

文章编号: 1000-4734(2016)01-0103-08

桂中两江 Cu 矿床的地质和 S-Pb 同位素研究

蔡伊^{1,2,3}, 李艳萍⁴, 张乾¹, 王大鹏¹, 李开文⁵, 张永斌^{1,2}

(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 550002;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 贵州师范大学喀斯特生态文明研究中心; 4. 河南地质调查研究院, 河南 郑州 450001;
5. 河南地质调查研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: 两江 Cu 矿床为一个位于广西中部的石英脉型矿床。为了查明矿床成因, 笔者对该矿床分别进行了矿床地质和 S-Pb 同位素研究。结果表明, 矿石硫化物 S 同位素的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 介于 -1.22~0.96‰ 之间, 呈塔式分布, 暗示矿石 S 为岩浆或深部热液起源。矿石 Pb 同位素的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值分别介于 38.698~39.817、15.773~15.879 和 18.307~19.232 之间, 平均值分别为 39.151、15.809 和 18.307。对比研究表明, 矿石与地层(寒武系和泥盆系)砂页岩和加里东期岩浆岩完全不同的 Pb 同位素组成, 而与晚白垩世岩浆岩(包括昆仑关黑云母花岗岩)具有较为相近分布范围。因此, 该矿床的矿石 Pb 及其成矿金属物质最有可能起源于晚白垩世岩浆作用。结合矿体交代关系和成矿物质来源研究, 笔者推测该矿床最有可能形成于晚白垩世。由于含石英斑岩为加里东期岩浆作用的产物, 因此, 在矿区深部存在与成矿作用有成生关系的隐伏岩体, 很可能为昆仑关黑云母花岗岩岩基向西北方向延伸部分。区域矿化特征对比表明, 大明山 W-Cu 多金属成矿带深部可能存在砂卡岩型矿化, 并预示着巨大的找矿潜力。

关键词: 加里东期; 成矿作用; 地球化学; 燕山期; 大明山

中文分类号: P611.1; P595; P571 **文献标识码:** A **doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.01.016

作者简介: 蔡伊, 男, 1986 年, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要研究中酸性岩浆岩和多金属矿床地球化学。E-mail: enginecai@126.com

Geology and Sulfur and Lead Isotopic Geochemistry of Liangjiang Cu Deposit, Central Guangxi Province, Southern China

CAI Yi^{1,2}, ZHANG Qian¹, WANG Da-peng¹, LI Kai-wen³, ZHANG Yong-bing^{1,2}

(1. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute for Ecological Civilization of Karst Area, Guizhou Normal University, Guiyang 550001 Guizhou China; 4. 912 Geological Party of JBEDGMR, Yingtan 335001 Jiangxi China;
5. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001 Henan China)

Abstract: The Liangjiang Cu deposit, located in the central Guangxi province, southern China, is a typical quartz vein type mineralization. To clarify its ore genesis, an investigation of the geological feature and sulfur and lead isotope is carried out on this deposit. Sulfur isotopic compositions of sulfides have a relatively uniform $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ value ranging from -1.22‰ to 0.96‰, suggesting a magmatic hydrothermal origin. Ore sulfides from the deposit are enriched in radioactive lead and range in $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios from 38.698 to 39.817, 15.773 to 15.879 and 18.307 to 19.232, with the mean values of 39.151, 15.809 and 18.603, respectively. In comparison, they are obviously different from that of Cambrian and Devonian strata and Caledonian magmatic rocks, but consistent with that of the Late Cretaceous magmatic rocks, hinting to that Pb and ore-forming metals are probably derived from the Late Cretaceous magmatism. Field

收稿日期: 2014-11-01

基金项目: 矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群 (SKLOGD-ZY125-04); 国家自然科学基金面上项目 (批准号: 41372105)

* 通讯作者, E-mail: zhangqianggeo@163.com

and geochemical evidences, i.e., cross-cutting of ore bodies and magmatic origin of ore-forming materials, indicate that the Cu deposit possibly formed during Late Cretaceous. Regional mineralized features including the Gejiu, Bainiuchang, Dulong and Dachang ore districts suggest that abundant skarn and quartz ore bodies should be probably concealed under cover, indicating a vast prospecting potential at depth in the Liangjiang Cu deposit.

Keywords: Caledonian; mineralization; geochemistry; Yanshannian; Damingshan

大明山成矿带是广西主要的钨-铜多金属成矿带之一, 其钨、铜储量分别占广西总储量的 42%和 27%^[1-2], 已发现矿床和矿点多达 120 余处, 其中大型矿床 3 处、中型矿床 2 处和小型矿床 5 处。两江矿床位于该成矿带的中部, 大明山背斜南西翼中段轴部, 是一个产于寒武、泥盆系地层和石英斑岩中的 Cu 矿床。前人研究表明, 该矿床为一个受断裂裂隙带控制, 在空间和时间上与石英斑岩存有一定成因联系的脉状型^[2-3]或斑岩型矿床^[4-5]。迄今为止, 该矿床的成矿物质来源的研究也显得极为薄弱, 严

重阻碍了对成岩成矿作用的理解。因此, 笔者对该矿床中矿石硫化物进行系统的 S-Pb 同位素分析, 以期查明矿石硫和铅, 以及成矿物质 (Cu) 的来源, 从而进一步探讨了矿床成因及其深部找矿意义。

1 地质背景

大明山 Cu-W 多金属成矿带位于华南加里东褶皱系右江拗陷与桂中拗陷交汇处, NW 向南丹-昆仑关断裂东南端 (图 1)。两江矿床则位于该成矿带中

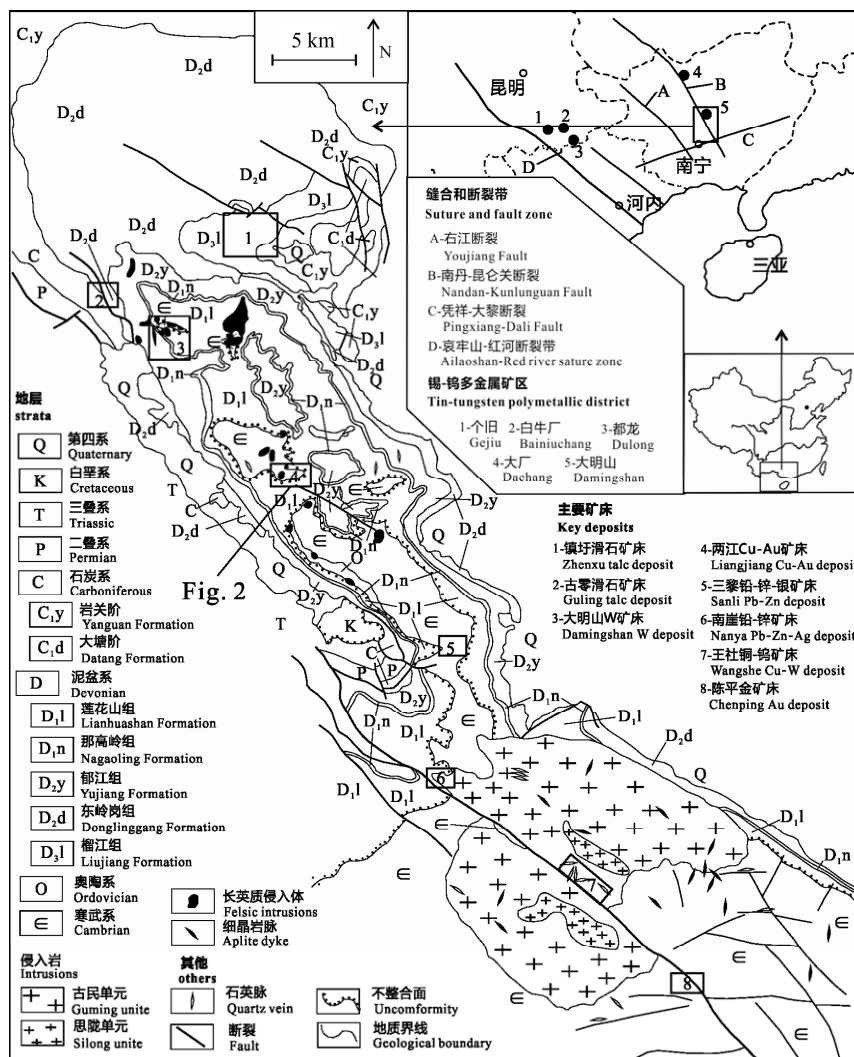


图 1 桂中大明山 W-Cu 多金属成矿带的地质特征

Fig. 1. Geological map of the Damingshan tungsten and copper polymetallic zone from the central Guangxi, South China.

部, 为一个产于寒武、泥盆系地层和石英斑岩中的石英脉型矿床。矿区内岩浆作用发育, 主要为石英斑岩, 其次有辉绿岩, 普遍遭受强烈的蚀变作用。石英斑岩仅产于寒武系地层中, 呈岩脉产出, 走向 NE-SW, 长 1100 m, 宽 150~200 m。矿区内, 中上寒武系地层以“天窗”出露, 岩性为一套巨厚的浅灰色、黄褐色砂页岩互层, 底部夹有盐酸盐岩, 具有明显的复理石建造特征(图 2); 下泥盆统莲花山组泥质砂岩、石英砂岩、泥质页岩不整合寒武统地层之上。矿区构造作用发育, 大明山箱式复式背斜从矿区东北面通过; 其次, 3 个较大的 EW 向次级背斜呈紧密线状排列。断裂主要有 EW、NE、NW、SN 四个方向的断裂, 其中, EW、NE 两组断裂表现为压扭性, 控制矿体的产出与形态^[2]。

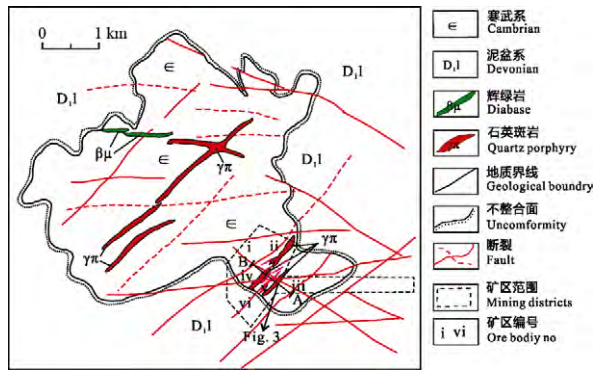


图 2 广西中部两江 Cu-Au 矿床的地质简图
Fig. 2. Geological characteristics of Liangjiang copper and gold deposit in the central Guangxi, south China.

2 矿床地质与含矿石英斑岩的岩相学特征

矿床赋存于中-上寒武统和下泥盆统莲花山组(D₁l)砂页岩中(图 2)。在矿区 2 km² 范围内已发现六个矿带, 其中, EW 向有 II、IV、V 三个矿带, NE 向有 I、III 两个矿带, VI 矿带则以侵染状产于

盖层泥盆统莲花山组底部砂岩中^[3]。矿体呈细脉浸染状产于石英斑岩内外, 而且, 石英斑岩(群)交叉部位处矿化往往较为富集, 横向膨胀大(图 3)。矿体由断裂破碎带中致密块状矿石和两侧细脉浸染状矿石组成(图 4a、b), 主破碎带的厚度与细脉带厚度之比一般为 1:2~1:4^[2]。矿石分致密块状、细脉状和细脉浸染状 3 种类型(图 4), 其铜品位均超过 1%。矿石矿物以黄铜矿为主, 约占 2%~5%, 黄铁矿、白铁矿、毒砂、闪锌矿等次之, 约占 2%~3%; 脉石矿物石英约占 60%, 白云石约占 10%, 其次为方解石、白云母、高岭石、绢云母等。矿石的结构主要有他形、双晶、压碎和固溶体分离结构。矿石以块状、浸染状、角砾状和脉状构造为主。矿体中心具明显蚀变分带, 即, 内带为绢云母化(包含工业矿体), 向外为高岭石化^[4]。矿体围岩普遍受不同程度的变质作用。围岩蚀变有硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸岩化、黄铜矿化和黄铁矿化等; 以矿体为中心, 具有外围为高岭石化, 内部为绢云母化的蚀变晕圈。傅民禄^[3]将整个成矿作用划分为 3 个阶段: ①无矿石英脉阶段; ②含铜石英脉阶段; ③含铜硫化物阶段。其中, 第 3 阶段又可细分为毒砂-黄铜矿和方铅矿-闪锌矿-白云石 2 个亚阶段。

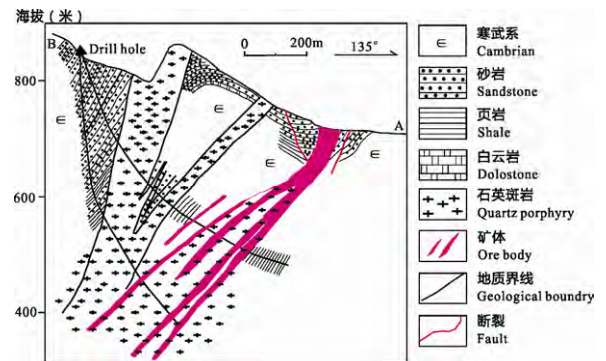
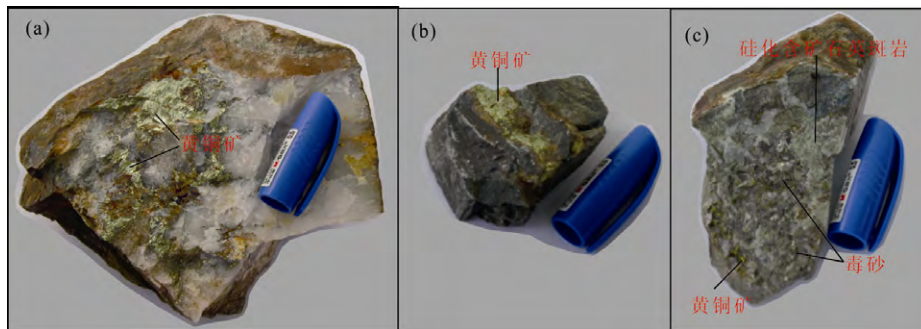


图 3 两江矿床 ii 号矿体 10 号线的剖面图
Fig. 3. Cross-cutting of the line 10 of ii ore body from the Liangjiang copper and gold deposit.



a. 石英大脉型矿石; b. 网脉型矿石; c. 岩体型矿石
图 4 两江矿床典型的矿石样品
Fig. 4. Photo of the typical samples of ores from the Liangjiang Cu-Au deposit

3 分析方法

3.1 分析方法

矿石中硫化物的 S 同位素直接以 Cu₂O 作为氧化剂制备 SO₂，然后在中国科学院地球化学研究所环境国家重点实验 MAT-252 型质谱仪上完成硫同位素测试，分析精度大于 0.2‰，数据采用 V-CDT 标准报道。矿石中硫化物 Pb 同位素在核工业北京地质研究院完成，采用 ISOPROBE-T 分析，其相对差小于 0.0005% (2σ)，详细的流程可参照李开文等^[6]。

3.2 分析结果

矿石硫化物的 S 同位素测试值列于表 1。所有硫化物同位素的 δ³⁴S_{CDT} 值介于 -1.22‰~0.96‰ 之间，平均值为 0.09‰。其中，黄铜矿的 δ³⁴S_{CDT} 值介于 -1.22‰~0.96‰ 之间，平均值为 0.12‰；方铅矿和毒砂的 δ³⁴S_{CDT} 分别为 -0.93‰ 和 0.59‰，因此，毒砂 > 黄铜矿 > 方铅矿。由此可见，两江矿床的硫化物沉淀时未达到同位素平衡。

笔者分析了 18 件 Pb 同位素数据。其中，8 件矿石硫化物的 Pb 同位素列于表 2。矿石硫化物的 Pb 同位素的 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 的值分别介于 38.698~39.817、15.773~15.879 和 18.307~19.232 之间，平均值分别为 39.151、15.809 和 18.307。由于地层砂、页岩样品含较高的 Th、U 含量，因此需要对其进行 Pb 同位素校正^[7-9]。为了对比，本次校正年龄为区域已知成矿年龄（最可能为成矿年龄，详述见下文），即，95 Ma^[10-12]，其校正后的 10 件数据列于表 3。地层岩石富集放射性成因 Pb，寒武系的 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 分别为 19.047~20.788、15.874~15.988 和 39.536~45.321 之间，泥盆系的 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 分别为 19.067~21.584、15.8484~15.995 和 39.627~44.973 之间。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

关于成矿物质来源，前人仅限于 S 同位素研究，不同学者所获得硫同位素的 δ³⁴S_{CDT} 分别为 0.3~2.3‰^[4]和 0.8~3.7‰^[2,5]。笔者这次获得了 18 件硫化物 S 同位素的 δ³⁴S_{CDT} 值介于 -1.22~0.96‰ 之间，平均值为 0.09‰，与前人的结果一致。室内显微鉴定表明，两江矿床矿石的矿物组成主要为硫化物，不含硫酸盐，因此，矿石硫化物的 S 同位素并不需要计算便可以近似代地表成矿流体的 S 同位素组成^[13-15]。在 δ³⁴S_{CDT} 直方图（图 5）中，18 件硫同位素呈塔式分布于 0 附近，与地幔 S 同位素组成相

表 1 两江 Cu-Au 矿床的 S 同位素组成

Table 1. Sulfur isotope composition of ore sulfides from the Liangjiang Cu-Au deposit.

| 样品编号 | 采样位置 | 测试矿物 | δ ³⁴ S/‰ | stdev |
|---------|------|------|---------------------|-------|
| LJ-1 | II | 黄铜矿 | -1.22 | 0.03 |
| LJ-3 | II | 黄铜矿 | -0.90 | 0.03 |
| LJ-5 | II | 黄铜矿 | -0.59 | 0.08 |
| LJ-7-1 | II | 黄铜矿 | -0.58 | 0.01 |
| LJ-8 | II | 黄铜矿 | -0.09 | 0.04 |
| LJ-10 | II | 黄铜矿 | -0.04 | 0.02 |
| LJ-11 | II | 黄铜矿 | 0.21 | 0.01 |
| LJ-12-1 | II | 黄铜矿 | 0.30 | 0.11 |
| LJ-13 | IV | 黄铜矿 | 0.34 | 0.05 |
| LJ-15 | IV | 黄铜矿 | 0.35 | 0.03 |
| LJ-16-2 | IV | 黄铜矿 | 0.53 | 0.00 |
| LJ-17 | IV | 黄铜矿 | 0.55 | 0.02 |
| LJ-19-1 | III | 黄铜矿 | 0.56 | 0.04 |
| LJ-22-3 | III | 黄铜矿 | 0.59 | 0.06 |
| LJ-23-1 | III | 黄铜矿 | 0.92 | 0.14 |
| LJ-23-2 | III | 黄铜矿 | 0.96 | 0.09 |
| LJ-3 | V | 方铅矿 | -0.93 | 0.05 |
| LJ-20 | V | 毒砂 | 0.59 | 0.18 |

表 2 两江 Cu-Au 矿床的 Pb 同位素测试结果

Table 2. Pb isotopic data of ore sulfides from the Liangjiang Cu-Au deposit.

| 样品编号 | 测试矿物 | ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb (2σ) | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb (2σ) | ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb (2σ) | μ | ω | Th/U | V ₁ | V ₂ | Δα | Δβ | Δγ |
|----------|------|---|---|---|------|-------|------|----------------|----------------|-------|-------|------|
| LJ-3 | 方铅矿 | 18.474 ± 2 | 15.825 ± 1 | 39.010 ± 3 | 9.9 | 40.71 | 3.98 | 72.16 | 52.84 | 71.63 | 32.42 | 45.2 |
| LJ-8 | 黄铜矿 | 18.885 ± 3 | 15.780 ± 2 | 39.444 ± 6 | 9.77 | 39.67 | 3.93 | 93.1 | 67.09 | 95.47 | 29.48 | 56.9 |
| LJ-10 | 黄铜矿 | 18.600 ± 2 | 15.796 ± 2 | 39.106 ± 4 | 9.83 | 40.08 | 3.95 | 77.69 | 57.28 | 78.93 | 30.52 | 47.8 |
| LJ-16-2 | 黄铜矿 | 18.540 ± 3 | 15.879 ± 3 | 39.226 ± 7 | 10 | 41.77 | 4.04 | 79.04 | 54.9 | 75.45 | 35.94 | 51 |
| LJ-20 | 毒砂 | 18.433 ± 1 | 15.807 ± 2 | 38.917 ± 4 | 9.87 | 40.38 | 3.96 | 68.87 | 51.47 | 69.25 | 31.24 | 42.7 |
| LJ-23-1 | 黄铜矿 | 19.232 ± 2 | 15.780 ± 2 | 39.817 ± 4 | 9.74 | 39.22 | 3.9 | 110.9 | 79.91 | 115.6 | 29.48 | 66.9 |
| LJ12-3-8 | 闪锌矿 | 18.307 ± 2 | 15.773 ± 1 | 38.698 ± 3 | 9.82 | 39.85 | 3.93 | 60.38 | 46.97 | 61.94 | 29.02 | 36.9 |
| LJ12-3-6 | 闪锌矿 | 18.349 ± 1 | 15.793 ± 1 | 38.781 ± 3 | 9.85 | 40.16 | 3.95 | 63.45 | 48.55 | 64.37 | 30.33 | 39.1 |

注：μ、ω、Th/U、V₁、V₂、Δα、Δβ 和 Δγ 计算参照文献[19]。

表 3 大明山地区寒武系和泥盆系地层的 Pb 同位素组成.

Table 3. Lead isotopic composition of Cambrian and Devonian strata mainly including sandstone and shale.

| 样品 | Th | U | Pb | ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb (2σ) | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb (2σ) | ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb (2σ) | ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb* | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb* | |
|-----|---------------------------------------|-------|-------|---|---|---|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|
| E-1 | 14.97 | 6.76 | 17.12 | 19.494 ± 2 | 15.902 ± 2 | 40.481 ± 5 | 19.047 | 15.881 | |
| E-2 | 27.73 | 7.00 | 43.63 | 19.233 ± 2 | 15.894 ± 2 | 39.763 ± 4 | 19.053 | 15.885 | |
| E-3 | 20.89 | 5.38 | 24.53 | 19.385 ± 1 | 15.886 ± 1 | 40.259 ± 3 | 19.138 | 15.874 | |
| E-4 | 13.89 | 3.49 | 3.35 | 22.113 ± 2 | 16.051 ± 2 | 47.006 ± 5 | 20.788 | 15.988 | |
| E-5 | 32.10 | 4.68 | 5.28 | 21.022 ± 2 | 15.936 ± 2 | 44.648 ± 5 | 19.942 | 15.884 | |
| E-6 | 26.20 | 3.70 | 6.82 | 21.022 ± 3 | 15.943 ± 2 | 44.832 ± 6 | 20.359 | 15.911 | |
| D-1 | 23.99 | 5.68 | 46.48 | 19.769 ± 3 | 15.862 ± 2 | 41.034 ± 5 | 19.067 | 15.899 | |
| D-2 | 17.78 | 2.30 | 12.03 | 23.779 ± 2 | 16.100 ± 2 | 48.006 ± 5 | 19.239 | 15.874 | |
| D-3 | 25.76 | 5.96 | 3.56 | 19.456 ± 2 | 15.884 ± 2 | 40.744 ± 4 | 21.584 | 15.995 | |
| D-4 | 24.55 | 5.00 | 19.11 | 19.204 ± 2 | 15.906 ± 2 | 39.812 ± 6 | 19.470 | 15.848 | |
| 样品 | ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb* | μ | ω | Th/U | ν ₁ | ν ₂ | Δα | Δβ | Δγ |
| E-1 | 40.164 | 9.95 | 41.51 | 4.04 | 134 | 88.1 | 130.79 | 37.44 | 84.64 |
| E-2 | 39.536 | 9.96 | 40.11 | 3.9 | 110 | 83.1 | 115.65 | 36.92 | 65.4 |
| E-3 | 39.952 | 9.93 | 41.11 | 4.01 | 125 | 84.9 | 124.47 | 36.4 | 78.69 |
| E-4 | 45.321 | 11.31 | 58.05 | 4.97 | 357 | 147 | 282.71 | 47.16 | 259.46 |
| E-5 | 42.280 | 10.35 | 50.24 | 4.7 | 273 | 117 | 219.43 | 39.66 | 196.29 |
| E-6 | 43.334 | 10.35 | 50.85 | 4.75 | 277 | 115 | 219.43 | 40.11 | 201.22 |
| D-1 | 39.627 | 9.86 | 41.64 | 4.09 | 154 | 94.5 | 146.75 | 34.83 | 99.45 |
| D-2 | 40.207 | 12.79 | 61.36 | 4.64 | 424 | 219 | 379.35 | 50.36 | 286.26 |
| D-3 | 44.973 | 9.92 | 42.53 | 4.15 | 139 | 82.9 | 128.59 | 36.26 | 91.68 |
| D-4 | 40.564 | 9.98 | 40.58 | 3.94 | 110 | 81.5 | 113.97 | 37.7 | 66.71 |

注: * 以 Th、U、Pb 含量和 t=95 Ma 校正的 Pb 同位素比值.

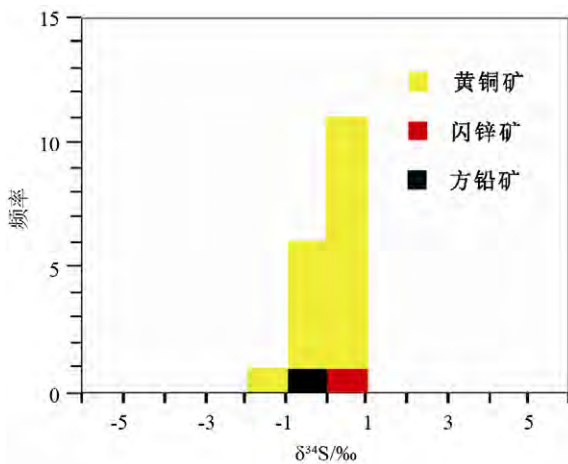


图 5 两江矿床矿石硫化物的硫同位素的直方图

Fig. 5. Histogram of Sulfur isotope of ore sulfides from the Liangjiang deposit.

似^[16], 说明矿石 S 主要为岩浆硫。区域上, 矿区西北部的大明山矿床中矿石硫化物 S 同位素的 δ³⁴S_{CDT} 分别介于-1.37~+1.8‰之间, 平均值分别为-0.14‰; 矿区东南部的三黎、南崖、王社矿床中矿石硫化物的 S 同位素组成 δ³⁴S_{CDT} 分别介于-0.57‰~+3.46‰、+0.55~+0.95‰和-0.12~+0.89‰之间, 平均值分别为+1.52‰、+0.78‰和+0.30‰; 另外, 大明山矿床镇武山矿段内 Sb 矿脉 (辉锑矿-石英-萤石-方解石)

和 Pb-Zn 矿脉 (方铅矿-闪锌矿-石英-萤石) 的 S 同位素组成分别介于-1.39‰~+0.91‰和-4.47‰~-3.57‰之间 (笔者未发表数据)。由此可知, 整个大明山成矿带的多金属硫化物矿床均表现出岩浆硫的特点。

其次, Pb 同位素也是一种示踪成矿物质来源的良好方法^[18,17]。因此, 笔者将矿石投影于 Zartman and Doe^[18]的 Pb 构造模式图 (图 6) 中。在 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 图 (图 6b) 中, 矿石 Pb 位于造山带演化曲线之上; 在 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 图 (图 6a) 中则分布于大陆上地壳演化曲线之上或附近, 说明成矿物质主要壳源。为了进一步探讨 Pb 的来源, 笔者再将矿石 Pb 同位素投影于朱炳泉^[19]的 Δγ-Δβ 图解 (图 7) 上, 结果表明绝大多数点位于地幔-岩浆作用混合和上地壳两个区域, 这再次证明矿石 Pb 最有可能主要来源于壳源物质的岩浆作用, 可能有部分地幔物质参与成矿。为了精准确定矿石 Pb 及其成矿物质来源, 笔者将矿石与区域岩浆岩和地层岩石进行 Pb 同位素直接对比研究。图 8 表明, 区域加里东期岩浆岩的 Pb 同位素组成最低, 且分散; 晚白垩世花岗岩的 Pb 同位素组成不但均一, 且较加里东期岩浆岩富集放射性 Pb; 地层 (寒武系和泥盆系) 岩石的 Pb 同位素最为富集放射性成因的 Pb;

两江矿床的矿石硫化物与晚白垩世岩浆岩的 Pb 同位素分布范围重叠(图 8b)或最为接近(图 8a)。因此,我们认为晚白垩世岩浆作用最有可能为该矿床的成矿作用提供矿石 Pb 和成矿物质,而寒武系和泥盆系沉积岩和加里东期的石英斑岩可能并不是成矿母岩。

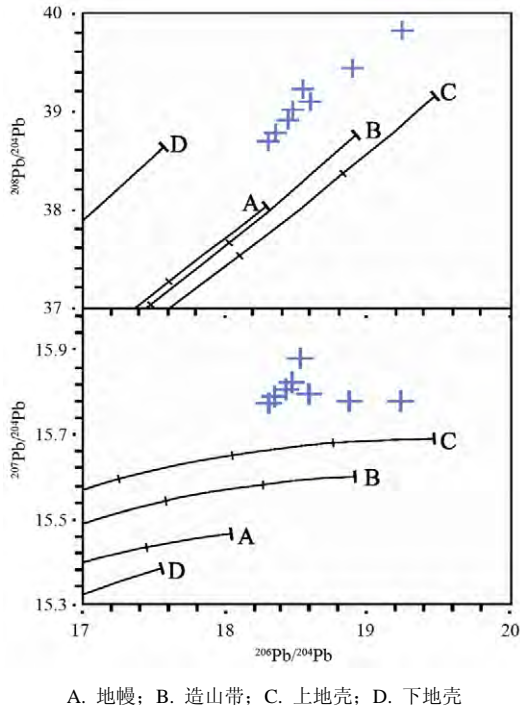


图 6 两江矿床矿石硫化物铅同位素构造模式图

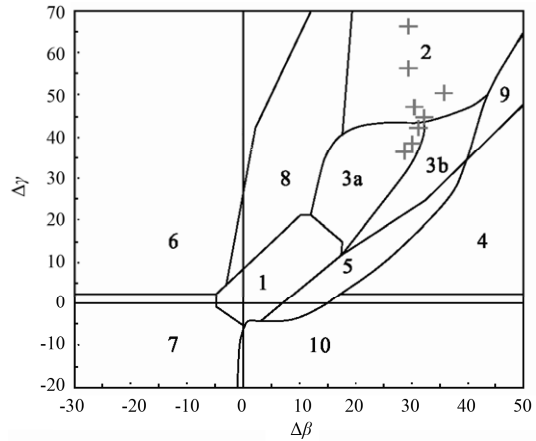
Fig. 6. Plumbotectonics model of lead isotope of ore sulfides from the Liangjiang deposit.

4.2 成矿时代推测

由上论述可知,矿区的六矿带以侵染状产于下泥盆统莲花山组地层之中^[3],因此,两江矿床的矿化时代一定晚于早泥盆世。这也得到该矿带其他矿化证据的支持,比如,矿区北部矿化作用较为相似

的伝潘-上级 Cu 矿点以似层状沿东岭岗阶底部含炭质灰岩层间滑动面及裂隙充填,矿化长达 12 km。

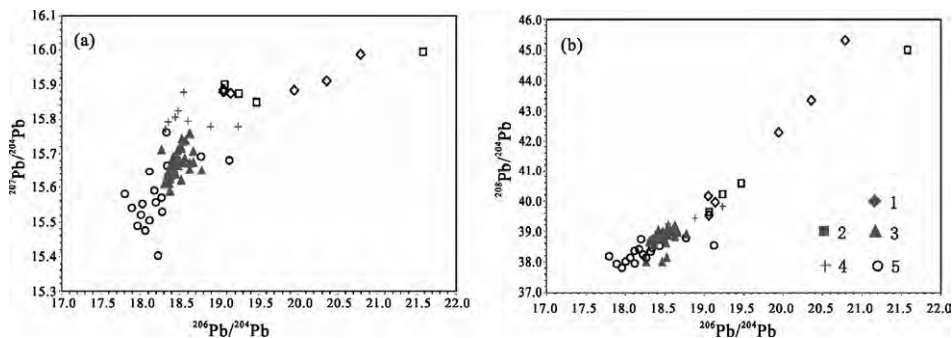
大量的锆石 U-Pb 年代学研究表明,区域岩浆作用仅有加里东和燕山(晚白垩世)两期,并无印支期岩浆活动(笔者未发表数据)。笔者通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究揭示了该矿床含矿石英斑岩的成岩年龄为 427.3±1.9 Ma,明显早于成矿时代(笔者未发表数据)。因此,该岩体与成矿作用并无成因联系。其次,S-Pb 同位素研究表明,该矿床的成矿物质为岩浆热液起源。Pb 同位素直接对比可知,该矿床的成矿物质既不是来源于寒武系和泥盆系地层岩石,也不是来源于加里东期岩浆岩,而是起源于晚白垩世岩浆作用。由此可见,两江矿床的成矿时代最有可能为晚白垩世。



1. 地幔源铅; 2. 上地壳铅; 3. 上地壳与地幔混合的俯冲带铅 (3a-岩浆作用; 3b-沉积作用); 4. 化学沉积型铅; 5. 海底热水作用铅; 6. 中深变质作用铅; 7. 浅变质下地壳铅; 8. 造山带铅; 9. 古老页岩上地壳铅; 10. 退变质铅

图 7 两江矿床矿石硫化物铅同位素 Δγ-Δβ 图解 (数据引自朱炳权等^[19])

Fig. 7. Δγ-Δβ diagram of lead isotope at Liangjiang deposit (data adopted from Zhu et al.^[19])



1. 寒武系砂岩和页岩; 2. 泥盆系砂岩; 3. 加里东期岩浆岩(引自张乾等^[30]); 4. 燕山晚期岩浆岩(引自祝朝辉等^[31], 李开文等^[6]和笔者等未发表数据); 5. 矿石硫化物

图 8 两江矿床的铅同位素对比图

Fig. 8. Comparison of lead isotope of ore sulfides, ore-bearing strata and magmatic rocks.

此外, 区域上, 大瑶山和西大明山地区分别位于该矿床的东西两侧, 其典型的加里东期成矿作用不但成矿元素单一(仅为 Au 矿化), 而且矿物成分也简单(仅有黄铁矿和自然金); 唯有燕山期(晚白垩世)矿化作用不但组分复杂, 而且矿化元素较多^[20]。目前研究表明, 两江矿床矿石矿物组成也较为复杂, 主要包括黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、毒砂, 以及少量的磁黄铁矿、白铁矿、方铅矿、黝铜矿、蓝铜矿、辉铜矿和微量银金矿^[3]。因此, 这也佐证了两江矿床为晚白垩世成矿作用的产物。

4.3 区域成矿认识及其意义

南岭西段分布着几个世界级超大型多金属矿田, 包括个旧、都龙、白牛厂、大厂和 大明山, 同属于晚白垩世大规模成岩-成矿作用的产物^[21-22]。在个旧, 从北向南分别为马拉格、松树脚、高松、老厂和卡房矿床, 垂向上均明显表现出深部(或岩体里)为 W-Be-Bi-Mo-Sn, 边缘以 Sn-Cu 为主, 浅部则为 Pb-Zn, 其矿化类型主要为云英岩型、矽卡岩型、似层状型和脉型矿化^[21]。在都龙, 从老君山花岗岩体依次向南, 靠近或在老君山花岗岩产出有云英岩型钨矿(花石头), 其次为铜街矽卡岩型 Cu 矿床, 再向南则为曼家寨 Zn-In 矿床^[23-24]。最新勘探表明, 在金石坡矿段深部靠近岩体附近存在良好的 W 矿化^[25], 而且还在辣子寨外围田蓬组中发现网脉状 Pb-Zn 矿化^[26]。在白牛厂, 从西北向东南依次分布有咪尾、白羊、穿心洞、对门山和阿尾五个矿段, 目前的采矿工作已经证实了矿区深部存在隐伏花岗岩体, 而且从岩体接触带向上依次出现 Sn→Cu→Zn→Pb→Ag→Sb 的矿化空间分带规律^[27]。从东往西, 大厂矿田可分为东、中、西 3 个矿带, 东带为 Sn 多金属矿床, 比如, 大福楼、灰乐、亢马 Sn 多金属矿床; 中带为 Zn-Cu-Sb-W 矿床, 包括拉么-龙箱盖矽卡岩型 Zn-Cu 矿床和茶山 W-Sb 矿床; 介于中带与西带之间的黑水沟-大树脚矽卡岩型 Zn-Cu 矿床; 西带为 Sn 多金属矿化, 包括鱼泉洞-铜坑矽卡岩型 Zn-Cu 矿床和长坡-巴力-龙头山似层状 Sn 多金属矿床; 整个矿化作用分为矽卡岩、锡石-硫化物、石英脉型钨-铋三期矿化作用^[28]。同样地, 在大明山成矿带, 南丹-昆仑关深大断裂横穿整个成矿带, 将巨大的昆仑关黑云母花岗岩岩基右滑错开了 5~10 km, 说明该断裂带在晚白垩世为一直处于极其活跃的状态。沿着该断裂带及其附近(图 1), 从南东向北西依次包括寒武系地层中的陈平 Au 矿床、岩基中的王社云英岩型 Cu-W 矿床^[10]、岩基

与泥盆系接触带的南崖矽卡岩型 Pb-Zn 矿床、寒武系地层中的三黎脉状 Pb-Zn-Ag 矿床、寒武和泥盆系地层中的两江脉状 Cu-Au 矿床^[2-5], 以及产于加里东期斑状白云母花岗岩和寒武、泥盆统地层中的大明山脉状、似层状和网脉状 W 矿床^[29]。其中, 只有大明山 W 矿床和王社 Cu-W 矿床的成矿年龄被很好地限制, 二者均为南岭西段晚白垩世大规模岩浆热液成矿作用的产物^[10-12]。可见, 这几个超大型矿田的成矿地质与地球化学特征表现出很大的相似性。

大量的年代学数据表明, 区域成岩作用与成矿作用几近同时发生^[21-22]。直接 Pb 同位素对比也证明, 两江 Cu-Au 矿床与昆仑关岩体, 以及区域晚白垩世岩浆岩的物质起源具有极大的相似性, 因此, 可以推断该矿床的成矿母岩很可能为矿区南部的昆仑关晚白垩世黑云母花岗岩岩基向西北方向延伸的隐伏岩体。值得注意的是, 在大明山地区, 寒武统地层的岩性为长石石英砂岩与薄层状页岩互层, 下部中夹有一层中厚层状白云质灰岩, 而且整个大明山成矿带的多金属矿床绝大部分赋存于寒武统地层中(少部分产于泥盆系地层中), 这为深部存在矽卡岩型矿化创造良好成矿地质条件。因此, 已发现的两江脉状 Cu-Au 矿床、三黎脉状 Pb-Zn-Ag 矿床和陈平脉状 Au 矿床很有可能为深部矽卡岩型矿床的末梢。而且, 在昆仑关岩体北部已经有南崖矽卡岩型 Pb-Zn 矿床的出现。这预示着大明山成矿带深部拥有巨大的找矿潜力。

5 结论

(1) S-Pb 同位素研究表明, 矿石硫化物不但显示岩浆 S 特点, 而且与晚白垩世岩浆岩表现出较为相似的 Pb 同位素组成, 因此, 该矿床最有可能为晚白垩世成矿作用的产物, 与其有成因联系的岩浆岩很有可能为昆仑关黑云母花岗岩岩基向西北方向延伸的隐伏岩体。

(2) 与南岭西段几个主要的多金属矿田(大厂、白牛厂、个旧和都龙)相比, 大明山 W-Cu 成矿带表现出诸多相似的成矿地质地球化学特征。结合该成矿带的地质特征, 笔者认为大明山成矿带深部可能存在有矽卡岩型矿化, 并预示着巨大的找矿潜力。

致谢: 本次科研得到本研究得到矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群(SKLOGD-ZY125-04)和国家自然科学基金面上项目(41372105)的联合支持。笔者还要真诚感谢中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验的安宁工程师和北京铀矿地质研究所的刘牧老师, 他们在实验分析上给予大量的帮助。最后, 笔者还要衷心感谢几位审稿人给予建设性的意见。

参 考 文 献:

- [1] 杨斌, 彭省临, 李水如, 张起钻. 广西有色金属成矿系列与成矿区带[J]. 矿产与地质, 2007, 1: 8-11.
- [2] 石晓明, 杜金全, 韦可利. 广西两江铜矿床地质特征及找矿潜力分析[J]. 矿产与地质, 2010, 3: 213-216.
- [3] 傅民禄. 数理统计在两江铜矿的应用[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1981, 1: 113-122.
- [4] 邝今敖. 两江铜矿成因探讨——一个斑岩型脉状富铜矿[J]. 地质与勘探, 1980, 10: 16-19.
- [5] 羊士赣. 论大明山地区铜矿找矿前景[J]. 南方国土资源, 2004, 9: 15-17.
- [6] 李开文, 张乾, 王大鹏, 蔡伊, 张永斌. 滇东南白牛厂多金属矿床铅同位素组成及铅来源新认识[J]. 地球化学, 2013, 2: 116-130.
- [7] Carr G R, Dean J A, Suppel D W, et al. Precise lead isotope fingerprinting of hydrothermal activity associated with Ordovician to Carboniferous metallogenic events in the Lachlan Fold Belt of New South Wales [J]. *Economic Geology*, 1995, 90(6): 1467-1505.
- [8] 张乾, 潘家永. 论接触交代矽卡岩型多金属矿床的矿质来源——以铅同位素组成为依据[J]. 矿物学报, 1994, 14(4): 369-372.
- [9] Zhou J, Huang Z, Bao G. Geological and sulfur-lead-strontium isotopic studies of the Shaojiwan Pb-Zn deposit, southwest China: Implications for the origin of hydrothermal fluids [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 128: 51-61.
- [10] 蔺志永, 王登红, 李水如. 广西王社铜钨矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2008, 11: 1565-1571.
- [11] 李水如, 王登红, 梁婷, 屈文俊, 应立娟. 广西大明山钨矿区成矿时代及其找矿前景分析[J]. 地质学报, 2008, 7: 873-879.
- [12] 杨锋, 冯佐海, 康志强, 肖荣. 广西中部大明山钨矿白云母-⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 2011, 9: 1429-1433.
- [13] Poulson S R, Ohmoto H. An evaluation of the solubility of sulfide sulfur in silicate melts from experimental data and natural samples [J]. *Chemical Geology*, 1990, 85(1): 57-75.
- [14] Dixon G, Davidson G J. Stable isotope evidence for thermochemical sulfate reduction in the Dugald River (Australia) strata-bound shale-hosted zinc-lead deposit [J]. *Chemical Geology*, 1996, 129(3): 227-246.
- [15] Seal R R. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 61(1): 633-677.
- [16] Chaussidon M, Albarède F, Sheppard S M F. Sulphur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulphide inclusions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 92(2): 144-156.
- [17] 张乾, 潘家永, 邵树勋. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. 北京: 地球化学, 2000, 3: 231-238.
- [18] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics — the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1): 135-162.
- [19] 朱炳权, 等. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[B]. 科学出版社, 1998: 216-230.
- [20] 崔彬, 翟裕生, 蒙义峰, 黄方方, 树皋, 刘光华. 广西大瑶山-西大明山金银成矿系统研究[J]. 地球科学, 2000, 4: 352-355+396.
- [21] Cheng Y, Mao J, Chang Z, et al. The origin of the world class tin-polymetallic deposits in the Gejiu district, SW China: Constraints from metal zoning characteristics and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology [J]. *Ore Geology Reviews*, 2013a, 53: 50-62.
- [22] Cheng Y, Mao J, Spandler C. Petrogenesis and geodynamic implications of the Gejiu igneous complex in the western Cathaysia block, South China [J]. *Lithos*, 2013b, 175: 213-229.
- [23] 杨晓坤, 秦德先, 冯美丽, 伍伟, 胡志军, 蒋顺德. 都龙锡锌矿区晏家寨矿段主矿体空间统计分布特征研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2008, 60(3): 14-18.
- [24] 贾福聚, 秦德先, 张文源, 武伟, 杨晓坤. 云南都龙锡锌多金属矿床矿化趋势分析及成矿规律[J]. 有色金属(矿山部分), 2010, 62(1): 84-75.
- [25] 缪应理, 张世奎, 韦文彪, 杨荣华. 云南都龙锡多金属矿床金石坡矿段钨铜铅矿化特征及地质意义[J]. 矿物学报, 2013, 33(4): 510-514.
- [26] 张世奎, 缪应理, 郭跃进. 云南马关都龙辣子寨碳酸盐岩型铅锌矿体的发现及其地质意义[J]. 矿物学报, 2014, 33(4): 556-461.
- [27] 张洪培, 刘继顺, 李晓波, 章霞林. 滇东南花岗岩与锡、银、铜、铅、锌多金属矿床的成因关系[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(2): 87-90.
- [28] 陈毓川, 黄民智, 徐珏, 艾永德, 李祥明, 唐绍华, 孟令库. 大厂锡石-硫化物多金属矿带地质特征及成矿系列[J]. 地质学报, 1985, 59(3): 228-240.
- [29] 李水如, 魏俊浩, 邓军, 谭俊. 广西大明山矿集区钨多金属矿床类型及控矿因素与找矿标志[J]. 中国钨业, 2007, 22(3): 19-24.
- [30] 张乾, 张宝贵, 曹裕波, 潘家永, 曾天育, 郝淑芝. 粤西大降坪黄铁矿床硫、铅同位素组成初步研究[J]. 地质学报, 1993, 67(3): 232-243.
- [31] Zhu C H, Zhang Q, Shao S X, Zhu X Q, Wang D P. Lead isotopic composition and lead source in the Bainiuchang Ag-polymetallic deposit, Yunnan Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2008, 82(4): 845-857.