富集阶段:铜的地球化学性质决定它难以在地表水体中长距离大规模搬运(华仁民,1995),而从薄片镜下鉴定照片(图3b、e)中可以看出,碎屑颗粒呈棱角状,磨圆度差,正好说明搬运距离不远。另

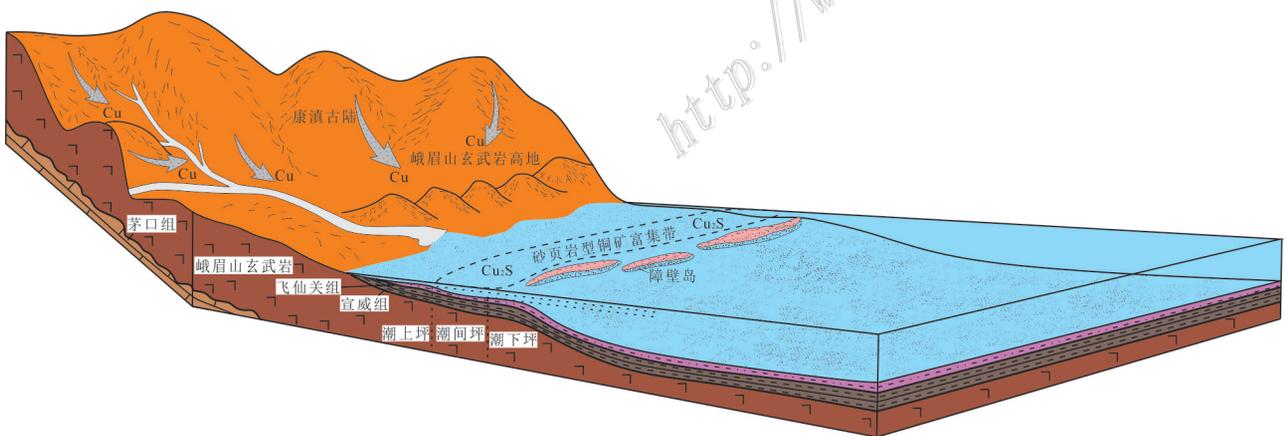


图10 沐川地区飞仙关组底部砂页岩型铜矿成矿模式图

Fig.10 Schematized metallogenic model of sandstone-shale-hosted copper deposit at the bottom of the Feixianguan Formation in Muchuan area

外,康滇古陆东侧的沐川地区早三叠世初期的岩相古地理环境属于临海的环境,即潮坪亚相,物源距沉积区较近,有利于铜的沉积。Samama(1980)研究表明,铜的沉淀需要安静稳定的低能水动力条件,而大量粗碎屑相参与的高能沉积环境不利于铜的沉积成矿。根据研究区铜的富集规律显示,铜主要富集于粉砂质条带黏土岩、灰绿色泥质条带粉砂岩等潮坪亚相岩石中,粉砂质条带黏土岩、灰绿色泥质条带粉砂岩等沉积物往往通气不良,这种环境适宜厌氧细菌的活动,有利于铜以硫化物形式沉淀下来(华仁民,1995)。此时,沐川地区处于有障壁型海岸相的潮坪亚相环境,属于相对安静的低能环境,潮间混合坪微相属于潮坪亚相中水动力条件适中的环境,同时古地形平缓并微凹陷,最适宜铜的沉淀成矿。

成岩保存阶段:铜质沉积后,随着进一步海浸,在富铜沉积物之上沉积了飞仙关组二段至四段地层,从而将飞仙关组底部的砂页岩型铜矿层覆盖保存。

## 5 结 论

(1) 沐川地区砂页岩型铜矿体产出于早三叠世飞仙关组底部(一段)的一套灰绿色细碎屑岩中,主要矿石类型有粉砂质条带黏土岩型铜矿、泥质条带粉砂岩型铜矿、粉砂岩型铜矿和细砂岩型铜矿,矿石矿物以黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿为主。

(2) 沐川地区飞仙关组底部为有障壁型海岸相潮坪亚相沉积,可识别出潮上泥坪微相、潮间混合坪微相、潮下砂坪微相和潮渠微相4种微相,总体上属于贫氧过渡-缺氧还原沉积环境;Cu元素主要富集于粉砂质条带黏土岩和泥质条带粉砂岩等水动力条件较弱的潮间混合坪微相中,以前者为主,后者次之,粉砂岩中的Cu元素富集程度次于前两者,细砂岩中的Cu元素富集程度最低,大多数细砂岩中Cu的含量未达到边界品位,严格受岩相古地理及沉积相的控制。

(3) 沐川地区飞仙关组底部砂页岩型铜矿中Cu元素主要来源于已初步富集铜的峨眉山高钛玄武岩,西部的康滇古陆(玄武岩高地)是其主要的物源区。

(4) 沐川地区飞仙关组底部砂页岩型铜矿的成因具同生成因特点,属于沉积型铜矿床,其成矿模式可分为4个阶段,即峨眉山玄武岩喷溢(矿源层形

成)阶段、风化剥蚀搬运阶段、沉积富集阶段和成岩保存阶段。

**致 谢** 衷心感谢审稿专家对本文的评审并提出的修改意见。

## References

- Cheng W B, Dong S Y, Jin C H, Zhao B, Zhang Y and Wang C. 2019. Characteristics of elemental geochemistry and petrogenesis discussion of the Emeishan basalts in Muchuan area, Sichuan Province[J]. *Mineralogy and Petrology*, 39(4): 49-60 (in Chinese with English abstract).
- Dai H Z, Liu J J and Zhu W B. 2018. Studies on tectonic setting, sedimentary environment and mineralization mechanism of the Yunnan copper in Yunnan Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(1): 108-124.
- Fan W M, Zhang C H, Wang Y J, Guo F and Peng T P. 2008. Geochronology and geochemistry of Permian basalts in western Guangxi Province, Southwest China evidence for plim-lithosphere interaction[J]. *Lithos*, 102(1-2): 218-236.
- Gao H, Pei R f, Wang A j, Cao D H, Fan S J and Mei Y X. 2012. Marine sand shale-hosted copper mineralization model and geological correlation: A case study of the Dongchuan copper mine in Yunnan and the Aynak copper mine in Afghanistan[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1332-1351 (in Chinese with English abstract).
- He B, Xu Y G, Xiao L, Wang K M and Sha S L. 2003. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: New evidence from stratigraphic records[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 194-202 (in Chinese with English abstract).
- He B, Xu Y G, Wang Y M and Zhen Y L. 2006. Sedimentation and lithofacies paleogeography in SW China before and after the Emeishan flood volcanism: New insights into surface response to mantle plume activity[J]. *The Journal of Geology*, 114: 117-132.
- Hua R M. 1995. Three main genetic models of stratiform copper deposits[J]. *Geological Review*, 41(2): 112-120 (in Chinese with English abstract).
- Jiang H B, Jiang C Y, Qian Z Z, Zhu S F, Zhang F B and Tang D M. 2009. Petrogenesis of high-Ti and low-Ti Emeishan basalts in Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1117-1134 (in Chinese with English abstract).
- Li H M, Mao J W, Zhang G, Xu Z B, Gao H G, Zhang C Q, Wang D H and Xu H. 2006. Alteration zoning and organic fluid inclusions in basalt copper deposits in northeastern Yunnan and western Guizhou and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1026-1034 (in Chinese with English abstract).
- Li S R, Yang Y P, Gong Z D, Yang Y F and Yang X G. 2016. Metallogenic regularity and resource evaluation of copper deposits in Si-

- chuan Province[M]. Beijing: Science Press. 1-210(in Chinese).
- Liu J Q, He L, Hu Y H, He J W and He P. 2019. The petrological and geochemical characteristics of Emeishan basalt in Leibo County, Sichuan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41 (3) : 325-336 (in Chinese with English abstract).
- Ma J F, Sha X B, Liu J Q, Li Y G and He L. 2019. Geochemical characteristics and genesis of Emeishan basalt in Yanjin area[J]. *Mineralogy and Petrology*, 39(2): 25-33 (in Chinese with English abstract).
- Miao Y, Tian Y F, Wu L, Lü X C, Li S Z and Song W T. 2021. Zircon U-Pb chronology, petrochemistry and its implications for Rodinia supercontinent tectonic evolution in the Lower Triassic Feixianguan Formation in the Daibu area, Southwest of Upper Yangtze[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(12) : 3739-3757(in Chinese with English abstract).
- Ren G M, Wen J, Pang W H, Lu J Y, Zhang P and Zhou Y. 2018. 1:50 000 regional geological survey report of Luoluoba, Luokan and Yuhe sheets in Wumeng mountain area of Yunnan Province[R]. 1-216 (in Chinese).
- Samama J C. 1980. A comparative review of the genesis of sandstone-type copper-lead deposits[A]. Director: Wolf K H. Layer-controlled deposits and layered deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-17(in Chinese with English abstract).
- Shao L Y, Gao C X, Zhang C, Wang H, Guo L J and Gao C H. 2013. Sequence-palaeogeography and coal accumulation of Late Permian in southwestern China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31 (5) : 856-866(in Chinese with English abstract).
- Sholkovitz E R. 1978. The flocculation of dissolved Fe, Mn, Cu, Ni, Co and Zn during estuarine mixing[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 41(1) : 77-86.
- Sichuan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1977. The stratigraphic summary report of the Late Permian Xuanwei Formation in the Leshan-Liangshan area of Sichuan Province[R]. 1-265(in Chinese).
- Sichuan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1997. Sichuan lithostratigraphy[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1-417(in Chinese).
- Leshan Geological Team of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources. 1961. Exploration report of Zhangjiacun-Shengjiping copper mine in Muchuan County, Sichuan Province[R]. 1-220 (in Chinese).
- No.207 Geological Tem of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources. 2012. Detailed investigation report of Yujiaping copper mine in Muchuan County, Sichuan Province[R]. 1-98 (in Chinese).
- No.207 Geological Tem of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources. 2019. Summary report of the 2019 annual mass screening of Zhoujiawan copper mine in Muchuan County, Sichuan Province[R]. 1-103(in Chinese).
- No.207 Geological Tem of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources. 2019. Summary report of the 2019 annual detailed investigation of Shengjiping copper mine in Muchuan County, Sichuan Province[R]. 1-95(in Chinese).
- Wang F L, Zhao T P, Chen W and Wang Y. 2013. Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopic compositions of the Nb-Ta-Zr bearing syenitic dikes in the Emeishan large igneous Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10) : 3519-3532(in Chinese with English abstract).
- Wang F D, Zhu X Q and Wang Z G. 2011. Madouzi-type(nodular)sedimentary copper deposit associated with the Emeishan basalt[J]. *Science China Earth Sciences*, 54: 1880-1891.
- Wang Y, Wang K, Xing C M, Wei B, Dong H and Cao Y H. 2017. Metallogenic diversity related to the Late Middle Permian Emeishan large igneous Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36 (3) : 404-417(in Chinese with English abstract).
- Wen J, Ren G M, Pang W H, Lu J Y, Zhang P and Zhou Y. 2019. Analysis of sedimentary environment and coal accumulation under the sequence stratigraphic framework of the Late Permian in the Dianqianbei Weixin depression[J]. *Mineralogy and Petrology*, 39(3) : 85-94(in Chinese with English abstract).
- Wen J, Liu Z C, Zhu H L, Zhang H F, Zhang J Y, Zhong H R, Chen D F, Guo W Y, You X J, Zhao W, Ling M Q, Li P C, He Y G and Guo Y H. 2021. Characteristics and geological significance of abnormal enrichment of Nb-REE in bottom of Uper Permian Xuanwei Formation in Muchuan area, southern Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 40(5) : 1045-1071(in Chinese with English abstract).
- Xu Y G. 2002. Mantle plumes, large igneous provinces and their geologic consequences[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4) : 341-353 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Li R T, Ba J, Li X P and Ma J Y. 2019. Geochemical characteristics of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Meigu area, southwestern Sichuan and its significance for the provenance and tectonic setting[J]. *Mineralogy and Petrology*, 39(3) : 52-59 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Mao J W, Wang F S and Pirajno F. 2006. Native gold and native copper grains enclosed by olivine phenocrysts in a picrite lava of the Emeishan large igneous province[J]. *American Mineralogist*, 91(7) : 1178-1183.
- Zhang Z C. 2009. A discussion on some important problems concerning the Emeishan large igneous Province[J]. *Geology in China*, 36(3) : 634-646(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Hou T and Cheng Z G. 2022. Mineralization related to large igneous Provinces[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96 (1) : 131-154(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y L, Wang Z Q, Wang G, Li Q and Lin J F. 2016. Chromian spinel, zircon age constraints on the provenance of Early Triassic Feixianguan Formation sandstones from Huize area, Upper Yangtze region[J]. *Geological Review*, 62 (1) : 55-72 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y X, Luo Y N and Yang C X. 1988. Panxi rift[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-325(in Chinese).
- Zhao B, Ma R Z, Tao X F, Liu D Z and Hu X W. 2015. 1:50 000 re-

- gional geological survey report of Xiangshui, Baina, Dafang, Linquan, Niuchangpo, Shawo sheets in Guizhou[R]. 1-469 (in Chinese).
- Zhou Y S, Yang J H, Huang Y, Liu J Z, Qi L S and Deng X S. 2022. Provenance of the Lower Triassic Feixianguan Formation in southwestern Guizhou Province and reconstruction of volcanic denudation sequence in Emeishan large igneous Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(7): 2348-2364 (in Chinese with English abstract).
- Zhu M, Chen H L, Zhou J and Yang S F. 2016. Provenance of Early Triassic in Yanyuan basin, Upper Yangtze and its implication for the tectonic evolution[J]. *Earth Science*, 41(8): 1309-1321 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 程文斌,董树义,金灿海,赵兵,张琦,王畅. 2019. 四川省沐川地区峨眉山玄武岩元素地球化学特征与成因探讨[J]. *矿物岩石*, 39(4): 49-60.
- 代鸿章,刘家军,朱文兵. 2018. 云南因民铜矿床构造沉积环境及成矿机制研究[J]. *地质前缘*, 25(1): 108-124.
- 高辉,裴荣富,王安建,曹殿华,范世家,梅燕雄. 2012. 海相砂页岩型铜矿成矿模式与地质对比——以中国云南东川铜矿和阿富汗安纳克铜矿为例[J]. *地质通报*, 31(8): 1332-1351.
- 何斌,徐义刚,肖龙,王康明,沙绍礼. 2003. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布:来自沉积地层学的新证据[J]. *地质学报*, 77(2): 194-202.
- 华仁民. 1995. 试论层状铜矿的三种主要成因模式[J]. *地质论评*, 41(2): 112-120.
- 姜寒冰,姜常义,钱壮志,朱士飞,张蓬勃,唐冬梅. 2009. 云南峨眉山高钛和低钛玄武岩的岩石成因[J]. *岩石学报*, 25(5): 1117-1134.
- 李厚民,毛景文,张冠,徐章宝,高宏光,张长青,王登红,许虹. 2006. 滇黔交界地区玄武岩铜矿蚀变分带和有机包裹体特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 80(7): 1026-1034.
- 李仕荣,杨永鹏,龚志大,杨永峰,杨先光. 2016. 四川省铜矿成矿规律及资源评价[M]. 北京:科学出版社. 1-210.
- 刘建清,何利,胡宇瀚,何佳伟,何平. 2019. 四川雷波峨眉山玄武岩岩石学及地球化学特征[J]. *地球学报*, 41(3): 325-336.
- 马健飞,沙小保,刘建清,李佑国,何利. 2019. 盐津地区峨眉山玄武岩地球化学特征及成因分析[J]. *矿物岩石*, 39(2): 25-33.
- 缪宇,田瑜峰,吴亮,吕晓春,李仕忠,宋文婷. 2021. 上扬子西南待补地区飞仙关组年代学、岩石地球化学及其对Rodinia超大陆构造演化的指示[J]. *地质学报*, 95(12): 3739-3757.
- 任光明,庞维华,卢君勇,文俊,张鹏,周洋. 2018. 云南乌蒙山区1:5万洛洛坝、罗坎、雨河3幅区域地质调查报告[R]. 1-216.
- Samama J C. 1980. 关于砂岩型铜铅矿床成因的对比性评述[A]. 主编:沃尔夫K H. 层控矿床和层状矿床 [C]. 北京:地质出版社. 1-17.
- 邵龙义,高彩霞,张超,汪浩,郭立君,高彩红. 2013. 西南地区晚二叠世层序——古地理及聚煤特征[J]. *沉积学报*, 31(5): 856-866.
- 四川省地质局乐山地质队. 1961. 四川省沐川县张家村一生基坪铜矿区勘探报告[R]. 1-220.
- 四川省地质矿产局. 1977. 四川省乐山-凉山地区晚二叠世宣威组地层总结报告[R]. 1-265.
- 四川省地质矿产局. 1997. 四川省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 1-417.
- 四川省地矿局二零七地质队. 2012. 四川省沐川县喻家坪铜矿详查报告[R]. 1-98.
- 四川省地矿局二零七地质队. 2019. 四川省沐川县周家湾铜矿普查2019年度总结报告[R]. 1-103.
- 四川省地矿局二零七地质队. 2019. 四川省沐川县生基坪铜矿详查2019年度总结报告[R]. 1-95.
- 王汾连,赵太平,陈伟,王焰. 2013. 峨眉山大火成岩省赋Nb-Ta-Zr矿化正长岩脉的形成时代和锆石Hf同位素组成[J]. *岩石学报*, 29(10): 3519-3532.
- 王焰,王坤,邢长明,魏博,董欢,曹永华. 2017. 二叠纪峨眉山幔柱岩浆成矿作用的多样性[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 36(3): 404-417.
- 文俊,任光明,庞维华,卢君勇,张鹏,周洋. 2019. 滇黔北威信凹陷晚二叠世沉积环境与层序地层格架下的聚煤规律浅析[J]. *矿物岩石*, 39(3): 85-94.
- 文俊,刘治成,竹合林,张航飞,张金元,钟海仁,陈东方,郭文彦,游学军,赵伟,凌茂前,李鹏程,何永刚,郭宇衡. 2021. 川南沐川地区上二叠统宣威组底部Nb-REE超常富集特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 40(5): 1045-1071.
- 徐义刚. 2002. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应[J]. *地质前缘*, 9(4): 341-353.
- 张衡,李仁涛,巴金,李小平,马继跃. 2019. 川西南美姑地区下三叠统飞仙关组地球化学特征及其对物源和构造环境的指示意义[J]. *矿物岩石*, 39(3): 52-59.
- 张招崇. 2009. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论[J]. *中国地质*, 36(3): 634-646.
- 张招崇,侯通,程志国. 2022. 大火成岩省的成矿效应[J]. *地质学报*, 96(1): 131-154.
- 张英利,王宗起,王刚,李谦,林健飞. 2016. 上扬子会泽地区早三叠世飞仙关组砂岩物源特征:来自重矿物铬尖晶石和碎屑锆石的限定[J]. *地质论评*, 62(1): 55-72.
- 张云湘,骆耀南,杨崇喜. 1988. 攀西裂谷[M]. 北京:地质出版社. 1-325.
- 赵兵,马润则,陶晓风,刘登忠,胡新伟. 2015. 贵州1:5万响水、白纳、大方等6幅区域地质调查报告[R]. 1-469.
- 周寅生,杨江海,黄燕,刘建中,祁连素,邓旭升. 2022. 黔西南下三叠统飞仙关组沉积物源分析对于峨眉山大火成岩省火山剥蚀序列的重建约束[J]. *地质学报*, 96(7): 2348-2364.
- 朱民,陈汉林,周静,杨树锋. 2016. 上扬子西南盐源盆地早三叠世物源体系及构造意义[J]. *地球科学*, 41(8): 1309-1321.