

新疆东昆仑阿卡苏盖提坎锰矿的发现及其意义

陈登辉^{1,2,3*}, 冯红刚³, 连政³

(1.自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安, 710054; 2.中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054;

3.新疆地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队, 乌鲁木齐, 830011)

昆仑造山带位于青藏高原北缘, 处于印度板块与欧亚板块的结合部位, 是青藏高原的重要组成部分, 也是研究特提斯构造演化的重要区域。海相沉积型锰矿是昆仑造山带的优势矿产之一, 特别是西昆仑玛尔坎苏优质锰矿带的发现说明昆仑造山带具备形成大规模、高品位海相沉积型锰矿的成矿条件。玛尔坎苏锰矿带累计探获锰矿石资源量超过 5000 万吨, 远景资源量近 1 亿吨, 具有较大的锰矿找矿潜力, 包括了奥尔托卡纳什锰矿、穆呼锰矿、玛尔坎土锰矿等多个大中型锰矿床(高永宝等, 2017; 陈登辉等, 2019a; 2022); 玛尔坎苏锰矿带二叠纪地层中发现了博拖彦南锰矿(陈登辉等, 2019)。新疆地矿局第一区域地质调查大队 2022 年在东昆仑屈库勒克一带石炭系碳酸盐岩-硅质岩中发现神仙山锰矿(菱锰矿, 品位 11%-55%)、阿卡苏盖提锰矿(硅锰矿、方锰矿、菱锰矿, 品位 13%-25.5%), 在二叠系碳酸盐岩地层中发现双带梁东锰矿(菱锰矿, 品位 12%-38%), 说明昆仑造山带晚古生代海相沉积型锰矿成矿是一次区域性的成矿事件, 东昆仑地区也具有海相沉积型锰矿成矿条件。

东昆仑锰矿主要位于阿卡苏盖提坎-神仙山一带, 行政区划上属于且末县至民丰县南部。大地构造位置属于秦祁昆中央构造带之昆仑造山带喀拉米兰复合沟弧带。目前已发现了阿卡苏盖提坎锰矿、神仙山锰矿、孔木洋北锰矿等多个锰矿床(点)。锰矿品位 13.1-25.5%, 矿石矿物以菱锰矿为主, 含有少量的硅锰矿、方锰矿、蔷薇辉石和锰方解石。出露地层为下石炭统托库孜达坂组(C₁tk), 也是区内主要的含锰层位, 主要为一套中基性火山岩-陆源碎屑岩-碳酸盐岩建造。区域上建造类型复杂, 岩石组合众多, 同时经历了拉张-汇聚多期构造变动, 构造作用较为强烈, 以断裂、褶皱构造为主。因此, 区域上表现为由不同单元地质体构成的复式向斜构造与北东东向断裂组合相互依存为特征。

阿卡苏盖提坎锰矿是新疆地矿局第一区域地质调查大队在东昆仑屈库勒克一带发现的海相沉积型锰矿, 是东昆仑地区新发现比较典型的锰矿床, 矿区主要出露托库孜达坂组四段。托库孜达坂组四段岩性组合为岩屑砂岩、粉砂岩、硅质岩夹少量凝灰岩、玄武岩、灰岩等, 为一套海相细碎屑岩夹基性火山熔岩、火山碎屑岩及碳酸盐岩建造。区内断裂构造较发育, 主要为北东向展布的蛇绿构造混杂岩边界断裂及其次级断裂, 见有一组北北东向展布的较晚期张性走滑断裂。锰矿带分布在阿克苏萨依南西侧高山区, 北东延伸带被第四系覆盖, 南西因山势陡峭, 切割极其强烈, 尚未完全控制。目前, 在锰矿带内发现 6 条锰矿体, 走向与矿带一致, 赋矿岩性均为硅质岩。目前控制锰矿体长度 500 米左右, 矿体呈层状产出。锰矿石为灰黑色-黑色, 表面金属光泽明显, 见褐铁矿化、孔雀石化等, 地表采集的矿石矿物以硅锰矿、方锰矿等为主。

东昆仑地区阿卡苏盖提坎锰矿、神仙山锰矿等一系列锰矿床(点)的发现说明了昆仑造山带晚古生代海相沉积型锰矿成矿是一次区域性的成矿事件; 昆仑古特提斯构造转换是昆仑造山带晚古生代巨量海相沉积型锰矿成矿的关键因素; 晚古生代冰期与昆仑造山带晚古生代海相沉积型锰矿也有较好的耦合关系, 东昆仑地区也具有较大的锰矿找矿潜力。

参考文献:

- 高永宝, 滕家欣, 陈登辉, 等. 2017. 新疆西昆仑玛尔坎苏锰矿带成矿地质特征及找矿方向[J]. 西北地质, 50(1): 261-269.
陈登辉, 隋清霖, 赵晓健, 等. 2019a. 西昆仑穆呼锰矿晚石炭世含锰碳酸盐岩地质地球化学特征及其沉积环境. 沉积学报, 37(3): 477-490.
陈登辉, 贺永康, 赵晓健, 等. 2019. 西昆仑玛尔坎苏锰矿带二叠纪博拖彦南锰矿的首次发现. 中国地质, 46(3): 666-667.
陈登辉, 隋清霖, 郭周平, 等. 2022. 西昆仑玛尔坎苏地区穆呼锰矿含锰岩系沉积环境—来自蜓类化石及碳、氧、锶同位素证据[J]. 西北地质, 55(2): 1-13.

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0806)、国家自然科学基金项目(41503046)、陕西省自然科学基金(2017JM4024)

第一作者简介: 陈登辉, 男, 1980 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事沉积学、矿床学研究。

*通讯作者, E-mail: 47134454@qq.com

运用锆石微量元素构建花岗岩成矿潜力判别 图解：机器学习视角

郭广慧, 钟世华*, 李三忠, 戴黎明, 索艳慧, 刘嘉情, 牛警徽,
薛梓萌, 黄宇

(中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

近些年来, 得益于成矿理论的发展和测试技术的提升, 人们对花岗质成矿岩浆的特征及成因机制已取得长足的认识, 建立了大量识别成矿岩体的地球化学勘查指标及阈值。其中, 依据锆石成分识别花岗岩成矿潜力已成为当前最常用的手段之一 (Zhong et al., 2021)。由于锆石在中酸性岩中广泛存在且成分稳定、不易受到后期热液活动的扰动, 因此锆石成分可以有效记录成矿岩浆信息。锆石的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 、 Ce/Ce^* 、 Eu/Eu^* 和 Ce/Nd 值可以反映岩浆氧逸度和含水量等成矿信息, 已被广泛用于花岗岩类成矿潜力评价。然而, 随着研究的深入发现, 这些地球化学指标并不完全具有普适性。此外, 以往研究均是通过对成矿岩体的“已知认识”提出成矿潜力判别方法, 但考虑到成矿过程的复杂性, 许多反映岩浆成矿能力的地球化学信息可能均尚未被揭露。

为此, 本文以东昆仑祁漫塔格成矿带为例, 借助当前广泛应用的机器学习算法之一——支持向量机, 对来自该成矿带斑岩-矽卡岩 $Cu-Fe-Pb-Zn$ 多金属矿床成矿岩体和全球非成矿岩体的锆石数据开展机器学习训练, 然后, 利用机器学习解释性算法——SHAP (SHapley Additive exPlanations), 查明不同特征对分类结果准确率的贡献度, 目的在于挖掘能够反映岩浆成矿能力的锆石微量元素特征。在此基础上, 选择一些对分类结果影响较大的特征, 运用机器学习算法绘制二元图解的决策边界, 从而构建一些新的能够反映花岗岩成矿潜力的地球化学图解。本文共收集了约 750 条锆石微量元素数据, 其中包括 350 条来自成矿岩体的锆石数据和近 400 条来自非成矿岩体的锆石数据。对于每一条数据, 选择 21 种特征用于后续机器学习训练, 包括 15 种稀土元素 (La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 和 Y)、Ti、Hf、Th、U 以及 Eu/Eu^* 和 Ce/Ce^* 。选择这些特征的原因是因为这些特征在文献中几乎均有报道, 从而确保本文可以充分利用文献中已发表的数据。将 21 个锆石特征全部作为训练输入特征时, 得到的支持向量机模型的 SHAP 值结果显示, 对输出结果影响最大的 5 个特征是 Gd、Dy、Yb、Y 和 Tm, 其次是 Lu、Er、Tb、Ho、 Eu/Eu^* 。在此基础上, 本文新提出的 10 个基于锆石成分的二元判别图解, 在区分成矿岩体和非成矿岩体时的准确率均很高, 为 0.99~1。来自成矿岩体的锆石通常表现为 Gd、Dy、Yb 和 Y 值比较低, 而 Tm 值则比较高; 来自成矿岩体的锆石则正好与之相反, 它们的 Tm 趋向于低值而其余 4 个特征趋向于高值。这些规律与 SHAP 值的结果是完全一致的。本文构建的 10 个二元图解能够有效地区分来自成矿岩体和非成矿岩体的锆石。

研究表明, 利用机器学习方法和地质大数据, 可以挖掘传统研究方法难以发现的新的地球化学指标和图解, 这对深入认识矿床成因、指导找矿勘查具有重要意义, 但目前并不存在通用性极强的机器学习模型, 地学工作者仍需根据实际情况选择不同模型进行训练学习。本文旨在向地学工作者从机器学习 (监督学习) 的角度展示常见学习方法在地矿勘察中应用的最佳案例, 帮助地学工作者利用机器学习知识进一步拓宽研究思路。

参考文献:

ZHONG S, LI S, FENG C, et al. 2021. Geochronology and geochemistry of mineralized and barren intrusive rocks in the Yemaquan polymetallic skarn deposit, northern Qinghai-Tibet Plateau: A zircon perspective. *Ore Geology Reviews*, 139: 104560.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42203066)和山东省自然科学基金项目(ZR2020QD027)联合资助

第一作者简介: 郭广慧, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: guo Guanghui778@163.com

* 通讯作者, E-mail: zhongshihua@ouc.edu.cn

柴北缘西段宽沟—红旗沟铜金矿床地质特征

贺小元^{1,2*}, 杨兴科^{3,4}

(1. 延安大学 石油工程与环境工程学院, 陕西 延安 716000;

2. 延安市工业固体废物资源化处理和处置重点实验室, 陕西延安, 716000;

3. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

4. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

宽沟-红旗沟铜金矿床处于柴北缘成矿带西段, 位于青海省海西州大柴旦镇西北部约 115km 处, 赛什腾山北侧。在红灯沟北西侧和南东侧圈定的红灯沟铜金矿床和团结沟铜金矿床, 与前人发现的红灯沟金(铜)矿点和团结沟(铜)金矿化点一一对应(李欢等, 2010), 铜金矿体赋存于宽沟-红旗沟韧性剪切带内。因此, 厘定为韧性剪切带型铜金矿。

宽沟-红旗沟铜金矿矿区地层为滩间山群灰绿色碎屑岩夹火山岩段($\in O_3T^{b-2}$)及安山玄武质火山岩段($\in O_3T^{b-3}$), 属低绿片岩相, 火山岩变质年龄为 $413\pm 39\sim 426\pm 36$ Ma (青海省第一地质矿产勘查大队, 1997), 铜金矿赋存于碎屑岩夹火山岩段($\in O_3T^{b-2}$)的安山岩中。矿区火山岩金、铜平均含量分别为 4.62×10^{-9} 、 74.97×10^{-6} (汪雯, 2010)。宽沟-红旗沟韧性剪切带, 由近平行的两条断裂组成, 呈北西向展布, 主要由构造角砾岩、糜棱岩、片岩等组成, 产状 $220^\circ\sim 240^\circ\angle 60^\circ\sim 75^\circ$, 呈波状弯曲, 延伸长度约 20 km, 宽度 2~3 km, 并见褐铁矿化、黄铁矿化、孔雀石化, 沿片理面见透镜状石英脉体, 脉宽 10~30 cm 不等, 石英脉走向 325° 左右, 近直立。剪切带以片理化带为主, 可见片理揉皱, 叠加韧性变形及印支期脆性断裂。由此说明, 区内构造活动复杂, 具有多期构造叠加的特征。韧性剪切带南段东西两侧出露中奥陶世二长花岗岩、花岗闪长岩, 如裂隙沟西侧花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 465.4 ± 3.5 Ma, 东侧相邻的团鱼山岩体年龄为 $469.7\sim 443.5$ Ma, 为中-晚奥陶世(吴锁平, 2008; Wu et al., 2009)。

宽沟-红旗沟剪切带型铜金矿床目前发现 6 条金矿体, 矿石类型为糜棱岩型、构造角砾岩型、黄铁绢云岩型、石英脉型等。由黄铜矿、蓝铜矿、赤铜矿、自然金、孔雀石及褐铁矿等组成矿石矿物, 由方解石、石英等组成脉石矿物; 半自形-他形粒状结构, 稠密-稀疏-星散浸染状、角砾状及脉状构造。围岩蚀变主要为绢云母化、石英-方解石化、黄铁矿化、黄铜矿化、孔雀石化、绿帘石化、绿泥石化, 局部有钾化等, 其中黄铜矿化、黄铁绢英化与金矿化关系密切。石英脉多数呈透镜状、石香肠状, 一般可见长约 50~100 m, 个别最大可达 175 m, 可见厚约 0.2~5 m。矿体走向 $320^\circ\sim 340^\circ$, 倾向南西, Au 品位介于 $0.12\times 10^{-6}\sim 75\times 10^{-6}$, Cu 品位介于 $0.3\times 10^{-2}\sim 4\times 10^{-2}$, 矿石比重介于 2.6~3.5g/cm³, 金属量 45.05 kg。

根据钻孔矿体穿插关系, 将成矿过程划分为: 无矿石英脉阶段 I、石英-硫化物阶段 II、石英-碳酸盐岩阶段 III (图 1)。

无矿石英脉阶段 I: 主要表现为碎裂岩, 沿裂隙分布石英脉, 白色透明干净, 无矿化, 表面绿帘石化 (图 1a)。

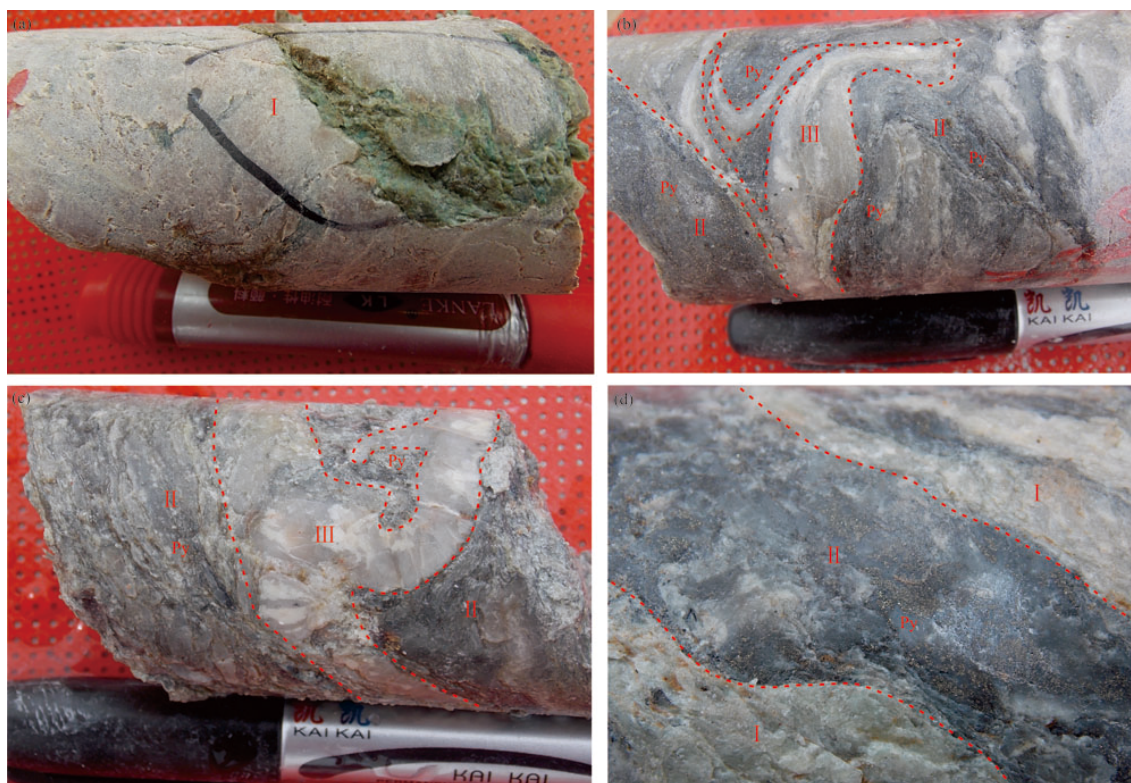
石英-硫化物阶段 II: 浅灰色石英脉, 强烈构造蚀变为糜棱岩, 含有大量黄铁矿, 呈团块状-浸染状, 伴生自然金, 并切割无矿石英脉 (图 1d), 为主要成矿阶段。

石英-碳酸盐岩阶段 III: 晚期石英-碳酸盐岩脉体沿岩石裂隙贯入, 且呈脉状穿插石英-硫化物糜棱岩 (图 1b、c), 发生后期揉皱。

基金项目: 延安大学博士科研启动基金 (项目编号: YDBK2022-31)

第一作者简介: 贺小元, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事矿田构造、岩石学、矿床学研究。

* 通讯作者, E-mail: 81556924@qq.com



a-碎裂化糜棱岩，无矿石英脉阶段 I，绿帘石化；b、c-石英-黄铁矿化 II 糜棱岩被方解石-石英脉 III 穿插，后期发生揉皱；d-无矿石英脉 I 被石英-黄铁矿脉 II 穿插

图 1 柴北缘宽沟-红旗沟铜金矿钻孔 III ZK07 中矿体特征

根据以上叙述及区域地质资料，宽沟-红旗沟铜金矿具有以下特征：①与柴北缘俯冲碰撞造山作用密切相关，②金成矿作用滞后于峰期变质作用（420~440Ma），③矿床位于滩间山群绿片岩相变质体中，④矿体主要赋存于脆-韧性剪切内石英脉或构造蚀变岩中，并伴有强烈的黄铁绢云岩化，因此厘定为韧性剪切带型金矿。

参考文献：

- Wu C L, Wooden J L, Robinson P T, et al. 2009. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids from the west segment in the North Qaidam. *Science China(Ser.D)*, 52:1771~1790.
- 李欢, 奚小双. 2010. 青海省大柴旦红旗沟金矿区剪切带构造分布特征与构造形式分析[J]. *矿产与地质*, 24(1):9-15.
- 汪雯. 2010. 青海省大柴旦红旗沟地区滩间山群地层综合研究[D]. 中南大学, 硕士学位论文.
- 吴锁平. 2008. 柴北缘古生代花岗岩类成因及其造山响应[D]. 中国地质科学院, 博士学位论文.
- 青海省第一地质矿产勘查大队. 1997. 1:5 万三角顶幅 J-46-57-A.

运用磷灰石元素与机器学习方法判别花岗岩成因类型

刘嘉情, 钟世华*, 李三忠, 戴黎明, 索艳慧, 郭广慧,
牛警徽, 薛梓萌, 黄宇

(中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

花岗岩类岩石是大陆地壳的重要组成部分, 正确识别花岗岩类型对多种金属矿床的成因研究与勘探具有重要的科学意义。尽管不同成因类型的花岗岩具有不同的矿物学特征, 但由于这些矿物在岩体中分布不均匀, 在手标本尺度上有时难以被发现。磷灰石是火成岩中最为常见的副矿物之一, 具有较高的饱和温度与较长的结晶历史, 可贯穿岩浆演化的全过程, 能够记录从岩浆结晶早期到晚期, 乃至热液阶段的演化信息, 吸引了国内外学者的关注。近年来, 机器学习方法被大量应用于地球科学领域, 如 Zhong et al (2023) 运用机器学习方法, 提出了运用锆石微量元素识别 I 型、S 型和 A 型花岗岩的方法, 并获得较高的准确率, 为我们使用磷灰石元素特征对花岗岩源岩类型判别提供方法指导。

本研究共收集来自全球的近 1200 条岩浆成因磷灰石微量元素数据, 包括 900 多条来自 I 型花岗岩的磷灰石数据和近 300 条来自 S 型花岗岩的磷灰石数据, 对于每一条数据, 选择 19 种特征用于机器学习训练, 包括 14 个稀土元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu, Sr、Y 以及由以上元素派生的 3 个比值(Eu/Eu*、Sr/Y、La/Yb)。运用两种较常见的机器学习方法——支持向量机与随机森林, 在对数据集进行缺失值处理、类不平衡处理、数据标准化之后, 运用两种机器学习方法对 I 型、S 型花岗岩的磷灰石数据进行判别。

本研究采用准确率值 (Accuracy) 评价支持向量机模型与随机森林模型的分类性能。支持向量机模型对 I 型与 S 型磷灰石数据集分类准确率为 1.00; 随机森林模型对 I 型与 S 型磷灰石数据集分类准确率为 0.99, 两种机器学习模型对磷灰石数据集分类准确率较高。为验证机器学习模型在 I 型与 S 型磷灰石数据上的普适性, 选取了 200 条新数据用于外部独立验证, 验证集中包括 138 条 I 型磷灰石数据、62 条 S 型磷灰石数据。运用本研究获得的机器学习分类器对这些验证集进行判别, 结果显示, 两种机器学习模型分类准确率皆高于 0.90。这进一步证明本研究得到的两种机器学习训练模型能够很好地识别来自 I 型和 S 型花岗岩的磷灰石。

本研究结果证明, 运用机器学习方法与磷灰石元素特征可以有效识别花岗岩源岩类型, 本研究将为运用其他副矿物开展花岗岩成因类型研究提供方法和思路上的借鉴; 同时, 将本研究结果应用于碎屑磷灰石研究, 将为花岗岩构造环境识别和找矿勘探提供新的视角。

参考文献:

Zhong S H, Li S Z, Liu Y, et al. 2023. I-type and S-type granites in the Earth's earliest continental crust. *Communications Earth & Environment*, 4: 61.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42203066)和山东省自然科学基金项目(ZR2020QD027)联合资助

第一作者简介: 刘嘉情, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: liujiaqing221129@163.com

* 通信作者, E-mail: zhongshihua@ouc.edu.cn

藏南下地壳变质岩中硫化物的岩相学特征

刘巧芬^{1,2}, 孙晓明^{1,2,3*}

(1. 中山大学, 海洋科学学院, 广东 珠海, 519000; 2. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 广东 珠海, 519000;
3. 中山大学, 地球科学与工程学院, 广东 珠海, 519000)

同位素填图表明藏南冈底斯斑岩型 Cu-Au 矿床与新生地壳在空间分布上高度重合, 同时下地壳岩石的硫化物及其高 Cu 含量表明其可能为藏南造山带的铜金矿化提供物质来源 (Hou et al., 2015)。但目前对该地区下地壳岩石相关研究多使用岩石地球化学方法探索变质岩系的起源以及锆石年代学揭示变质作用的演化过程 (Zhang et al., 2020), 对变质作用期间硫化物的演化了解甚少。

本文下地壳变质岩样品采于拉萨地体东南缘, 主要有角闪岩、片麻岩及含石榴石片麻岩, 均含有大量硫化物, 从标本看主要是黄铁矿, 呈细脉状、浸染状及面状分布。镜下可见硫化物主要为黄铁矿、黄铜矿与磁黄铁矿。磁黄铁矿分为两种类型 Po-I 与 Po-II。Po-I 呈浑圆球状被包裹在斜长石、角闪石中, 含量较少且粒径相对较小。斜长石中的 Po-I 可见有黄铜矿条带, 内部可见被溶蚀的痕迹, 边缘被氧化为黄铁矿和磁铁矿; 角闪石中的 Po-I 包裹体则相对较完整, 边缘有黄铜矿条带。Po-II 在含石榴石片麻岩中含量最高(但样品中仍以黄铁矿为主), 呈不规则状群体分布在斜长石与云母之间, 而在片麻岩与角闪岩中 Po-II 仅有零星分布。黄铜矿含量高于磁黄铁矿但次于黄铁矿的硫化物, 分为两种类型 Cpy-I、Cpy-II 与 Cpy-III。Cpy-I 呈条带状分布在 Po-I 内部或边缘。Cpy-II 呈椭球状或不规则状被包裹在黄铁矿中, 粒径多在 100~300 μm。Cpy-III 呈不规则状独立分布, 或与黄铁矿共生嵌入斜长石、角闪石等基质矿物之间。黄铁矿是含量最高的硫化物, 可分为三种类型 Py-I、Py-II 与 Py-III。Py-I 由 Po-I 氧化而成, 分布于球状 Po-I 边缘, 出现频率较低。Py-II 外层常被氧化物包裹, 呈他形细粒状, 常有黄铜矿 (Cpy-II)-黄铁矿 (Py-II)-赤铁矿-磁铁矿的圈层状分布特征, 整体呈不规则状或六边形结构, 偶见小颗粒黄铁矿被包裹在磷灰石中。Py-III 大部分颗粒粒径大, 甚至是标本肉眼可见程度, 主要呈自形粗粒状独立产出, 或与磁铁矿、赤铁矿呈大面积不规则状分布在石榴石、角闪石等含铁矿物的边界或裂隙中, 与 Py-II 的区别为不被铁氧化物包裹而是共生关系。

根据磁黄铁矿的球状形态及与寄主矿物清晰的接触面判断具有岩浆硫化物熔体来源 (Nadeau et al., 2010); 而黄铁矿与黄铜矿粒径相对大, 形态不规则, 判断为次生矿物。电子探针分析表明包裹体型磁黄铁矿 Po-I 含金量最高, 可达 0.07 wt.%。LA-ICP-MS 结果表明黄铁矿 (Py-II) 中含有多元素包体, Au 含量可达 13 ppm, 可能为 Po-I 残留。而 Po-II、Py-III 与 Cpy-III 则没有检测到含金包体。结合样品中的大量富 CO₂ 流体包裹体, 说明变质过程中氧化性流体使硫化物受改造并使其中的 Au 等元素被活化迁移, 可能为区域金矿化提供物质来源。

参考文献:

- Hou, Z.Q., Duan, L.F., Lu, Y.J., et al., 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogen. *Economic Geology* 110, 1541–1575.
- Nadeau, O., Williams-Jones, A.E., Stix, J., 2010. Sulphide magma as a source of metals in arc-related magmatic hydrothermal ore fluids. *Nature Geosci* 3, 501–505.
- Zhang, Z.M., Ding, H.X., Palin, R.M., et al., 2020. The lower crust of the Gangdese magmatic arc, southern Tibet, implication for the growth of continental crust. *Gondwana Research* 77, 136–146.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 91855213)

第一作者简介: 刘巧芬, 女, 1993 年生, 博士后, 主要从事矿床学研究。

* 通讯作者, E-mail: ecssxm@mail.sysu.edu.cn。

胶东地区招平断裂带南段旧店金矿床 流体包裹体研究

牛警徽¹, 吴明刚^{1,2}, 范德江¹, 邱敦方³, 许道学³, 田福泉³, 宋子崇³, 张永林⁴, 崔青岐⁴, 张鹏³, 王海红⁴, 梁青青³, 钟世华^{1*}

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100; 2. 烟台黄金职业学院山东烟台 265401;
3. 青岛金星矿业股份有限公司, 山东青岛 266748; 4. 福建省政和县源鑫矿业有限公司, 福建南平 353600)

旧店金矿床位于胶东地区招远-莱州成矿带, 产出于招平断裂带南段, 是一个以石英脉型为主的金矿床。矿区开采历史悠久, 积累了丰富的野外地质资料, 但对该矿床的成矿流体研究还较为薄弱。因此本次研究对旧店金矿床典型矿石和矿体等开展了详细的野外地质调查和取样, 在室内岩相学观察基础之上, 运用流体包裹体显微测温分析、包裹体激光拉曼分析等测试方法, 以期查明旧店金矿床的矿区地质特征与成矿流体特征, 为矿区矿产预测与下一步找矿勘查提供理论指导。

详细的野外地质调查研究表明, 旧店矿区矿石类型主要有含金石英脉型和含金黄铁绢英岩型两种。矿石矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、银金矿及少量的自然金。金的赋存状态主要是裂隙金, 金的产出形式以银金矿为主。根据矿物共生组合和脉体穿插关系, 结合资料将旧店金矿床成矿过程划分为石英-黄铁矿阶段、金-黄铁矿-石英阶段和石英-碳酸盐阶段三个阶段。本文通过对旧店金矿床主成矿阶段不同中段的流体包裹体的观察与研究, 发现流体包裹体存在 4 种类型: 气液两相水溶液包裹体 (I 型), 室温条件下为气相和水溶液两相, 以气液比值 50% 可细分为富气相包裹体和富液相包裹体; 单一水溶液包裹体 (II 型), 包裹体不随温度发生变化, 均为单一液相; CO₂ 三相包裹体 (III 型), 室温状态下为三相 (气相 CO₂、液相 CO₂ 和液相水), 可分为气液比大于 50% 的富 CO₂ 三相包裹体和气液比小于 50% 的含 CO₂ 三相包裹体, 包裹体粒径相对较大; 纯 CO₂ 两相包裹体 (IV 型), 由气相 CO₂ 和液相 CO₂ 构成, 个体较小。本次研究所涉及的流体包裹体均以石英作为寄主矿物, 类型以 I、III 型包裹体为主, II、IV 型包裹体也能见到, 但含量较少。通过测温工作共得到 600 多个包裹体的温度数据, 所有包裹体的均一温度范围是 110~370℃, 大多数集中在 230~320℃ 之间, 其中, I 型包裹体的均一温度虽然范围分布较大, 但整体上相对 III 型包裹体的均一温度较低; 旧店金矿床流体包裹体的盐度较低, 范围 0.21~9.24 wt% NaCl_{eqv}, 主要集中在 3.5~7.5% 之间。激光拉曼分析表明不同中段同一类型的流体包裹体在成分上具有相似性。I 型包裹体的成分主要是 H₂O, 部分含有少量 CO₂, II 型包裹体的成分主要是 H₂O, III 型包裹体成分主要是 H₂O 和 CO₂。根据所得数据计算得出成矿流体的密度在 0.59~0.99g/cm³, 属于低密度流体, 成矿压力主要集中在 630~810 bar; 成矿深度主要集中在 2.1~2.7 km。

通常情况下流体包裹体的均一温度和盐度会随着成矿过程的发生而降低 (Wen et al., 2016)。旧店金矿床主成矿期不同中段的流体包裹体在均一温度和盐度上均未发生明显变化, 说明旧店金矿床成矿流体的迁移与成矿作用是在短时间内完成的, 成矿流体性质较为均一, 未出现演化趋势。氢氧同位素特征表明成矿流体来源为岩浆水与大气降水的混合。综合赋矿围岩、控矿构造类型、矿石矿物组合、矿石类型以及成矿流体特征, 可以得出旧店金矿床为一典型的中温石英脉型金矿床, 并且该矿脉深部依然存在较大成矿潜力。

参考文献:

- Wen B J, Fan H R, Hu F F, et al. Fluid evolution and ore genesis of the giant Sanshandao gold deposit, Jiaodong gold province, China: Constrains from geology, fluid inclusions and H-O-S-He-Ar isotopic compositions[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2016, 171: 96-112.
卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (批准号: 42203066)

第一作者简介: 牛警徽, 男, 1996 年生, 博士研究生, 主要从事矿床学研究。E-mail: niujinghui@163.com

*通讯作者, E-mail: zhongshihua@ouc.edu.cn

冈底斯斑岩成矿作用研究进展与探讨

全海辉, 柴鹏*, 袁玲玲

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

冈底斯斑岩成矿带是中国西部最重要的成矿带之一, 目前已探明 Cu 资源量超过 3000 万吨, 铅、锌、金等资源量超过 730 吨(谢富伟等, 2022)。冈底斯斑岩成矿带位于拉萨地体南缘, 北以班公湖-怒江缝合带为界, 南以印度河-雅鲁藏布江缝合带为限, 是一条东西向延伸的长约 1500Km 的岩浆岩带。冈底斯斑岩成矿带在中生代经新特提斯洋向北俯冲, 并于约 65Ma 叠加了印度-欧亚大陆碰撞作用, 经历了俯冲相关的岩石圈改造、碰撞导致的地壳增厚和广泛的新生代岩浆作用。

冈底斯斑岩型成矿作用与两个不同的岩浆岩套密不可分: 1) 与 Cu-Au 矿床(例如: 雄村、拉泽)有关的侏罗纪弧; 2) 与 Cu-Mo 矿床(例如: 驱龙, 甲玛)有关的后碰撞岩浆岩套(Hou et al., 2015)。侏罗纪岩浆弧由新特提斯洋向北俯冲于拉萨地体之下形成, 被南北走向的亚东-古鲁裂谷分为东段和西段, 雄村超大型斑岩铜矿产于侏罗纪弧西段, 但东段中没有发现侏罗纪的斑岩铜矿。后碰撞埃达克质侵入体在冈底斯斑岩成矿带广泛分布, 岩石类型包括从花岗闪长岩到石英二长花岗岩和花岗岩。冈底斯东、西两段(以 87°E 为分界线)埃达克质岩均具有较高的 SiO₂、Al₂O₃、K₂O 和 Sr; Y 较低; 富集大离子亲石元素; 高场强元素亏损; 并且 Sr-Nd 同位素组成变化范围大的地球化学特征, 因此冈底斯东、西两段(以 87°E 为分界线)埃达克质岩成因相同, 但只有东段埃达克质岩与重要的斑岩铜矿床有关(Yang et al., 2016)。冈底斯东段与成矿相关的后碰撞埃达克质岩发育在侏罗纪弧内, 而同期的不含矿斑岩则侵位在弧外(Hou et al., 2015)。

与俯冲相关的侏罗纪斑岩型铜矿, 具有富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素的地球化学特征, 且具有平坦的重稀土元素配分模式, 表明其来源于俯冲改造的软流圈地幔。侏罗纪岩石的平均铅石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 从西段(平均+16)到东段(平均+6)显著降低, 降低且变化的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (1-12) 表明侏罗纪弧东段岩浆在底侵过程中有地壳组分的混入, 可能导致岩浆氧逸度降低, 诱发富铜硫化物聚集在侏罗纪下地壳弧堆晶岩中, 这很好的解释了发育于侏罗纪弧外的埃达克质岩不含矿。印度-欧亚大陆碰撞过程与含矿埃达克质岩的形成密切相关。最新研究结果表明, 印度大陆岩石圈在俯冲过程中被撕裂成多个具有不同俯冲角度的块体, 且在中角度俯冲、新生地壳发育的位置有利于斑岩型铜矿的产出(Hou et al., 2023)。冈底斯西段中生带新生下地壳的发育极少, 撕裂后的印度岩石圈地幔块体在此处为长距离低角度俯冲, 因此解释了冈底斯西段不易产生斑岩铜矿(Hou et al., 2023)。板片撕裂后在冈底斯东段发生中角度深俯冲, 软流圈上涌导致交代岩石圈地幔部分熔融产生了超钾镁铁质熔体, 这些熔体通过撕裂窗上侵于新生下地壳底部并释放大量的水和挥发分, 诱发富 Cu 新生下地壳的部分熔融, 通过壳幔混合作用形成了富铜富水的岩浆, 因此东段发育大型斑岩铜矿(Hou et al., 2023)。

参考文献:

- Hou Zengqian, Yang Zhiming, Lu Yongjun, et al. 2015. A genetic linkage between subduction-and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones. *Geology*, 43(3): 247-250.
- Hou Zengqian, Wang Rui, Zhang Haijiang, et al. 2023. Formation of giant copper deposits in Tibet driven by tearing of the subducted Indian plate. *Earth-Science Reviews*, 2023: 104482.
- 谢富伟, 郎兴海, 唐菊兴等. 2022. 西藏冈底斯成矿带成矿规律. *矿床地质*, 41(05).
- Yang Zhiming, Goldfarb Richard, Chang Zhaoshan. 2016. Generation of postcollisional porphyry copper deposits in southern Tibet triggered by subduction of the Indian continental plate. *SEG Special Publication*, 19, 279-300.

基金项目: 地质调查项目(DD20230340); 自然科学基金项目(41973045); 中国地质科学院基本科研业务费项目(JKYZD202312)

第一作者简介: 全海辉, 男, 2000 年生, 硕士, 主要从事斑岩-浅成低温热液 Au 多金属矿床成矿机理研究。

*通讯作者, E-mail: cx001chaipeng@163.com

原位Fe同位素反演荣那斑岩-浅成低温 Cu-Au矿床的热液演化过程

徐放^{1,2}, 李金祥^{1*}, 安芳³, 张夏楠⁴, 李光明⁵, 秦克章⁵, 丁林^{1,2}

(1. 中国科学院青藏高原研究所 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室 北京 100101; 2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院 北京 100049; 3. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室 西安 710069; 4. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室 南昌 330013; 5. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院矿产资源研究重点实验室 北京 100029)

斑岩-高硫型浅成低温 Cu-Au 成矿系统的热液演化过程对于探究其成因机制具有重要作用, 但因其过程的复杂性, 传统稳定同位素 (H-O-S) 在解析该过程的不足逐渐显现。近年来随着 Fe 同位素测试分析技术的成熟和岩浆-矿物-流体间 Fe 同位素分馏系数的限定, 使 Fe 同位素逐步成为探讨热液演化过程的有力工具 (朱祥坤等, 2008; Li et al., 2010; 何永胜等, 2015; 黄方和田筌谕, 2018)。

荣那 Cu-Au 矿床位于西藏班公湖-怒江成矿带西段多龙矿集区北部, 是西藏首例斑岩-高硫型浅成低温热液型铜矿床; Cu 资源储量巨大 (>1500 万吨), 是区内最大的超大型 Cu-Au 矿床, 目前勘探其深部矿体界限仍未探明。该矿床斑岩型与高硫型浅成低温热液的蚀变矿化在空间上呈上下叠置关系 (李光明等, 2015; 唐菊兴等, 2016; Lin et al., 2017), 是利用 Fe 同位素揭示斑岩-浅成低温 Cu-Au 成矿系统热液演化过程的理想对象。该矿床发育有下部斑岩成矿有关蚀变, 主要有黑云母化与硅化绢云母化; 以及上部高硫型浅成低温矿化相关的高级泥化蚀变, 主要包含高岭土化、叶腊石化和明矾石化。深部斑岩阶段矿化主要发育有黄铜矿、斑铜矿, 偶见辉钼矿 (Cu-Fe-S 体系); 高硫型浅成低温热液阶段矿化发育有辉铜矿、蓝辉铜矿、砷黝铜矿、铜蓝和硫砷铜矿 (Cu-S 体系) 等。在各蚀变矿化带中相应发育有典型斑岩-浅成低温热液系统的脉系, 依据形成先后顺序可分为: 深部钾化带内花岗闪长斑岩中的 EB 型脉、A 型脉, 硅化绢云母化带 B 型脉, 常切穿早期的 A 型脉; C 型脉, 主要由绿泥石、石英、电气石和黄铁矿组成; 与高硫型浅成低温热液蚀变矿化相关的脉含有明矾石、叶腊石、高岭石、地开石等典型蚀变矿物, 脉壁平直, 分布于矿床的中上部。

本次研究选择 04 排 5 个钻孔 (ZK0804、ZK3204 等) 内的斑岩-浅成低温蚀变矿带中黄铜矿-黄铁矿为主要对象。在系统岩相学和矿相学的基础上, 采用微区原位 Fe 同位素技术测试分析, 结果显示: 硅化-绢云母化花岗闪长斑岩中黄铜矿的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 为: $-0.51\text{‰}\sim-0.16\text{‰}$, 基于黄铜矿与流体之间分馏很小 (Syverson et al., 2017), 所以其基本代表斑岩蚀变矿化阶段成矿流体的 Fe 同位素组成; 与之共生的黄铁矿的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 为: $0.11\text{‰}\sim 0.38\text{‰}$ 。而在浅成低温热液阶段黄铜矿的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 为: $-1.19\text{‰}\sim-1.16\text{‰}$, 共生黄铁矿的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 同位素变化大 ($-1.15\text{‰}\sim 0.42\text{‰}$), 最低可以达到 -1.15‰ , 显示从斑岩-浅成低温阶段黄铜矿和黄铁矿的 Fe 同位素是逐渐降低的, 这与矿集区内多龙斑岩-拿顿浅成低温系统的 Fe 同位素变化趋势是一致的 (Li et al., 2018)。同时, 结合所有黄铁矿的 Fe 同位素值 ($-2.58\text{‰}\sim 0.82\text{‰}$), 同样也显示斑岩-浅成低温演化过程中黄铁矿 Fe 同位素呈逐渐变轻的趋势。在深部斑岩蚀变矿化带内一些样品中 Fe 同位素变化也很大 (如 4004 孔 890m, 其 $\delta^{56}\text{Fe}$ 范围 $-0.33\text{‰}\sim 0.46\text{‰}$), 指示了浅成低温热液矿化的叠加。综合已发表的流体包裹体 (杨超等, 2014; Zhang et al., 2020)、硫化物 S 同位素 (Yang et al., 2020) 以及微量元素特征 (He et al., 2018), 这种 Fe 同位素变化可能受控于流体氧逸度和温度, 进一步指示了斑岩-浅成低温演化过程中氧逸度的升高而导致流体中 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值的变化。通过对荣那矿床 Fe 同位素的研究, 表明 Fe 同位素联合 H-O-S 同位素是解析岩浆-热液演化过程的有效手段之一。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41972083, 42372091, 42102096)

第一作者简介: 徐放, 男, 1999 年生, 硕士, 主要从事斑岩型成矿系统的研究。

* 通讯作者, E-mail: xufang@itpcas.ac.cn; ljx@itpcas.ac.cn

印尼爪哇岛Pacitan地区矽卡岩型铁锰矿床 辉石和绿泥石矿物学特征及其地质意义

臧政博¹, 李双^{1*}, 杨晓勇², 孙赛军³

(1. 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004;

2. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026; 3. 深海研究中心, 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071)

印尼 Pacitan 地区矽卡岩型铁锰矿床位于印度尼西亚东爪哇岛西南边缘的南部山区。南部山区出露第三纪火山岩, 被始新世、渐新世、中新世至上新世的年轻火山岩和石灰岩覆盖。Pacitan 地区的矿化带主要位于一个半径约 5 公里的区域, 矿化作用与渐新世-中新世火山碎屑岩中的英安岩脉侵入有关。前人对东爪哇 Pacitan 地区矽卡岩型铁锰矿床进行了化探和物探等详细的勘查工作, 发现 Pacitan 地区矽卡岩型铁锰矿床中主要发育有四种蚀变类型: 青磐岩化、泥化、千枚岩化和钙硅酸盐化蚀变(Warmada et al., 2008)。在 Pacitan 地区矽卡岩型铁锰矿床中与成矿相关的火成岩为闪长玢岩, 围岩为白云岩。本研究对象包括 Pacitan 地区矽卡岩型铁锰矿床中的闪长玢岩以及矽卡岩。

通过电子探针技术对闪长玢岩中绿泥石、矽卡岩中辉石和似辉石进行分析, 分析结果得到绿泥石中 $\omega(\text{SiO}_2)$ 为 26.61%~29.33%; $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 17.62%~19.59%, 均值为 19.05%; $\omega(\text{FeO})$ 为 21.95%~28.24%; $\omega(\text{MgO})$ 为 13.90%~16.24%, 其中, 铁、镁含量呈现此消彼长的趋势, 反映了镁与铁在绿泥石中相互置换比较普遍。

辉石的 $\omega(\text{SiO}_2)$ 为 48.82%~49.83%, $\omega(\text{CaO})$ 为 21.77%~23.16%, $\omega(\text{FeO})$ 为 7.27%~10.89%, $\omega(\text{MgO})$ 为 1.70%~3.35%, $\omega(\text{MnO})$ 为 12.61%~18.82%。其中 Cr_2O_3 、 TiO_2 、 NiO 含量较少。该矿床中辉石以钙锰辉石(Jo)为主, 其次为钙铁辉石(Hd)、还有少量透辉石(Di)。钙锰辉石含量为 44.05%~65.03%, 平均值为 52.85%; 钙铁辉石含量为 24.68%~36.14%, 平均值为 32.57%; 透辉石含量为 10.29%~19.81%, 平均值为 14.58%。辉石主要属于锰钙铁辉石系列。

似辉石的 $\omega(\text{SiO}_2)$ 为 45.54%~47.39%, $\omega(\text{CaO})$ 为 6.81%~13.06%, $\omega(\text{FeO})$ 为 1.249%~7.038%, $\omega(\text{MgO})$ 为 0.1%~0.398%, $\omega(\text{MnO})$ 为 35.664%~42.075%, 其中 Cr_2O_3 、 TiO_2 、 NiO 含量较少。测试结果与闽南马坑中锰三斜辉石的测试结果相似(韩发等, 1980)。

Pacitan 地区的矽卡岩型铁锰矿床的绿泥石, 主要为密绿泥石, 少量为铁镁绿泥石及铁斜绿泥石(辉绿泥石), 指示绿泥石形成于还原环境。该矿床的绿泥石的 $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 相对偏高, 指示绿泥石形成于基性岩中。绿泥石中离子置换主要表现为 Fe 对 Mg 的置换, 指示绿泥石形成于富铁环境之中。

Pacitan 地区矽卡岩型铁锰矿床中的矽卡岩属于锰质矽卡岩范畴。矽卡岩主要的组成矿物为锰钙铁辉石、锰三斜辉石, 伴有黄铁矿化和雌黄铁矿化。矿床中的含矿锰质矽卡岩也产于距接触带有一定距离的白云岩中。辉石和似辉石的电子探针结果表明印尼 Pacitan 地区矽卡岩型铁锰矿床中的辉石和似辉石具有硅、富钙、富锰、贫钠、贫镁、贫铝、贫钾的特征。这表明围岩与闪长

玢岩发生接触交代变质作用所形成的热液中可能含有较为丰富的锰-铁元素, 同时在矽卡岩矿化阶段形成了大量的锰钙铁辉石、锰三斜辉石以及含锰的铁矿石。

参考文献:

Warmada I W, Tun M M, Fukuda K, et al. 2008. Stability field between hedenbergite and johannsenite in Kasihan Fe-Mn (Au) skarn deposit, Pacitan, East Java. *Pertemuan Ilmiah Tahunan*, 37: 562-568.

韩发, 葛朝华, 谭惠静, 等. 1980. 闽南马坑等地钙蔷薇辉石及锰三斜辉石. *地质论评*, 3: 30-38.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41803038)、广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA138193)

第一作者简介: 臧政博, 男, 硕士研究生, 矿床地球化学, 541004. E-mail: 861609568@qq.com。

*通讯作者, E-mail: lishaung@glut.edu.cn。

柬埔寨油气成矿潜力评述

曾祥婷^{1*}, 朱华平¹, 谭杰², 黎绍杰²

(1. 中国地质调查局 成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 611230; 2. 中国有色桂林矿产地质研究院, 广西 桂林 541004)

柬埔寨位于印支板块的西南边缘, 处在欧亚大陆、太平洋板块和印度板块的交会处, 构造演化历史复杂, 地层发育完整, 具有生油生气条件, 但其地质工作程度较低, 截止目前油气勘探主要集中在西南的滨海地区。

本文探索性的利用无机地球化学的副样(土壤及水系沉积物), 按照油气地球化学勘查标准加工样品, 对柬埔寨 5 个陆上油气盆地进行油气地球化学指标分析, 最终检测出与石油、天然气直接关联的烃类各项指标信息(甲烷、乙烷、丙烷、吸附相态汞、后生碳酸盐、电导率), 根据异常规模及各项异常强度在 5 个盆地中圈出了 7 个综合异常区块, 综合排序如下:

(1) 磅逊盆地

磅逊盆地是泰国湾盆地的一部分, 在柬埔寨的西南部, 沉积厚度大, 面积近 8 万 km², 其中陆地部分面积 2 万多 km², 是本次研究的对象, 在陆上盆地发现了 3 个异常区, 分别在盆地西北部、中西部和东南部。其中西北部异常规模较大, 约 1600 km², 其规模、强度(中内浓度带占 50-70%, 甲烷异常最大值 179 μ l/kg, 平均值 22 μ l/kg) 在 7 个异常区块中综合居于第一位; 中西部异常面积 1170 km², 异常中等(甲烷异常最大值 17.9 μ l/kg, 平均值 2.15 μ l/kg), 在 7 个异常区块中综合居于第五位; 东南部异常规模一般(约 500 km²), 异常强度中等(甲烷异常最大值 16.2 μ l/kg, 平均值 2.3 μ l/kg), 且发育岩浆活动, 在 7 个异常区块中综合居于第六位。

(2) 洞里萨盆地

洞里萨盆地位于柬埔寨西北部平原, 其间发育洞里萨湖, 为山间盆地, 面积 23800 km², 盆地中发现了 3 个异常区, 分别在盆地西北部、中部和东南部。其中西北部异常规模较大, 约 1100 km², 异常强度高(甲烷异常最大值 119.9 μ l/kg, 平均值 9.84 μ l/kg), 在 7 个异常区块中综合居于第二位; 中部异常面积 680 km², 异常中等(甲烷异常最大值 86.5 μ l/kg, 平均值 8.4 μ l/kg), 在 7 个异常区块中综合居于第三位; 东南部异常规模较大(1214 km²), 但异常强度较小(甲烷异常最大值 3.5 μ l/kg, 平均值 1.4 μ l/kg), 且构造及岩浆活动发育, 可能存在破坏性, 在 7 个异常区块中综合居于第七位。

(3) 钟盆地

钟盆地位于柬埔寨东部的桔井地区, 是印支褶皱带中一个南北向地堑的一部分, 盆地内发现 1 个异常区, 位于盆地的西北端, 异常规模大, 约 1514 km², 异常强度中等(甲烷异常最大值 15.5 μ l/kg, 平均值 3.4 μ l/kg) 在 7 个异常区块中综合居于第四位。

(4) 柯良河盆地、暹邦盆地

柯良河盆地与暹邦盆地均位于柬埔寨的东北地区, 前者横跨桔井和蒙多基里省, 后者主要在腊塔纳基里省境内, 均不同程度发现烃类信息的存在, 但异常零星、规模小、强度小, 基本不具备找油气前景。

结合各盆地的综合异常信息、有利生油地层、后期破坏构造及岩浆活动综合分析, 认为, 磅逊盆地最具找油气前景, 其次为洞里萨盆地, 最后为钟盆地, 柯良河盆地、暹邦盆地不具备找油前景。

说明: 本次工作仅是探索性运用无机地球化学样品检测油气信息, 发现的异常究竟反映的是盆地地下深部的油气活动, 还是生油岩与地下油气活动信息的综合反映, 抑或仅仅是地表出露生油地层信息的反映, 尚难以定论, 有待做进一步工作验证。

基金项目: 中国地质调查局地调项目(DD20230579, DD20230127, DD20230339)

第一作者简介: 曾祥婷, 女, 1989 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: 1009457900@qq.com

* 通信作者, E-mail: 1009457900@qq.com

云南景谷—民乐地区曾家村铜矿床地质和硫同位素地球化学特征

张宵¹, 张亚辉¹, 周家喜^{1*}, 罗开¹, 姜永果², 杨昌华²

(1. 云南大学地球科学学院云南省高校关键矿产成矿学重点实验室, 云南昆明 650500;

2. 云南省有色地质局地质地球物理化学勘查院, 昆明 650216)

曾家村铜矿位于兰坪-普洱中-新生代盆地中南部, 处于环太平洋和特提斯这两大构造域的结合处, 区域内受造山作用的影响, 岩浆活动频发, 多产铜多金属矿床(如兰坪铅锌矿、兰坪白秧坪铜多金属矿床、普洱大平掌铜矿等), 是中国著名的三江构造成矿带铜多金属成矿带的重要组成部分。

近年来曾家村铜矿所在的区域铜找矿取得重要突破(杨昌华等, 2023), 使得该区成为研究和勘查的热点区域。区内地层主要出露古生界、中生界和新生界, 其中以中生界分布最为广泛, 由老至新依次为中侏罗统花开佐组 and 上侏罗统坝注路组、下白垩统景星组和曼岗组。区域内构造主要为一系列的近南北向断裂和褶皱, 其次为北北西向的次级断裂。近南北向的断裂、褶皱与西侧澜沧江深断裂在平面上平行或近于平行, 具多期次活动特征, 并控制了区域铜矿段的展布, 且被后期形成的近北东向次级断层所切错。

区内矿石以硫化矿为主, 占比约 90%。金属矿物主要有辉铜矿、斑铜矿, 次为黄铜矿、黄铁矿, 少量硫砷铜矿、黝铜矿、方铅矿、闪锌矿和蓝辉铜矿等。铜矿物之间共生关系复杂, 常相伴产出, 根据其嵌布特征大致划分为不规则团块状或断续脉状铜矿物和微细粒铜矿物两种类型, 不规则团块状或断续脉状铜矿物是在部分矿块中富集产出的中粗粒铜矿物集合体, 而微细粒铜矿物则为广泛分布于矿石中的微细粒铜矿物集合体。脉石矿物组成较为简单, 主要为方解石、钙泥质物等, 其次是石英、绢云母和长石等。

本次研究共采集 60 件样品, 分别采集黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿五种硫化矿物, 开展 S 原位同位素组成分析, 结果显示全部硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值在 -22.47‰~+8.78‰ 之间, 多数集中在零值附近, 平均值为 -4.30‰, 极差为 31.25‰, 表明矿床中硫的来源具有多来源混合特征, 是深部岩浆硫和沉积硫共同贡献的结果, 而沉积硫的还原可能经历了细菌硫酸盐还原和热化学还原两个过程。因此, 本文认为曾家村铜矿床成矿物质来源多样, 成矿作用复杂, 矿床成因亟需深入剖析, 否则将严重制约进一步找矿勘查。

参考文献:

杨昌华, 肖章程, 姜永果, 等. 云南景谷民乐地区铜矿勘查获得新突破[J]. 矿物学报, 2023, Doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.068.

基金项目: 本文受云南大学科研启动项目(YJRC4201804)、云南大学关键金属成矿与找矿预测创新团队(2021-3)、云南省教育厅关键金属成矿与找矿预测硕士生导师团队(2023-15)和云南大学第十五届研究生科研创新项目(KC-23234015)联合资助

第一作者简介: 张宵, 男, 1999年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: 12022118093@mail.ynu.edu.cn

*通讯作者, E-mail: zhoujiayi@ynu.edu.cn

张家坪子金矿床成因及成矿预测：来自黄铁矿 LA-ICP-MS原位微区和热电性的证据

朱莉叶，严冰*

(成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

张家坪子金矿床大地构造处在扬子陆块西缘的金河-程海深大断裂附近, 是丹巴-冕宁金矿带内新发现的超大型金矿床。该矿床主要经历了中元古代的岩浆变质作用, 晚侏罗世至早白垩世的韧性剪切作用, 燕山期和喜山期的富矿热液作用, 金矿体石英 K-Ar 法年龄在 25Ma (辛存林等, 2016), 处于晚碰撞期。矿床共有 97 个已探明的矿体, 主要有 5 个大型矿体, 60 号矿体为主要矿体之一, 矿体呈层状、透镜状或不规则形态, 赋存于中三叠统 (T_2) 中浅变质绿片岩带及蚀变交代白云岩 (Dm) 内。矿石类型以蚀变岩型为主, 石英脉型次之。成矿元素由热液石英脉携带而来, 往往靠近石英脉的块段为高品位矿体, 远离石英脉的蚀变带弱矿化至无矿, 矿床平均品位为 2.01 g/t (辛存林等, 2016)。矿石矿物以金属硫化物为主, 约占 15%~20%, 以黄铁矿为主, 另有少量方铅矿、黝铜矿、黄铜矿、自然金等; 脉石矿物约占 80%~85%, 主要为白云石、石英、绢云母、铬云母, 含少量绿泥石、钠长石; 表生矿物有褐铁矿。矿石构造以浸染状、细脉浸染状、层纹状构造为主, 次为团块状构造、角砾状构造; 矿石结构以不等粒自形-半自形晶结构、它形结构为主, 其次为交代残余结构、鳞片变晶结构、碎裂结构等。围岩蚀变发育绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化、硅化、绢云母化。

张家坪子金矿床成因一直存在争议, 一种观点是浅成低温热液型金矿床 (包小强等, 2016), 另一种观点是造山型金矿 (Yan et al, 2023)。为探讨其矿床成因类型, 以张家坪子金矿床载金黄铁矿为研究对象, 分析黄铁矿热电性标型特征对成矿规模、深度和温度的指示作用, 并利用 LA-ICP-MS 激光剥蚀电感耦合离子质谱技术对本次所采的不同期次载金黄铁矿进行原位微区及矿物学研究, 查明黄铁矿微量元素含量, 分析微量元素的特征、赋存状态和金的迁移富集机制, 厘定矿床成因并为找矿提供新的思路。

结果表明, 黄铁矿分为三期: 粗粒黄铁矿 (PyI)、中-细粒黄铁矿 (PyII) 和脉状黄铁矿 (PyIII), 其中 PyII 为主成矿期, Au 的含量最高。Co、Ni、As 元素激光剥蚀曲线与 Fe、S 激光剥蚀曲线大致平行, 且无明显的“尖峰”及“利谷”, 主要以类质同象形式赋存于黄铁矿中, Cu、Pb、Zn、Bi、Ag、Te、Sb 等元素激光剥蚀曲线中存在明显的“尖峰”, 表明以微粒或纳米微粒包体于黄铁矿颗粒内部或间隙, Cu 的含量在 PyIII 阶段中显著增加, 而 Pb 含量在 PyII 阶段中达到最高值, 说明有方铅矿、黄铜矿等独立矿物的存在。Au 有两种赋存方式: (1) 以可见金的形式呈粒状或片状充填于黄铁矿裂隙中, (2) 不可见金主要以固溶体金 (Au^+) 的形式存在于黄铁矿晶格中 ($Au/As < 0.02$), 少量以微粒或纳米微粒的形式 (Au^0) 分布于黄铁矿晶体内部 ($Au/As > 0.02$), 这与造山型金矿床中 Au 的赋存方式相似。Cu/Au 比值 > 1 指示成矿环境中, Au 以 $Au(HS)^2-$ 的形式在还原环境下迁移, As/Sb 比值 > 20 则表明成矿流体在沸腾状态下发生沉淀。PyI 和 PyII 型黄铁矿落在变质热液型区域, PyIII 落在浅成低温热液型或岩浆热液型区域, 表明成矿热液来源具有一定的多样性, 与造山型金矿床成矿热液特征相似。黄铁矿热电系数范围 $-278.8 \sim 325.5 \mu V/^\circ C$, 热电系数离散性较大, 矿化作用明显。通过黄铁矿热电系数计算出成矿温度为 $75.37 \sim 382.62^\circ C$, 与造山型金矿床的成矿温度范围相一致。矿体平均剥蚀率为 50.13%, 说明目前所见的矿体位于原始矿体的中部, 下部仍有较大的找矿潜力。黄铁矿 LA-ICP-MS 原位微区和热电性标型特征表明该矿床为造山型金矿床, 并指出深部仍有较大的找矿潜力。

基金项目: 矿床地球化学国家重点实验室开放研究基金资助项目 (编号: 202007)

第一作者简介: 朱莉叶, 女, 1997 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: xiachuchunmo@stu.cdut.edu.cn

* 通讯作者, E-mail: 379118262@qq.com

参考文献:

辛存林, 包小强, 安国堡. 2016. 四川张家坪子金矿床地质特征及成矿作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 52(06): 713-721

包小强. 2016. 张家坪子金矿床成矿机制及矿化富集特征[D]. 西北师范大学.

Yan B, Zhu L Y, Zhang J Q, et al. 2023. Fluid evolution and metallogenesis of the Zhangjiapingzi gold deposit in mianning, Sichuan province: constraints from fluid inclusion studies. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 11.