

云南武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床成矿物质来源 ——来自矿床地质与 S、Pb、H、O 同位素的制约

侯 林¹, 彭惠娟², 丁 俊¹

(1. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘 要: 武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿位于我国云南省中部, 扬子板块西缘, 康滇地轴云南段。根据矿物组合、围岩蚀变和矿化特征等方面的差异, 可将其蚀变矿物组合划分为铁-稀土-长石-硅酸盐组合和铜-金-石英-碳酸盐组合两类, 前者发生在矿化中前期, 后者发生于矿化后期。铁-铜-稀土-长石-硅酸盐组合又可划分为磁铁矿-钠长石-稀土组合和黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合。分别对黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中的黄铜矿、萤石, 铜-金-石英-碳酸盐组合中的黄铜矿、萤石、石英、方解石开展了 S、Pb、H、O 同位素的示踪研究。两组黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ (‰) 值变化范围为 $-0.44\text{‰} \sim +4.07\text{‰}$, 集中于 0 值附近, 说明其具有单一岩浆来源。后一组黄铜矿单矿物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ (‰) 值稍高于前一组合。第一组黄铜矿的 Pb 同位素组成较为均一, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 $37.684 \sim 51.112$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 $16.939 \sim 17.875$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 $40.116 \sim 41.984$, 表明其来源单一; 而第二组黄铜矿的 Pb 同位素组成则相对分散且具线性趋势, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 $19.523 \sim 356.740$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 $15.853 \sim 41.182$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 $39.411 \sim 42.010$, 表明其为混合来源。前一组合中的萤石单矿物 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值介于 $+9.30\text{‰} \sim +10.80\text{‰}$ 之间, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值介于 $-63.20\text{‰} \sim -80.20\text{‰}$ 之间, 表明其更具岩浆水性; 后一组合中的石英单矿物 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值介于 $+15.20\text{‰} \sim +18.10\text{‰}$ 之间, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值介于 $-47.70\text{‰} \sim -91.20\text{‰}$ 之间; 方解石单矿物 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值介于 $+17.00\text{‰} \sim +19.60\text{‰}$ 之间, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值介于 $-66.10\text{‰} \sim -98.20\text{‰}$ 之间, 表明其更具有变质水的特征。

关键词: 迤纳厂矿床; 滇中地区; 同位素地球化学; 成矿物质来源; IOCG

中图分类号: P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)02-0205-14

Sources of the ore-forming materials for the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit, Wuding, Yunnan Province: Constraints from the ore geology and the S, Pb, H, O isotope geochemistry

HOU Lin¹, PENG Hui-juan² and DING Jun¹

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit is located in the middle of Yunnan Province along the southern part of Kangdian axis and at the southwest edge of the Yangtze block. According to differences in mineral association, ore structure, texture and wall rock alterations, two mineral assemblages can be recognized, i. e., Fe-Cu-REE-feldspar-silicate assemblage of pre-dominant mineralization stage and Cu-Au-quartz-carbonate assemblage of post-mineralization stage, and the Fe-REE-feldspar-silicate assemblage can be further divided into magnetite-

收稿日期: 2014-11-20; 修订日期: 2015-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402074); 中国地质调查局地调资助项目(1212011094400)

作者简介: 侯 林(1985-), 男, 汉族, 矿床学博士学位, 助理研究员, E-mail: houlin-aaron@163.com。

albite-REE subassemblage and chalcopyrite-K feldspar-garnet-biotite subassemblage. S, Pb, H, O isotopic researches on chalcopyrite, fluorite, quartz and calcite of the chalcopyrite-K feldspar-garnet-biotite subassemblage and the Cu-Au-quartz-carbonate assemblage suggest that the metal and fluid sources of the chalcopyrite-K feldspar-garnet-biotite subassemblage were dominantly derived from magma, while the ore-forming materials of the Cu-Au-quartz-carbonate assemblage had a complicated metal source, and its fluid was probably of metamorphic hydrothermal origin.

Key words: Yinachang deposit; central Yunnan Province; isotope geochemistry; metal sources; IOCG

康滇地区元古代变质基底地层中的铁-铜-金-稀土矿床的成因研究历史悠久且众说纷纭,过去的观点主要包括“顺层交代”、“沉积变质”、“火山沉积-变质”、“火山块状硫化物矿床”和“喷流沉积矿床”(杨时蕙, 1982; 杨应选等, 1986; 杨耀民, 2003), 其中一个关键的问题就是成矿物质来源没有解决。近年来, 随着研究的逐渐深入和国外新成矿理论的引入, 学者们在对诸如会理拉拉、武定迤纳厂、新平大红山这一系列矿床的成矿地质背景、流体成矿作用、成矿年龄和矿床类型方面的研究均取得了较大的突破(Zhao *et al.*, 2010; Hou *et al.*, 2014), 但在这些矿床的物质来源方面的认识仍然存在较大争议。这一类型矿床达到工业品位的组分多, 这些组分的成因先后关系及它们分别的来源, 对于解决这一地区长期困扰学者们的成矿模式问题至关重要。

迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床位于云南中部武定县, 于 20 世纪 70 年代被云南地质局第四大队发现并勘探, 查明 Fe 矿石量 686.8 万吨, Cu 金属量 6.8 万吨, 还伴生有大量 Au、REE 等资源(云南地质局第四大队, 1979^①), 无论在空间位置、资源储量或矿床特征上, 都具有很好的代表性。近期该矿床在成矿年龄、流体演化、矿床类型等方面均取得了新的研究进展(杨耀民, 2003; 杨耀民等, 2004, 2005a, 2005b; 侯林等, 2013a, 2013b, 2013c), 但与其同类矿床一样, 在物质来源方面的研究尚待深入。大量研究已表明, O、H 同位素可以用于判明成矿流体是来源于岩浆流体、变质流体还是大气降水流体, 而 S、Pb 同位素则可以有效示踪成矿体系中金属元素的来源(Rye and Ohmoto, 1974; Ohmoto, 1986; Hoefs, 1997; Jiang *et al.*, 1999; Ding and Jiang, 2000; 李文博等, 2006)。但若是仅仅利用少量的同位素数据, 或者单方面的同位素数据, 可能会得到相对片面甚至矛盾的结论, 有必要开展多元同位素体系的综

合示踪以杜绝这一问题。因此, 本文选取云南武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床展开系统的 O、H、S、Pb 同位素地球化学示踪, 结合野外和镜下事实, 探讨其成矿物质和流体来源, 进而讨论矿床成因, 为解决区域同类型矿床成矿模式提供可用素材。

1 区域地质概况

武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床的大地构造位置处于扬子地块西南缘, 康滇地轴主干断裂——安宁河断裂以西, 受控于由绿汁江断裂、安宁河断裂和小江断裂所主导的南北向构造带内(图 1)。这一区域是著名的扬子地块基底地层集中分布区, 出露的元古代区域地层包括古元古代汤丹群变碎屑岩, 中元古代东川群变碳酸岩与变碎屑岩, 东川群的同时异相产物河口群、大红山群变火山岩与变碳酸岩, 中新元古代昆阳群变碳酸岩与变碎屑岩(图 2)。在这一套地层内, 对于滇中的铁-铜-金-稀土矿床而言最主要的赋矿地层当属下东川群的因民组变质碎屑岩和整合覆盖在其上的变质碳酸岩, 这两套地层赋存了 80% 以上的该类型矿床。数十年来的勘查经验表明, 因民组主要赋存以铁为主的矿床, 而落雪组则主要赋存以铜为主的矿床。

区域上分布大量中早元古代火山岩, 其喷发-沉积时期大致在 1.6~1.7 Ga 左右, 并具有典型的拉张型地球化学特征(Hu *et al.*, 1991; Zhou *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2004; Greentree and Li, 2008; 王子正等, 2012); 同时期还侵入了一套以辉绿岩为主的基性岩, 同样具有板内拉张环境的地球化学特征(Hou *et al.*, 2014)。另外, 在河口群、大红山群和昆阳群内还分布一系列以闪长岩、花岗岩为代表的中酸性岩, 但年龄关系上看, 这些中酸性岩侵入时间较晚(0.9~1.0 Ga, Li *et al.*, 2007; Zhao and Zhou,

① 云南地质局第四大队. 1979. 云南省武定县迤纳厂铁-铜-金-稀土矿区详勘地质报告(第二期).

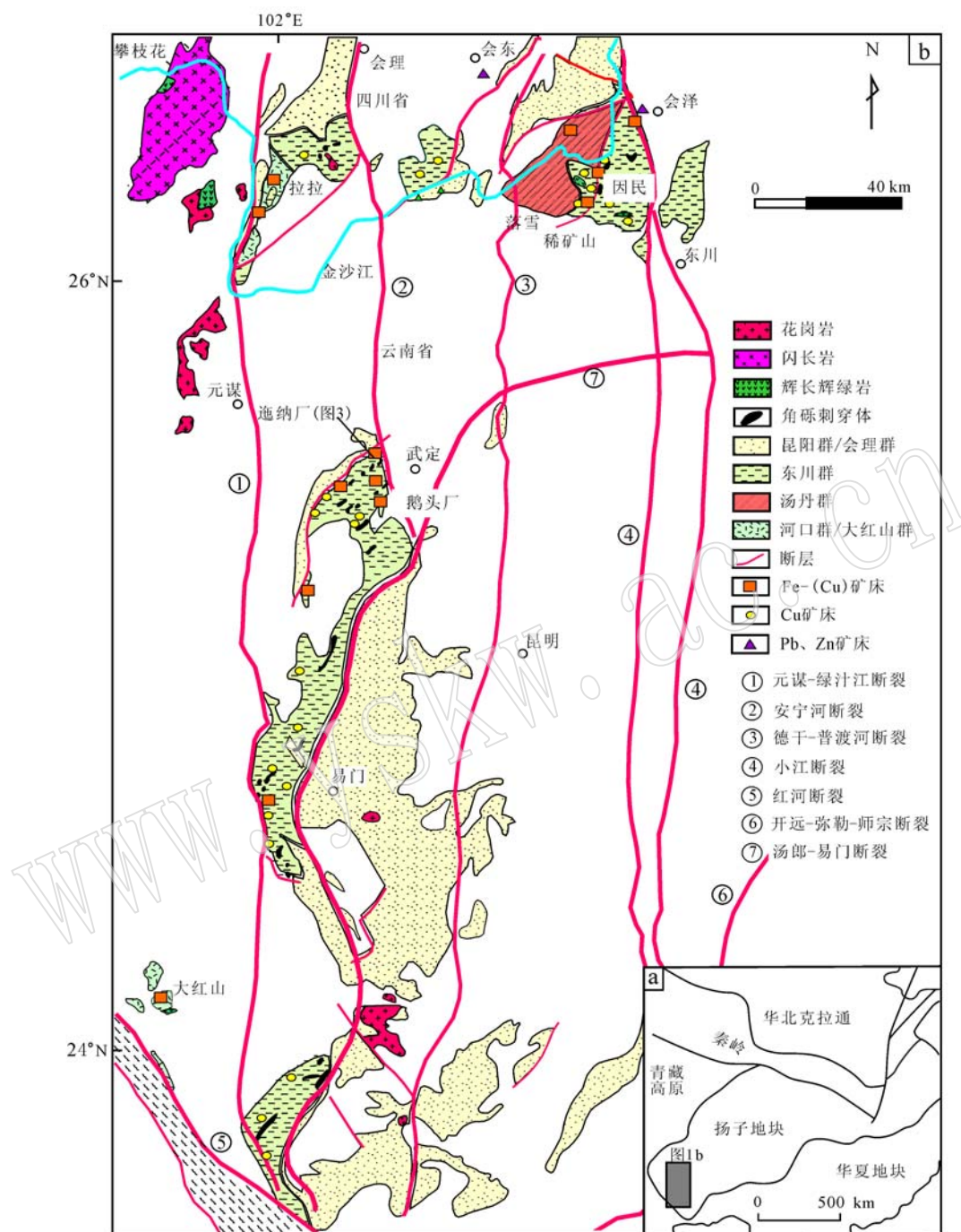


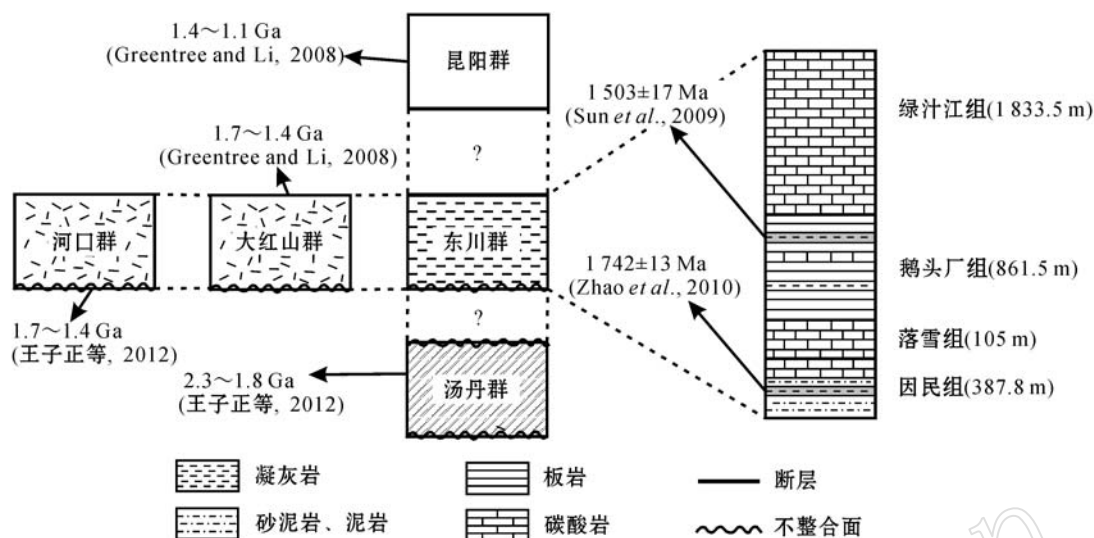
图 1 康滇地区大地构造位置(a)与元古代地层分布图(b)(据侯林等, 2013a)

Fig. 1 Geological location of Kangdian region (a) and distribution of Proterozoic strata (b) (after Hou Lin *et al.*, 2013a)

2011), 与现今普遍认为发生在 1.6 Ga 左右 (Zhao *et al.*, 2010; Hou *et al.*, 2014) 的成矿事件关系不大。值得注意的是, 区域上广泛分布角砾岩, 按其胶结物成分可分为岩浆角砾岩和沉积角砾岩两种, 这两种角砾岩的空间分布与矿体十分接近。

长期以来学者们都认为康滇地区在早中元古代

经历了一次板内拉张作用 (华仁民, 1990; 龚琳等, 1996), 这次拉张作用形成了以汤丹群为基底, 以东川群、河口群、大红山群为产物的“昆阳裂谷”。这次大致发生在 1.6~1.7 Ga 左右的拉张作用引发了区域规模的岩浆作用、角砾岩化以及略晚的铁-铜-金-稀土成矿作用。

图 2 康滇地区地层简图(据 Hou *et al.*, 2014)Fig. 2 Simplified stratigraphic map of Kangdian region (after Hou *et al.*, 2014)

2 矿床地质特征

2.1 矿体特征

迤纳厂矿区位于武定县城西约 17 km。区内出露地层主要为东川群 4 个组的变质碳酸岩、变质碎屑岩建造(图 3a)。矿区外围还分布昆阳群、震旦系、寒武系以及侏罗系地层。矿区处于因民-大尖山断裂的派生体——核桃箐逆冲断裂西侧,断层下盘为向西倾伏的 EW 向复式背斜构造。在复式背斜的轴部和断层复合处,常见由复杂成分角砾和岩浆质胶结物组成的岩浆角砾岩体,在这些岩体周边的因民组、落雪组地层矿化明显加强(图 3b)。同时,矿区沿断裂分布数条辉绿岩脉,与成矿的关系尚不清楚。

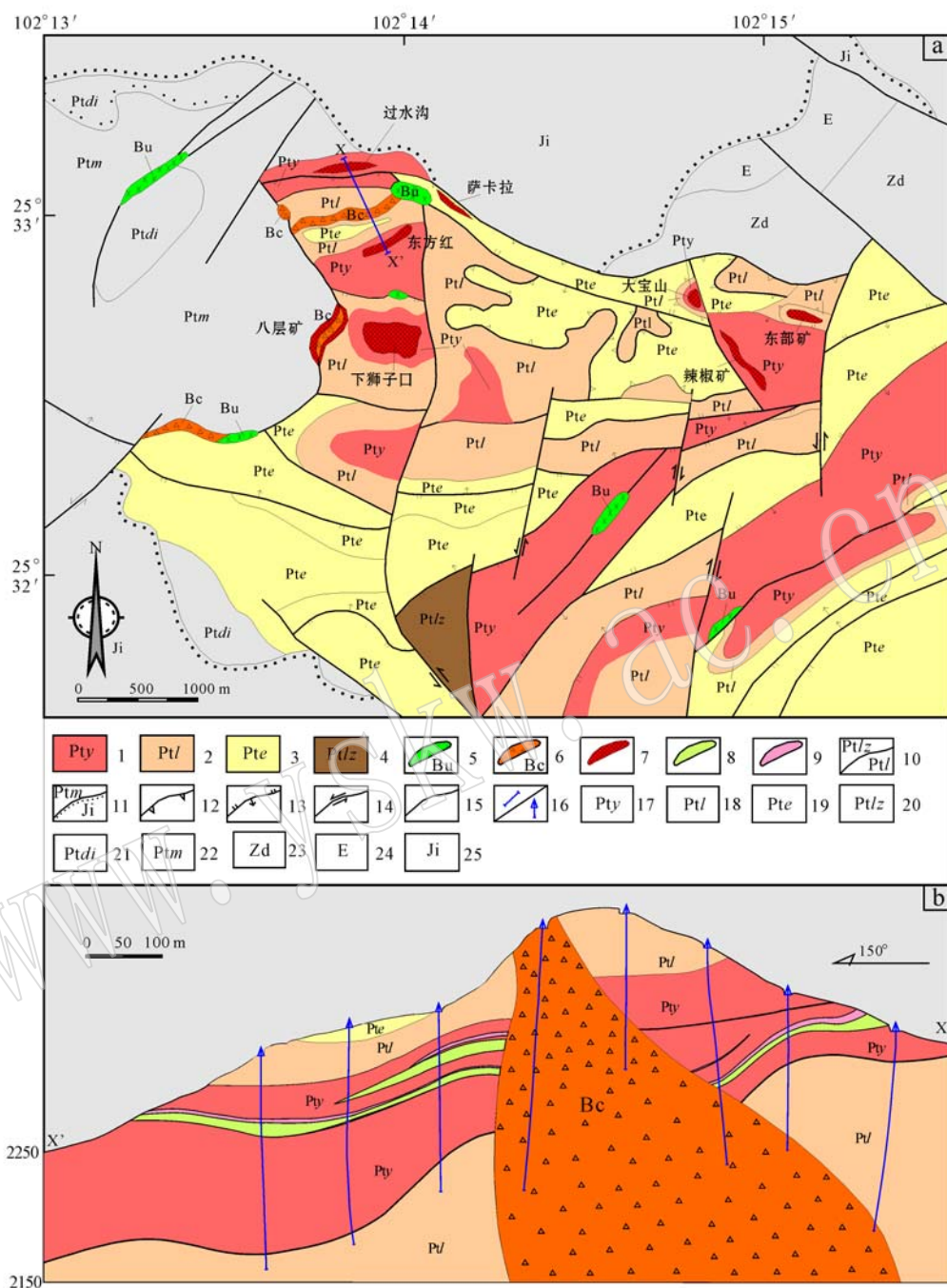
矿区可分为 8 个矿段,东西两部矿群,共有 58 个矿体。铁铜矿体主要呈似层状、透镜状分布在因民组中上部和落雪组铁白云石碳酸岩地层中,一般长 400~700 m,最长的超过 1 000 m,厚 3.93~4.31 m,宽 200 m。平均含铜 0.85%~0.97%,含铁 41.93%~44.53% 以及较高含量的稀土元素;铜金矿体主要呈脉状、网脉状穿入因民组、落雪组铁铜矿化碳酸岩内,常与脉石矿物如石英、方解石等伴生。脉体宽 0.1~30 cm,平均含铜 0.95%~1.21%,含金 0.1~0.3 g/t。矿体上下盘围岩主要为灰绿色变斑状石榴子石黑云母片岩、石英二云片岩等。矿体与围岩呈渐变过渡关系,但沿走向和倾向时现膨缩、

分支、复合现象。

2.2 矿化与蚀变组合

通过对矿区展开详细的地质填图,矿体追索与编录,根据矿石结构构造、矿物组合、围岩蚀变和矿化特征等方面的差异,可将迤纳厂铁铜金稀土矿床的蚀变矿物组合划分为铁-铜-稀土-长石-硅酸盐组合和铜-金-石英-碳酸盐组合两类。这两类蚀变矿物组合均以交代状或脉状广泛分布在岩浆角砾岩周围的碳酸岩围岩中。

铁-铜-稀土-长石-硅酸盐组合又可进一步分类为两个次级矿物组合:磁铁矿-钠长石-稀土组合和黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合。磁铁矿-钠长石-稀土组合往往发生在成矿最前期,主要表现为以团块状、浸染状、条带状分布于岩浆角砾岩周围碳酸岩中的磁铁矿化,并伴随着稍远端钠长石的带状分布(图 4a, 4b)。钠长石粒度小且细,晶型不好,具有重结晶的典型特征,有时与磁铁矿共生(图 4b)。稀土矿物主要有独居石、磷灰石、氟碳铈矿,它们以被包裹的形式存在于磁铁矿内部(图 4c)。黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合的发生稍晚于磁铁矿-钠长石-稀土组合,往往发生于离岩浆角砾岩更近的碳酸岩内。这一组合的黄铜矿主要以马尾丝状、顺层条带状、浸染状交代之形成的磁铁矿,最终表现为与磁铁矿互层(图 4d)。强烈的交代作用也导致此时的矿体顶底板形成一套以自形程度较高的钾长石、石榴子石和黑云母为主要交代矿物的蚀变带(图

图3 迤纳厂铁铜矿区地质概况(据 Hou *et al.*, 2014)Fig. 3 Geological setting of the Yinchang deposit (after Hou *et al.*, 2014)

1—中元古代东川群因民组; 2—中元古代东川群落雪组; 3—中元古代东川群鹅头厂组; 4—中元古代东川群绿枝江组; 5—辉绿岩; 6—岩浆角砾岩; 7—矿段; 8—铁矿体; 9—铜矿体; 10—整合界线; 11—不整合界线; 12—推覆构造; 13—逆断层; 14—平移断层; 15—断层; 16—勘探线/钻探; 17—中元古代因民组; 18—中元古代落雪组; 19—中元古代鹅头厂组; 20—中元古代绿枝江组; 21—中元古代大营盘组; 22—中元古代美党组; 23—震旦系; 24—寒武系; 25—侏罗系

1—Yinmin Formation of Mesoproterozoic Dongchuan Group; 2—Luoxue Formation of Mesoproterozoic Dongchuan Group; 3—Etouchang Formation of Mesoproterozoic Dongchuan Group; 4—Luzhijiang Formation of Mesoproterozoic Dongchuan Group; 5—dolerite dyke; 6—breccia body; 7—ore block; 8—Fe orebody; 9—Cu orebody; 10—conformity; 11—unconformity; 12—nappe structure; 13—reversed fault; 14—strike-slip fault; 15—fault; 16—exploration line/drilling; 17—Mesoproterozoic Yinmin Formation; 18—Mesoproterozoic Luoxue Formation; 19—Mesoproterozoic E'touchang Formation; 20—Mesoproterozoic Lvzhijiang Formation; 21—Mesoproterozoic Dayingpan Formation; 22—Mesoproterozoic Meidang Formation; 23—Sinian; 24—Cambrian; 25—Jurassic

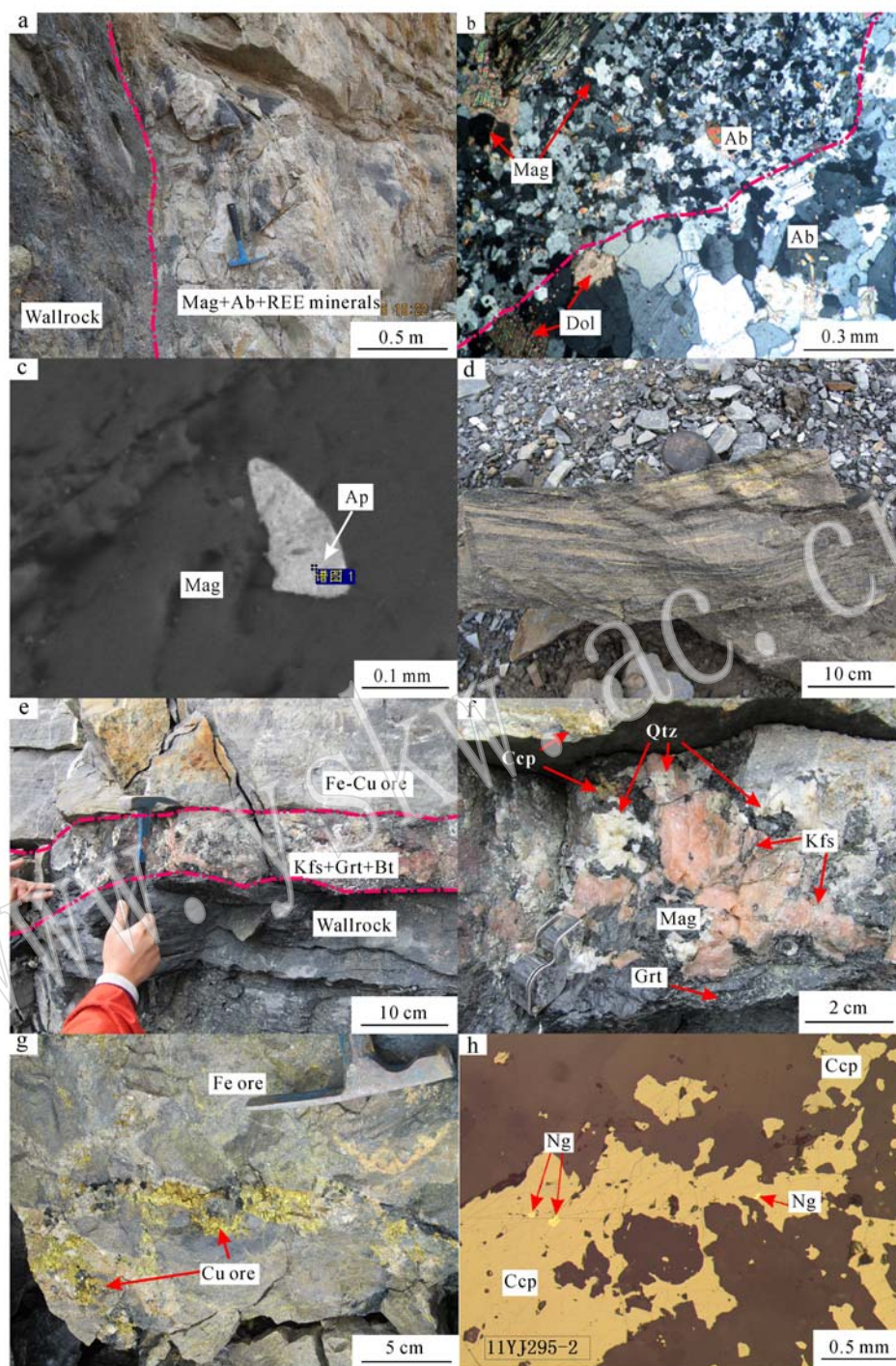


图 4 迤纳厂矿床矿体矿石照片(矿物简写据沈其韩,2009)

Fig. 4 Photographs of ores from the Yinachang deposit (abbreviations after Shen Qihan, 2009)

a—最早发生的磁铁矿-钠长石-稀土蚀变矿物组合,围岩钠化后褪色明显;b—正交偏光镜下,可见糖粒状钠长石完全或近完全交代碳酸岩,并有大量磁铁矿分布其中;c—扫描电镜下见到赋存于磁铁矿内部的磷灰石;d—黄铜矿以条带浸染状交代前期磁铁矿矿石;e, f—介于围岩与铁铜矿石之间的蚀变带,其矿物组合包括钾长石、石榴子石、黑云母和少量磁铁矿、黄铜矿;g—富含黄铜矿、黄铁矿的石英脉穿插前期形成的矿石;h—存在于黄铜矿内部的自然金;Mag—磁铁矿;Ab—钠长石;REE—稀土矿物;Dol—白云石;Ap—磷灰石;Kfs—钾长石;

Grt—石榴子石;Bt—黑云母;Qtz—石英;Ccp—黄铜矿;Ng—自然金

a—earliest magnetite-albite-REE mineral assemblage, obvious discoloration of the wall rock caused by albitization; b—carbonatite completely replaced by the sucrosic albite, along with significant magnetite (crossed nicols); c—apatite in magnetite under SEM; d—previous magnetite replaced by layered metasomatic chalcopyrite; e, f—alteration zone between wall rocks and Fe-Cu ores, including potassium feldspar, garnet, biotite and minor magnetite; g—chalcopyrite-, pyrite- bearing quartz veins cutting through early ore; h—native gold in chalcopyrite; Mag—magnetite; Ab—albite; REE—rare earth elements; Dol—dolomite; Ap—apatite; Kfs—K-feldspar; Grt—garnet; Bt—biotite; Qtz—quartz; Ccp—chalcopyrite; Ng—native gold

4e, 4f), 并含有少量的萤石网脉。铜-金-石英-碳酸盐组合主要发生于成矿的中后期, 表现为大量脉状、网脉状富含黄铜矿和黄铁矿的石英、方解石穿插前期形成的似层状铁铜矿体(图 4g)。金在这一矿物组合中普遍存在, 以粒间金的形式赋存于黄铜矿和黄铁矿内部的裂隙中(图 4h)。

3 样品采集与测试

上已述及, 迤纳厂矿床的蚀变矿物组合可依次分为磁铁矿-钠长石-稀土组合、黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合和铜-金-石英-碳酸盐组合。不同的矿物组合, 其物质来源有可能不同, 因此需要分别采样。用于本次分析的样品均采自迤纳厂矿床东方红矿段的露天采场, 新鲜的岩矿石样品被粉碎到 40~60 目, 清洗、干燥之后在双目镜下挑纯达 99% 以上。

S 同位素和 Pb 同位素的测试分别选取黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中的顺层条带状、浸染状黄铜矿和铜-金-石英-碳酸盐组合中赋存于石英网脉中的黄铜矿单矿物进行分析。S 同位素的分析方法采用硫化物与氧化铜和五氧化二钒混合氧化剂在高温真空条件下反应制取 SO_2 , 在 MAT251 质谱计上测定, 采用国际标准 CDT, 测定方法总精确度: $\pm 0.2\%$ (Shima *et al.*, 1963)。Pb 同位素的分析方法为称取 50~100 mg 岩石样品置于聚四氟乙烯烧杯中, 用 $\text{HF} + \text{HNO}_3$ 溶解, 再连续 3 次用 6 mol/L HCl 去除酸液。最后采用 HCl (2 mol/L) + HBr (1 mol/L) 混合酸溶解样品, 离心后得到的上层清液上 AG-1 $\times$ 8 阴离子交换柱分离纯化 Pb。Pb 同位素组成质谱分析在热电离子质谱仪 MAT261 上完成。分析过程采用标样 NBS981 进行质量监控, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测定结果平均值为 $0.914\,34 \pm 0.000\,30$ (2σ), 与其推荐值 $0.914\,64 \pm 0.000\,33$ 在误差范围内一致。同位素分析样品的制备均在超净化实验室完成, 与样品同时测定的 Pb 流程空白为 3.7×10^{-9} g (Manhès *et al.*, 1980)。分析单位为中国地质调查局武汉地质调查中心。

于中国地质调查局武汉地质调查中心对黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中的萤石、铜-金-石英-碳酸盐组合石英和方解石单矿物进行氢、氧同位素组成分析。氢同位素分析首先在 150℃ 真空条件下去气 4 h 以上, 除去矿物中的吸附水; 在 200~

350℃ 下采用加热爆破法提取包裹体中的 H_2O , 并在 400℃ 条件下与 Zn 反应 30 min 制取 H_2 ; 最后在 MAT251EM 质谱仪上测定同位素比值。 δD 以 SMOW 为标准计算, 精度 $\pm 2\%$ 。氧同位素用 BrF_5 和石英样品在 500℃ 真空中反应提取矿物氧, 并与灼热石墨棒燃烧转化成 CO_2 气体, MAT-253 质谱仪上分析氧同位素组成; $\delta^{18}\text{O}$ 以 SMOW 为标准计算, 精度为 $\pm 2\text{‰}$; 与石英平衡的流体中水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值依据 $1\,000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3\,138 \times 10^6/t^2 - 3.4$ (其中, t 为均一温度℃, 郑永飞等, 2000) 计算 ($t = 350\text{℃}$, 取所测包裹体均一温度的平均值)。

4 结果与讨论

4.1 硫同位素制约

硫同位素组成测试结果见表 1。从表 1 可以看出, 中前期黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中的顺层条带状、浸染状黄铜矿单矿物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})$ 值变化在 $-0.44\text{‰} \sim +3.60\text{‰}$ 之间, 平均在 $+1.75\text{‰}$ 左右, 分布较为平均, 以 $+2\text{‰} \sim +3\text{‰}$ 区间内最多; 后期铜-金-石英-碳酸盐组合中的脉状黄铜矿单矿物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})$ 值变化在 $+1.84\text{‰} \sim +4.07\text{‰}$ 之间, 平均在 $+3.21\text{‰}$ 左右。

硫化物中硫的来源是了解矿床成矿物质来源的重要参数之一。总结此次测试成果和以往研究数据, 迤纳厂矿床矿石中黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})$ 值变化范围为 $-0.44\text{‰} \sim +4.07\text{‰}$, 分布比较集中。这种较为集中的硫同位素组成往往暗示黄铜矿具有单一的硫原。又因该值比较接近与岩浆硫的特征 ($\delta^{34}\text{S} \approx 0 \pm 3\text{‰}$), 因此推断其可能来源于岩浆 (Holser *et al.*, 1996)。具体而言, 后期的脉状黄铜矿单矿物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})$ 值较前一矿物组合中顺层条带状、浸染状黄铜矿略高, 分布范围更窄, 且具有明显的塔式分布特征(图 5)。且后期的黄铜矿样品 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})$ 值较为接近 $+5\text{‰}$, 从成因上看更具有混合成因的特性, 有可能显示其来自硫酸盐的还原反应。迤纳厂铁铜矿区及其外围的地层, 尤其是东川群因民组的底部, 有蒸发岩层的分布, 而迤纳厂以及邻区同类型矿床就主要赋存于这套地层之上。曾有学者对这套蒸发岩对该类型成矿所起的作用提出过讨论 (Zhao *et al.*, 2010; Hou *et al.*, 2014), 也提出过一种由蒸发岩提供硫酸盐, 并与合适位置还原成矿的理论。从本次研究得到的 S 同位素结果来看, 如此低的 S

表 1 迤纳厂矿床硫同位素组成测定结果

Table 1 S isotope analyses of the chalcopyrite in the Yinachang deposit

样号	成矿期	矿物组合	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})$	资料来源
DFH3-1	中前期	黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母	黄铜矿	+2.94	本次研究
DFH3-2			黄铜矿	+2.85	
DFH3-3			黄铜矿	+2.52	
DFH3-4			黄铜矿	+1.14	
DFH3-5			黄铜矿	-0.44	
DFH3-6			黄铜矿	+2.98	
DFH3-7			黄铜矿	+3.60	
DFH3-8			黄铜矿	+1.27	
DFH3-9			黄铜矿	+0.73	
DFH3-10			黄铜矿	-0.11	
YDFH1-8	后期	铜-金-石英-碳酸盐	黄铜矿	平均+1.57	杨耀民, 2003
			黄铜矿	平均+2.28	李志群, 1996
DFH4-1			黄铜矿	+2.63	本次研究
DFH4-2			黄铜矿	+2.81	
DFH4-3			黄铜矿	+2.77	
DFH4-4			黄铜矿	+3.55	
DFH4-5			黄铜矿	+1.84	
DFH4-6			黄铜矿	+3.31	
DFH4-7			黄铜矿	+4.07	
DFH4-8			黄铜矿	+3.56	
DFH4-9			黄铜矿	+3.61	
DFH4-10			黄铜矿	+3.94	
脉 1~7			黄铜矿	平均+4.89	杨耀民, 2003
			黄铜矿	平均+1.52	吴建民等, 1998

同位素值,至少说明此类蒸发岩提供物质的量非常少。考虑到其实两类黄铜矿 S 同位素值差别甚小,笔者认为后期热液把前期浸染状硫化物中被氧化的硫携带进入流体,再在合适部位重新还原聚集,是脉状黄铜矿形成的主要作用。

4.2 铅同位素制约

前人未针对迤纳厂矿床展开过单矿物的 Pb 同位素测试。本次 Pb 同位素测试结果见表 2。

表 2 中可见,中前期黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中黄铜矿的铅同位素组成较为均一, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 37.684~51.112 (平均 43.557), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 16.939~17.875 (平均 17.329), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 40.116~41.984 (平均 41.169);而来自后期铜-金-石英-碳酸盐组合中黄铜矿的铅同位素组成则相对分散, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 19.523~35.740 (平均 163.466), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 15.853~41.182 (平均 26.840), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为 39.411~42.010 (平均 40.608)。

中前期黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中黄铜矿的铅同位素组成,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

图上表现出了一定的线性趋势,而在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上则集中分布于地壳演化线以上的狭小区域(Zartman and Haines, 1988; 图 6)。造成铅同位素如此均一的可能原因包括:单一的铅来源或混合完全的多重铅来源。线性趋势一般被解释为铅具有混合来源(Canals and Cardellach, 1977),而集中分布的点则代表单一来源。同一套样品的黄铜矿,表现出不同的铅同位素结果,说明其成因相对复杂。从 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上可知,其 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 组成是相对稳定单一的,说明其最初来源单一,可能为深部来源。而 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上相对分散且有线性趋势,表明原本相对单一的最初来源受到了后期热事件的改造。后期铜-金-石英-碳酸盐组合中黄铜矿的铅同位素组成,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上分布分散无规律,而 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上均表现出了明显的线性趋势,说明这一类黄铜矿的铅具有混合来源,极有可能来自中前期形成的黄铜矿。

两类黄铜矿铅同位素 μ 值远高于正常铅的 μ 值范围(8.686~9.490),显示铅的成熟度相当高;大部分样品所具有的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值均远高于平均值

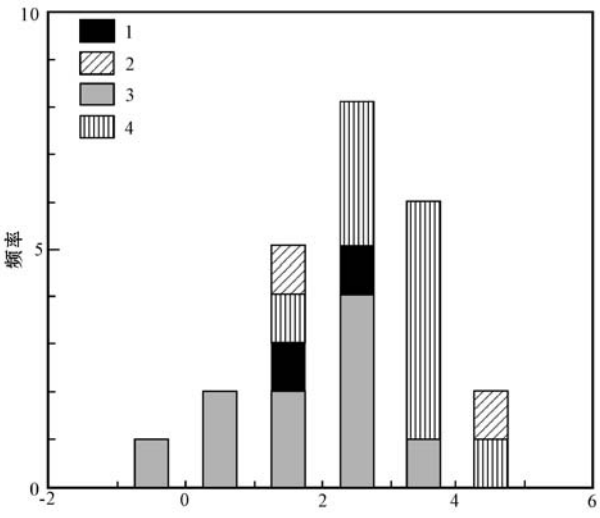


图5 迤纳厂矿床不同矿物组合内黄铜矿 S 同位素直方图

Fig. 5 Histogram of S isotopes of chalcopyrite in different mineral assemblages of the Yinachang deposit
1—以往测试黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母矿物组合(李志群, 1996; 杨耀民, 2003); 2—以往测试铜-金-石英-碳酸盐矿物组合(吴建民等, 1998; 杨耀民, 2003); 3—本次测试黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母矿物组合; 4—本次测试铜-金-石英-碳酸盐矿物组合
1—previous analytical results of the chalcopyrite-K-feldspar-garnet-biotite assemblage (after Li Zhiqun, 1996; Yang Yaomin, 2003); 2—previous analytical results of the copper-gold-quartz-carbonate assemblage (after Wu Jianmin *et al.*, 1998; Yang Yaomin, 2003); 3—newly analytical results of the chalcopyrite-K-feldspar-garnet-biotite assemblage; 4—newly analytical results of the chalcopyrite-K-feldspar-garnet-biotite assemblage

18.000,所有样品的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值高于 15.3,且 Th/U 比值小于 1,表明样品对铀铅的富集,且在源区内 U 和 Th 相对 Pb 而言是富集的。一般情况

下,样品如果富集铀铅且²⁰⁶Pb 和²⁰⁷Pb 值偏高,意味着它是较为成熟的铅,其²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 会偏低,表现出一定程度的钍铅亏损。然而迤纳厂矿床黄铜矿的²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值仍略高于 39.000 的平均值,这同样表明黄铜矿经历了热事件改造,使得样品再次富集钍铅,也使得²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值增高。

4.3 氢氧同位素制约

为准确区分引起迤纳厂矿床不同矿物组合矿化的成矿流体来源,本次研究分别对黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中的萤石、铜-金-石英-碳酸盐组合石英和方解石单矿物进行了氢、氧同位素组成分析。经计算,武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中的萤石单矿物 δ¹⁸O_{V-SMOW} 值介于 +9.30‰~+10.80‰之间,平均 +10.08‰,δD_{V-SMOW} 值介于 -63.20‰~-80.20‰之间,平均 -71.33‰;铜-金-石英-碳酸盐组合中的石英单矿物 δ¹⁸O_{V-SMOW} 值介于 +15.20‰~+18.10‰之间,平均 +16.32‰,δD_{V-SMOW} 值介于 -47.70‰~-91.20‰之间,平均 -74.82‰;铜-金-石英-碳酸盐组合中的方解石单矿物 δ¹⁸O_{V-SMOW} 值介于 +17.00‰~+19.70‰之间,平均 +18.96‰,δD_{V-SMOW} 值介于 -66.10‰~-98.20‰之间,平均 -86.4‰(表 3)。

将测试取得的氢氧同位素结果与 Taylor(1974)提供的自然界各种地质体的平均值相对比后发现,本次所测试的样品 δ¹⁸O_{V-SMOW} 值均大于地幔值,其中萤石样品靠近岩浆水范围且可排除来自沉积岩的可能,石英和方解石样品属于变质岩、沉积岩、变质水范围的混合区,也可排除火成岩成因(图 7a);而图 7b 所表现出来的各类样品的 δD_{V-SMOW} 值更为复杂,

表 2 迤纳厂矿床铅同位素组成测定结果

Table 2 Pb isotope analyses of the chalcopyrite in the Yinachang deposit

样号	期次	矿物组合	矿物	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ 值	Th/U
DFH3-1	中前期	黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母	黄铜矿	51.112	17.875	41.971	21.03	0.46
DFH3-2			黄铜矿	41.646	17.068	40.869	16.27	0.54
DFH3-3			黄铜矿	45.572	17.472	40.116	18.24	0.45
DFH3-4			黄铜矿	38.048	16.997	41.095	14.46	0.62
DFH3-5			黄铜矿	47.282	17.620	41.984	19.10	0.51
DFH3-6			黄铜矿	37.684	16.939	40.980	14.27	0.62
DFH4-1	后期	铜-金-石英-碳酸盐	黄铜矿	40.653	17.181	41.899	15.77	0.61
DFH4-2			黄铜矿	232.226	33.120	42.010	112.12	0.09
DFH4-3			黄铜矿	168.187	26.866	39.713	79.91	0.10
DFH4-4			黄铜矿	356.740	41.182	40.008	174.75	0.05
DFH4-5			黄铜矿	19.523	15.853	39.411	9.86	3.62

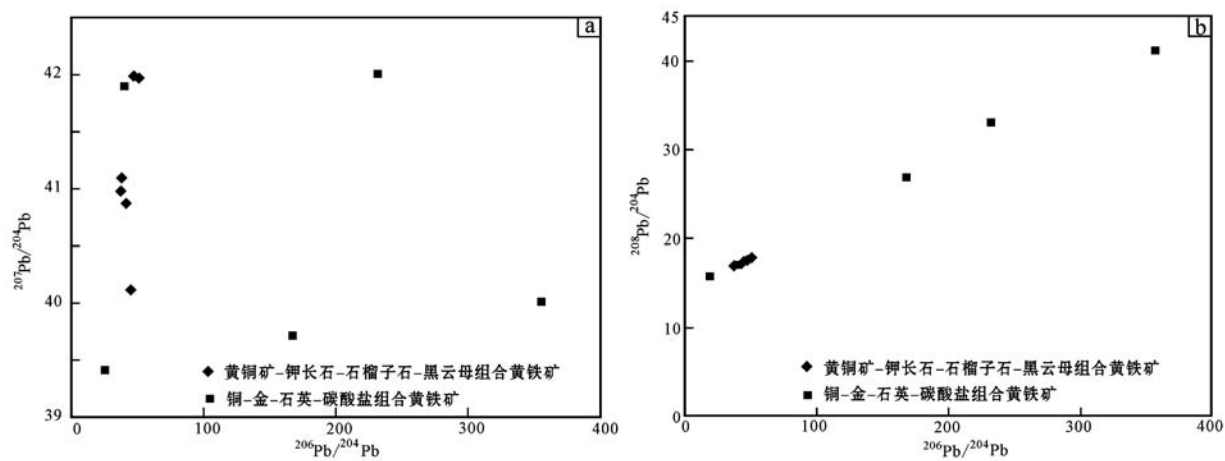


图 6 迤纳厂矿床不同矿物组合内黄铜矿²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (a) 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (b) 图解
(据 Zartman and Haines, 1988)
Fig. 6 ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (a) and ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (b) diagrams of chalcopyrite in different assemblages of the Yinachang deposit (after Zartman and Haines, 1988)

表 3 迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床成矿流体氢氧同位素分析结果
Table 3 H-O isotope analyses of the chalcopyrite in the Yinachang deposit

编号	成矿期	矿物组合	矿物	δ ¹⁸ O _{V-SMOW} /‰	δD _{V-SMOW} /‰
DFH-B18	中前期	黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母	萤石	+ 10.70	- 64.10
DFH-B19				+ 9.60	- 63.20
DFH-B20				+ 10.00	- 77.80
DFH-B21				+ 10.10	- 77.20
DBS-Z6				+ 9.30	- 65.50
DFH4-YS	后期	铜-金-石英-碳酸盐	石英	+ 10.80	- 80.20
DFH-B22				+ 15.20	- 82.10
DFH-B23				+ 15.70	- 71.30
DFH-B24				+ 16.70	- 88.80
DFH-B26				+ 15.60	- 47.70
DFH-B27		铜-金-石英-碳酸盐	方解石	+ 16.60	- 91.20
DFH-B28				+ 18.10	- 67.80
DFH-B08				+ 19.60	- 98.20
DFH-B09				+ 19.40	- 90.60
DFH-B10				+ 19.70	- 92.60
DFH-B14				+ 19.10	- 84.50
DFH-B16				+ 17.00	- 66.10

其中萤石样品落入花岗岩、球粒陨石、变质岩、碎屑沉积岩和岩浆水的混合区,可排除海水和变质水成因,而石英和方解石样品则比较分散,单从此图上难以对其成因做出判断。迤纳厂铁-铜-金-稀土矿成矿各阶段流体的 δ¹⁸O_{V-SMOW} 值逐渐增高,中前期黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中的萤石值与花岗岩浆近似,但后期铜-金-石英-碳酸盐组合石英和方解石的 δ¹⁸O_{V-SMOW} 含量逐渐增多,这么高的含量说明其只能来源于岩石建造的变质脱水作用。图

8 所表现出来的各类样品的 δD_{V-SMOW} 值较为复杂,其中萤石样品落入岩浆水范围,石英和方解石样品主要介于变质水和高岭石风化线之间,可以看出,随着矿化作用的进行,有一条从岩浆热液向变质热液逐渐靠近而后再逐渐趋于高岭石风化线的同位素值变化轨迹。据 Robert(1993)和 Taylor(1974)研究表明,在年代古老的矿床中(本矿床成矿年龄 1.6 Ga 左右),由于风化作用,矿物中保留的 O 同位素发生分馏,从而更为富集重氧,导致在图中的投点上

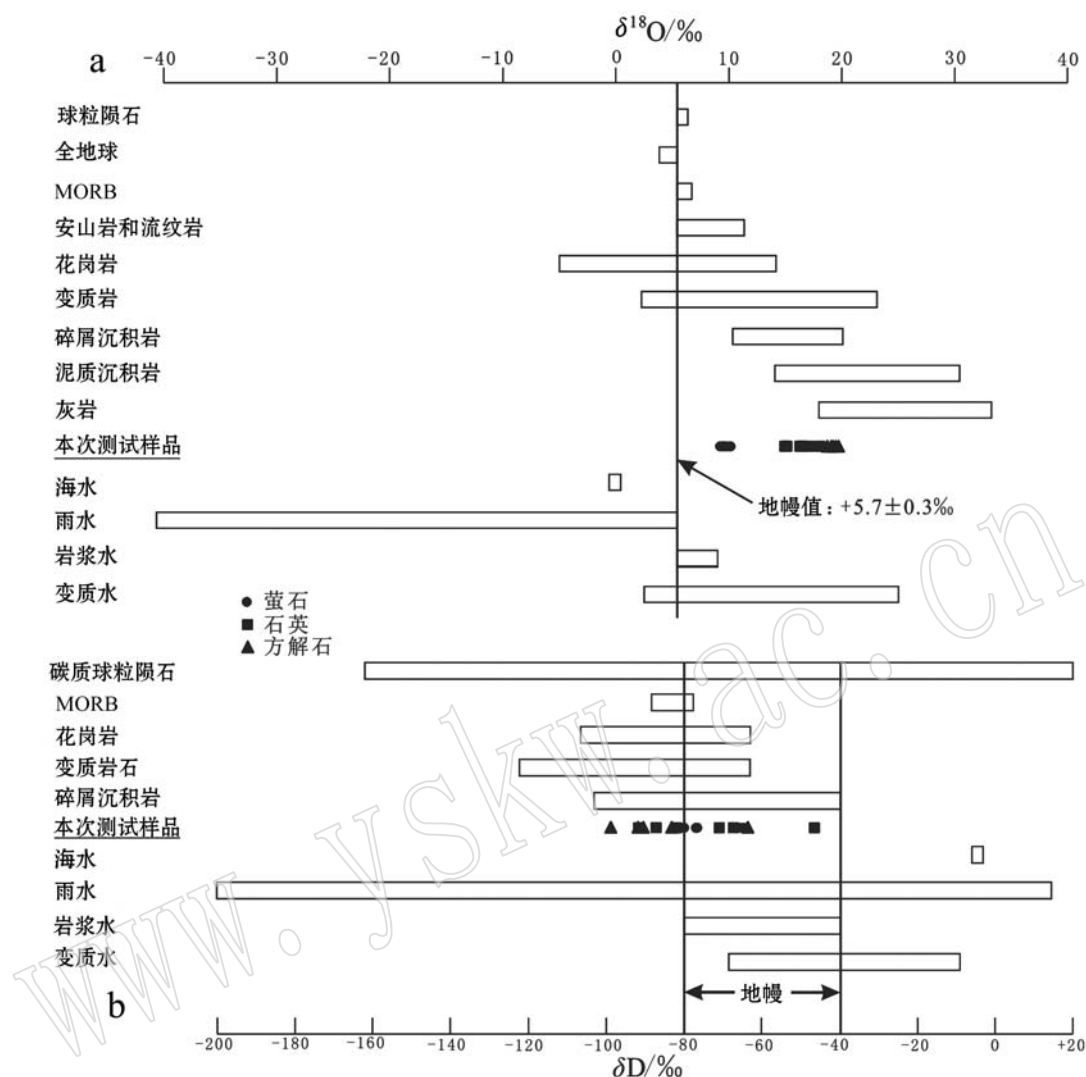


图7 迤纳厂铁铜矿床成矿流体氢氧同位素对自然界氢氧同位素值(据 Onuma *et al.*, 1972; Taylor, 1974; Sheppard, 1977)

Fig. 7 H-O isotopic analyses of the Yinachang deposit and the nature (after Onuma *et al.*, 1972; Taylor, 1974; Sheppard, 1977)

发生向高岭石线的偏移。

从此可总结,萤石样品更具有岩浆水的性质,中前期的热液应为岩浆不混溶作用而来;而石英、方解石则更具有变质水的特征,后期的热液为围岩变质脱水而来。

5 结论

(1) 迤纳厂铁铜矿床的蚀变矿物组合可划分为铁-铜-稀土-长石-硅酸盐组合和铜-金-石英-碳酸盐组合两类。前者发生在主成矿的中前期,后者发生

在主成矿的后期。铁-铜-稀土-长石-硅酸盐组合又可进一步分类为两个次级矿物组合:磁铁矿-钠长石-稀土组合和黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合。

(2) 硫、铅同位素研究表明,迤纳厂铁铜矿床中前期黄铜矿-钾长石-石榴子石-黑云母组合中黄铜矿的硫来源来自岩浆;而后期铜-金-石英-碳酸盐组合中的黄铜矿的硫来源为后期热液对前期浸染状硫化物的再次活化聚集。

(3) 氢、氧同位素研究表明,迤纳厂铁铜矿床中前期引起成矿的流体来自岩浆,其成矿作用也主要

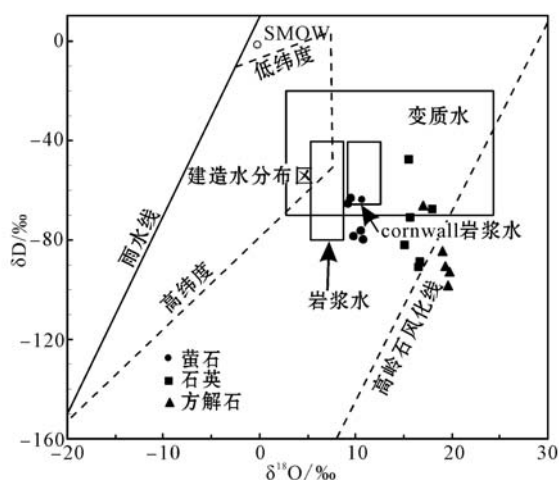


图 8 迤纳厂铁铜矿床成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 对 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 投影图

Fig. 8 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ versus $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ diagram of the ore-forming fluid of the Yinachang deposit
岩浆水、建造水和变质水的范围引自 Taylor(1974), Cornwall 花岗岩岩浆水范围引自 Sheppard(1977), 雨水线引自 Epstein *et al.* (1965)

Magmatic water, strata water and metamorphic water after Taylor, 1974; Cornwall granite water after Sheppard, 1977; meteoric water after Epstein *et al.*, 1965

是因岩浆热液与碳酸岩的交代作用;后期成矿流体逐渐转换为变质热液与大气降水的混合导致了矿质的新一轮沉淀。

致谢 在野外工作中得到成都地质调查中心郭阳、王子正、杨斌工程师的帮助;在论文完成过程中得到了廖震文教授级高工、王生伟博士的指导和帮助;同位素成分测试得到武汉地质调查中心于桂香老师的帮助;审稿老师和编辑老师对文章的思路和细节上提出了很多重要的修改意见。在此向上述专家、同仁表示最衷心的感谢。

References

Canals A and Cardellach E. 1997. Ore lead and sulphur isotope pattern from the low-temperature veins of the Catalanian Coastal Ranges (NE Spain)[J]. *Minerium Deposita*, 32: 243~249.
Ding T P and Jiang S Y. 2000. Stable isotope study of the Langshan polymetallic mineral district, Inner Mongolia, China[J]. *Resource Geology*, 50: 25~38.
Epstein S, Sharp R P and Gow A J. 1965. Six-year record of oxygen

and hydrogen isotope variations in South Pole fir[J]. *Journal of Geophysical Research*, 70(8): 1 809~1 814.
Gong Lin and He Yite. 1996. Rift-Related Proterozoic Copper Mines in Dongchuan, Yunnan[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1~105(in Chinese with English abstract).
Greentree M R and Li Z X. 2008. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5~6): 289~302.
Hoefs J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry*[M]. 4th edition, Springer Verlag, Berlin, 201.
Holser W T, Magaritz M and Ripperdan R L. 1996. Global isotopic events[A]. *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic* (ed O H Walloser)[C]. Springer-Verlag, Beilin, 63~88.
Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, *et al.* 2013a. Zircon LA-ICP-MS dating and its geological significance of the magmatic breccia from Yinachang iron-copper deposit, Wuding County, Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(4): 8~16(in Chinese with English abstract).
Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, *et al.* 2013b. Ore-forming fluid and metallogenesis of the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit, Wuding, Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1 187~1 202(in Chinese with English abstract).
Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, *et al.* 2013c. Geochemical characteristics of magnetite and its significance on ore-forming of Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit, Wuding, central Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 154~166(in Chinese with English abstract).
Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, *et al.* 2014. Geology, geochronology, and geochemistry of the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit of the Kangdian region of SW China: Evidence for a Paleo-Mesoproterozoic tectono-magmatic event and associated IOCG systems in the western Yangtze Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*.
Hu A Q, Zhu B Q, Mao C X, *et al.* 1991. Geochronology of the Dahongshan group[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 10(3): 195~203.
Hua Renmin. 1990. On the Kunyang Aulacogen[J]. *Acta Geologica Sinica*, 4: 289~301(in Chinese with English abstract).
Jiang S Y, Han F and Shen J Z. 1999. Chemical and Sr-Nd isotopic systematics of tourmaline from the Dachang Sn-polymetallic ore deposit, Guangxi Province, China[J]. *Chemical Geology*, 157: 49~67.
Li Wenbo, Huang Zhilong and Zhang Guan. 2006. Sources of the ore metals of the Huize ore field in Yunnan province: constraints from

- Pb, S, C, H, O and Sr isotope geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2 567~2 580(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Sinclair J A, *et al.* 2007. Reply to the comment by Zhou *et al.* on. "Revisiting the "Yanbian Terrane". Implication for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China"[J]. *Precambrian Research*, (155): 318~323.
- Li X H, Liu D Y, Sun M, *et al.* 2004. Precise Sm-Nd and U-Pb isotopic dating of the supergiant Shizhuyuan polymetallic deposit and its host granite, SE China[J]. *Geological Magazine*, 141(2): 225~231.
- Li Zhiqun. 1996. Geochemistry of Fe-Cu deposits in the Yinmin Formation of the Proterozoic Kunyang Group[J]. *Mineral and Geology*, 10(2): 100~107(in Chinese with English abstract).
- Manhès G, Allègre C J, Dupré B, *et al.* 1980. Lead isotope study of basic-ultrabasic layered complexes: Speculations about the age of the Earth and primitive mantle characteristics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 47: 370~382.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy*, 6: 491~559.
- Onuma N, Clayton R N and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope cosmo-thermometer. *Geochimistry*[J]. *Cosmochim. Acta*, (36): 169~188.
- Robert O R. 1993. The evolution of magmatic fluids in the epithermal environment: The stable isotope perspective[J]. *Economic Geology*, 88: 733~753.
- Rye R O and Ohmoto H. 1974. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review[J]. *Economic Geology*, 69: 826~842.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500(in Chinese with English abstract).
- Sheppard S M P. 1977. The Cornubian batholith, SW England. D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ studies of kaolinite and other alteration minerals[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 133(6): 573~591.
- Shima M, Gross W H and Thode H G. 1963. Sulfur isotope abundances in basic sills, differentiated granites, and meteorites[J]. *Journal of Geophysical Research*, 68: 2 835~2 847.
- Sun Zhiming, Yin Fuguang, Guan Junlei, *et al.* 2009. SHRIMP U-Pb dating and its stratigraphic significance of tuff zircons from Heishan Formation of Kunyang Group, Dongchuan area, Yunnan Province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 896~900(in Chinese with English abstract).
- Taylor HP Jr. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal, alteration and ore deposition [J]. *Economic Geology*, 69: 843~883.
- Wang Zizheng, Zhou Bangguo, Guo Yang, *et al.* 2012. Geochemistry and zircon U-Pb dating of Tangtang granite in the western margin of the Yangtze Platform[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(5): 652~662(in Chinese with English abstract).
- Wu Jianmin and Huang Yongping. 1998. Comparison between Xikuangshan Fe-Cu deposit and Olympic Dam deposit[J]. *Mineral and Geology*, 12(2): 79~85(in Chinese with English abstract).
- Yang Shihui. 1982. An approach to the genesis of magnetite deposit, Yinachang, Yunnan, from the internal structures of magnetite[J]. *Bulletin of the Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 3(1): 137~147(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin. 2003. Study on geochemistry of Fe-Cu-REE deposit in Kunyang Group in Mid-Proterozoic: Examples by the Yinachang Fe-Cu-REE deposit[D]. Ph. D. Dissertation. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences. 1~90(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin, Tu Guangchi and Hu Ruizhong. 2004. REE geochemistry of Yinachang Fe-Cu-REE deposit in Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(3): 301~308(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin, Tu Guangchi, Hu Ruizhong, *et al.* 2005a. Sm-Nd isotopic geochronology of the Yinachang Fe-Cu-REE deposit at Wuding, Yunnan Province and its genetic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2 090~2 096(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin, Tu Guangchi, Hu Ruizhong, *et al.* 2005b. Sulfur isotope geochemistry characteristics of Yinachang REE-Fe-Cu deposit [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 23: 90(in Chinese with English abstract).
- Yang Yingxuan, Qiu Dingmao, Que Meiyang *et al.* 1988. Precambrian Stratabound Copper Deposits in Xichang-Central Yunnan Region [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1~374(in Chinese).
- Zartman R E and Haines S M. 1988. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs: A case study for bi-directional transport[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 1 327~1 339.
- Zhao X F and Zhou M F. 2011. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: a Proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) metallogenic province[J]. *Miner Deposita*, 46: 731~747.
- Zhao X F, Zhou M F, Li J W, *et al.* 2010. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block[J]. *Pre-*

cambrian Research, 182: 57~69.

Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 193~313 (in Chinese with English abstract).

Zhou M F, Kennedy A K and Sun M. 2002. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China. Implication for the accretion of Rodinia[J]. Journal of Geology, 110(5): 611~618.

附中文参考文献

龚琳, 何毅特. 1996. 云南东川元古宙裂谷型铜矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~248.

侯林, 丁俊, 邓军, 等. 2013a. 云南武定迤纳厂铁铜矿岩浆角砾岩锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质通报, 32(4): 8~16.

侯林, 丁俊, 邓军, 等. 2013b. 云南武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床成矿流体特征与成矿作用[J]. 岩石学报, 29(4): 1187~1203.

侯林, 丁俊, 邓军, 等. 2013c. 滇中武定迤纳厂铁铜矿床磁铁矿元素地球化学特征及其成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 32(2): 154~167.

华仁民. 1990. 论昆阳拗拉谷[J]. 地质学报, (4): 289~301.

李文博, 黄智龙, 张冠. 2006. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb、S、C、H、O、Sr 同位素制约[J]. 岩石学报, 22(10): 2567~2580.

李志群. 1996. 中元古界昆阳群因民组铁铜矿的成矿地球化学研究[J]. 矿产与地质, 10(2): 100~107.

沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.

王子正, 周邦国, 郭阳, 等. 2012. 扬子地台西缘淌塘花岗岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 定年[J]. 岩石矿物学杂志, 31(5): 652~662.

吴健民, 黄永平. 1998. 稀矿山式铁铜矿床与奥林匹克坝式铜多金属矿床的对比研究[J]. 矿产与地质, 12(2): 79~85.

杨时惠. 1982. 从磁铁矿内部结构探讨云南迤纳厂铁铜矿床的成因[J]. 中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊, 3: 137~147.

杨耀民. 2003. 中元古代昆阳群 Fe-Cu-REE 矿床地球化学研究——以武定迤纳厂矿床为例[D]. 中科院研究生院博士学位论文: 1~90.

杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠. 2004. 迤纳厂稀土铁铜矿床稀土元素地球化学[J]. 矿物学报, 24(3): 301~308.

杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 等. 2005a. 武定迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床 Sm-Nd 同位素年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 50(12): 1253~1258.

杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 等. 2005b. 迤纳厂稀土-铁-铜矿床硫同位素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(增刊): 90.

杨应选, 仇定茂, 阙梅英, 等. 1986. 西昌一滇中前寒武系层控铜矿[M]. 重庆: 重庆出版社, 1~374.

郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.