

四川拉拉铜矿床赋矿层位变质沉积岩地球化学特征

何德锋, 钟宏*, 朱维光, 肖芳

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

He Defeng, Zhong Hong*, Zhu Weiguang, Xiao Fang

State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

He Defeng Zhong Hong Zhu Weiguang et al. Geochemical characteristics of the ore-bearing strata metasedimentary host rocks in the Lala copper deposit Sichuan Province. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 218-226

Abstract: Geochemical study of metasedimentary rocks in the Lala copper deposit was conducted to better constrain their provenance, chemical weathering condition and tectonic environment. These rocks have relatively low CIA values (44–65) and K_2O/Al_2O_3 values (0.02–0.43) with high ICV values (1.44–5.11), suggesting that they underwent relatively weak chemical weathering and were derived from an immature source with minor clay minerals and alkali feldspar. Compared to PAAS, the samples mostly have relatively lower large ion lithophile element (LILE) contents (Cs, Rb), lower transitional element contents (V, Cr, Zn) and relatively higher high field strength elements (HFSE) contents (Y, U, Zr, Hf, Nb, Sc). The right-slope REE ((La/Yb)_{n(av)} = 25.7) pattern, low Cr/Zr (0.01–0.42) and Th/Sc (0.37–1.14) ratios and Sm and Nd isotopic characteristics, indicate that these rocks were deposited in a continental back arc environment and derived from a felsic-dominated provenance. Furthermore, in combination with the results of tectonic setting discrimination of sodic metavolcanic rocks, we conclude that the Lala copper deposit may also have been formed in a continental back arc environment.

Key words: Lala copper deposit; metasedimentary rocks; provenance; weathering condition; tectonic setting

摘要: 拉拉铜矿区赋矿层位变质沉积岩的主量元素 (ICV_(av) = 3.04, K_2O/Al_2O_3 _(av) = 0.22, CIA_(av) = 53.1) 及 Cs、Rb 显著亏损特征, 表明其物源区岩石只含有较少的粘土矿物和碱性长石, 为中—低化学风化程度, 且处于较不稳定的构造环境; 多数样品的微量元素表现为显著富集高场强元素、亏损过渡族元素及 Cr/Zr_(av) = 0.15、Th/Sc_(av) = 0.58, 且具轻稀土富集、重稀土平坦 ((La/Yb)_{n(av)} = 25.7) 的稀土元素配分模式, 表明物源区以长英质组分为主; Sm、Nd 同位素组成特征也显示其物源区以长英质组分为主, 且沉积于大陆岛弧的弧后拉张环境。同时, 结合矿区赋矿层位变钠质火山岩的构造判别结果, 认为拉拉铜矿床也形成于该构造背景下。

关键词: 拉拉铜矿床; 变质沉积岩; 物源区; 风化条件; 构造背景

中图分类号: P618.41; P595 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2010)04-0218-09

碎屑沉积岩保留了源岩成分特征、物源区风化信息^[1-6], 其中的泥/页岩除能较好地保存母岩经风化条件、沉积成岩过程及大地构造背景等方面的信息和成岩作用后的地球化学特征外^[7], 还具有粒度上

收稿日期: 2009-11-26; 修回日期: 2009-12-03

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-136, KZCX2-YW-111); 中国科学院地球化学研究所领域前沿项目

作者简介: 何德锋(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 矿床地球化学专业, 主要从事岩浆活动与成矿作用研究。E-mail: hedf04@mails.gucas.ac.cn

*通讯作者: 钟宏。E-mail: zhonghong@vip.gyig.ac.cn

的均一性、沉积期后的不渗透性和较高的微量元素含量等优点。加之微量元素,特别是稀土元素(REE)、高场强元素(HFSE)、Cr和Co等,在海水中的溶解度低且在沉积作用过程中很少分异,因此其化学成分最适合追溯物源区性质和判别构造背景^[8-11]。此外,低级变质沉积岩的地球化学特征也已成为研究沉积物源区性质及地壳演化的有效手段^[12-15]。拉拉铜矿床位于扬子地块西缘的康滇隆起中段,赋存于经历变质的海相火山-沉积岩系中,是受变质热液叠加或改造的火山成因块状硫化物矿床^[16],与云南大红山铁铜矿床^[16-18]、辽宁红透山铜锌矿床^[19-20]等相似,其铜金属总储量约61万t,是一个以铜为主的多金属矿床。系统分析了拉拉铜矿区赋矿层位不含矿或少量含矿变质沉积岩的地球化学特征,旨在查明其物源区性质、古风化条件及成岩成矿背景,从而对矿床的成矿机制加以限定。

1 地质背景

拉拉铜矿床位于四川省南部的会理县境内,地理坐标为:东经 $101^{\circ}55'33''$ ~ $102^{\circ}01'12''$,北纬 $26^{\circ}10'18''$ ~ $26^{\circ}16'48''$,大地构造位置位于康滇隆起中段西缘。矿区出露地层以古元古界河口群为主,次为中元古界会理群、上三叠统白果湾组及第四系(图1),工业矿体主要赋存于河口群落幽组的中部和下部。矿体多为平行岩层分布,呈层状、似层状和透镜状。该矿床经历了新元古代大规模区域变质作用,变质程度达到高绿片岩相^[22],形成了以云母片岩类和钠长岩类为主的岩石类型,两者共同构成了矿区的围岩及赋矿岩石。矿区主要矿石矿物(黄铜矿、黄铁矿)有两种赋存形式:一是矿石矿物密集成条纹、条带状相间分布于钠长岩中;二是以稀疏浸染



图1 拉拉铜矿区地质略图
(据文献[21]修改)

Fig 1 Simplified geological map of the Lala copper deposit

状、稠密浸染状及块状赋存于云母片岩中。其中, 前者的变质原岩为火山岩, 后者的变质原岩则为以页岩为主的沉积岩^[23-24]。本文主要对矿区赋矿层位不含矿或少量含矿的变质沉积岩进行研究。

2 样品和分析方法

分析样品取自矿区主要赋矿层位(+1 825 m、+2 046 m 标高)的不含矿或少量含矿的变质沉积岩, 岩石类型包括白云钠长片岩、钠长黑云片岩、黑

云钠长岩和二云钠长片岩(图2)。矿物组合以白云母、黑云母、钠长石为主, 个别样品含有方解石及少量的磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿等矿石矿物, 其中云母显著定向排列, 部分黑云母略蚀变, 钠长石多呈颗粒状, 仅少量钠长石发育聚片双晶。岩石总体呈片状构造发育。

样品的主量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室完成, 岩石样品采用X荧光光谱法(XRF), 矿石样品用常规湿化学分析方法, 分析精度优于10%。微量元素和稀土元素分析的

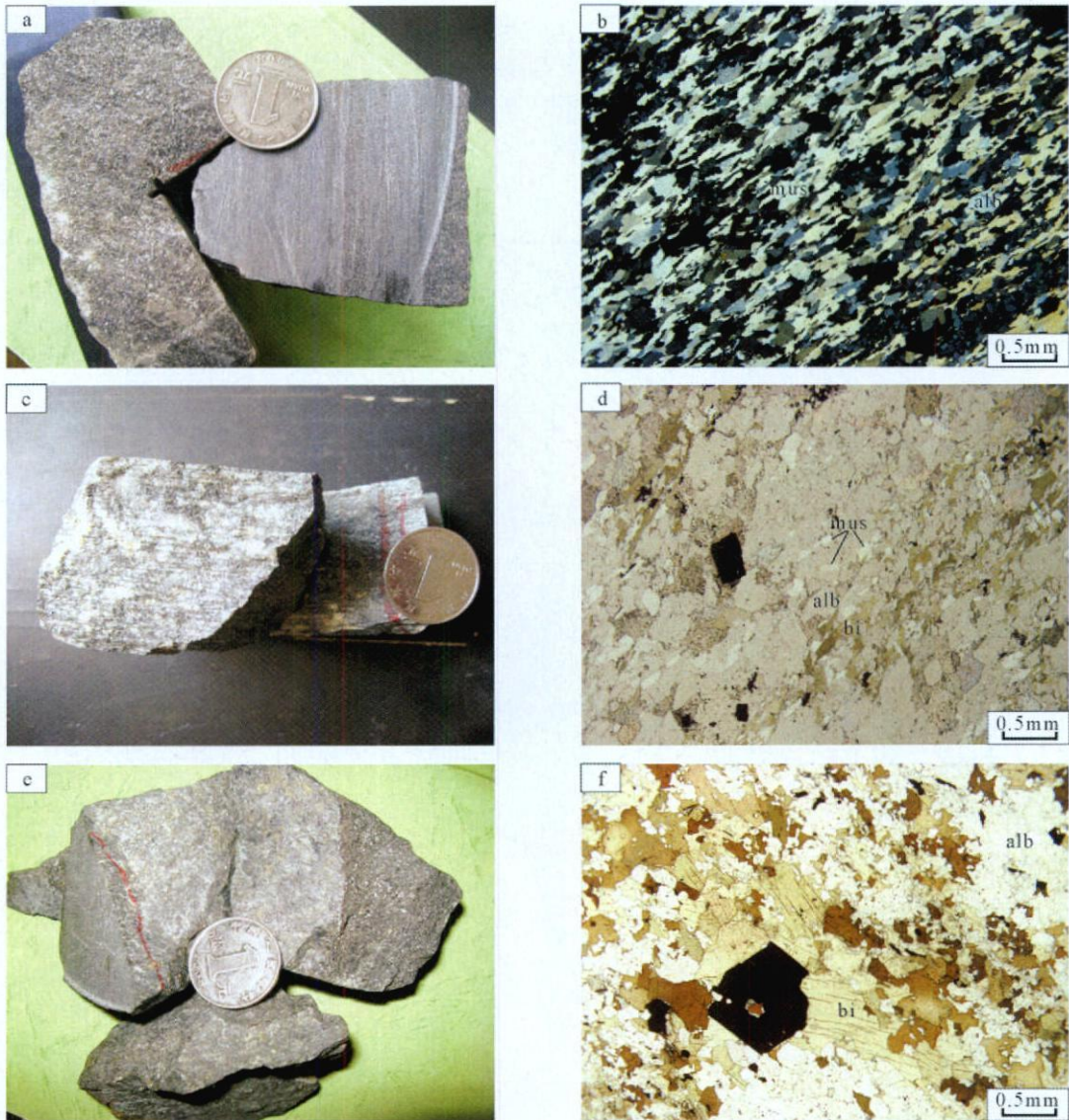


图2 拉拉铜矿区赋矿层位变质沉积岩手标本及显微照片

Fig 2 Hand specimens and photomicrographs of metasedimentary rocks in the Lala copper deposit
a、b—白云钠长片岩; c、d—二云钠长片岩; e—黑云钠长岩; f—钠长黑云片岩; mus—白云母; alb—钠长石;
bi—黑云母。

前期样品处理过程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, 后期测试在中国科学院广州地球化学研究所 PE Elan 6000 型等离子体质谱仪测定, 分析精度优于 5%。样品的 Sm-Nd 同位素化学分离和测试均在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成, 测试仪器为德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电离质谱仪, 实验室对国际标样 BCR2 测定结果为 $w(\text{Sm}) = 6.58 \times 10^{-6}$, $w(\text{Nd}) = 28.8 \times 10^{-6}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512643 \pm 13$ 。

3 分析结果

样品的主量元素、微量元素分析结果见表 1。岩石的烧失量 (LOI) 变化范围较大, 为 0.15% ~ 9.68%, 其中烧失量较大的样品 CaO^{**} 的含量也相对较高, 根据镜下观察是由于受到方解石化蚀变及部分样品含有较细小的后期方解石脉所致。考虑到这一因素, 以下讨论和图解的主要氧化物含量均为扣除烧失量后重新换算的数据, 并对 CaO^{**} 按照

McLennan 等^[25] 和 Panahi 等^[26] 的方法进行了扣除方解石的计算和校正。

在主量元素的后太古宙澳大利亚页岩 (PAAS) 标准化图解上 (图 3a), 多数样品显示出了略亏损 SiO_2 、 Al_2O_3 , 富集 Fe_2O_3 、 MnO 、 CaO^{**} 、 Na_2O 及 MgO , 并与 PAAS 基本一致的特征, 而 P_2O_5 、 TiO_2 的变化范围较大, 可能与磷灰石和金红石等重矿物富集程度不同有关。通常情况下, Na 和 Ca 的含量主要由斜长石含量所决定, 因此 Na_2O 、 CaO^{**} 的富集可能表明斜长石的含量较多。在微量元素的 PAAS 标准化图解上 (图 3c), 显著亏损大离子亲石元素 (Cs、Rb) 和过渡族元素 (Sc、Cr、V、Zn), 除个别样品与 PAAS 基本一致外, 显著富集高场强元素 (Y、U、Zr、Hf、Nb)。在稀土元素的球粒陨石标准化图解上 (图 3b), 呈轻稀土富集、重稀土平坦, 轻重稀土分异显著的右倾型 ($(\text{La}/\text{Yb})_{n(\text{av})} = 25.7$) (其中 av 代表均值), Eu 显示弱的负异常到显著正异常 ($\delta\text{Eu} = 0.86 \sim 4.03$, $\delta\text{Eu}_{(\text{av})} = 1.93$)。样品的 Sm、Nd 同位素分析结果见表 2, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值按 1700 Ma 计算, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.095 ~ 0.118, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为

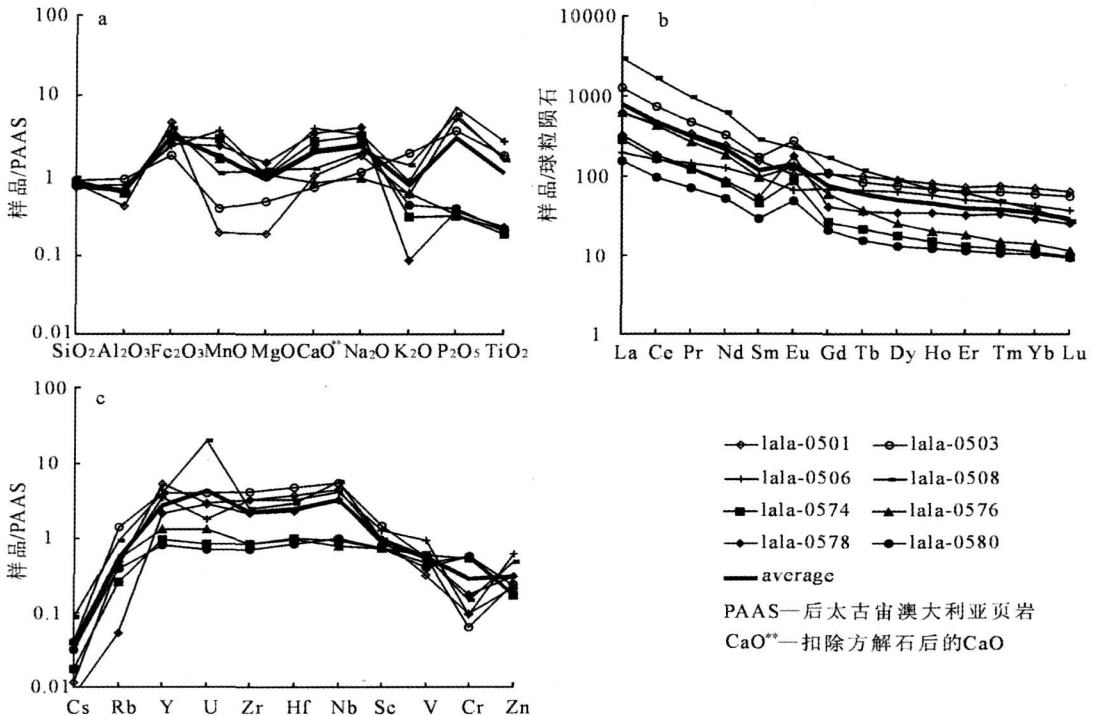


图 3 拉拉铜矿区赋矿层位变质沉积岩主量元素、微量元素及稀土元素图解

Fig 3 Plots of major elements, trace elements and REEs of metasedimentary rocks in the Lala copper deposit
a、c—主、微量元素的 PAAS 标准化图解; b—稀土元素球粒陨石标准化图解; CaO^{**} —扣除方解石后的 CaO ; LOI—烧失量; PAAS 值据文献 [27]; 球粒陨石值据文献 [28]。

表 1 拉拉铜矿区赋矿层位变质沉积岩的主量元素(%)、微量元素(10^{-6})分析结果

Table 1 Major and trace element contents of metasedimentary rocks in the Lala copper deposit

| 样品编号 | 岩石类型 | $w_B/\%$ | | | | | | | | | | | | | | ICV | K_2O/Al_2O_3 | CIA |
|-----------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|-------------------|------------------|------|-------------------------------|------------------|------|------|--------|------|------|----------------|-----|
| | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | MnO | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | LOI | Cu | Total | | | | |
| lala-0501 | BYN | 49.56 | 7.85 | 32.42 | 0.41 | 1.29 | 2.12 | 2.19 | 0.02 | 0.83 | 1.68 | 0.15 | — | 98.52 | 5.11 | 0.28 | 55.8 | |
| lala-0503 | BYN | 55.49 | 17.22 | 12.62 | 1.06 | 0.94 | 1.34 | 7.13 | 0.04 | 0.58 | 1.75 | 2.58 | — | 100.76 | 1.44 | 0.41 | 62.7 | |
| lala-0506 | EYN | 42.28 | 13.01 | 15.24 | 2.10 | 7.00 | 3.57 | 2.84 | 0.36 | 1.05 | 2.41 | 9.68 | — | 99.54 | 2.55 | 0.22 | 46.7 | |
| lala-0508 | NCH | 44.32 | 11.52 | 27.30 | 2.54 | 1.60 | 2.30 | 4.93 | 0.12 | 0.92 | 1.53 | 1.48 | — | 98.55 | 3.49 | 0.43 | 54.0 | |
| lala-0574 | HYN | 47.91 | 11.04 | 20.97 | 2.11 | 6.62 | 3.65 | 1.07 | 0.30 | 0.05 | 0.18 | 5.72 | 0.29 | 99.75 | 3.13 | 0.10 | 45.6 | |
| lala-0576 | EYN | 53.90 | 11.17 | 22.20 | 2.21 | 2.98 | 1.09 | 2.17 | 0.17 | 0.05 | 0.20 | 3.30 | 0.17 | 99.66 | 2.76 | 0.19 | 65.3 | |
| lala-0578 | EYN | 43.39 | 12.45 | 17.44 | 3.14 | 10.62 | 4.65 | 0.31 | 0.25 | 0.06 | 0.22 | 3.54 | 2.94 | 99.76 | 2.92 | 0.02 | 44.3 | |
| lala-0580 | EYN | 52.33 | 11.29 | 21.86 | 2.12 | 4.06 | 2.92 | 1.55 | 0.18 | 0.06 | 0.21 | 2.92 | 0.34 | 99.92 | 2.90 | 0.14 | 50.0 | |
| average | | 48.65 | 11.94 | 21.26 | 1.96 | 4.39 | 2.70 | 2.77 | 0.18 | 0.45 | 1.02 | 3.67 | 0.34 | 99.56 | 3.04 | 0.22 | 53.1 | |
| PAAS | | 62.40 | 18.78 | 7.18 | 2.19 | 1.29 | 1.19 | 3.68 | 0.11 | 0.16 | 0.99 | — | — | — | 0.88 | 0.20 | 75.3 | |

| 样品编号 | 岩石类型 | $w_B/10^{-6}$ | | | | | | | | | | | | | | δEu | $(La/Yb)_n$ | Th/Sc | Cr/Zr |
|-----------|------|---------------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------------|-------|-------|
| | | Sc | V | Cr | Ni | Zn | Rb | Sr | Zr | Nb | Cs | La | Ce | Pr | Nd | | | | |
| lala-0501 | BYN | 15.6 | 46.7 | 10.7 | 9.3 | 18.3 | 68.6 | 14.1 | 677 | 84.8 | 0.17 | 191 | 353 | 41.8 | 147 | 30.3 | 7.67 | 24.2 | 4.74 |
| lala-0503 | BYN | 23.8 | 82.6 | 7.01 | 15.7 | 20.4 | 230 | 24.4 | 869 | 107 | 0.60 | 395 | 597 | 58.4 | 196 | 33.6 | 20.5 | 24.5 | 4.05 |
| lala-0506 | EYN | 20.6 | 141 | 10.2 | 22.7 | 52.3 | 75.9 | 33.1 | 685 | 79.4 | 0.45 | 61.3 | 131 | 18.0 | 76.2 | 19.0 | 4.84 | 15.5 | 3.19 |
| lala-0508 | NCH | 15.7 | 86.3 | 16.4 | 44.1 | 40.8 | 147 | 46.0 | 517 | 107 | 1.30 | 906 | 1322 | 117 | 374 | 54.9 | 16.5 | 45.1 | 5.62 |
| lala-0574 | HYN | 11.9 | 89.2 | 58.1 | 74.5 | 14.5 | 40.4 | 79.0 | 176 | 17.9 | 0.26 | 89.6 | 137 | 14.8 | 49.3 | 9.05 | 6.36 | 6.81 | 1.04 |
| lala-0576 | EYN | 11.6 | 69.6 | 62.8 | 21.3 | 19.6 | 84.3 | 34.5 | 175 | 15.0 | 0.64 | 193 | 345 | 32.6 | 110 | 18.6 | 9.51 | 13.2 | 1.75 |
| lala-0578 | EYN | 13.3 | 80.5 | 19.1 | 74.3 | 25.5 | 8.70 | 36.7 | 445 | 62.0 | 0.12 | 101 | 148 | 15.5 | 52.5 | 10.6 | 12.9 | 9.04 | 1.74 |
| lala-0580 | EYN | 11.9 | 61.5 | 62.9 | 94.9 | 15.3 | 63.3 | 59.8 | 149 | 19.2 | 0.48 | 48.5 | 78.7 | 8.82 | 31.9 | 5.84 | 3.63 | 4.50 | 0.74 |
| average | | 15.5 | 82.1 | 30.9 | 44.6 | 25.9 | 89.8 | 41.0 | 462 | 61.5 | 0.50 | 248 | 389 | 38.4 | 130 | 22.7 | 10.2 | 17.9 | 2.86 |
| PAAS | | 16.0 | 150 | 110 | 55.0 | 85.0 | 160 | 200 | 210 | 19.0 | 15.0 | 38.2 | 79.6 | 8.83 | 33.9 | 5.55 | 1.08 | 4.66 | 0.77 |

| 样品编号 | 岩石类型 | $w_B/10^{-6}$ | | | | | | | | | | | | | | δEu | $(La/Yb)_n$ | Th/Sc | Cr/Zr |
|-----------|------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------------|-------|-------|
| | | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Y | Hf | Ta | U | ΣREE | Th/Sc | Cr/Zr | | | | | |
| lala-0501 | BYN | 28.9 | 5.96 | 15.5 | 2.56 | 14.8 | 2.10 | 144 | 18.6 | 5.75 | 9.01 | 870 | 0.87 | 8.72 | 0.57 | 0.02 | 0.02 | | |
| lala-0503 | BYN | 24.3 | 5.02 | 13.6 | 2.21 | 12.6 | 1.85 | 110 | 23.8 | 7.31 | 12.5 | 1389 | 2.18 | 21.1 | 0.68 | 0.01 | 0.01 | | |
| lala-0506 | EYN | 20.8 | 4.14 | 10.5 | 1.63 | 9.08 | 1.22 | 94.8 | 16.7 | 5.08 | 5.53 | 376 | 0.86 | 4.55 | 0.37 | 0.01 | 0.01 | | |
| lala-0508 | NCH | 28.9 | 5.03 | 12.9 | 1.61 | 8.13 | 0.91 | 111 | 14.7 | 4.88 | 61.8 | 2898 | 1.01 | 75.1 | 0.52 | 0.03 | 0.03 | | |
| lala-0574 | HYN | 5.73 | 1.08 | 2.78 | 0.40 | 2.31 | 0.32 | 25.7 | 4.94 | 0.94 | 2.59 | 326 | 2.48 | 26.2 | 0.50 | 0.33 | 0.33 | | |
| lala-0576 | EYN | 8.41 | 1.47 | 3.81 | 0.51 | 2.98 | 0.38 | 35.1 | 4.84 | 0.95 | 4.04 | 742 | 1.86 | 43.6 | 1.14 | 0.36 | 0.36 | | |
| lala-0578 | EYN | 11.5 | 2.50 | 6.95 | 1.15 | 6.27 | 0.85 | 58.5 | 11.6 | 3.72 | 8.86 | 380 | 4.03 | 10.9 | 0.42 | 0.04 | 0.04 | | |
| lala-0580 | EYN | 4.18 | 0.89 | 2.40 | 0.37 | 2.15 | 0.31 | 21.8 | 4.13 | 0.79 | 2.16 | 193 | 2.16 | 15.2 | 0.45 | 0.42 | 0.42 | | |
| average | | 16.6 | 3.26 | 8.56 | 1.31 | 7.29 | 0.99 | 75.1 | 12.4 | 3.68 | 13.3 | 897 | 1.93 | 25.7 | 0.58 | 0.15 | 0.15 | | |
| PAAS | | 4.68 | 0.99 | 2.85 | 0.41 | 2.82 | 0.43 | 27.0 | 5.00 | — | 3.10 | 185 | 9.13 | 9.13 | 0.91 | 0.20 | 0.20 | | |

注: BYN—白云钠长片岩; EYN—二云钠长片岩; NCH—钠长黑云片岩; HYN—黑云钠长岩; “—”表示低于测定下限; PAAS 值据文献[27]。

表 2 拉拉铜矿区赋矿层位变质沉积岩的 Sm、Nd 同位素分析结果

Table 2 Sm and Nd isotopic compositions of metasedimentary rocks in the Lala copper deposit

| 样号 | w(Sm)/10 ⁻⁶ | w(Nd)/10 ⁻⁶ | ¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd | ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (2σ) | (¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _I | f ^{Sm/Nd} | ε _{Nd} (1700 Ma) |
|-----------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|---|--|--------------------|---------------------------|
| lala-0501 | 24.09 | 123.3 | 0.1181 | 0.511862 (13) | 0.510541 | -0.40 | 2.01 |
| lala-0503 | 29.54 | 183.3 | 0.0974 | 0.511618 (13) | 0.510529 | -0.50 | 1.77 |
| lala-0508 | 27.72 | 165.7 | 0.1011 | 0.511594 (12) | 0.510463 | -0.49 | 0.48 |
| lala-0576 | 18.78 | 119.8 | 0.0948 | 0.511567 (12) | 0.510507 | -0.52 | 1.34 |
| lala-0580 | 4.942 | 27.60 | 0.1083 | 0.511711 (11) | 0.510501 | -0.45 | 1.21 |

0.48 ~ 2.01, 河口群变质火山岩的¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 为 0.165, ε_{Nd}(t) 为 -7.50^[24]。

4 讨论

4.1 物源区性质

(1) 成分变化指数(ICV)。研究物源区性质的重要手段,其表达式为 $ICV = (Fe_2O_3 + MgO + TiO_2 + CaO + Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$, 以元素的质量分数为依据。成分变化指数在不同矿物中,尤其在粘土矿物和非粘土矿物中存在较大差异,总的变化趋势为辉石(10~100) > 角闪石(3~10) > 黑云母(2~3) > 碱性长石(0.8~1) > 斜长石(0.6) > 白云母(0.3) ≈ 伊利石(0.3) > 蒙脱石(0.14~0.3) > 高岭石(0.03~0.05)^[29], 因此常用于判断物源区的矿物组成,尤其是研究粘土矿物和非粘土矿物相对含量。同时由于粘土矿物的含量可以显示泥质岩的化学成熟度,即泥质岩的化学成熟度随着粘土矿物含量的增加而升高,因此化学成熟度低的岩石因含有较多的非粘土矿物而具有较大的 ICV 值(> 1), 多为第一个沉积旋回的产物,表明形成于不稳定的构造环境^[30]; 化学成熟高的岩石因含有较多的粘土矿物而具有较小的 ICV 值(< 1), 为多次风化作用和沉积旋回的产物,表明形成于稳定的克拉通环境^[31]。而构造活动区经极其强烈风化作用的第一个沉积旋回也能使 ICV 值小于 1^[32]。矿区赋矿层位变质沉积岩的 ICV 值在 1.44 ~ 5.11, 平均为 3.04。尽管较大的 ICV 值有样品中 5% ~ 10% 磁铁矿的贡献,但其 ICV 值远大于 1 依然能说明本区变质沉积岩物源区的粘土矿物含量极少,且处于较不稳定的构造环境。

(2) K₂O/Al₂O₃ 比值。在不同矿物中,尤其在碱性长石和粘土矿物中存在明显差别,其变化趋势为碱性长石(0.4~0.9) > 钙长石(约 0.3) ≈ 伊利石(约 0.3) > 水白云母(约 0.25) > 其他粘土矿物

(约 0), 常用于判断母岩中碱性长石的含量。研究表明,泥质岩石中 K₂O/Al₂O₃ 比值如果大于 0.5 则表明母岩中含有相当数量的碱性长石; 如果小于 0.4 则表明母岩中只含有少量的碱性长石^[29]; 矿区赋矿层位变质沉积岩的 K₂O/Al₂O₃ 在 0.10 ~ 0.43, 平均为 0.22, 表明母岩中只含有少量的碱性长石。

(3) 微量元素。已有研究表明,在风化过程中大离子亲石元素 Cs、Rb 倾向于进入粘土矿物^[33], 因此矿区赋矿层位变质沉积岩 Cs、Rb 的显著亏损(图 3c)表明粘土矿物含量较少,与 ICV 值的判别结果基本一致。在岩浆分离结晶过程中,高场强元素(Y、U、Zr、Hf、Nb)因其不相容性而倾向于富集在长英质组分中^[34], 过渡族元素(Sc、Cr、V、Zn)因其相容性而倾向于富集在镁铁质组分中,因此与镁铁质组分相比,以长英质组分为主的物源区应相对富集高场强元素而亏损过渡族元素。在微量元素的 PAAS 标准化图解上(图 3c), 本研究中多数样品显示出了显著亏损过渡族元素和富集高场强元素的特征,表明其物源区以长英质组分为主。前人的研究表明,微量元素比值尤其是高场强元素和过渡族元素比值如 Cr/Zr、Th/Sc、Cr/Th 等,能反映镁铁质组分和长英质组分对沉积物的相对贡献^[27, 35-37]。样品的 Cr/Zr 比值在 0.01 ~ 0.42, 均值为 0.15, Th/Sc 比值在 0.37 ~ 1.14, 均值为 0.58(表 1), 表明拉拉铜矿区变质沉积岩的物源区以长英质组分为主。

(4) 稀土元素。其配分模式是研究沉积物源区性质的有效手段,轻、重稀土分馏的程度是判别沉积岩物源区长英质和镁铁质成分比例的一个重要尺度,而 Eu 异常则提供了物源区及风化条件等方面的信息。在稀土元素的球粒陨石标准化图解上(图 3b), 呈轻稀土富集、重稀土平坦,且轻重稀土显著分异的特征,表明物源区以长英质组分为主^[11]; 除个别样品外,拉拉矿区的变质沉积岩均表现出显著

的 Eu 正异常, 与 PAAS 显示 Eu 的弱负异常明显不同, 可能是因为: ①继承了物源区的 Eu 正异常, 即物源区受到部分熔融过程中斜长石堆晶加入或分离结晶过程中斜长石大量堆积的影响; ②源区的化学风化条件是一个非还原环境, 因为在沉积体系中, Eu^{2+} 比其他稀土元素容易被含水溶液带走, 从而导致 Eu 的负异常。但在非还原环境下, Eu^{3+} 相对稳定, 使 Eu 具有与其他稀土元素相似的迁移规律, 从而较好地保存源区岩石 Eu 正异常特征。

(5) 同位素。Whitehouse^[38]、Barovich 和 Patchett^[39] 指出, 全岩的 Sm-Nd 同位素体系基本上不会受到后期变质变形作用的影响, 能较好保留沉积岩物源区信息。研究表明, 主要的可能沉积物源区如典型的 MORB、年轻岛弧、平均上地壳、古老地壳等具有明显不同的 Th/Sc 值与 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值^[12, 40], 因此被广泛用于沉积物源区性质的研究。在 Th/Sc- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解上(图 4), 拉拉矿区赋矿层位的变质沉积岩落到了同时代的长英质岩浆岩和平均上地壳的中间且明显偏向长英质岩浆岩的一侧, 表明其源区以长英质组分为主, 仅有少量上地壳物质的加入; 在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $f^{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 图解上(图 5), 样品落到了靠近岛弧地壳一侧, 表明岛弧地壳可能是其主要的物源区。

4.2 风化条件

蚀变作用的化学指数(CIA)是研究源区风化条件的重要手段, 表达式为 $\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, 其中 CaO^* 为与硅酸盐部分有关的 CaO , 以元素的摩尔分数为依据^[41]。McLennan 等^[42] 的研究表明细碎屑沉积岩比共生的砂岩更能反映源区的风化状况。本文所研究样品的 CIA 值在 44~65, 平均值为 53(表 1), 表明源区为中一低风化程度, 揭示物源区寒冷或者干旱的气候条件抑或为构造活动区。

4.3 构造背景

McLennan 等^[12, 25, 42] 和李秋根等^[15] 的研究表明, 形成于弧后和大陆弧背景下的沉积岩通常沿着岛弧安山岩和上地壳之间的混合线分布, 而形成于弧前背景下的沉积岩通常落在岛弧安山岩和 MORB 间。拉拉矿区赋矿层位的变质沉积岩样品均落到了岛弧安山岩和上地壳之间(图 4), 表明它们沉积于大陆岛弧体系下的弧后拉张环境, 与矿区赋矿层位变钠质火山岩的构造环境判别结果基本一致^[23], 也与前人^[43] 的结论较为吻合。据此可以推断拉拉铜矿床也形成于大陆岛弧体系下的弧后拉张环境。

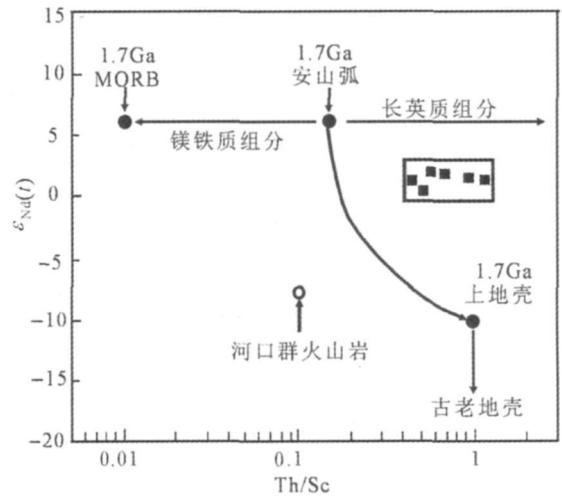


图 4 拉拉铜矿区赋矿层位变质沉积岩的 Th/Sc- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解

(底图据文献[12], 河口群火山岩据文献[23])

Fig. 4 Th/Sc- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ plot for metasedimentary rocks in the Lala copper deposit

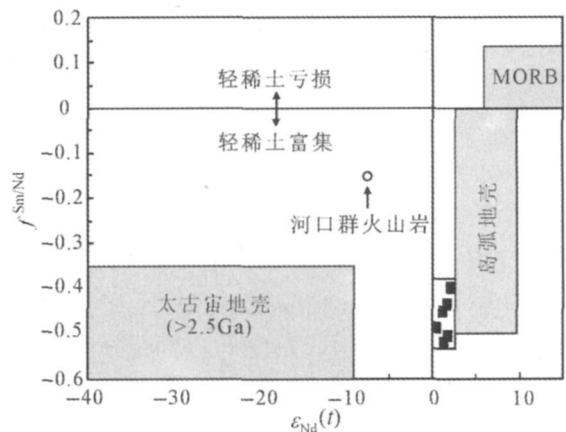


图 5 拉拉铜矿区赋矿层位变质沉积岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $f^{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 图解

(底图据文献[40], 河口群火山岩据文献[23])

Fig. 5 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $f^{\text{Sm}/\text{Nd}}$ plot for metasedimentary rocks in the Lala copper deposit

5 结论

(1) 拉拉矿区赋矿层位变质沉积岩物源区岩石所含粘土矿物及碱性长石较少, 以长英质组分为主, 且经历中一低程度的化学风化。

(2) 构造判别结果表明矿区赋矿层位变质沉积岩沉积于大陆岛弧体系下的弧后拉张环境, 拉拉铜矿床也形成于同一构造背景。

References

- [1] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J] . The Journal of Geology, 1983, 91: 627-661.
- [2] Gu X X, Liu J M, Zheng M H, et al. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence[J] . Journal of Sedimentary Research, 2002, 72: 393-407.
- [3] Cullers R L, Podkovyrov V N. The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uigroup, Southeastern Russia[J] . Precambrian Research, 2002, 117: 157-183.
- [4] Hofmann A. The geochemistry of sedimentary rocks from the Fig Tree Group, Barberton greenstone belt: Implications for tectonic, hydrothermal and surface processes during mid-Archaean times[J] . Precambrian Research, 2005, 143: 23-49.
- [5] Garzanti E, Doglioli C, Vezzoli G, et al. Orogenic belts and orogenic sediment provenance[J] . The Journal of Geology, 2007, 115: 315-334.
- [6] Huntsman-Mapila P, Tiercelin J J, Benoit M. Sediment geochemistry and tectonic setting: Application of discrimination diagrams to early stages of intracontinental rift evolution, with examples from the Okavango and Southern Tanganyika rift basins[J] . Journal of African Earth Sciences, 2009, 53: 33-44.
- [7] Van de Kamp PC, Leake B E. Petrology and geochemistry of siliciclastic rocks of mixed feldspathic and ophiolitic provenance in the Northern Apennines, Italy[J] . Chemical Geology, 1995, 122: 1-20.
- [8] McLennan S M, Simonetti A, Goldstein S L. Nd and Pb isotopic evidence for provenance and post-depositional alteration of the Paleoproterozoic Huronian Supergroup, Canada[J] . Precambrian Research, 2000, 102: 263-278.
- [9] Chen B, Jahn B M. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of Northwest China and their tectonic implications[J] . Geological Magazine, 2002, 139: 1-13.
- [10] Roser B P, Coombs D S, Korsch R J, et al. Whole-rock geochemical variations and evolution of the arc-derived Murihiku Terrane[J] . New Zealand Geological Magazine, 2002, 139: 665-685.
- [11] Joo Y J, Lee Y I, Bai Z Q. Provenance of the Qingshuijian Formation (Late Carboniferous), NE China: Implications for tectonic processes in the northern margin of the North China block[J] . Sedimentary Geology, 2005, 177: 97-114.
- [12] McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, et al. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America[J] . Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 1153-1177.
- [13] Gao S, Ling W L, Qiu Y M, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis[J] . Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63: 2071-2088.
- [14] Bolhar R, Kamber B S, Moorbath S, et al. Chemical characterization of Earth's most ancient clastic metasediments from the Isua Greenstone Belt, southern West Greenland[J] . Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69: 1555-1573.
- [15] Li Q G, Liu S W, Han B F, et al. Geochemical characteristics of the metapelites from the Xingxingxia Group in the Eastern Segment of the Central Tianshan: Implications for the provenance and paleo-weathering[J] . Science in China: Series D, 2005, 35(3): 225-234(in Chinese).
- [16] Zaw K, Peters S G, Cromie P, et al. Nature diversity of deposit types and metallogenic relations of South China[J] . Ore Geology Reviews, 2007, 31: 3-47.
- [17] Qin D X, Yan Y F, Tian Y L, et al. Geological characteristics and ore-forming evolution of Dahongshan copper deposit [J] . Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(2): 129-139(in Chinese).
- [18] Wu K W, Zhong H, Zhu W G, et al. Study on ore-forming fluid of the Dahongshan stratiform copper deposit, Yunnan, China[J] . Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(9): 2045-2057 (in Chinese).
- [19] Gu L X, Zheng Y Z, Tang X Q, et al. Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, NE China[J] . Ore Geology Reviews, 2007, 30: 1-29.
- [20] Zhang S, Zhao D F, Lü G J, et al. Geology and genesis of the Hongtoushan copper-zinc deposit in Liaoning Province [J] . Geology and Resources, 2007, 16(3): 173-182(in Chinese).
- [21] Huang C K, Bai Y, Zhu Y S, et al. Copper Deposit in China [M] . Beijing: Geological Publishing House, 2001: 407-416 (in Chinese).
- [22] He D F, Zhong H, Zhu W G. Application of the garnet-biotite geothermometer in the Lala copper deposit, Sichuan Province[J] . Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(2): 127-134(in Chinese).
- [23] He D F, Zhong H, Zhu W G. Protoliths of the metamorphic rocks in Lala copper deposit[J] . Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(Suppl): 370-371(in Chinese).
- [24] He D F. Petrological and Geochemical Characteristics of the Lala Copper Deposit in Sichuan Province[D] . Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009: 22-39

- (in Chinese).
- [25] McLennan S M, Hemming S, McDaniell D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics[M] //Johnsson M J, Basu A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Geology Society American Special Paper, 1993, 284: 21-40.
- [26] Panahi A, Young G M, Rainbird R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 2199-2220.
- [27] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1-312.
- [28] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[M] //Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. New York: Elsevier, 1984: 63-114.
- [29] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the Southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2919-2940.
- [30] Van de Kamp P C, Leake B E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1985, 76: 411-449.
- [31] Weaver C E. Clays, Muds, and Shales[M]. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- [32] Barshad I. The effect of a variation in precipitation on the nature of clay mineral formation in soils from acid and basic igneous rocks[C] //Proceedings International Clay Conference, 1966: 167-173.
- [33] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44: 1659-1666.
- [34] Feng R, Kerrich R. Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstones belt, Canada: Implications for provenance and tectonic setting[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 1061-1081.
- [35] Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0-Ga-old continental craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 1537-1549.
- [36] Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shale, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 4955-4972.
- [37] Fedo C M, Young G M, Nesbitt H W. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: A greenhouse to icehouse transition[J]. *Precambrian Research*, 1997, 86: 210-223.
- [38] Whitehouse M J. Granulite facies Nd-isotopic homogenization in the Lewisian complex of Northwest Scotland[J]. *Nature*, 1988, 331: 705-707.
- [39] Barovich K M, Patchett P J. Behaviour of isotopic systematics during deformation and metamorphism: Hf, Nd and Sr isotopic study of mylonitized granite[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 109: 386-393.
- [40] Tran H T, Ansdell K, Bethune K, et al. Nd isotope and geochemical constraints on the depositional setting of Paleoproterozoic metasedimentary rocks along the margin of the Archean Hearne craton, Saskatchewan, Canada[J]. *Precambrian Research*, 2003, 123: 1-28.
- [41] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717.
- [42] McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, et al. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 2015-2050.
- [43] Sun Y, Li C D. Mineralization mechanism of Lala copper deposit in Sichuan Province[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1990, 17: 1-9(in Chinese).

参考文献

- [15] 李秋根, 刘树文, 韩宝福, 等. 中天山东段星星峡群变质泥质岩的地球化学特征及其对物源区和古风化作用的制约[J]. *中国科学: D 辑*, 2005, 35(3): 225-234.
- [17] 秦德先, 燕永锋, 田毓龙, 等. 大红山铜矿床的地质特征及成矿作用演化[J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 129-139.
- [18] 吴孔文, 钟宏, 朱维光, 等. 云南大红山层状铜矿床成矿流体研究[J]. *岩石学报*, 2008, 24(9): 2045-2057.
- [20] 张森, 赵东方, 吕广俊, 等. 辽宁红透山铜矿床地质特征及成因浅析[J]. *地质与资源*, 2007, 16(3): 173-182.
- [21] 黄崇珂, 白治, 朱裕生, 等. 中国铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 407-416.
- [22] 何德锋, 钟宏, 朱维光. 石榴石-黑云母地质温度计在四川拉拉铜矿床的应用[J]. *矿物学报*, 2008, 28(2): 127-134.
- [23] 何德锋, 钟宏, 朱维光. 拉拉铜矿区变质原岩的确定[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(增刊): 370-371.
- [24] 何德锋. 四川省拉拉铜矿床岩石学及地球化学研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009: 22-39.
- [43] 孙燕, 李承德. 四川拉拉铜矿床成矿机制研究[J]. *成都地质学院学报*, 1990, 17: 1-9.