

# 云南省大红山铁铜矿床含矿变质岩系原岩恢复及其形成环境

叶紫枫<sup>1</sup>, 杨光树<sup>1</sup>, 覃龙江<sup>2</sup>, 陈爱兵<sup>1</sup>, 王 凯<sup>1</sup>, 周 艳<sup>1</sup>, 毛致博<sup>1</sup>, 戴智慧<sup>3</sup>  
(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 玉溪大红山矿业有限公司, 云南 新平 653405;  
3. 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 550081)

**摘要:** 大红山铁铜矿床产于下元古界大红山群变质火山-沉积岩建造中, 目前对于含矿变质岩系的成因和原岩构造环境还存在较大争议, 制约了对区内成矿过程和规律的认识。为查明赋矿围岩的原岩类型及其成岩环境, 本文系统研究了主要含矿变质岩系(变钠质火山岩、云母片岩及大理岩等)和辉长辉绿岩体(脉)的主量、微量及稀土元素组成, 在此基础上探讨了其成岩构造环境。分析结果显示, 含矿岩系具有贫钾、低钛、富钠的特征; 变钠质火山岩明显亏损 Ba、Sr、Ti, 轻微亏损 Zr、Hf、Nb, 相对富集 Th、Nd、Sm、La 等, 稀土元素含量总体较低, 相对富集轻稀土元素(LREE/HREE=1.84~9.43), 具较显著的 Eu 正异常( $\delta\text{Eu}=0.91\sim 3.59$ , 平均值为 1.62)和不明显的 Ce 异常, 与现代洋中脊、陆内裂谷等构造背景下的喷流沉积或高温海底火山作用产物的特征相似。综合研究认为, 云母片岩原岩为钙质泥岩, 变钠质熔岩和变钠质凝灰岩原岩为半深海环境喷发的富钠火山岩, 且受到了后期热液叠加作用的影响。变钠质火山岩、辉长辉绿岩等具有非造山的大陆裂谷玄武岩特征, 可与区域上同期岩浆岩对比, 表明它们均为同一大陆裂谷环境下岩浆活动的产物, 可能代表了 Columbia 超大陆的裂解过程在扬子板块西缘的响应, 大陆裂解为幔源岩浆的运移提供了通道, 进而为康滇铁铜多金属成矿带的形成提供了良好的物质基础。

**关键词:** 含矿岩系; 微量元素; 构造环境; 大红山铁铜矿床; 云南

中图分类号: P588.2; P618.31; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)02-0429-23

## Restoration of the ore-bearing metamorphic rocks and its formation environment in the Dahongshan iron-copper deposit, Yunnan Province

YE Zi-feng<sup>1</sup>, YANG Guang-shu<sup>1</sup>, QIN Long-jiang<sup>2</sup>, CHEN Ai-bing<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, ZHOU Yan<sup>1</sup>,  
MAO Zhi-bo<sup>1</sup> and DAI Zhi-hui<sup>3</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yuxi Dahongshan Mining Co., Ltd., Xinping 653405, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The Dahongshan iron-copper deposit is hosted in metavolcanic to metasedimentary rocks of the Paleoproterozoic Dahongshan Group. Up to now, the genesis and tectonic environment of these ore-bearing rocks have been still controversial, which seriously restricts the understanding of the metallogenic mechanism and process. In order to identify the original rock types and diagenetic tectonic environment of these host rocks, the authors systematically studied major, trace and rare earth element compositions of main ore-bearing metamorphic rock series, including the meta-sodic volcanic rocks, mica schists and marbles, as well as the gabbro-diabase rocks. According to the results

收稿日期: 2020-10-26; 接受日期: 2021-01-28; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41762008, 42072094); 国家重点研发计划项目(2017YFC0602500); 云南省应用基础研究计划项目(2018FB080)

作者简介: 叶紫枫(1994-), 女, 硕士研究生; 通讯作者: 杨光树(1980-), 男, 教授, 主要从事矿床学研究和教学工作, E-mail: 13888600582@163.com。

obtained, the ore-bearing rocks are characterized by poor K, Ti and rich Na, the meta sodic volcanic rocks are relatively depleted in Ba, Sr and Ti, weakly depleted in Zr, Hf and Nb, and are enriched in Th, Nd, Sm and La; their total content of rare earth elements are generally low, with LREEs relative enrichment ( $LREE/HREE = 1.84 \sim 9.43$ ), significant Eu positive anomalies ( $\delta Eu = 0.91 \sim 3.59$ , mean = 1.62), and no obvious Ce anomalies. These characteristics are similar to those of rocks from jet deposition or high temperature submarine volcanism in the modern mid-ocean ridge or intracontinental rift. According to the comprehensive study, the protolith of mica schist may have been a calcareous mudstone, while the protoliths of meta-sodic lavas and meta-sodic tuffs are volcanic rocks which erupted in the bathyal environment, with high Na content. Meta-sodic volcanic rocks and gabbro-diorite rocks show similar anorogenic features to the magmatic rocks in the same period of Kangdian area, indicating that they are all products of magmatic activities in the same continental rift environment which may represent the Columbia supercontinent cracking process on the western margin of Yangtze block. The continental breakup generated some channels for the migration of mantle-derived magma, and provided a good material basis for the formation of the iron copper polymetallic metallogenic belt in Kangdian area.

**Key words:** ore-bearing rock series; trace elements; tectonic setting; Dahongshan iron-copper deposit; Yunnan Province

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (41762008, 42072094); Project of National Key Research and Development (2017YFC0602500); Yunnan Applied Basic Research Program Project (2018FB080)

在扬子板块西南缘的康滇地区(图 1a),自北向南分布着一系列赋存于前寒武纪浅变质岩系中的 Fe-Cu-(Au-REE)矿床,以拉拉、东川、迤纳厂和大红山等为代表(图 1b),构成了重要的康滇铁铜多金属成矿带(孙克祥等, 1991; Zhao and Zhou, 2011; Zhao *et al.*, 2013, 2017)。大红山铁铜矿床位于成矿带南段的新平县戛洒镇附近,矿体赋存于大红山群变质岩系中,已探明铁矿石储量约 455.27 Mt,铜金属储量约 1.44 Mt,伴生可综合利用元素有 Au、Ag、Co、Pt 和 Pd 等(钱锦和等, 1990),是该成矿带最具代表性的超大型矿床之一。

前人对大红山矿床已开展了大量地质背景与成矿规律(孙家骢, 1988; 钱锦和等, 1990; 秦德先等, 2000)、地球化学(吴孔文等, 2008; 李俊等, 2015; Su *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2020)、成岩成矿年代学(杨红等, 2012, 2013; 金廷福等, 2017; Kou *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2017)等方面的研究工作,认为该地区 1.7 ~ 1.6 Ga 期间的构造岩浆活动可能对大红山铜铁等成矿具有主导作用。然而,目前对于大红山群含矿变质岩系的成岩机制和构造环境仍存在争议。多数学者认为含矿变质岩系是海底火山-沉积作用的产物,具有细碧岩特征,矿床受海底火山机构和喷发不同阶段形成的火山-沉积岩控制(沈远仁, 1984; 钱锦和等, 1990; 孙克祥等, 1991; 陈贤胜, 1995; 王铠元, 1996; 侯增谦等, 2003; 李俊等,

2015; Wang *et al.*, 2020),但对于变质火山岩的成岩构造环境还存在洋中脊环境(徐启东, 1998; 朱炳泉等, 1998)、大陆/陆间裂谷环境(钟昆明等, 1999; 张鸿翔等, 2001; 尹福光等, 2012; 方维萱, 2014; 杨红等, 2014; 耿元生等, 2017)等不同认识。部分学者则认为铁矿体的主要赋存围岩(红山组)为复合次火山岩体,而并非火山岩地层单元(颜以彬, 1981; 孙家骢, 1988; 秦德先等, 2000; Zhao *et al.*, 2017)。此外,还有学者提出大红山矿区外围的东么地区大红山群含矿岩系中的角砾岩为隐爆角砾岩(陆蕾等, 2014),矿区铁铜成矿则可能与陆相(次)火山活动有关(肖荣洋等, 2015)。

大红山群含矿变质岩系是大红山式铁铜矿床的主要赋矿围岩,其成因及成岩构造环境对深入理解矿床的形成机理与构造背景,以及了解扬子板块西南缘的早期地质演化历史等均具有重要意义。鉴于此,本文在前人工作的基础上,以大红山群主要含矿岩系为对象,开展了主量、微量和稀土元素等综合对比研究,以恢复其原岩类型,探讨其成岩构造环境,进而为揭示扬子板块西缘早期的构造演化提供地质依据。

## 1 地质背景

扬子板块西缘地区北邻青藏高原,西连“三江”造山带,南与华夏板块相接(图 1a)。位于扬子西南

缘的康滇铁铜成矿带主要包括康定-攀枝花-元谋-易门-元江等地的南北向狭长地带,受绿汁江断裂、普渡河断裂、小江断裂等近南北向断裂构造控制(图1b),传统上称为康滇地轴(孙克祥等,1991;尹福光等,2012)。区内断续分布着元古宙地层,以大红山群、河口群、东川群、昆阳群和会理群等为代表(图1b),主要由浅变质的火山-沉积岩系组成,共同构成了扬子板块西缘的前寒武纪基底(吴懋德等,1990;Greentree and Li, 2008;耿元生等,2008,2017;尹福光等,2012)。

大红山地区位于康滇铁铜成矿带南段,处于北西向哀牢山-红河断裂带和近南北向绿汁江断裂带之间的凹陷内,靠近红河断裂带一侧(图1b)。区内主要出露两套地层,其中大红山矿区四周主要出露上三叠统干海子组( $T_3g$ )、舍资组( $T_3s$ )陆源碎屑岩;矿区内及周边东么、河口等地不连续出露下元古界大红山群,为一套富含铁/铜的浅-中等变质的钠质火山-沉积岩系,呈“构造窗”状不整合于三叠系之下(图1c)。大红山群在大红山地区出露较完整,自下而上分为老厂河组( $Pt_1dl$ )、曼岗河组( $Pt_1dm$ )、红山组( $Pt_1dh$ )、肥味河组( $Pt_1df$ )和坡头组( $Pt_1dp$ ),主要分布于底巴都背斜南翼的老厂河、曼岗河和肥味河河谷及两岸(钱锦和等,1990),总体上受底巴都背斜及其南翼的东西向基底断裂控制,自北向南具有由老变新的趋势(图1c)。在曼岗河组和红山组中,分别产出一系列不同类型但又密切相关的铜铁矿体群(图2),被称为“大红山式”铁铜矿床(钱锦和等,1990)。

## 2 含矿岩系岩石学特征

大红山群岩石组成较复杂,既有变质火山岩/次火山岩、火山岩-沉积岩类( $Pt_1dm$ 、 $Pt_1dh$ 、 $Pt_1df$ ),也有变质正常沉积岩类( $Pt_1dl$ 、 $Pt_1dp$ ),各组岩性特征见图3a。其中曼岗河组( $Pt_1dm$ )和红山组( $Pt_1dh$ )为主要含矿层位(图3b)。曼岗河组以海底火山喷发沉积建造为主,与下伏老厂河组变质沉积岩呈整合接触,与上覆红山组呈(火山)不整合接触(钱锦和等,1990)。红山组岩性存在变质火山岩和次火山岩体的争议,但根据野外调查、矿山露天采场和井下大量编录资料,其底部发育火山集块岩,下部为具有

火山喷发韵律和流动构造的浅灰色钠长片岩(变钠质熔岩),中部夹有条带状含铜角闪黑云白云石大理岩,上部为具有火山岩结构构造的深灰色角闪钠长片岩(即角闪变钠质熔岩)<sup>①</sup>,本文认同该组为变质细碧-角斑岩建造的观点(沈远仁,1984),该组与上覆肥味河组大理岩呈过渡的整合接触关系。

含矿岩系主要为富钠变质火山岩和变质沉积岩两类(据钱锦等,1990)。从图2和图3b中可见,变质火山岩主要由变钠质凝灰岩和变钠质熔岩等组成,变质沉积岩主要包括石榴云母片岩和大理岩等,它们被后期沿构造侵入的~1.65 Ga脉状辉长辉绿岩( $\lambda\omega$ )和石英钠长斑岩(CN)所穿切包裹(Zhao *et al.*, 2011, 2017;冯裕昌,2015)。主要含矿岩系及岩体特征如下:

(1) 变钠质熔岩:主要产于红山组下部( $Pt_1dh^1$ )和上部( $Pt_1dh^3$ ),是铁主矿体的赋存围岩。岩石主要呈灰-浅灰色,含角闪石较多时呈深灰绿色,普遍具有弱绢云母化及钠化蚀变,钠化强时呈灰白色,变余交织结构、均匀细-微粒变晶结构(图4a),常为致密块状构造,也有角砾状、杏仁状构造等。主要矿物为钠长石(60%~75%,体积分数)、磁铁矿(10%~20%)和石英(10%~15%),次要矿物有绢云母、黑云母、角闪石和电气石等(图4b)。副矿物有磷灰石、钛铁矿等,次生蚀变矿物以绿泥石为主。

(2) 变钠质凝灰岩:主要产于曼岗河组三段( $Pt_1dm^3$ ),常与石榴石黑云片岩相伴或互层产出,共同构成I号铁铜矿带的赋矿围岩(图4c)。岩石特征、成分与变钠质熔岩类似,主要矿物为钠长石(图4d),其次为磁铁矿和鳞片状绢云母,绢云母成分高于变钠质熔岩,少量电气石、磷灰石。岩石多具有微粒和鳞片状变晶结构,条纹状构造,部分具有片理构造。

(3) 辉长辉绿岩体:矿区内广泛出露,呈岩墙、岩床、岩舌及不规则岩枝产出,剖面上主要沿东西向 $F_1$ 和 $F_2$ 断裂分布,切割包裹 $II_1$ 主矿体(图2、图4e),形态复杂,规模大小不等。岩石新鲜面呈墨绿色,蚀变后呈灰绿色,变余辉长/辉绿结构(图4f),块状构造。主要暗色矿物辉石大多已蚀变为角闪石(40%~50%),基性斜长石多蚀变为钠长石(40%~60%),次要矿物为黑云母、绿泥石、绿帘石等。副矿物有磁铁矿、钛铁矿、黄铜矿、黄铁矿、磷灰石等。辉长辉绿岩与围岩接触带上常伴生产出脉状和囊状的

① 云南省地质矿产局第一地质大队九分队. 1983. 云南省新平县大红山矿区东段铁矿详细勘探及铜矿初步勘探地质报告.

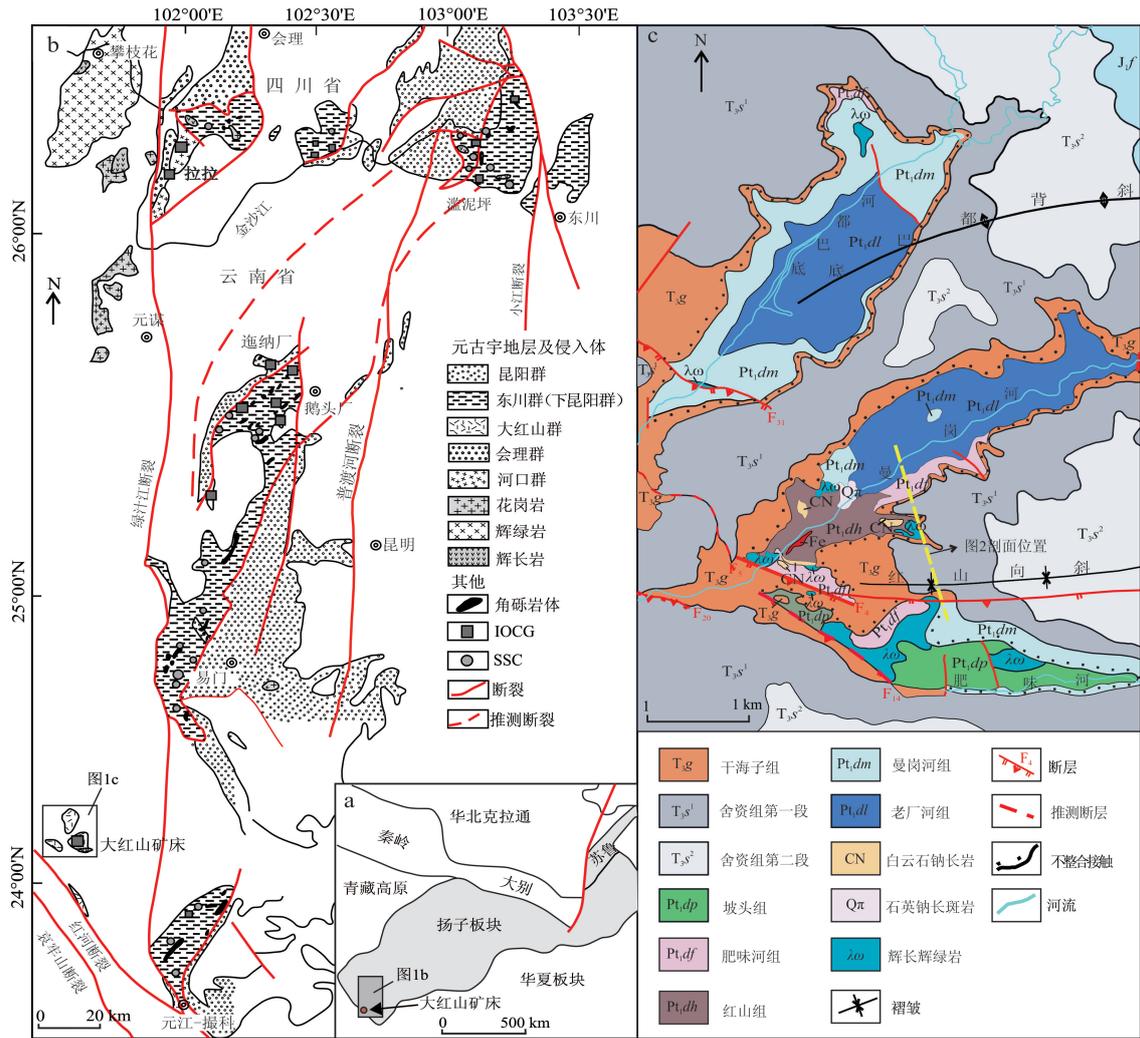


图1 大红山铁铜矿床区域地质简图(据 Zhao *et al.*, 2017 修改)

Fig. 1 Simplified regional geological map of the Dahongshan iron-copper deposit (after Zhao *et al.*, 2017)

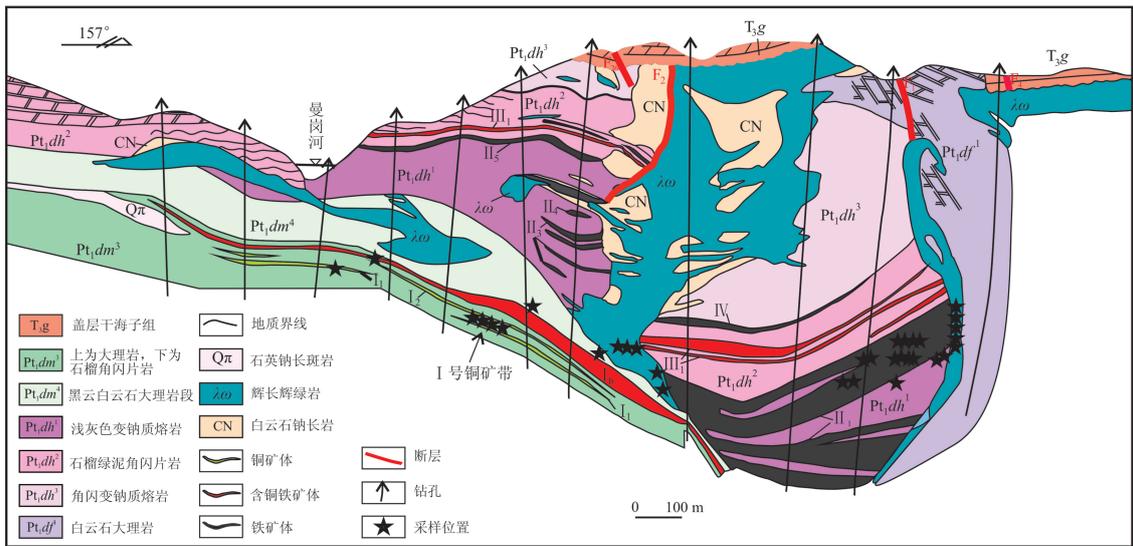


图2 大红山铁铜矿床 A32 线剖面图(据金廷福等, 2017 修改)

Fig. 2 Geological section along No. A32 line of the Dahongshan Cu-Fe deposit(modified after Jin Tingfu *et al.*, 2017)

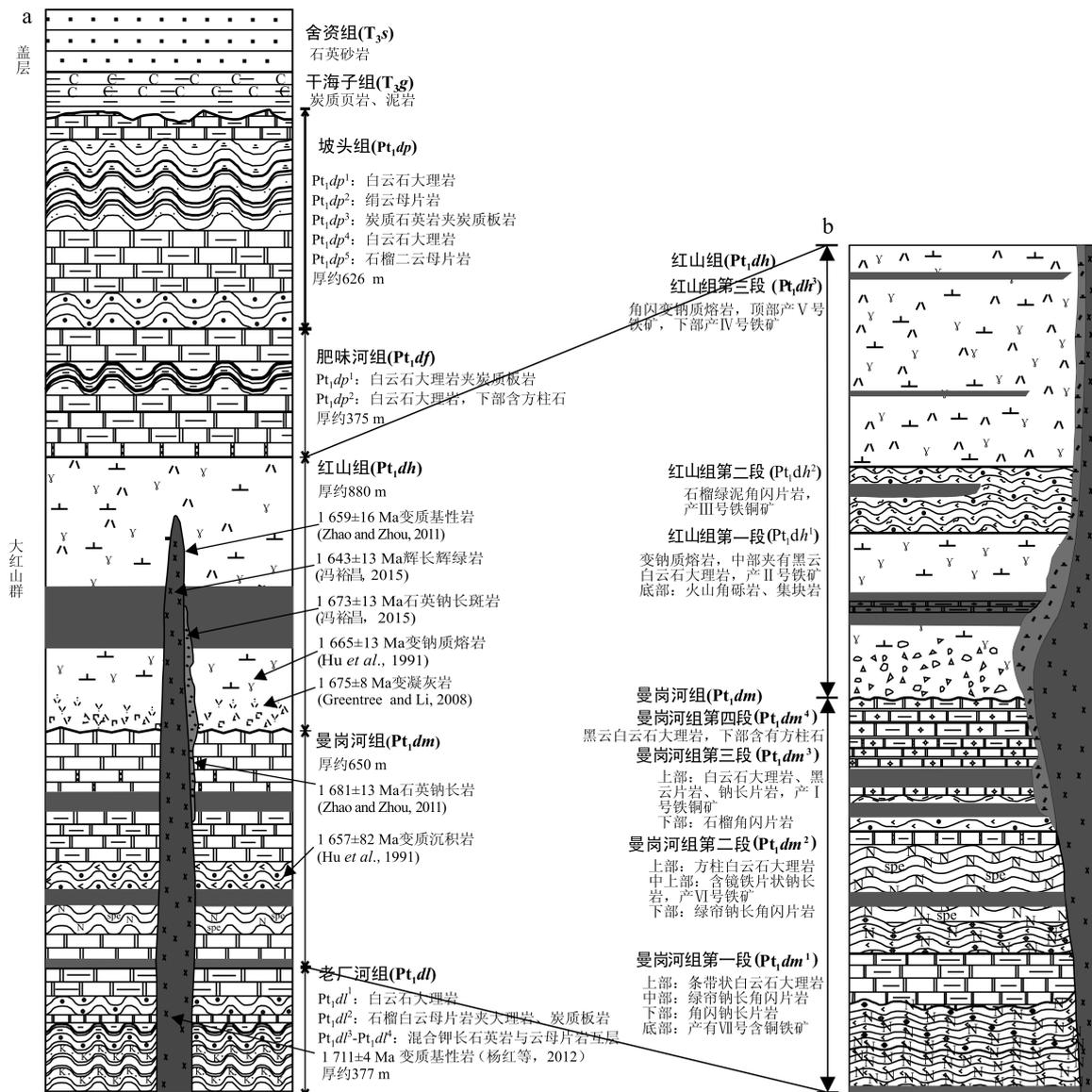


图 3 大红山铁铜矿床的地层特征 (据钱锦和等, 1990)

Fig. 3 Stratigraphic composite column of the Dahongshan iron-copper deposit (after Qian Jinhe *et al.*, 1990)

石英白云石钠长斑岩, 岩石新鲜面为灰白色, 风化后呈黄褐色, 风化面长石斑晶特征清楚 (图 4i)。主要矿物为钠长石 (30%~50%)、铁白云石 (40%~60%) 和石英 (5%~20%)。

(4) 石榴石黑云母片岩: 主要产于曼岗河组三段 (Pt<sub>1</sub>dm<sup>3</sup>), 是 I 号铁铜矿的主要赋存围岩之一。岩石为深灰绿色, 鳞片状、粒状变晶结构, 片状、条带状构造 (图 4g、4h)。

(5) 大理岩: 主要产于曼岗河组第四岩段 (Pt<sub>1</sub>dm<sup>4</sup>) 和肥味河组 (Pt<sub>1</sub>df)。以白色厚层-块状白云石大理岩和白色薄层条纹条带状黑云白云石大理岩为主, 前者常被辉长辉绿岩脉侵入 (图 4e), 具有

等粒状变晶结构, 块状构造。

### 3 样品采集、测试及分析方法

用于主微量、稀土元素测试的样品主要有变钠质火山岩、辉长辉绿岩、云母片岩、大理岩以及炭质板岩等, 共 25 件。测试样品分别采自 II<sub>1</sub> 号铁矿带 340 m、320 m、280 m 中段 5 号穿脉南沿脉和 3 号穿脉南部, I 号铜矿带 440 m、560 m、640 m 中段, 以及露天采场 895~985 m 中段和曼岗河河谷两岸等地, 采样位置见图 2。

全岩主、微量、稀土元素相关数据测试均在澳实

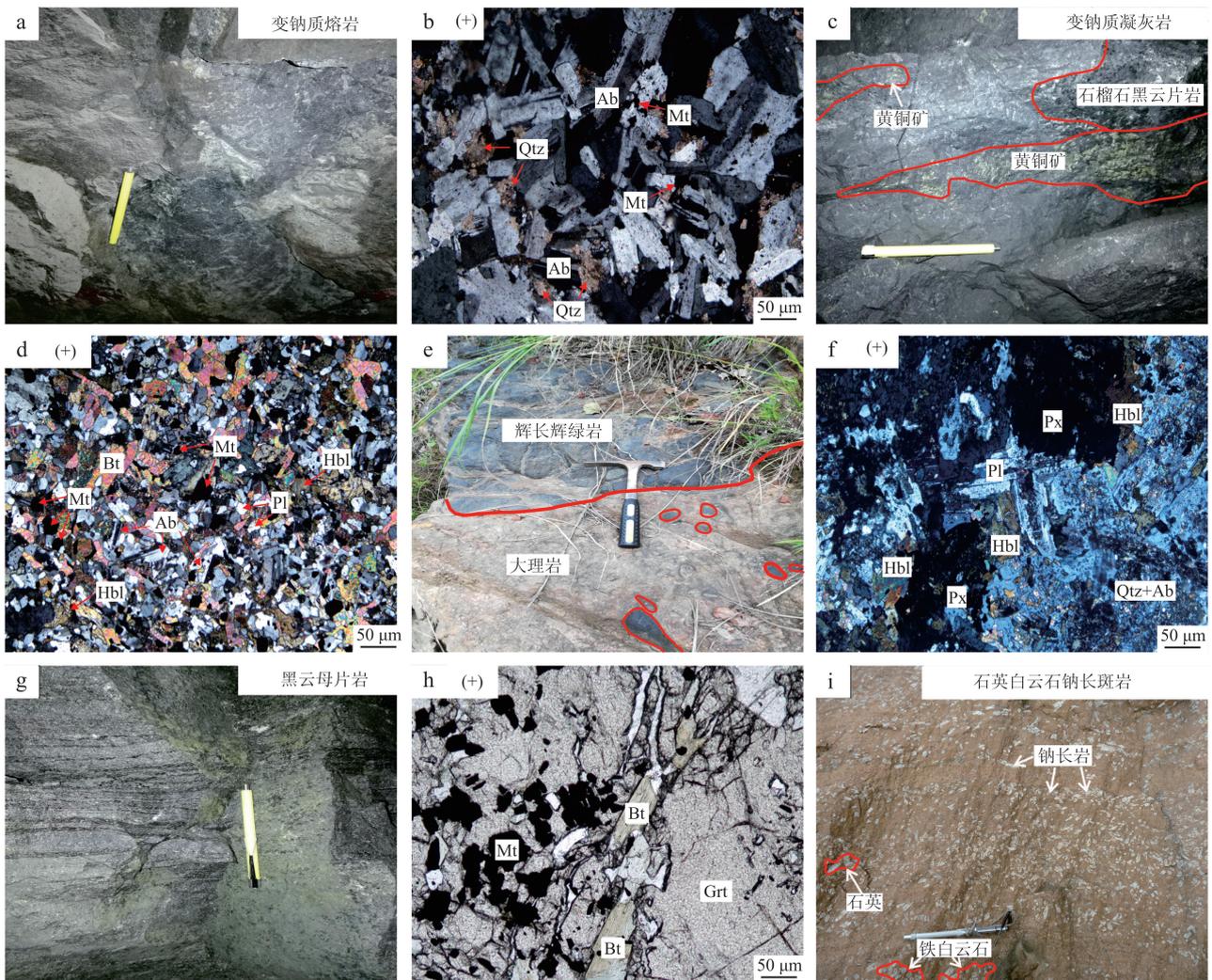


图4 大红山群含矿岩系岩石学特征

Fig. 4 Characteristics of the ore-bearing rocks from Dahongshan Group

Ab—钠长石; Hbl—角闪石; Qtz—石英; Mt—磁铁矿; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Grt—石榴子石; Px—辉石  
Ab—albite; Hbl—amphibole; Qtz—quartz; Mt—magnetite; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Grt—garnet; Px—pyroxene

分析检测(广州)有限公司完成。主量元素测定采用X射线荧光光谱法(XRF),其过程大致为:首先对样品进行无污染粉碎后,选取1~2 g样品,然后加入适量硼酸高温熔融成玻璃片在XRF上用外标法测定氧化物含量,氧化物总量分析误差除样品4450-4和4450-6外均小于1%,显示了测试结果的可靠性,分析方法参照邓宇峰等(2011)。微量元素及稀土元素的测定采用ME-MS81型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,其过程大致为:首先准确称取粉碎至大约200目的粉末样品50 mg于聚四氟乙烯坩埚中,加入1 mL HF+1 mL HNO<sub>3</sub>置于烘箱于180 °C加热约40 h。冷却后取出坩埚开盖置于低温电热板上

蒸干,加入浓度为 $500 \times 10^{-9}$ 的Rh内标1 mL, HNO<sub>3</sub> 2 mL,去离子水5 mL,再装入钢套中密封入烘箱140 °C加热5 h。冷却后取出摇匀,使用ICP-MS测定,当元素含量大于 $10 \times 10^{-6}$ 时,误差小于10%,分析方法参照杨光树等(2020)。

## 4 分析结果

### 4.1 主量元素

分别测试了含矿岩系中变钠质熔岩、变钠质凝灰岩、辉长辉绿岩、石榴石云母片岩和大理岩的化学组成,测试结果见表1。分析结果表明,含矿变质火

表 1 大红山铁铜矿床含矿岩系主量元素组成  
Table 1 Composition of main elements of ore-bearing rocks in the Dahongshan iron-copper deposit

| 样品编号     | 岩性       | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO   | MnO  | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O | ALK  | 烧失量   | 总量     | w <sub>B</sub> /% |
|----------|----------|------------------|--------------------------------|-------|---------------------------------|------------------|-------|------|-------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------------|------|-------|--------|-------------------|
| 320-5    | 变钠质熔岩    | 24.70            | 5.37                           | 20.90 | 10.80                           | 0.03             | 9.05  | 0.44 | 2.07              | 0.10                          | 0.56             | 69.00                              | 2.10 | 26.40 | 100.48 |                   |
| 280-5    | 变钠质熔岩    | 37.75            | 9.02                           | 16.70 | 9.50                            | 0.06             | 3.96  | 0.32 | 4.61              | 0.05                          | 0.55             | 76.83                              | 4.67 | 17.36 | 99.89  |                   |
| 340Y-2   | 变钠质熔岩    | 50.19            | 19.70                          | 0.60  | 15.80                           | 5.12             | 0.60  | 0.01 | 2.79              | 0.41                          | 2.16             | 0.54                               | 7.91 | 2.26  | 99.66  |                   |
| 340S-2   | 变钠质熔岩型铁矿 | 29.18            | 1.56                           | 7.00  | 53.46                           | 0.01             | 1.46  | 0.14 | 0.21              | 0.30                          | 0.45             | 21.00                              | 0.22 | 5.73  | 99.60  |                   |
| 340Y-1   | 变钠质熔岩型铁矿 | 43.57            | 2.16                           | 1.03  | 49.39                           | 0.02             | 0.12  | 0.01 | 1.20              | 0.71                          | 1.94             | 60.00                              | 1.22 | -0.57 | 99.60  |                   |
| 320-6    | 辉长辉绿岩    | 47.05            | 12.89                          | 7.86  | 14.84                           | 0.78             | 6.51  | 0.14 | 4.23              | 0.19                          | 2.35             | 5.42                               | 5.01 | 3.26  | 100.11 |                   |
| 320-8    | 辉长辉绿岩    | 46.83            | 15.60                          | 4.78  | 12.50                           | 2.87             | 8.17  | 0.12 | 3.25              | 0.05                          | 0.97             | 1.13                               | 6.12 | 3.90  | 99.22  |                   |
| 320-9    | 辉长辉绿岩    | 43.83            | 15.04                          | 6.40  | 12.42                           | 4.21             | 9.74  | 0.16 | 1.24              | 0.05                          | 0.87             | 0.29                               | 5.45 | 5.67  | 99.64  |                   |
| 280-4    | 辉长辉绿岩    | 44.77            | 14.32                          | 6.43  | 13.76                           | 4.81             | 7.71  | 0.14 | 1.02              | 0.10                          | 1.08             | 0.21                               | 5.83 | 4.27  | 99.55  |                   |
| 340S-5   | 含矿辉长辉绿岩  | 26.32            | 12.96                          | 5.77  | 22.32                           | 0.01             | 17.30 | 0.14 | 0.16              | 0.18                          | 0.91             | 16.00                              | 0.17 | 11.91 | 100.14 | 本次研究              |
| 340S-6   | 含矿辉长辉绿岩  | 33.56            | 1.01                           | 14.25 | 35.97                           | 0.01             | 0.66  | 0.19 | 0.30              | 0.20                          | 1.34             | 30.00                              | 0.31 | 11.79 | 99.33  |                   |
| 340-3    | 含矿辉长辉绿岩  | 44.12            | 10.84                          | 6.29  | 16.46                           | 0.04             | 8.48  | 0.10 | 2.31              | 0.24                          | 0.94             | 57.75                              | 2.35 | 8.96  | 99.80  |                   |
| 560Y-1   | 变钠质凝灰岩   | 21.98            | 3.47                           | 19.50 | 11.07                           | 0.48             | 9.89  | 1.48 | 1.40              | 0.12                          | 0.36             | 2.92                               | 1.88 | 29.66 | 99.43  |                   |
| 640K-2   | 含矿变钠质凝灰岩 | 36.50            | 8.12                           | 9.77  | 16.90                           | 0.12             | 3.81  | 1.20 | 3.17              | 0.43                          | 1.77             | 26.42                              | 3.29 | 12.42 | 99.28  |                   |
| 4450-7   | 大理岩      | 21.50            | 2.90                           | 8.60  | 35.90                           | 0.10             | 10.20 | 1.53 | 0.35              | 0.10                          | 0.30             | 3.20                               | 0.50 | 21.68 | 99.74  |                   |
| 4450-2   | 大理岩夹菱铁矿  | 51.69            | 10.16                          | 0.67  | 28.99                           | 2.93             | 1.88  | 2.80 | 0.27              | 0.15                          | 0.71             | 0.09                               | 3.20 | 3.57  | 100.38 |                   |
| 4450-4   | 石榴黑云母岩   | 41.30            | 13.60                          | 2.18  | 22.20                           | 3.49             | 3.58  | 0.24 | 4.02              | 0.36                          | 1.72             | 1.15                               | 7.51 | 3.89  | 101.15 |                   |
| 4450-5   | 含矿片岩夹凝灰岩 | 44.89            | 12.04                          | 3.80  | 18.23                           | 2.49             | 4.33  | 0.39 | 3.78              | 0.27                          | 2.73             | 1.52                               | 6.27 | 6.32  | 100.08 |                   |
| 4450-6   | 含矿石榴黑云片岩 | 18.35            | 2.18                           | 5.56  | 54.50                           | 0.08             | 5.04  | 0.38 | 0.11              | 0.14                          | 0.24             | 1.38                               | 0.19 | 6.00  | 101.79 |                   |
| DhsYS-2  | 变钠质熔岩    | 44.30            | 13.20                          | 7.09  | 11.14                           | 0.75             | 5.23  | 0.19 | 6.64              | 0.29                          | 1.23             | 8.85                               | 7.39 | 1.23  | 90.06  |                   |
| DhsYS-3  | 变钠质熔岩    | 42.30            | 12.55                          | 6.42  | 14.37                           | 1.39             | 5.46  | 0.16 | 6.08              | 0.25                          | 1.60             | 4.37                               | 7.47 | 1.60  | 90.58  |                   |
| DhsYS-6  | 变钠质熔岩    | 51.30            | 16.75                          | 1.68  | 17.80                           | 4.80             | 0.45  | 0.01 | 1.45              | 1.26                          | 2.21             | 0.30                               | 6.25 | 2.21  | 97.71  | 戚金栋, 2016         |
| DhsYS-9  | 变钠质熔岩    | 36.00            | 10.80                          | 5.95  | 26.70                           | 0.97             | 3.86  | 0.10 | 5.11              | 0.18                          | 1.96             | 5.27                               | 6.08 | 1.96  | 91.63  |                   |
| DhsYS-7  | 变钠质熔岩    | 52.00            | 11.85                          | 6.50  | 11.49                           | 2.43             | 1.67  | 0.81 | 2.81              | 0.46                          | 1.56             | 1.16                               | 5.24 | 1.56  | 91.58  |                   |
| DhsYS-13 | 变钠质熔岩    | 46.60            | 10.20                          | 6.72  | 15.72                           | 0.24             | 3.97  | 0.23 | 4.09              | 0.21                          | 1.34             | 17.04                              | 4.33 | 1.34  | 89.32  |                   |

续表 1  
Continued Table 1

| 样品编号     | 岩性        | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | TiFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO  | MnO  | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O | ALK   | 烧失量   | 总量     | 资料来源       |
|----------|-----------|------------------|--------------------------------|------|----------------------------------|------------------|------|------|-------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------------|-------|-------|--------|------------|
| DhsYS-12 | 变钠质熔岩     | 59.00            | 15.65                          | 2.34 | 8.26                             | 0.80             | 0.72 | 0.04 | 7.13              | 0.21                          | 2.52             | 8.91                               | 7.93  | 2.52  | 96.67  |            |
| DhsYS-10 | 变钠质熔岩     | 44.30            | 12.80                          | 8.43 | 17.74                            | 1.40             | 7.01 | 0.11 | 3.99              | 0.29                          | 0.70             | 2.85                               | 5.39  | 0.70  | 96.77  |            |
| DhsYS-11 | 变钠质熔岩     | 49.10            | 13.20                          | 5.12 | 14.31                            | 0.20             | 2.77 | 0.17 | 7.32              | 0.18                          | 1.72             | 36.60                              | 7.52  | 1.72  | 94.09  | 戚金栋, 2016  |
| DhsYS-14 | 变钠质熔岩     | 42.90            | 12.50                          | 7.83 | 11.39                            | 0.48             | 5.22 | 0.18 | 6.69              | 0.19                          | 1.51             | 13.94                              | 7.17  | 1.51  | 88.89  |            |
| DhsYS-5  | 变钠质凝灰岩    | 43.80            | 17.50                          | 0.65 | 24.69                            | 2.65             | 0.54 | 0.01 | 5.34              | 0.32                          | 2.01             | 2.02                               | 7.99  | 1.87  | 97.51  |            |
| DhsYS-8  | 变钠质凝灰岩    | 44.70            | 18.60                          | 0.73 | 22.71                            | 4.09             | 0.54 | 0.01 | 4.01              | 0.30                          | 2.30             | 0.98                               | 8.10  | 2.01  | 97.99  |            |
| DFe1404  | 变钠质熔岩     | 51.90            | 9.41                           | 6.51 | 9.95                             | 0.03             | 2.86 | 0.20 | 5.36              | 0.32                          | 1.84             | 14.94                              | 5.39  | 10.95 | 99.42  |            |
| DFe1417  | 变钠质熔岩     | 57.60            | 12.25                          | 3.63 | 10.21                            | 0.04             | 0.76 | 0.13 | 6.67              | 0.28                          | 1.30             | 15.94                              | 9.17  | 6.58  | 99.67  |            |
| DFe1431  | 变钠质熔岩     | 54.70            | 15.10                          | 4.71 | 6.88                             | 0.04             | 2.51 | 0.07 | 8.31              | 0.06                          | 1.38             | 16.94                              | 10.17 | 5.94  | 99.82  |            |
| DFe1462  | 角闪变钠质熔岩   | 53.70            | 14.90                          | 3.99 | 13.33                            | 0.37             | 2.41 | 0.06 | 7.72              | 0.33                          | 1.37             | 17.94                              | 11.17 | 1.01  | 99.65  |            |
| DFe1406  | 辉长岩       | 48.90            | 14.05                          | 6.26 | 13.35                            | 0.65             | 6.14 | 0.10 | 5.75              | 0.11                          | 2.26             | 1.21                               | 6.83  | 1.73  | 99.82  | 冯裕昌, 2015  |
| DFe1408  | 辉长辉绿岩     | 48.20            | 12.15                          | 4.76 | 15.12                            | 1.54             | 7.92 | 0.15 | 1.82              | 0.23                          | 1.50             | 2.21                               | 7.83  | 6.00  | 99.62  |            |
| DFe1423  | 辉长岩       | 45.30            | 14.60                          | 1.76 | 20.00                            | 0.58             | 5.87 | 0.19 | 4.43              | 0.23                          | 1.88             | 3.21                               | 8.83  | 4.74  | 99.79  |            |
| DFe1433  | 辉长辉绿岩     | 48.40            | 13.80                          | 7.21 | 13.47                            | 1.46             | 6.67 | 0.05 | 4.64              | 0.13                          | 1.84             | 4.21                               | 9.83  | 1.56  | 100.13 |            |
| DFe1453  | 辉绿岩       | 46.30            | 13.80                          | 8.22 | 14.48                            | 1.86             | 6.03 | 0.10 | 4.03              | 0.34                          | 2.43             | 5.21                               | 10.83 | 1.33  | 100.36 |            |
| DFe14100 | 辉长岩       | 43.10            | 13.75                          | 7.87 | 16.26                            | 1.36             | 3.27 | 0.43 | 4.56              | 0.22                          | 2.12             | 6.21                               | 11.83 | 6.37  | 100.13 |            |
| DH-1     | 变钠质凝灰岩    | 61.04            | 17.76                          | 5.09 | 3.43                             | 0.47             | 1.83 | 0.19 | 8.52              | 0.44                          | 1.01             | 18.13                              | 8.99  |       | 99.78  |            |
| DH-4     | 变钠质凝灰岩    | 51.72            | 15.23                          | 1.14 | 2.16                             | 0.14             | 0.43 | 0.07 | 8.42              | 0.10                          | 0.32             | 60.14                              | 8.56  |       | 99.74  |            |
| DH-7     | 变钠质凝灰岩    | 44.85            | 15.57                          | 5.09 | 23.45                            | 0.31             | 4.62 | 0.51 | 3.49              | 0.18                          | 1.52             | 11.26                              | 3.80  |       | 99.59  |            |
| DH-2     | 石英钠长斑岩    | 64.81            | 16.47                          | 4.25 | 2.32                             | 0.09             | 1.47 | 0.17 | 8.98              | 0.42                          | 0.78             | 99.78                              | 9.07  |       | 99.74  | 张欢, 2013   |
| DH-3     | 石英钠长斑岩    | 64.72            | 14.39                          | 3.07 | 6.32                             | 0.84             | 5.35 | 0.38 | 2.72              | 0.24                          | 1.61             | 3.24                               | 3.56  |       | 99.65  |            |
| DH-5     | 石英钠长斑岩    | 76.42            | 13.86                          | 0.18 | 1.11                             | 0.15             | 0.28 | 0.01 | 7.69              | 0.03                          | 0.12             | 51.27                              | 7.84  |       | 99.84  |            |
| DH-6     | 石英钠长斑岩    | 76.99            | 13.78                          | 0.18 | 0.68                             | 0.15             | 0.06 | 0.01 | 8.08              | 0.02                          | 0.12             | 53.87                              | 8.23  |       | 100.00 |            |
| DG-3     | 石英钠长斑岩    | 68.55            | 13.87                          | 1.80 | 0.51                             | 0.08             | 0.69 | 0.09 | 7.39              | 0.03                          | 0.33             | 92.38                              | 7.47  |       | 94.48  | 钱锦和等, 1990 |
| DL-1     | 钠长黑云母片岩   | 41.24            | 13.40                          | 2.30 | 26.41                            | 4.79             | 2.58 | 0.44 | 1.23              | 0.24                          | 1.68             | 0.26                               | 6.02  |       | 94.18  |            |
| DL-5     | 石榴钠长黑云母片岩 | 40.75            | 15.30                          | 1.74 | 29.86                            | 2.76             | 3.24 | 0.41 | 2.63              | 0.25                          | 2.51             | 0.95                               | 5.39  |       | 97.05  | 廖声林, 2009  |
| DL-6     | 石榴黑云片岩    | 41.23            | 13.80                          | 2.46 | 31.96                            | 0.88             | 2.87 | 1.40 | 0.15              | 0.51                          | 2.98             | 0.17                               | 1.03  |       | 95.34  |            |
| DL-7     | 石榴黑云片岩    | 34.29            | 7.20                           | 4.16 | 37.49                            | 0.56             | 4.84 | 1.60 | 0.17              | 0.38                          | 0.80             | 0.30                               | 0.73  |       | 88.90  |            |

山岩具有富钠、贫钾、低钛、铁含量高、硅含量变化大等特征。

在 Harker 图解中(图 5),大红山地区火成岩中  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量总体与  $\text{SiO}_2$  呈正相关,  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$  与  $\text{SiO}_2$  呈明显负相关关系。随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加,变钠质熔岩和变钠质凝灰岩  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$  具有明显的增高趋势,  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$  呈下降趋势,  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  与  $\text{SiO}_2$  相关性变化较大;

辉长辉绿岩中  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$  相对增加,  $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$  呈下降趋势;石英钠长斑岩中除  $\text{Na}_2\text{O}$  增加外,其余主量元素呈现出明显的下降趋势。变钠质熔岩、变钠质凝灰岩与辉长辉绿岩主量元素变化特征具有相似性,表明它们可能具有同源性,或者变质火山岩受到了辉长辉绿岩侵入的影响。含矿火山岩富钠贫钾的特征暗示大规模的钠化作用可能与铁成矿密切相关(冯裕昌, 2015)。

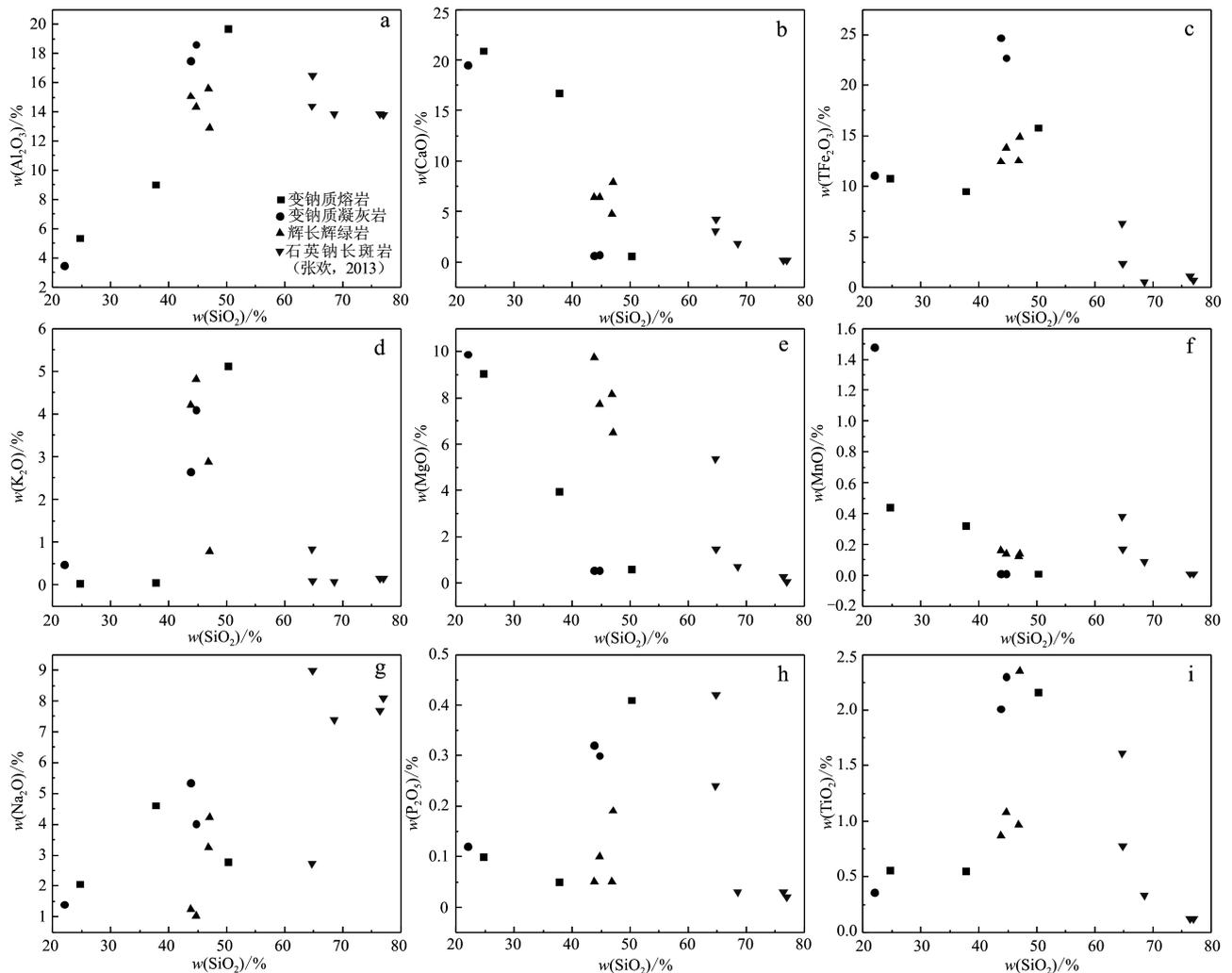


图 5 大红山铁铜矿床含矿岩系 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams for the ore-bearing rocks in the Dahongshan iron-copper deposit

在  $(\text{al}+\text{fm})-(\text{c}+\text{alk})-\text{Si}$  图解(图 6a)中可见,变钠质熔岩投点集中于火山岩附近,少部分落于厚层泥岩和钙质沉积岩范围,显示正变质岩特征;变钠质凝灰岩落于厚层泥岩及钙质沉积岩附近,表明其形成时混入了较多沉积组分;云母片岩投点均落入泥质沉积岩范围,显示出副变质岩特征。表 1 中可见,

该地区含矿火成岩系全碱(ALK)含量范围为 0.17%~11.83%,平均 7.08%,其中变钠质熔岩、变钠质凝灰岩、辉长辉绿岩和石英钠长斑岩平均值分别为 6.79%、6.55%、7.84%和 7.18%,显示出明显的富碱特征,显著高于矿石(0.22%~3.29%)及蚀变的含矿辉长辉绿岩(0.17%~2.35%)。在 TAS 分类图解(图

6b)中,变钠质熔岩投点集中于碱玄岩、玄武岩质粗面安山岩和粗面玄武岩范围,少部分落于副长火山岩附近,且多数都位于碱性系列范围;变钠质凝灰岩分布相对零散,落于碱玄岩、粗面岩、玄武岩及玄武

岩质粗面安山岩附近,且位于碱性系列范围;辉长辉绿岩则集中于碱玄岩和粗面玄武岩区域,并位于碱性系列;石英钠长斑岩投点分散于粗面安山岩、流纹岩和英安岩区域,且多数位于亚碱性系列范围。

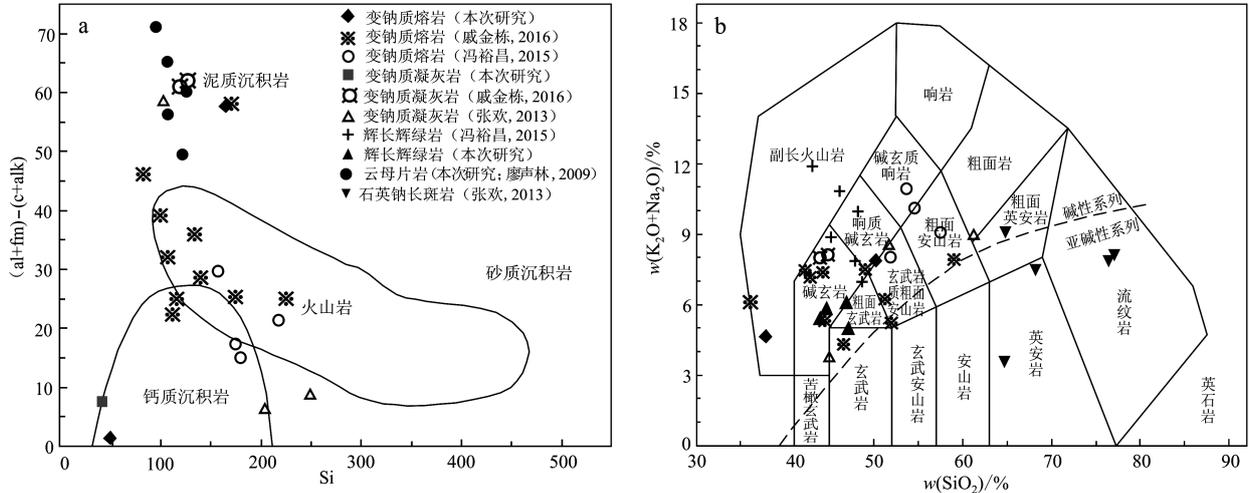


图6 大红山铁铜矿床含矿岩系 (al+fm)-(c+alk)-Si 图解(a, 底图据 Simonen, 1953) 和 TAS 图解(b, 底图据 Middlemost, 1994)

Fig. 6 (al+fm)-(c+alk)-Si diagram (a, after Simonen, 1953) and TAS diagram (b, after Middlemost, 1994) for the ore-bearing rocks

#### 4.2 微量元素

含矿岩系微量元素分析结果见表2。从中可见,与地壳元素丰度相比,含矿岩系总体富集 Co、Mn、Nd、Rb、Th、U、V、Y, 相对亏损 Ba、Ti、Zr、Hf、Sr 等元素。

在微量元素原始地幔标准化图解(图7)中可见,变钠质熔岩相对富集 Nd 和高场强元素 Th、Zr、Hf、Nb, 亏损 Ti 和大离子亲石元素 Ba、Sr(图7a);变钠质凝灰岩富集 La、Ce、Nd、Sm 和高场强元素 Th, 亏损 Ti 和大离子亲石元素 Ba、Sr(图7b), 且与不含矿样品 560Y-1 相比,含矿变钠质凝灰岩样品 640K-2、640K-3 的微量元素 Ba、Ce、Co、La、Nd、Nb、Ni、Sm、V、Y、Zr 含量较高,微量元素标准化蜘蛛网图变化趋势与前者一致。辉长辉绿岩相对富集元素 Sm、Nd、La、Ce, 亏损 Ti 和大离子亲石元素 Rb、Sr(图7c), 此外,样品 320-6、320-8、320-9、280-4 中 Ba 相对富集, Th 相对亏损,而样品 3405-5、3405-6、340-3 中 Th 相对亏损, Ba 相对富集。云母片岩富集元素 La、Ce、Sm 和 Nd, 亏损 Ti、高场强元素 Nb 和大离子亲石元素 Sr(图7d), 样品 4450-4 中 Rb、Ba、Th 相对富集, 而样品 4450-6 中 Rb、Ba、Th 相对亏损。大理岩类岩石富集 Nd、Sm、La、Ce 和大离子亲石元素 Rb, 强烈

亏损 Ti 和大离子亲石元素 Ba、Sr(图7e)。两件炭质板岩样品的微量元素含量差别较大,但都富集 La、Ce、Sm、Nd 和高场强元素 Th, 强烈亏损 Ti、大离子亲石元素 Sr、Ba 和高场强元素 Nb(图7f)。

#### 4.3 稀土元素

大红山铁铜矿床的稀土元素测试结果及球粒陨石标准化配分模式图见表3和图8, 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图除矿化炭质板岩样品 640K-1 外,所有样品均显示出 LREE 相对富集右倾型的配分形式。

变钠质熔岩为红山组一段( $Pt_1dh^1$ ) II<sub>1</sub> 号铁矿体的赋矿围岩,其  $\Sigma REE$  为  $25.90 \times 10^{-6} \sim 106.05 \times 10^{-6}$ , 平均值  $56.75 \times 10^{-6}$ ; LREE/HREE 值为 1.84~6.89,  $(La/Yb)_N$  值为 1.20~7.27, 相对较富集轻稀土元素特征(图8a);  $(La/Sm)_N$  值为 1.05~4.29,  $(Gd/Lu)_N$  值为 0.76~1.19, 显示出一定的轻稀土元素分馏,且表现出较强的 Eu 正异常 ( $\delta Eu = 1.34 \sim 3.59$ , 平均 2.04), 无明显 Ce 异常 ( $\delta Ce = 0.88 \sim 1.04$ , 平均值 0.94)。

变钠质凝灰岩为曼岗河组三段( $(Pt_1dm^3)$ ) I 号铜矿带的赋矿围岩,其  $\Sigma REE$  为  $43.59 \times 10^{-6} \sim 313.41 \times 10^{-6}$ , 平均值  $222.28 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 值

表 2 大红山铁铜矿床矿石、岩石微量元素组成  
Table 2 Composition of trace elements from ore and rock in the Dahongshan iron-copper deposit

$w_B/10^{-6}$

| 样品编号    | 岩性        | Ba      | Ce     | Co     | Cr     | Hf   | La     | Lu   | Mn       | Nb    | Nd    | Ni     | Rb     | Sm    | Sr     | Ta   | Th      | Ti       | U     | V      | Y     | Yb    | Zr     | Ho   | Nb/La | Y/Ho  | Zr/Hf | Nb/Ta | 资料来源                    |
|---------|-----------|---------|--------|--------|--------|------|--------|------|----------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|---------|----------|-------|--------|-------|-------|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| 4450-1  | 含矿片岩夹凝灰岩  | 3.00    | 35.00  | 79.00  | 5.00   | 0.50 | 16.90  | 0.38 | 4777.00  | 1.20  | 16.20 | 86.10  | 0.00   | 3.53  | 2.10   | 0.20 | 4.80    | 140.00   | 0.60  | 187.00 | 24.20 | 2.08  | 16.00  | 0.85 | 0.07  | 28.47 | 32.00 | 6.00  | 资料来源                    |
| 4450-4  | 石榴黑云片岩    | 776.00  | 97.90  | 184.50 | 69.00  | 3.10 | 52.20  | 0.59 | 1640.00  | 15.40 | 46.50 | 110.00 | 84.00  | 10.25 | 8.90   | 0.90 | 1.54    | 8860.00  | 1.29  | 521.00 | 41.20 | 3.83  | 129.00 | 1.56 | 0.30  | 26.41 | 41.61 | 17.11 |                         |
| 4450-5  | 含矿片岩夹凝灰岩  | 384.00  | 69.80  | 116.50 | 8.00   | 3.90 | 34.10  | 0.59 | 2540.00  | 15.70 | 39.50 | 42.20  | 54.90  | 9.27  | 11.50  | 1.00 | 0.55    | 14150.00 | 0.91  | 706.00 | 37.10 | 3.56  | 160.00 | 1.49 | 0.46  | 24.90 | 41.03 | 15.70 |                         |
| 4450-6  | 含矿石榴黑云片岩  | 16.00   | 33.10  | 203.00 | 12.00  | 0.80 | 27.90  | 0.22 | 2420.00  | 2.10  | 9.10  | 64.40  | 6.00   | 1.78  | 46.30  | 0.10 | 0.79    | 1260.00  | 2.86  | 96.00  | 12.30 | 1.25  | 37.00  | 0.46 | 0.08  | 26.74 | 46.25 | 21.00 |                         |
| 4450-2  | 大理岩夹菱铁矿   | 315.00  | 113.00 | 89.60  | 94.00  | 4.90 | 68.10  | 0.46 | 20600.00 | 12.70 | 42.30 | 41.00  | 67.40  | 7.77  | 5.20   | 1.00 | 12.20   | 3980.00  | 5.30  | 117.00 | 25.60 | 2.61  | 196.00 | 0.97 | 0.19  | 26.39 | 40.00 | 12.70 |                         |
| 640K-1  | 炭质板岩      | 90.70   | 274.00 | 598.00 | 93.00  | 5.30 | 162.00 | 0.22 | 5000.00  | 18.30 | 99.60 | 184.50 | 156.50 | 17.15 | 6.40   | 1.10 | 63.90   | 3820.00  | 14.75 | 444.00 | 15.80 | 1.42  | 210.00 | 0.70 | 0.11  | 22.57 | 39.62 | 16.64 | 本次研究                    |
| 640Y-1  | 炭质板岩      | 169.00  | 6.00   | 126.00 | 41.00  | 2.70 | 2.80   | 0.24 | 12450.00 | 8.30  | 3.60  | 36.00  | 26.20  | 1.44  | 33.40  | 0.60 | 6.80    | 1750.00  | 6.20  | 69.00  | 17.40 | 1.65  | 110.00 | 0.68 | 2.96  | 25.59 | 40.74 | 13.83 |                         |
| 640K-2  | 含矿变质凝灰岩   | 48.60   | 115.50 | 137.50 | 14.00  | 5.30 | 61.80  | 1.49 | 8510.00  | 17.20 | 52.10 | 416.00 | 2.70   | 11.45 | 56.40  | 1.10 | 4.02    | 10100.00 | 1.46  | 389.00 | 92.20 | 9.57  | 230.00 | 3.29 | 0.28  | 28.02 | 43.40 | 15.64 |                         |
| 640K-3  | 含矿变质凝灰岩   | 718.00  | 121.50 | 125.00 | 22.00  | 3.20 | 57.40  | 0.52 | 4150.00  | 14.80 | 65.40 | 143.00 | 65.10  | 15.40 | 11.80  | 0.80 | 1.49    | 10000.00 | 0.97  | 408.00 | 35.90 | 3.29  | 130.00 | 1.39 | 0.26  | 25.83 | 40.63 | 18.50 |                         |
| 560Y-1  | 变质凝灰岩     | 23.00   | 13.30  | 28.80  | 25.00  | 1.60 | 6.40   | 0.27 | 9870.00  | 4.20  | 7.50  | 19.90  | 22.20  | 2.03  | 26.50  | 0.30 | 2.42    | 18000.00 | 0.76  | 51.00  | 18.20 | 1.68  | 63.00  | 0.63 | 0.66  | 28.89 | 39.38 | 14.00 |                         |
| 3405-2  | 变质的熔岩     | 5.00    | 41.80  | 12.30  | 22.00  | 3.30 | 23.60  | 0.38 | 924.00   | 22.40 | 17.40 | 21.30  | 1.50   | 3.46  | 41.70  | 1.20 | 1.52    | 1520.00  | 1.85  | 165.00 | 19.00 | 2.33  | 149.00 | 0.68 | 0.95  | 27.94 | 45.15 | 18.67 |                         |
| 340Y-2  | 变质的熔岩     | 1835.00 | 6.90   | 4.20   | 104.00 | 3.30 | 4.00   | 0.24 | 35.00    | 15.80 | 3.40  | 13.00  | 156.00 | 1.16  | 7.10   | 0.90 | 0.92    | 5120.00  | 2.06  | 630.00 | 12.40 | 1.45  | 138.00 | 0.46 | 3.95  | 26.96 | 41.82 | 17.56 |                         |
| 320-5   | 变质的熔岩     | 13.10   | 15.30  | 17.00  | 28.00  | 2.20 | 5.90   | 0.57 | 3180.00  | 8.70  | 10.30 | 20.70  | 3.50   | 3.55  | 100.50 | 0.24 | 0.48    | 2160.00  | 0.34  | 104.00 | 29.10 | 3.52  | 90.00  | 1.29 | 1.47  | 22.56 | 40.91 | 36.25 |                         |
| 280-5   | 变质的熔岩     | 19.00   | 11.40  | 14.40  | 58.00  | 2.00 | 6.40   | 0.29 | 2340.00  | 12.80 | 5.30  | 21.80  | 2.80   | 1.42  | 84.20  | 0.67 | 0.52    | 1700.00  | 0.80  | 103.00 | 11.60 | 1.69  | 79.00  | 0.47 | 2.00  | 24.68 | 39.50 | 19.10 |                         |
| 3405-5  | 含矿辉长辉绿岩   | 12.60   | 10.40  | 72.60  | 113.00 | 3.70 | 4.90   | 0.25 | 839.00   | 14.10 | 6.50  | 105.00 | 3.00   | 2.05  | 28.50  | 1.10 | 19.70   | 2340.00  | 2.55  | 294.00 | 14.70 | 1.51  | 149.00 | 0.56 | 2.88  | 26.25 | 40.27 | 12.82 |                         |
| 3405-6  | 含矿辉长辉绿岩   | 10.60   | 34.50  | 14.10  | 15.00  | 3.70 | 20.90  | 0.29 | 1170.00  | 22.20 | 14.20 | 24.50  | 0.40   | 3.65  | 52.10  | 1.30 | 1.42    | 4860.00  | 1.14  | 141.00 | 21.90 | 2.05  | 162.00 | 0.79 | 1.06  | 27.72 | 43.78 | 17.08 |                         |
| 340-3   | 辉长辉绿岩     | 14.20   | 114.50 | 76.40  | 87.00  | 2.80 | 61.30  | 0.45 | 653.00   | 12.30 | 49.70 | 58.60  | 2.90   | 9.08  | 21.50  | 0.80 | 5.50    | 3520.00  | 1.51  | 283.00 | 35.90 | 2.87  | 115.00 | 1.35 | 0.20  | 26.59 | 41.07 | 15.38 | 杨光树等, 2020              |
| 320-6   | 辉长辉绿岩     | 360.00  | 37.30  | 44.20  | 52.00  | 3.30 | 15.90  | 0.50 | 990.00   | 12.20 | 23.60 | 61.40  | 15.70  | 6.07  | 48.70  | 0.80 | 1.39    | 13400.00 | 0.36  | 539.00 | 32.60 | 3.25  | 128.00 | 1.27 | 0.77  | 25.67 | 38.79 | 15.25 |                         |
| 320-8   | 辉长辉绿岩     | 4980.00 | 11.40  | 38.60  | 110.00 | 1.50 | 4.80   | 0.23 | 893.00   | 4.90  | 7.30  | 79.10  | 90.70  | 2.22  | 118.50 | 0.25 | 0.35    | 4640.00  | 0.15  | 253.00 | 16.90 | 1.60  | 55.00  | 0.60 | 1.02  | 28.17 | 36.67 | 19.60 |                         |
| 320-9   | 辉长辉绿岩     | 2550.00 | 12.30  | 40.90  | 110.00 | 1.20 | 4.50   | 0.24 | 1140.00  | 4.20  | 7.40  | 126.00 | 224.00 | 2.17  | 152.50 | 0.23 | 0.27    | 4290.00  | 0.05  | 283.00 | 15.20 | 1.61  | 47.00  | 0.58 | 0.93  | 26.21 | 39.17 | 18.26 |                         |
| 280-4   | 辉长辉绿岩     | 956.00  | 13.10  | 52.30  | 150.00 | 1.40 | 5.40   | 0.29 | 1020.00  | 5.00  | 8.40  | 109.00 | 335.00 | 2.53  | 61.60  | 0.29 | 0.23    | 5480.00  | 0.41  | 396.00 | 17.00 | 1.88  | 55.00  | 0.67 | 0.93  | 25.37 | 39.29 | 17.24 |                         |
| 4450-7  | 大理岩       | 13.80   | 13.80  | 95.70  | 22.00  | 1.20 | 9.40   | 0.17 | 9910.00  | 3.30  | 5.40  | 23.20  | 9.30   | 1.36  | 23.40  | 0.20 | 1.61    | 1790.00  | 1.81  | 83.00  | 11.60 | 1.09  | 51.00  | 0.44 | 0.35  | 26.36 | 42.50 | 16.50 |                         |
| 320-4   | 大理岩       | 207.00  | 21.20  | 22.20  | 27.00  | 2.50 | 9.50   | 0.32 | 1150.00  | 8.60  | 11.10 | 15.90  | 31.70  | 2.98  | 80.10  | 0.49 | 2.16    | 3770.00  | 1.06  | 102.00 | 14.50 | 2.12  | 111.00 | 0.79 | 0.91  | 18.35 | 44.40 | 17.55 |                         |
| DhsYS-5 | 变质凝灰岩     | 820.00  | 15.10  | 6.70   | 40.00  | 3.70 | 8.40   | 0.25 |          | 17.70 | 6.60  | 12.20  | 76.00  | 1.97  | 18.10  | 1.10 | 0.90    | 6633.00  | 4.10  | 313.00 | 13.70 | 1.84  | 142.00 | 0.67 | 1.91  | 20.45 | 38.38 | 16.09 | 戴金栋, 2016               |
| DhsYS-8 | 变质凝灰岩     | 1800.00 | 5.30   | 15.40  | 100.00 | 3.60 | 3.10   | 0.34 |          | 14.90 | 2.40  | 12.90  | 114.00 | 0.86  | 12.30  | 1.00 | 0.80    | 7590.00  | 10.30 | 391.00 | 12.70 | 2.18  | 135.00 | 0.60 | 2.91  | 21.17 | 37.50 | 14.90 |                         |
|         | 地壳元素丰度    | 250.00  | 61.70  | 29.00  | 185.00 | 3.00 | 28.70  | 0.82 | 1400.00  | 11.00 | 0.30  | 105.00 | 32.00  | 6.90  | 260.00 | 1.00 | 3.50    | 5400.00  | 1.00  | 230.00 | 0.30  | 2.57  | 100.00 |      |       |       |       |       | 黎彤, 1994                |
|         | 原始地幔值(PM) | 6.99    | 1.78   |        | 0.31   | 0.69 | 0.07   |      |          | 1.35  |       | 0.64   | 0.44   | 21.10 | 0.04   | 0.09 | 1300.00 | 0.02     |       | 4.55   | 0.49  | 11.20 |        |      |       |       |       |       | Sun and McDonough, 1989 |

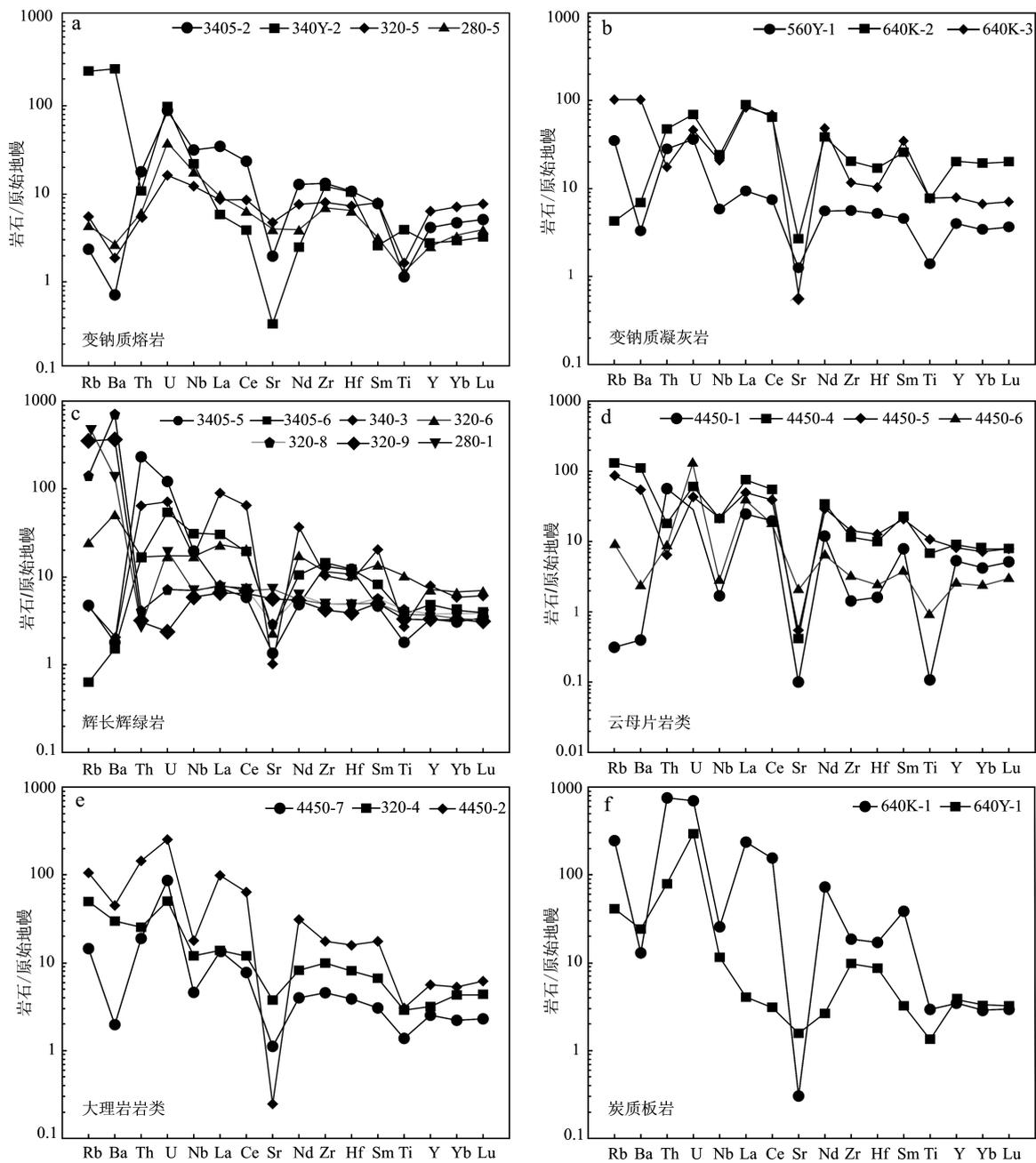


图7 大红山群含矿岩系微量元素原始地幔标准化图解(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Primitive-mantle-normalized multi-element patterns for ore-bearing rocks of the Dahongshan iron-copper deposit (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

为 2.88 ~ 9.43,  $(La/Yb)_N$  值为 2.73 ~ 12.51,  $(La/Sm)_N$  值为 1.98 ~ 3.40,  $(Gd/Lu)_N$  值为 1.11 ~ 2.85; Eu 总体表现出弱正异常特征 ( $\delta Eu = 0.91 \sim 1.71$ , 平均 1.25), 无明显 Ce 异常 ( $\delta Ce = 0.93 \sim 0.98$ , 平均值 0.95)。其中, 矿化样品 640K-2、640K-3 较 560Y-1 更富集轻稀土元素, 与前人获得的主要矿石稀土元素配分特征类似(图 8b)。

辉长辉绿岩  $\Sigma REE$  变化较大, 范围为  $36.46 \times 10^{-6} \sim 274.55 \times 10^{-6}$ , 平均值  $91.04 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 值为 2.59 ~ 10.58,  $(La/Yb)_N$  值为 2.00 ~ 15.32, 相对富集轻稀土元素, 尤其是含矿样品 340-3 轻稀土元素较富集;  $(La/Sm)_N$  值为 1.30 ~ 4.25,  $(Gd/Lu)_N$  值为 1.25 ~ 2.16, 显示出一定的轻重稀土元素分馏(图 8c)。不含矿样品 Eu 异常不明显 ( $\delta Eu =$

表 3 大红山铁铜矿床含矿岩系稀土元素组成  
Table 3 Composition of rare earth elements in ore-bearing rocks of the Dahongshan iron-copper deposit

| 样品号    | 样品名      | $w_B/10^{-6}$ |        |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |      |      | 资料来源  |        |              |       |       |           |                      |                      |             |             |            |
|--------|----------|---------------|--------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|--------|--------------|-------|-------|-----------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|------------|
|        |          | La            | Ce     | Pr    | Nd    | Sm    | Eu   | Gd    | Tb   | Dy    | Ho   | Er    | Tm   | Yb   | Lu   |       | Y      | $\Sigma$ REE | LREE  | HREE  | LREE/HREE | (La/Sm) <sub>N</sub> | (Gd/Lu) <sub>N</sub> | $\delta$ Eu | $\delta$ Ce |            |
| 560Y-1 | 变钠质凝灰岩   | 6.40          | 13.30  | 1.80  | 7.50  | 2.03  | 1.33 | 2.78  | 0.47 | 3.20  | 0.63 | 1.90  | 0.27 | 1.68 | 0.27 | 18.20 | 43.59  | 32.36        | 11.23 | 2.88  | 2.73      | 1.98                 | 1.32                 | 1.71        | 0.95        |            |
| 640K-2 | 含矿变钠质凝灰岩 | 61.80         | 115.50 | 13.60 | 52.10 | 11.45 | 3.64 | 12.85 | 2.11 | 14.40 | 3.29 | 10.20 | 1.53 | 9.57 | 1.49 | 92.20 | 313.41 | 258.07       | 55.34 | 4.66  | 4.63      | 3.40                 | 1.11                 | 0.91        | 0.93        |            |
| 640K-3 | 含矿变钠质凝灰岩 | 57.40         | 121.50 | 15.30 | 65.40 | 15.40 | 5.13 | 11.55 | 1.42 | 7.00  | 1.39 | 4.00  | 0.55 | 3.29 | 0.52 | 35.90 | 309.83 | 280.13       | 29.70 | 9.43  | 12.51     | 2.34                 | 2.85                 | 1.13        | 0.98        |            |
| 4450-4 | 石榴黑云母片岩  | 52.20         | 97.90  | 11.60 | 46.50 | 10.25 | 2.23 | 9.41  | 1.37 | 8.00  | 1.56 | 4.60  | 0.63 | 3.83 | 0.59 | 41.20 | 250.59 | 220.63       | 29.96 | 7.36  | 9.78      | 3.20                 | 2.04                 | 0.68        | 0.94        | 本次研究       |
| 4450-6 | 含矿石榴黑云片岩 | 27.90         | 33.10  | 2.80  | 9.10  | 1.78  | 1.18 | 2.04  | 0.32 | 2.00  | 0.46 | 1.30  | 0.19 | 1.25 | 0.22 | 12.30 | 83.70  | 75.88        | 7.82  | 9.70  | 16.01     | 9.86                 | 1.19                 | 1.89        | 0.73        |            |
| 4450-1 | 含矿片岩夹凝灰岩 | 16.90         | 35.00  | 4.10  | 16.20 | 3.53  | 1.27 | 3.91  | 0.69 | 4.30  | 0.85 | 2.40  | 0.33 | 2.08 | 0.38 | 24.20 | 91.92  | 76.99        | 14.93 | 5.16  | 5.83      | 3.01                 | 1.32                 | 1.04        | 1.00        |            |
| 4450-5 | 含矿片岩夹凝灰岩 | 34.10         | 69.80  | 9.00  | 39.50 | 9.27  | 1.82 | 9.14  | 1.25 | 7.30  | 1.49 | 4.30  | 0.58 | 3.56 | 0.59 | 37.10 | 191.64 | 163.44       | 28.20 | 5.80  | 6.87      | 2.31                 | 1.99                 | 0.60        | 0.96        |            |
| 640K-1 | 炭质板岩     | 162.00        | 274.00 | 28.80 | 99.60 | 17.15 | 3.77 | 10.70 | 0.99 | 4.00  | 0.70 | 1.80  | 0.24 | 1.42 | 0.22 | 15.80 | 605.35 | 585.32       | 20.03 | 29.22 | 81.83     | 5.94                 | 6.23                 | 0.79        | 0.91        |            |
| 640Y-1 | 炭质板岩     | 2.80          | 5.50   | 0.70  | 3.60  | 1.44  | 0.96 | 2.59  | 0.47 | 3.40  | 0.68 | 1.90  | 0.27 | 1.65 | 0.24 | 17.40 | 26.17  | 15.00        | 11.17 | 1.34  | 1.22      | 1.22                 | 1.38                 | 1.50        | 0.94        |            |
| 280-5  | 含矿变钠质熔岩  | 6.40          | 11.40  | 1.30  | 5.30  | 1.42  | 0.90 | 1.71  | 0.29 | 2.00  | 0.47 | 1.40  | 0.23 | 1.69 | 0.29 | 11.60 | 34.83  | 26.73        | 8.10  | 3.30  | 2.72      | 2.84                 | 0.76                 | 1.76        | 0.91        |            |
| 3405-2 | 含矿变钠质熔岩  | 23.60         | 41.80  | 4.70  | 17.40 | 3.46  | 1.70 | 3.53  | 0.51 | 3.40  | 0.68 | 2.20  | 0.35 | 2.33 | 0.38 | 19.00 | 106.05 | 92.61        | 13.44 | 6.89  | 7.27      | 4.29                 | 1.19                 | 1.47        | 0.92        |            |
| 320-5  | 含矿变钠质熔岩  | 5.90          | 15.30  | 2.20  | 10.30 | 3.55  | 1.79 | 4.71  | 0.90 | 6.00  | 1.29 | 3.60  | 0.56 | 3.52 | 0.57 | 29.10 | 60.25  | 39.03        | 21.22 | 1.84  | 1.20      | 1.05                 | 1.06                 | 1.34        | 1.04        |            |
| 340Y-2 | 变钠质熔岩    | 4.00          | 6.90   | 0.80  | 3.40  | 1.16  | 1.67 | 1.74  | 0.29 | 2.00  | 0.46 | 1.50  | 0.24 | 1.45 | 0.24 | 12.40 | 25.90  | 17.96        | 7.94  | 2.26  | 1.98      | 2.17                 | 0.93                 | 3.59        | 0.88        |            |
| 280-4  | 含矿辉长辉绿岩  | 5.40          | 13.10  | 1.70  | 8.40  | 2.53  | 0.88 | 2.82  | 0.50 | 3.20  | 0.67 | 1.90  | 0.30 | 1.88 | 0.29 | 17.00 | 43.60  | 32.04        | 11.56 | 2.77  | 2.06      | 1.34                 | 1.25                 | 1.00        | 1.04        |            |
| 3405-5 | 含矿辉长辉绿岩  | 4.90          | 10.40  | 1.40  | 6.50  | 2.05  | 1.07 | 2.87  | 0.46 | 2.70  | 0.56 | 1.60  | 0.25 | 1.51 | 0.25 | 14.70 | 36.46  | 26.31        | 10.15 | 2.59  | 2.33      | 1.50                 | 1.47                 | 1.35        | 0.96        |            |
| 3405-6 | 含矿辉长辉绿岩  | 20.90         | 34.50  | 3.70  | 14.20 | 3.65  | 2.80 | 4.06  | 0.64 | 3.80  | 0.79 | 2.20  | 0.33 | 2.05 | 0.29 | 21.90 | 93.93  | 79.75        | 14.18 | 5.62  | 7.31      | 3.60                 | 1.79                 | 2.21        | 0.89        | 杨光树等, 2020 |
| 340-3  | 含矿辉长辉绿岩  | 61.30         | 114.50 | 13.10 | 49.70 | 9.08  | 3.17 | 7.57  | 1.05 | 6.30  | 1.35 | 3.70  | 0.49 | 2.87 | 0.45 | 35.90 | 274.55 | 250.85       | 23.70 | 10.58 | 15.32     | 4.25                 | 2.16                 | 1.14        | 0.94        |            |
| 320-6  | 辉长辉绿岩    | 15.90         | 37.30  | 5.10  | 23.60 | 6.07  | 1.87 | 6.00  | 0.96 | 6.10  | 1.27 | 3.40  | 0.51 | 3.25 | 0.50 | 32.60 | 111.81 | 89.88        | 21.93 | 4.10  | 3.51      | 1.65                 | 1.54                 | 0.94        | 1.01        |            |
| 320-8  | 辉长辉绿岩    | 4.80          | 11.40  | 1.60  | 7.30  | 2.22  | 0.70 | 2.37  | 0.44 | 2.80  | 0.60 | 1.70  | 0.25 | 1.60 | 0.23 | 16.90 | 37.99  | 28.03        | 9.96  | 2.81  | 2.15      | 1.36                 | 1.32                 | 0.93        | 1.00        |            |
| 320-9  | 含矿辉长辉绿岩  | 4.50          | 12.30  | 1.60  | 7.40  | 2.17  | 0.86 | 2.56  | 0.43 | 2.70  | 0.58 | 1.70  | 0.24 | 1.61 | 0.24 | 15.20 | 38.93  | 28.85        | 10.08 | 2.86  | 2.00      | 1.30                 | 1.37                 | 1.11        | 1.12        |            |
| 320-4  | 含矿黑云母大理岩 | 9.50          | 21.20  | 2.70  | 11.10 | 2.98  | 0.82 | 3.18  | 0.59 | 3.80  | 0.79 | 2.20  | 0.32 | 2.12 | 0.32 | 14.50 | 61.58  | 48.27        | 13.31 | 3.63  | 3.21      | 2.01                 | 1.27                 | 0.81        | 1.02        |            |
| 4450-7 | 大理岩      | 9.40          | 13.80  | 1.40  | 5.40  | 1.36  | 0.65 | 1.85  | 0.30 | 2.10  | 0.44 | 1.20  | 0.17 | 1.09 | 0.17 | 11.60 | 39.37  | 32.03        | 7.34  | 4.36  | 6.19      | 4.35                 | 1.39                 | 1.25        | 0.83        |            |
| 445-2  | 大理岩夹菱铁矿  | 68.10         | 113.00 | 12.00 | 42.30 | 7.77  | 3.34 | 6.26  | 0.76 | 4.60  | 0.97 | 2.90  | 0.43 | 2.61 | 0.46 | 25.60 | 265.42 | 246.51       | 18.91 | 13.04 | 18.72     | 5.51                 | 1.74                 | 1.42        | 0.89        |            |

0.93~0.94),而矿化样品则表现出明显的Eu正异常特征( $\delta\text{Eu}=1.00\sim 2.21$ ,平均值1.45),表明矿化过程中岩石中稀土元素发生了分馏,所有样品都无明显Ce异常( $\delta\text{Ce}=0.89\sim 1.12$ ,平均值0.99)。

产于曼岗河组三段( $\text{Pt}_1\text{dm}^3$ )的云母片岩 $\Sigma\text{REE}$ 为 $83.70\times 10^{-6}\sim 250.59\times 10^{-6}$ ,平均值 $154.46\times 10^{-6}$ 。LREE/HREE值为5.16~9.70,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为9.78~16.01,较富集轻稀土元素特征,尤其是含矿样品4450-6轻稀土元素较富集,  $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为3.20~

9.86,  $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$ 值为1.19~2.04,显示出一定的轻稀土元素分馏(图8d)。Eu异常变化较大( $\delta\text{Eu}=0.68\sim 1.89$ ,平均1.28),无明显Ce异常( $\delta\text{Ce}=0.73\sim 0.94$ ,平均值0.84)。

大理岩 $\Sigma\text{REE}$ 为 $39.37\times 10^{-6}\sim 265.42\times 10^{-6}$ ,平均值 $122.12\times 10^{-6}$ 。LREE/HREE值为3.63~13.04,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为3.21~18.72,  $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为2.01~5.51,  $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$ 值为1.27~1.74,显示出一定的轻稀土元素分馏(图8e)。Eu呈现弱负异常-正异常

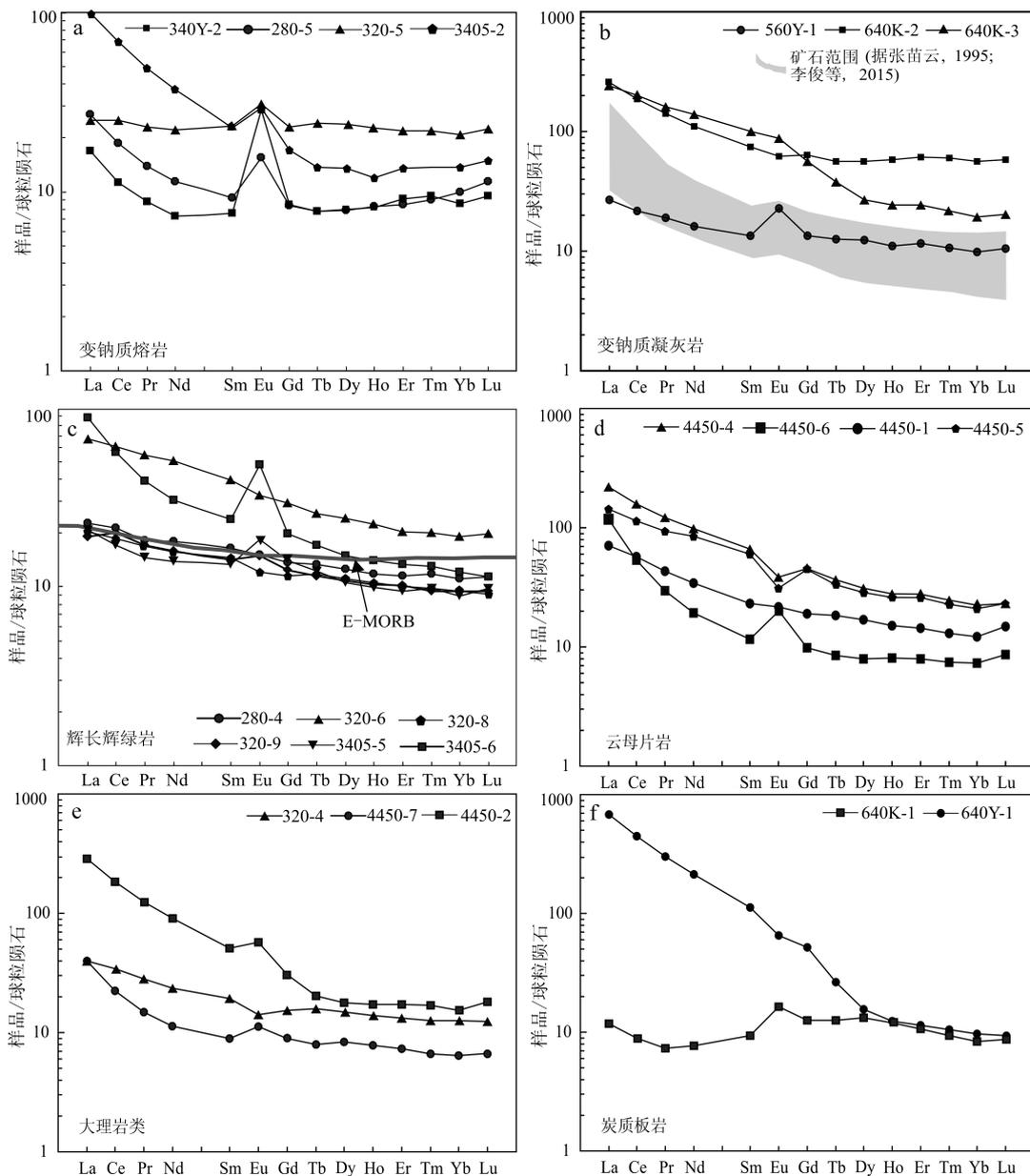


图8 大红山群含矿岩系稀土元素配分图解(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of ore-bearing rocks of Dahongshan Group (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

( $\delta Eu = 0.81 \sim 1.42$ , 平均 1.16), 无明显 Ce 异常 ( $\delta Ce = 0.83 \sim 1.02$ , 平均值 0.91)。

作为 I 号铜矿带底板的曼岗河组三段 ( $Pt_1 dm^3$ ) 炭质板岩样品 640K-1 夹有脉状和不规则状的菱铁矿、磁铁矿、黄铁矿和黄铜矿化, 与不含矿样品 640Y-1 特征有一定差别, 两者稀土元素配分特征也变化较大。两者的稀土元素总量 ( $\sum REE$ ) 分别为  $605.35 \times 10^{-6}$  和  $26.17 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 值为 29.22 和 1.34,  $(La/Yb)_N$  为 81.83 和 1.22,  $(La/Sm)_N$  值为 5.94 和 1.22,  $(Gd/Lu)_N$  值为 6.23 和 1.38。含矿样品显示出明显的右陡倾斜型 LREE 相对富集特征, 而不含矿样品则无明显的轻重稀土元素分馏 (图 8f)。前者具有弱 Eu 负异常 ( $\delta Eu = 0.79$ ), 后者则具有 Eu 正异常 ( $\delta Eu = 1.50$ ), 二者都无明显 Ce 异常 ( $\delta Ce = 0.91 \sim 0.94$ , 平均值 0.92)。

## 5 讨论

### 5.1 原岩恢复与物源分析

前人研究表明, 滇中前寒武纪铁铜矿床的含矿岩系总体经历了绿片岩-低角闪岩相的低-中级变质作用 (冉崇英, 1989; 孙克祥等, 1991; Greentree and Li, 2008; 耿元生等, 2008, 2017; 杨红等, 2014; 方维萱, 2014; 李静等, 2018)。本次研究综合野外产状、岩石组合与接触关系、矿物组合与结构构造等岩相学和地球化学特征, 尝试推断变质岩的原岩类型。

大红山群含矿岩系中, 云母片岩类多呈层状, 且

常与变钠质凝灰岩或黑白云石大理岩相间产出, 构成条纹条带状构造 (图 4g)。在  $(al+fm)-(c+alk)-Si$  图解 (图 6a) 中, 云母片岩投点全部落入泥质沉积岩区域, 表明其原岩可能为钙质泥岩。变钠质熔岩和变钠质凝灰岩的变质程度较低, 还保留有部分原岩特征, 如变余交织结构 (图 4b、4d)、变余杏仁状构造、角砾状构造等, 显示出正变质岩的特征。在图 6a 中, 变钠质熔岩绝大多数投点落入火山岩区域, 少数投点落入钙质沉积岩范围, 靠近火山边界, 表明变钠质熔岩原岩为火山岩, 即细碧角斑岩系, 可能受到了海底热液蚀变作用的影响 (朱炳泉等, 1998)。变钠质凝灰岩投点于火山岩, 表明其原岩为火山岩, 部分落入泥质沉积岩和钙质沉积岩区域, 结合其常与大理岩和片岩伴生的产出特征, 判断其主要形成于半深海相环境, 且化学组成可能受到了海底沉积作用的影响而表现出变质沉积岩的特点。

大离子亲石元素 (LILE) 和低场强元素 (LFSE) 在变质作用过程中较易迁移, 而高场强元素 (HFSE)、重稀土元素 (HREE) 以及过渡族元素 (Cr、Ni、V) 等在变质过程中属于不活动组分、不易发生迁移, 根据这类元素的相关图解对于原岩恢复和判别原岩构造环境效果更为良好 (Pearce, 1975; Wood *et al.*, 1979; Polat *et al.*, 2002; Polat and Hofmann, 2003)。为更好理解大红山与区域上相似矿床含矿岩系的形成环境, 本文选取了会理拉拉和金平龙脖河矿床变质火山岩系进行对比。在  $(La/Yb)_N - \sum REE$  图解 (图 9a) 中, 大红山地区云母片岩和大理

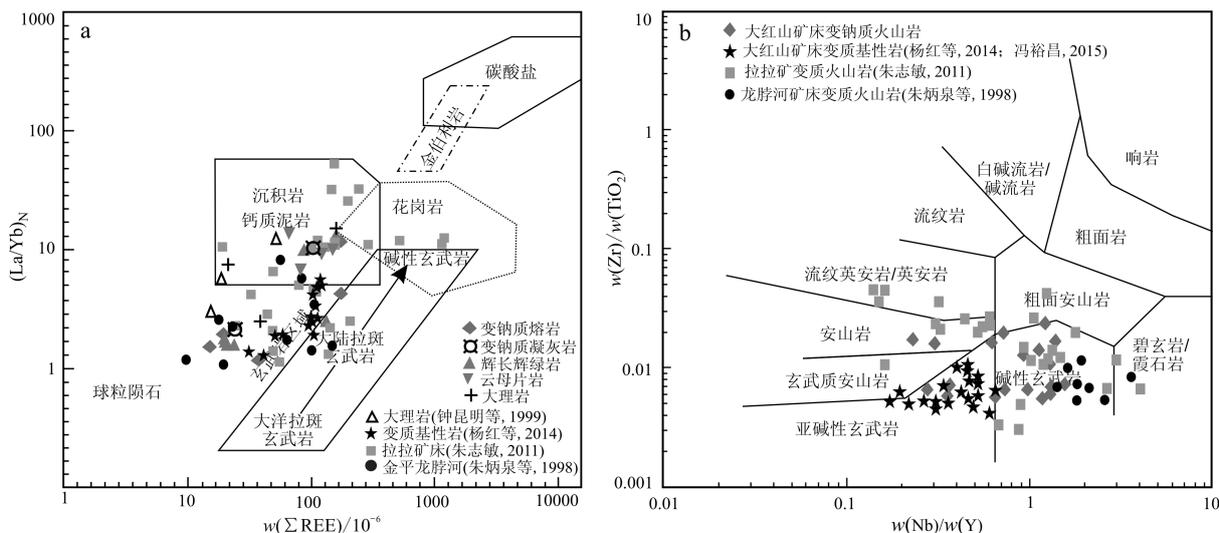


图 9 大红山群含矿岩系  $La/Yb - \sum REE$  图解 (a) 与  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  图解 (b) (据 Winchester and Floyd, 1977)  
 Fig. 9 Diagrams of  $La/Yb - \sum REE$  (a) and  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  (b) for the ore-bearing rocks in Dahongshan Group (after Winchester and Floyd, 1977)

岩样品投点主要集中于钙质泥岩区域;变质基性岩和辉长辉绿岩投点主要位于玄武岩区域或其左侧,靠近大陆拉斑玄武岩范围,少数受蚀变影响落入钙质泥岩范围;变钠质熔岩和凝灰岩投点主要位于钙质沉积岩下方和玄武岩范围左侧,与龙脖河矿床含矿火山岩特征类似,不同于散乱分布的拉拉矿床含矿变质火山岩。在  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  图解 (Winchester and Floyd, 1976) 中,变质基性岩样品(角闪岩)都位于亚碱性玄武岩区域内,变钠质火山岩样品落在碱性玄武岩和亚碱性玄武岩区域内(图 9b);拉拉矿床变质火山岩分布较为分散,主要集中于钙碱性玄武岩和安山岩区域,英安岩、碧玄岩均有少量分布;金平龙脖河变质火山岩集中于碱性玄武岩区域,仅一个落入碧玄岩区域。

可见,大红山变质基性岩和变质含矿火山岩具有大陆拉斑/碱性-亚碱性玄武岩的特点,拉拉矿床含矿变质火山岩总体以安山岩和玄武岩为主,属碱性-钙碱性系列(朱志敏, 2011),金平龙脖河矿床变质火山岩则具大陆碱性玄武岩特征。

稀土及微量元素由于其稳定的地球化学性质和分布的特殊性,常能对物质来源及流体演化起到重

要的指示作用,例如,  $Y/Ho$ 、 $Zr/Hf$ 、 $Nb/Ta$  值在同一热液体系中比较稳定,能有效地用于物源示踪 (Bau, 1991),但当发生热液活动和交代作用时,则会发生一定的分异,造成比值有较大的变化范围 (Yaxley and Green, 1998; 胡瑛等, 2009; 郭建等, 2020)。大红山矿区辉长辉绿岩、变钠质凝灰岩和变钠质熔岩的  $Y/Ho$  值 (25.37 ~ 28.17、20.45 ~ 28.02 和 22.56 ~ 27.94)、 $Zr/Hf$  值 (36.67 ~ 43.78、37.50 ~ 43.40 和 39.50 ~ 45.15) 和  $Nb/Ta$  值 (12.82 ~ 19.60、14.90 ~ 18.50 和 17.56 ~ 36.25) 范围大致相同,表明三者可能具有较为相似的来源。但相对而言,辉长辉绿岩的  $Y/Ho$  平均值更接近球粒陨石值 28 (Bau, 1991),变钠质熔岩  $Nb/Ta$  值较辉长辉绿岩和变钠质凝灰岩变化范围大,可能与后期热液叠加作用有关,井下伴随铁矿化加强,常见其边部发育规模不等的钠长石化褪色蚀变,也证明了这一点。

在图 10a 中,大红山矿区变钠质火山岩、辉长辉绿岩及变质基性岩从洋中脊玄武岩过渡到板内玄武岩范围,  $Zr/Y$  值逐渐增高且基本连续,随着矢量  $a$  的方向富集程度增高 (王仁民, 1987),表明其成岩物质可能来源于多个源区。含矿变钠质凝灰岩

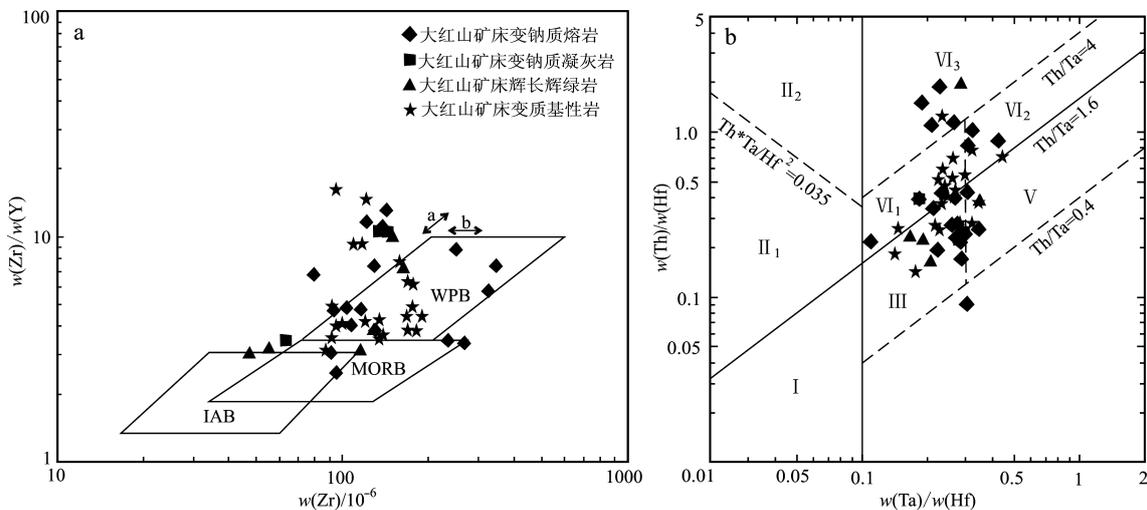


图 10  $Zr/Y - Zr$  (a) 和  $Th/Hf - Ta/Hf$  (b) 构造环境判别图解

Fig. 10 Tectonic discrimination diagrams of  $Zr/Y - Zr$  (a) and  $Th/Hf - Ta/Hf$  (b)

WPB—板内玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; I—板块发散边缘 N-MORB 区; II<sub>1</sub>—大洋岛弧玄武岩区; II<sub>2</sub>—陆源岛弧玄武岩区及陆源火山弧玄武岩区; III—大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 E-MORB、T-MORB 区; VI—大陆板内; VI<sub>1</sub>—陆内裂谷及陆源裂谷拉斑玄武岩区; VI<sub>2</sub>—陆内裂谷碱性玄武岩区; 大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区; VI<sub>3</sub>—大陆张性(或初始裂谷)玄武岩带; V—地幔热柱玄武岩区

WPB—intraplate basalts; MORB—mid-ocean ridge basalts; IAB— island arc basalts; I—plate divergent edge N-MORB zone; II—plate convergence margin; II<sub>1</sub>—ocean island arc basalts region; II<sub>2</sub>—arc basalts area of land source island and arc basalts area of land source volcano; III—outer ocean islands, seamounts basalts region and E-MORB, T-MORB region; VI—continental intraplate; VI<sub>1</sub>—interland rift and continental rift porphyry basalts region; VI<sub>2</sub>—basic basalts region of continental rift; VI<sub>3</sub>—continental tensional (or initial rift) basalts zone; V—mantle thermal pillar basalts region

Nb/La 值为 0.26~0.28, 与海相沉积变质而成的云母片岩和大理岩较为相近, 且与云母片岩夹层产出(图 4c), 明显低于不含矿样品 ( $Nb/La = 2.11 \sim 4.81$ , 戚金栋, 2016), 可能受到了海底沉积物的混染或热液交代作用的影响。辉长辉绿岩除含矿样品 3405-5 与 340-3 的 Nb/La 值明显大于原始地幔值 ( $Nb/La = 1$ , Weaver, 1991), 其余样品的 Nb/La 值均接近于原始地幔值, 在图 10b 中主要投点于大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 E-MORB、T-MORB 范围内, 表明其可能主要来源于富集地幔源区; 含矿辉长辉绿岩样品的蚀变较强, 导致其 Nb/La 值偏离了原始地幔值。变钠质熔岩 Nb/La 值为 0.95~3.95, 多数大于 1, 暗示其可能经历了后期的热液叠加作用过程。

变钠质熔岩、变钠质凝灰岩和辉长辉绿岩强烈亏损 Ba、Sr、Ti, 轻微亏损 Zr、Hf、Nb, 表明岩浆在结晶过程中可能存在钛铁矿或相关氧化物的分离结晶作用; Sr 亏损可能与钙长石分离结晶或蚀变作用有关, Ba 亏损可能与斜长石的分离结晶作用有关(赵军红等, 2005; 王永磊等, 2007; 周溪等, 2020; 任文恺等, 2020), Nb 亏损说明岩浆具有地壳来源的特征或曾受到地壳的污染(任文恺等, 2020)。含矿变钠质火山岩普遍富集 LREE, 具较显著的 Eu 正异常 ( $\delta Eu = 0.91 \sim 3.59$ , 均值为 1.62), 与现代洋中脊、陆内裂谷等构造背景下的喷流沉积或高温海底火山、热液

特征相似(Graf, 1977; Michard and Albarède, 1986; Klinkhammer *et al.*, 1994; Craddock *et al.*, 2010; 祝朝辉等, 2017; 杨光树等, 2020)。Eu 正异常可能是长石经高温海底热卤水蚀变作用的结果(Bau and Dulski, 1995; Alexander *et al.*, 2008)。

## 5.2 成岩构造环境

从图 10 中可见, 大红山变钠质火山岩样品投点主要位于板内玄武岩(WPB)区域内, 少量落入 MORB 范围; 辉长辉绿岩主要集中于大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 E-MORB、T-MORB 范围内, 变质基性岩样品主要分布于陆内裂谷玄武岩区域内, 总体显示拉张环境。在图 11 中, 通过与康滇成矿带内相似的拉拉和龙脖子矿床含矿变质火山岩对比可见, 金平龙脖子矿区变质火山岩集中于板内玄武岩区域内; 拉拉矿区变质火山岩投点较为分散, 主要处于钙碱性玄武岩和板内碱性玄武岩区域内, 部分落入岛弧拉斑玄武岩范围; 而大红山矿区变钠质火山岩则相对集中于板内玄武岩, 靠近钙碱性玄武岩区域, 变质基性岩集中于板内玄武岩区域, 部分具有 E-MORB 的特征, 其岩石地球化学特征相似于区域内东川等同时期的基性岩(王生伟等, 2013)。综上所述, 康滇成矿带古元古代含矿变质火山都主要显示出大陆裂谷玄武岩特征, 表明其形成于非造山的拉张构造环境, 可能是同一大陆裂谷环境下岩浆活动的产物。

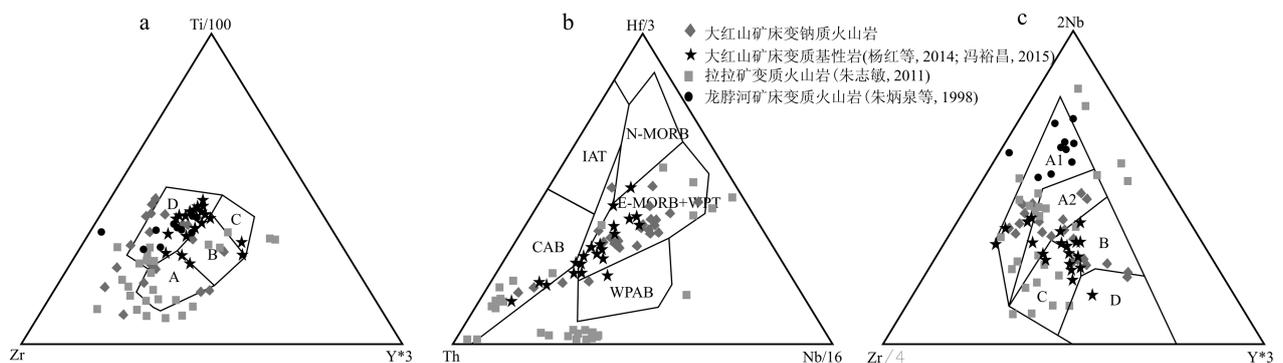


图 11 大红山铁铜矿床构造环境判别图解

Fig. 11 Tectonic environment discrimination diagram of the Dahongshan iron-copper deposit

- a: A—钙碱性玄武岩; B—MORB、岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩; C—岛弧拉斑玄武岩; D—板内玄武岩; b: IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; N-MORB—亏损型洋中脊玄武岩; E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; WPAB—板内碱性玄武岩; WPT—板内拉斑玄武岩; c: A1+A2—板内碱性玄武岩; A2+C—板内拉斑玄武岩; B—E-MORB; D—N-MORB; C+D—火山弧型玄武岩
- a: A—calc-alkaline basalt; B—mid-ocean ridge basalts, island arc porphyry basalts and calc-alkaline basalts; C— island-arc tholeiite; D— intraplate basalts; b: IAT— island-arc tholeiite; CAB— island-arc calc-alkaline basalts; N—MORB—normal mid-ocean ridge basalts; E—MORB—enriched mid-ocean ridge basalts; WPAB— within-plate basalts; WPT— within plate tholeiite basalts; c: A1+A2—plate alkaline basalts; A2+C—intra-plate porphyry basalts; B—enriched type mid-ocean ridge basalts; D—normal type mid-ocean ridge basalts; C+D—volcanic arc basalts

研究表明,扬子板块西缘发育许多与造山有关的 2.0 ~ 1.8 Ga 构造岩浆热事件(凌文黎, 1997; Sun *et al.*, 2008; 孙志明等, 2009; 关俊雷等, 2011; 王子正等, 2013), 并可能与 Columbia 超大陆的聚合造山过程相关(Rogers and Santosh, 2002; Zhao *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2012; 王生伟等, 2013; 徐文涛等, 2020)。近年来,在康滇地区获得了许多新的元古宙岩浆岩锆石 U-Pb 年龄,主要集中在 1.8 ~ 1.5 Ga 范围内,且对应岩浆岩大都具有非造山特征(王生伟等, 2013)。例如郭阳等(2012)获得武定铁铜矿区辉绿岩锆石 U-Pb 年龄为 1.88 ~ 1.56 Ga, 并认为其具有陆内裂谷玄武岩的特征;周家云等(2011)研究表明,河口群钠长岩形成于早元古代晚期的陆间裂谷或拗拉槽环境;王冬兵等(2012, 2013)研究认为,河口群中石英角斑岩形成于早元古代晚期(1.72 Ga), 而侵位于其中的辉长岩年龄为 ~1.69 Ga, 是伸展构造环境下幔源岩浆沿张性断裂侵入的产物;王生伟等(2013)通过对东川铜矿区古元古代辉绿岩主微量、稀土元素和 Sr-Nd 同位素的研究,认为其形成于陆内裂谷环境;杨红等(2013, 2014)研究表明,大红山铁铜矿床变质基性岩形成于 ~1.7 Ga 的大陆裂谷环境;Zhao 等(2011, 2017)研究表明,东川矿区因民组含矿火山岩年龄为 ~1.74 Ga, 大红山矿区含矿火山岩年龄为 ~1.7 Ga, 侵入其中的辉长辉绿岩年龄为 ~1.65 Ga, 认为镁铁质岩浆的底侵作用所诱发的大规模流体循环以及引起的大面积钠钙交代作用导致了大红山铁铜矿床的形成。

本文研究结果显示,大红山变钠质含矿火山岩形成于海底环境,辉长辉绿岩多具有陆内裂谷玄武岩和 E-MORB 的特点,与区域同期基性岩特征一致(王生伟等, 2013),表明它们具有相似的成岩构造背景,应该为同一期非造山型岩浆活动的结果。这期非造山型岩浆活动在全球范围内广泛存在,是 Columbia 超大陆裂解的主要体现(Rogers and Santosh, 2002; 陆松年等, 2002; 王奖臻等, 2012; Zhang *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2017)。因此,康滇地区广泛发育的 1.8 ~ 1.5 Ga 左右的非造山型岩浆岩,可能是 Columbia 超大陆的裂解在扬子板块西缘的响应,它们可能都是昆阳裂谷期的产物(龚琳等, 1996), 拉伸裂解构造环境为幔源岩浆的运移提供了通道,而幔源物质的上涌,则为康滇地区铁铜多金属成矿带的形成提供了良好的物质基础。

## 6 结论

(1) 大红山铁铜矿床含矿变质岩系具有富钠、贫钾、低钛、铁含量高、硅含量变化大的特征,云母片岩类原岩为泥质沉积岩,变钠质火山岩的原岩为细碧角斑岩系。含矿岩系的微量元素普遍亏损 Ba、Sr、Ti, 弱亏损 Zr、Hf、Nb, 富集 Th、Nd、Sm、La 等;变质火山岩都具有相对富集轻稀土元素的右倾型稀土元素配分特征, Ce 异常不明显, 具有较显著的 Eu 正异常, 变质火山岩显示出大陆拉斑/碱性-亚碱性玄武岩的特点。

(2) 含矿岩系 Nb/La 值大于原始地幔(Nb/La = 1), 且从变钠质火山岩到变质基性岩, Zr/Y 值逐渐增高且基本连续, 表明其成岩物质具有相似性, 但 Y/Ho、Zr/Hf、Nb/Ta 值等的差异表明, 变钠质火山岩可能受到了后期热液叠加作用的影响。多种构造环境判别结果表明, 变钠质火山岩具有 E-MORB 和 WPB 特征, 推测它们可能都形成于与富集地幔有关的大陆裂谷环境。

(3) 大红山矿区含矿变质火山岩系特征可与其它康滇地区 1.8 ~ 1.5 Ga 左右的非造山型岩浆岩对比, 表明它们形成于相似的拉伸构造环境, 可能代表了 Columbia 超大陆的裂解作用在扬子板块西缘的响应; 拉伸裂解构造环境为幔源岩浆的上涌和运移提供了通道, 进而为区域内大规模铁铜多金属矿床的形成提供了成矿物质基础。

**致谢** 野外工作得到了玉溪大红山矿业有限公司领导和地质人员的热情帮助, 两位匿名审稿专家对论文提出了宝贵的修改意见和建议, 在此一并表示衷心感谢!

## References

- Alexander B W, Bau M, Andersson P, *et al.* 2008. Continentially-derived solutes in Shallow a rcheanse awater: Rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola super-group, South Africa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (2): 378 ~ 394.
- Bau M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium[J]. *Chemical Geology*, 93: 219 ~ 230.

- Bau M and Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviors in fluorine-rich hydrothermal fluids[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119: 213~223.
- Chen Xiansheng. 1995. Origin and ore-forming series of Dahongshan deposit, Laochang, Xiping, Yunnan [J]. *Geology and Mineral Resources of Southwest China*, 36(1): 1~11 (in Chinese).
- Craddock P R, Bach W, Seewald J S, *et al.* 2010. Rare earth element abundances in hydrothermal fluids from the Manus Basin, Papua New Guinea; Indicators of sub-seafloor hydrothermal processes in back-arc basins [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 (19): 5 494 ~ 5 513.
- Deng Yufeng, Song Xieyan, Jie Wei, *et al.* 2011. Petrogenesis of the Huangshandong Ni-Cu sulfide-bearing Mafic-ultramafic intrusion, Northern Tianshan, Xinjiang; Evidence from major and trace elements and Sr-Nd isotope [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(9): 1 435 ~ 1 451 (in Chinese with English abstract).
- Fang Weixuan. 2014. Geotectonic evolution and the Proterozoic iron oxide copper-gold deposits on the western margin of the Yangtze Massif [J]. *Geotectonics and Metallogeny*, 38 (4): 733 ~ 757 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yuchang. 2015. Study on Geological Characteristics and Metallogenic Model of Dahongshan Iron-Copper Deposit in Yunnan [D]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology, 1 ~ 56 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, *et al.* 2017. Subdivision and correlation of the Mesoproterozoic stratigraphy in the Western and Northern margins of Yangtze block [J]. *Acta Geologica Sinica*, 91 (10): 2 151~2 174 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, *et al.* 2008. Metamorphic Basement Evolution in the Western Margin of the Yangtze Platform [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~215 (in Chinese with English abstract).
- Gong Lin, He Yite and Chen Tianyou. 1996. Paleozoic Rifting Copper Deposit in Dongchuan, Yunnan [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~226 (in Chinese).
- Graf J L. 1977. Rare earth elements as hydrothermal tracers during the formation of massive sulfide deposits in volcanic rocks [J]. *Economic Geology*, 72(4): 527~548.
- 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 Science*, 33(5~6): 289~302.
- Guan Junlei, Zheng Lailin, Liu Jianhui, *et al.* 2011. Zircons SHRIMP U-Pb dating of diabase from Hekou, Sichuan Province, China and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 482~490 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jian, Li Ziyang, Nie Jiangtao, *et al.* 2020. Trace-element geochemical characteristics of pyrite in polymetallic mineralization in the depth of the Xiangshan uranium orefield, Jiangxi Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(3): 257~266 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yang, Yang Bin, Zhou Bangguo, *et al.* 2012. Geological characteristics of the platinum group elements in Xijiaping of Dongchuan Area, Yunnan [J]. *J. Mineral Petrol.*, 32(4): 59~64 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Han Fa, Xia Linqi, *et al.* 2003. Modern and Ancient Hydrothermal Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~423 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Hu Ying, Chen Maohong, Dong Qingji, *et al.* 2009. Trace elements features of the vein quartzs, arsenian pyrites and their fluid inclusions in Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 15(4): 506~516 (in Chinese with English abstract).
- Jin Tingfu, Li Youguo, Fei Guangchun, *et al.* 2017. Re-Os isotopic dating of chalcopyrite in quartz vein from Dahongshan IOCG deposit in Kangdian copper metallogenic belt and its significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(4): 417~426 (in Chinese with English abstract).
- Klinkhammer G P, Elderfield H, Edmond J M, *et al.* 1994. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(23): 5 105~5 113.
- Kou Caihua, Zhang Zhaochong, Santosh M, *et al.* 2017. Oldest volcanic-hosted submarine iron ores in South China; Evidence from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Paleoproterozoic Dahongshan iron deposit [J]. *Gondwana Research*, 49: 182~204.
- Li Jing, Liu Guichun, Liu Junping, *et al.* 2018. Advances in Precambrian geology in central Yunnan [J]. *Geological Bulletin of China*, 37 (11): 1 957~1 969 (in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Xiao Bin, Fan Yuhua, *et al.* 2015. Preliminary study of REE geochemistry of copper and iron deposits in Yunnan Dahongshan [J]. *University Geology Journal*, 21(1): 50~58 (in Chinese with English abstract).
- Li Tong. 1994. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust [J]. *Geochimica*, 23 (2): 140~145 (in Chinese with English abstract).
- Liao Shenglin. 2009. Geochemical Characteristics and Prospecting Analysis of Dahongshan Iron-Copper Deposit in Xiping, Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 39 ~47 (in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Gao Shan, Zhang Benren, *et al.* 1997. Early Precambrian continental crust evolution at the Northern margin of Yangtze Craton:

- Constrain from the elemental and isotopic geochemical study of Houhe Complex[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 17(4): 26~32 (in Chinese with English abstract).
- Lu Lei, Feng Wenjie and Dong Jiangtao. 2014. Characteristics of crypto-explosive breccia in Dahongshan iron-copper deposit Yunnan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 41(5): 640~644 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huaikun, *et al.* 2002. North China Continent and Columbia supercontinent[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 225~233 (in Chinese with English abstract).
- Michard A and Albarède F. 1986. The REE content of some hydrothermal fluids[J]. *Chemical Geology*, 55(1~2): 51~60.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth—Science Reviews*, 37(3/4): 215~224.
- Pearce J A. 1975. Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus[J]. *Tectonophysics*, 25(1~2): 41~67.
- Polat A and Hofmann A W. 2003. Alteration and geochemical patterns in the 3.7~3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland [J]. *Precambrian Research*, 126(3): 197~218.
- Polat A, Hofmann A W and Rosing M T. 2002. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7~3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: Geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth[J]. *Chemical Geology*, 184(3~4): 231~254.
- Qi Jindong. 2016. Study on the Geochemical Characteristics of Metamorphic Volcanic Rock in Dahongshan Group[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 1~80 (in Chinese with English abstract).
- Qian Jinhe and Shen Yuanren. 1990. The Dahongshan Volcanogenic Fe-Cu Deposit in Yunnan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~236 (in Chinese).
- Qin Dexian, Yan Yongfeng, Tian Yulong, *et al.* 2000. Geological characteristics and ore-forming evolution of Dahongshan copper deposit[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 129~139 (in Chinese with English abstract).
- Ran Chongying. 1989. On ore source and ore-forming fluid of Dongchuan-Yimen copper deposit[J]. *Journal of Kunming Institute of Technology*, 12(4): 12~20 (in Chinese with English abstract).
- Ren Wenkai, Wang Shengyun, Chen Libiao, *et al.* 2020. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology, geochemistry and geological significance of granodiorites in Lancai Area, Tongren, Qinghai[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(4): 1059~1074 (in Chinese with English abstract).
- Rogers J J W and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a mesoproterozoic supercontinent[J]. *Gondwan Research*, 5(1): 5~22.
- Shen Yuanren. 1984. Discussion on the genesis of ore-bearing rock series in Dahongshan Iron Mine with Comrade Yan Yibin[J]. *Yunnan Geology*, 8(4): 386~390 (in Chinese).
- Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, Early Archean supracrustal rocks in South western Finland[J]. *Bulletin de la Commission Geologique de Finlande*, 160: 1~64.
- Su Zhikun, Zhao Xinfu, Li Xiaochun, *et al.* 2016. Using elemental and boron isotopic compositions of tourmaline to trace fluid evolutions of IOCG systems: The worldclass Dahongshan Fe-Cu deposit in SW China[J]. *Chemical Geology*, 441: 265~279.
- Sun Jiacong. 1988. Analysis of the structural modeling of Dahongshan iron ore control in Yunnan[J]. *Journal of Kunming Institute of Technology*, 13(3): 45~55 (in Chinese with English abstract).
- Sun Kexiang, Shen Yuanren and Liu Guoqing. 1991. Proterozoic Iron-copper Deposits in Central Yunnan Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~169 (in Chinese).
- Sun Min, Chen Nengsong, Zhao Guochun, *et al.* 2008. U-Pb zircon and Sm-Nd isotopic study of the Huangtuling granulite, Dabie-Sulu Belt, China: Implication for the Paleoproterozoic tectonic history of the Yangtze Craton[J]. *American Journal of Science*, 308(4): 469~483.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- 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).
- Wang Dongbing, Sun Zhiming, Yin Fuguang, *et al.* 2012. Geochronology of the Hekou Group on the Margin Western Yangtze block: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of volcanic rocks[J]. *Journal of Stratigraphy*, 36(3): 630~635 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiangzhen, Li Zeqin and Huang Congjun. 2012. The main geological events of the Kangdian Proterozoic Eon and response from the La-La IOCG deposit[J]. *Advances in Earth Science*, 27(10): 1074~1079 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kaiyuan. 1996. The division of paleo-proterozoic volcanic sediments sequence, volcanism and characteristics of mineralization in Dahongshan iron-copper deposit, Xiping[J]. *Yunnan Geological Science and Technology Information*, 36(2): 1~11 (in Chinese).
- Wang Renmin. 1987. Graphic Discrimination of Metamorphic Rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~199 (in Chinese).
- Wang Shengwei, Liao Zhenwen, Sun Xiaoming, *et al.* 2013. Geochemistry of Paleoproterozoic diabase in the Dongchuan Copper deposit, Yunnan, SW China: Response to breakup of the Columbia Supercontinent in the southwest margin of Yangtze Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(12): 1834~1852 (in Chinese with English abstract).

- Wang Yanjun, Zhu Weiguang, Huang Huiqing, *et al.* 2020. Geochemistry of magnetite from the giant Paleoproterozoic Dahongshan Fe-Cu deposit, SW China: Constraints on nature of ore-forming fluids and depositional setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 118: 1~14.
- Wang Yonglei, Pei Rongfu, Li Jinwen, *et al.* 2007. Geochemical characteristics and tectonic setting of Laochang granite in Gejiu[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 979~985 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zizheng, Guo Yang, Yang Bin, *et al.* 2013. Discovery of the 1.73 Ga Haizi anorogenic type granite in the western margin of Yangtze Craton, and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(7): 931~942(in Chinese with English abstract).
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104(2~4): 381~397.
- Winchester J A and Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination: Application to classify altered and metamorphosed igneous rocks[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 70: 175~195.
- Wood D A, Joron J L and Treuil M. 1979. A reappraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 45(2): 326~336.
- Wu Kongwen, Zhong Hong, Zhu Weiguang, *et al.* 2008. Study on ore-forming fluid of the Dahongshan stratiform copper deposit, Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2 045~2 057 (in Chinese with English abstract).
- Wu Maode, Duan Jinsun, Song Xueliang, *et al.* 1990. *Geology of Kunyang Group Yunnan* [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1~265 (in Chinese).
- Xiao Rongyang, Li Youguo, Jin Tingfu, *et al.* 2015. On mine features and genetic type study of Dahongshan Area[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 40(12): 33~38 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qidong. 1998. Original petrology and tectonic setting of meta-volcanic rocks from Dahongshan Group, Central Yunnan[J]. *Geochimica*, 27(5): 3~5 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wentao and Liu Fulai. 2020. The Late Paleozoic arc-back arc system in western Ailaoshan: Evidence from geochemistry and geochronology of basic rocks[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(4): 406~422 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yibin. 1981. On ore-bearing intrusive mass of Dahongshan, Yunnan [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 3(2): 20~28 (in Chinese).
- Yang Guangshu, Mao Zhibo, Qin Longjiang, *et al.* 2020. Geochemical characteristics of carbon and oxygen isotopes and trace elements of the Dahongshan Cu-Fe deposit in Yunnan and their metallogenic significances[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(52): 945~960 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Liu Fulai, Du Lilin, *et al.* 2012. Zircon U-Pb dating for metavolcanites in the Laochanghe Formation of the Dahongshan Group in south western Yangtze block, and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 994~3 014 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Liu Fulai, Liu Pinghua, *et al.* 2013.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating for muscovite in garnet muscovite-felsic schist of the Dahongshan Group in southwestern Yangtze block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2 161~2 170 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hong, Liu Pinghua, Meng En, *et al.* 2014. Geochemistry and its tectonic implications of metabasite in the Dahongshan Group in southwestern Yangtze block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 3 021~3 033 (in Chinese with English abstract).
- Yaxley G M and Green D H. 1998. Reactions between eclogite and peridotite: Mantle refertilisation by subduction of oceanic crust[J]. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 78(2): 243~255.
- Yin Fuguang, Sun Zhiming, Ren Guangming, *et al.* 2012. Geological record of Paleo and Mesoproterozoic orogenesis in the western margin of Upper Yangtze Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1 917~1 932 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongxiang, Liu Congqiang, Xu Zhifang, *et al.* 2001. Geochemical evidence of the lower proterozoic subduction system at the western margin of the Yangtze Plate[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(2): 231~238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huan. 2013. *Study on Geochemical Characteristics and the Function in Iron-Copper Mineralization of Alkali-rich Porphyry in the Dahongshan Area, Yunnan Province, China* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 41~58 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Miaoyun. 1995. *Geochemical Characteristics of Dahongshan Copper Deposit* [D]. Guizhou: Institute of Geochemistry, 24~55 (in Chinese).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue and Santosh M. 2012. Mid-Mesoproterozoic bimodal magmatic rocks in the northern North China Craton: Implications for magmatism related to breakup of the Columbia supercontinent [J]. *Precambrian Research*, 222: 339~367.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2002. Review of global 2.1~1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent [J]. *Earth Science Reviews*, 59(1/4): 125~162.
- Zhao Junhong, Peng Jiantang, Hu Ruizhong, *et al.* 2005. Chronology, petrology, geochemistry and tectonic environment of Banxi quartz porphyry dikes, Hunan Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(6): 525~534 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X F and Zhou M F. 2011. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: A Proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) metallogen-

- ic province[J]. *Mineralium Deposita*, 46(7): 731~747.
- Zhao X F, Zhou M F, Li J W, *et al.* 2013. Sulfide Re-Os and Rb-Sr isotope dating of the Kangdian IOCG metallogenic province, Southwest China: Implications for regional metallogenesis[J]. *Economic Geology*, 108(6): 1 489~1 498.
- Zhao X F, Zhou M F, Su Z K, *et al.* 2017. Geology, geochronology, and geochemistry of the Dahongshan Fe-Cu-(Au-Ag) deposit, Southwest China: Implications for the formation of iron oxide copper-gold deposits in intracratonic rift settings[J]. *Economic Geology*, 112(3): 603~628.
- Zhong Kunming, Yan Yibin and Qin Dexian. 1999. Origin of stratabound Cu-deposit and its ore-bearing stratum in basement bed in Dahongshan area, Yunnan, China[J]. *Journal of Kunming University of Technology*, 24(1): 137~144(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiayun, Mao Jingwen, Liu Feiyan, *et al.* 2011. SHRIMP U-Pb zircon chronology and geochemistry of albitite from the Hekou Group in the western Yangtze block[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(3): 66~73(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xi, Peng Jiantang, Lu Yulong, *et al.* 2020. Petrology and geochemical characteristics of felsic dykes in the Qiuwangchong gold deposit, central Hunan, and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(4): 441~453(in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan, Zou Ri, Chang Xiangyang, *et al.* 1998. Geochemical study of sodium-changing volcanic rocks in Jinping Longbei river copper deposit; I. Study on the characteristics and formation environment of main microelement [J]. *Geochemistry*, 27(4): 3~5(in Chinese with English abstract).
- Zhu Chaohui, Liu Shuxia, Song Feng, *et al.* 2017. Geochemical characteristics and geological significance of Sanfongong iron deposit in Henan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(6): 955~963(in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhimin. 2011. Lala Iron Oxide Copper Gold Deposit: Metallogenic Epoch and Metal Sources[D]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology, 1~92(in Chinese with English abstract).
- 耿元生, 旷红伟, 柳永清, 等. 2017. 扬子地块西、北缘中元古代地层的划分与对比[J]. *地质学报*, 91(10): 2 151~2 174.
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 2008. 扬子地台西缘变质基底演化[M]. 北京: 地质出版社, 1~215.
- 龚琳, 何毅特, 陈天佑. 1996. 云南东川元古宙裂谷型铜矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~226.
- 关俊雷, 郑来林, 刘建辉, 等. 2011. 四川省会理县河口地区辉绿岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 85(4): 482~490.
- 郭建, 李子颖, 聂江涛, 等. 2020. 江西相山铀矿田深部多金属矿床中黄铁矿微量元素地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 39(3): 257~266.
- 郭阳, 杨斌, 周邦国, 等. 2012. 云南东川奚家坪玄武岩的铂族元素地球化学[J]. *矿物岩石*, 32(4): 59~64.
- 侯增谦, 韩发, 夏林圻, 等. 2003. 现代与古代海底热水成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1~423.
- 胡瑛, 陈懋弘, 董庆吉, 等. 2009. 贵州锦丰(烂泥沟)金矿床含铜黄铁矿和脉石英及其包裹体的微量元素特征[J]. *高校地质学报*, 15(4): 506~516.
- 金廷福, 李佑国, 费光春, 等. 2017. 康滇铜成矿带大红山 IOCG 矿床石英脉中黄铜矿 Re-Os 定年与意义[J]. *矿物学报*, 37(4): 417~426.
- 李静, 刘桂春, 刘军平, 等. 2018. 滇中地区早前寒武纪地质研究新进展[J]. *地质通报*, 37(11): 1 957~1 969.
- 李俊, 肖斌, 范玉华, 等. 2015. 云南大红山铜铁矿床稀土元素地球化学特征初探[J]. *高校地质学报*, 21(1): 50~58.
- 黎彤. 1994. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J]. *地球化学*, 23(2): 140~145.
- 廖声林. 2009. 云南新平大红山铁铜矿床地球化学特征及找矿分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 39~47.
- 凌文黎, 高山, 张本仁, 等. 1997. 扬子克拉通北缘早前寒武纪地壳演化: 后河杂岩元素和同位素地球化学限制[J]. *矿物岩石*, 17(4): 26~32.
- 陆蕾, 冯文杰, 董江涛. 2014. 云南大红山铁铜矿床隐爆角砾岩的岩石学特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 41(5): 640~644.
- 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 等. 2002. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J]. *地学前缘*, 9(4): 225~233.
- 戚金栋. 2016. 滇中大红山地区大红山群变质火山岩岩石地球化学特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 1~80.
- 钱锦和, 沈远仁. 1990. 云南大红山古火山岩铁铜矿[M]. 北京: 地质出版社, 1~236.
- 秦德先, 燕永锋, 田毓龙, 等. 2000. 大红山铜矿床的地质特征及成矿作用演化[J]. *地质科学*, 35(2): 129~139.
- 冉崇英. 1989. 论东川-易门式铜矿的矿源与成矿流体[J]. *昆明工学院学报*, 12(4): 12~20.
- 任文恺, 王生云, 陈礼标, 等. 2020. 青海同仁兰采地区花岗闪长岩

## 附中文参考文献

- 陈贤胜. 1995. 云南新平老厂大红山矿区成矿系列及其成因[J]. *西南矿产地质*, 36(1): 1~11.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 颀炜, 等. 2011. 新疆北天山黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体的岩石成因: 主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素证据[J]. *地质学报*, 85(9): 1 435~1 451.
- 方维萱. 2014. 论扬子地块西缘元古宙铁氧化物铜金型矿床与大地构造演化[J]. *大地构造与成矿学*, 38(4): 733~757.
- 冯裕昌. 2015. 云南大红山铁铜矿床地质特征及成矿模式研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1~56.

- LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(4): 1 059~1 074.
- 沈远仁. 1984. 关于大红山铁含矿岩系的成因——与颜以彬同志商榷[J]. 云南地质, 8(4): 386~390.
- 孙家骢. 1988. 云南大红山铁控矿构造型式的分析[J]. 昆明工学院学报, 13(3): 45~55.
- 孙克祥, 沈远仁, 刘国庆. 1991. 滇中元古宙铁铜矿床[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~169.
- 孙志明, 尹福光, 关俊雷, 等. 2009. 云南东川地区昆阳群黑山组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义[J]. 地质通报, 28(7): 896~900.
- 王冬兵, 孙志明, 尹福光, 等. 2012. 扬子地块西缘河口群的时代: 来自火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据[J]. 地层学杂志, 36(3): 630~635.
- 王冬兵, 尹福光, 孙志明, 等. 2013. 扬子陆块西缘古元古代基性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义[J]. 地质通报, 32(4): 617~630.
- 王奖臻, 李泽琴, 黄从俊. 2012. 康滇地轴元古代重大地质事件与拉拉 IOCG 矿床成矿响应[J]. 地球科学进展, 27(10): 1 074~1 079.
- 王铠元. 1996. 新平大红山早元古代火山-沉积变质岩群层序划分、火山作用及其铁-铜矿床成矿特征[J]. 云南地质科技情报, 36(2): 1~11.
- 王仁民. 1987. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1~199.
- 王生伟, 廖震文, 孙晓明, 等. 2013. 云南东川铜矿区古元古代辉绿岩地球化学——Columbia 超级大陆裂解在扬子陆块西南缘的响应[J]. 地质学报, 87(12): 1 834~1 852.
- 王永磊, 裴荣富, 李进文, 等. 2007. 个旧老厂矿田花岗岩地球化学特征及其形成构造背景[J]. 地质学报, 81(7): 979~985.
- 王子正, 郭阳, 杨斌, 等. 2013. 扬子克拉通西缘 1.73 Ga 非造山型花岗斑岩的发现及其地质意义[J]. 地质学报, 87(7): 931~942.
- 吴孔文, 钟宏, 朱维光, 等. 2008. 云南大红山层状铜矿床成矿流体研究[J]. 岩石学报, 24(9): 2 045~2 057.
- 吴懋德, 段锦荪, 宋学良, 等. 1990. 云南昆阳群地质[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1~265.
- 肖荣洋, 李佑国, 金廷福, 等. 2015. 大红山地区矿区特征及成因类型探析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 40(12): 33~38.
- 徐启东. 1998. 滇中大红山岩群变质火山岩类的原岩性质和构造属性[J]. 地球化学, 27(5): 3~5.
- 徐文涛, 刘福来. 2020. 哀牢山西部晚古生代岛弧-弧后盆地系统——来自基性岩地球化学和年代学的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 39(4): 406~422.
- 颜以彬. 1981. 论云南大红山含矿岩体[J]. 昆明工学院学报, 3(2): 20~28.
- 杨红, 刘福来, 杜利林, 等. 2012. 扬子地块西南缘大红山群老厂河组变质火山岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(9): 2 994~3 014.
- 杨红, 刘福来, 刘平华, 等. 2013. 扬子地块西南缘大红山群榴白云母-长石石英片岩的白云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(6): 2 161~2 170.
- 杨红, 刘平华, 孟恩, 等. 2014. 扬子地块西南缘大红山群变质基性岩的地球化学研究及构造意义[J]. 岩石学报, 30(10): 3 021~3 033.
- 杨光树, 毛致博, 覃龙江, 等. 2020. 云南大红山铁铜矿床碳、氧同位素和微量元素地球化学特征及成矿意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 39(52): 945~960.
- 尹福光, 孙志明, 任光明, 等. 2012. 上扬子陆块西南缘早-中元古代造山运动的地质记录[J]. 地质学报, 86(12): 1 917~1 932.
- 张鸿翔, 刘丛强, 徐志方, 等. 2001. 扬子板块西缘早元古代俯冲体系的地球化学证据——有关变基性岩的微量元素地球化学研究[J]. 矿物学报, 21(2): 231~238.
- 张欢. 2013. 云南大红山地区富碱斑岩地球化学特征及与铁铜成矿关系研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 41~58.
- 张苗云. 1995. 大红山铜矿床的地球化学特征研究[D]. 贵州: 中国科学院地球化学研究所, 24~55.
- 赵军红, 彭建堂, 胡瑞忠, 等. 2005. 湖南板溪溪岩的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境[J]. 地球学报, 26(6): 525~534.
- 钟昆明, 颜以彬, 秦德先. 1999. 云南大红山基底地层中的层状铜矿及其含矿地层的成因[J]. 昆明理工大学学报, 24(1): 137~144.
- 周溪, 彭建堂, 鲁玉龙, 等. 2020. 湘中秋旺冲金矿区脉岩岩石学与地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 39(4): 441~453.
- 周家云, 毛景文, 刘飞燕, 等. 2011. 扬子地台西缘河口群钠长岩锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征[J]. 矿物岩石, 31(3): 66~73.
- 朱炳泉, 邹日, 常向阳, 等. 1998. 金平龙脖河铜矿区变质火山岩系地球化学研究: I. 主微量元素特征和形成环境探讨[J]. 地球化学, 27(4): 3~5.
- 祝朝辉, 刘淑霞, 宋锋, 等. 2017. 河南三佛宫铁矿床地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(6): 955~963.
- 朱志敏. 2011. 拉拉铁氧化物铜金矿: 成矿时代和金属来源[D]. 成都: 成都理工大学, 1~92.