

川西木落寨稀土矿床年代学、地球化学与成矿特征*

付浩邦^{1,2}, 刘 琰^{1**}, 郑 旭², 贾玉衡³, 丁 岩⁴

(1 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 3 桂林理工大学地球科学学院 广西 桂林 541006; 4 四川万凯丰稀土能源有限公司, 四川 冕宁 615600)

摘要 木落寨矿床位于川西冕宁-德昌稀土成矿带的北部, 郑家梁子矿段是该矿床的主要成矿段。野外勘查发现, 郑家梁子矿段主要的赋矿岩石是大理岩, 其中发育的张性断裂充填大量矿脉, 与矿带中其他矿床以正长岩为赋矿围岩的特征明显不同, 而大理岩是否是成矿物质的主要来源尚不清楚。为进一步明确大理岩、正长岩和稀土物质来源之间的关系, 文章对相关岩石和矿石进行地球化学特征对比分析。正长岩全岩稀土元素含量为 $1211 \times 10^{-6} \sim 2974 \times 10^{-6}$, 稀土元素配分曲线呈轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损的特征。近矿蚀变大理岩稀土元素配分曲线整体呈右倾, 稀土元素总量为 $1131 \times 10^{-6} \sim 1935 \times 10^{-6}$, 而远矿新鲜大理岩稀土元素总量为 $8.20 \times 10^{-6} \sim 8.69 \times 10^{-6}$, 由此可见, 大理岩很可能不是稀土物质的主要来源。新鲜大理岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围为 1.3‰~1.6‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 介于 23.2‰~23.7‰ 之间, 显示其是海相碳酸盐岩变质的产物, 蚀变大理岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围为 0.4‰~0.7‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 介于 15.7‰~16‰ 之间, 显示其受热液蚀变影响, 并经历碳酸盐的溶解作用。新鲜大理岩与蚀变大理岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值变化较小(0.4‰~1.6‰), 说明这 2 种大理岩为同源, 近矿大理岩可能只是碳酸盐岩溶解蚀变的产物。矿脉中的方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围为 -4.6‰~-4.7‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 介于 11.8‰~12.5‰ 之间, 显示出碳酸岩岩浆经历低温蚀变的过程, 证明矿脉与大理岩没有明显物质来源关系。矿石中氟碳铈矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 18.3143~18.3629、15.6243~15.6349 和 38.6197~38.7309, 正长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 18.3233~18.3568、15.6298~15.6360 和 38.6664~38.6880。正长岩和氟碳铈矿的铅同位素特征一致, 显示稀土的物质来源很可能是正长岩或隐伏的碳酸岩。本次研究选取典型矿石中与氟碳铈矿密切共生的金云母进行 Ar-Ar 同位素定年。鉴于矿石中的云母和氟碳铈矿并不存在多期次性, 研究测得该矿段金云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 $(27.6 \pm 0.2)\text{Ma}$, 可以很好地代表成矿时代。

关键词 地质学; 成矿特征; 地球化学; 物质来源; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄; 郑家梁子矿段

中图分类号: P618.7

文献标志码: A

Geochronology, geochemistry and metallogenic characteristics of Muluozhai deposit in southwestern Sichuan Province

FU HaoBang^{1,2}, LIU Yan¹, ZHENG Xu², JIA YuHeng³ and DING Yan⁴

(1 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China; 4 Wankai Feng Rare Earth Energy Company, Sichuan Mianning 615600, China)

Abstract

The Zhengjialiangzi ore section is the main metallogenic block of Muluozhai deposit which is located in the northern part of the Mianning-Dechang REE metallogenic belt in western Sichuan. It is found that the main ore-

* 本文得到国家自然科学基金面上项目(编号:41772044)、中国地质科学院基本科研业务费(编号:YYWF201509、YYWF201705)和中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20190060)联合资助

第一作者简介 付浩邦,男,1994年生,硕士研究生,地质工程专业。Email:949088885@qq.com

** 通讯作者 刘 琰,男,1982年生,副研究员,主要从事稀土和稀有金属矿床研究。Email:ly@cags.ac.cn

收稿日期 2018-08-03;改回日期 2019-01-19。赵海杰编辑。

bearing rock in the Zhengjialiangzi ore block is marble, in which the developed tensile faults fill a large number of veins through field investigation. As the ore-bearing surrounding rock in Zhengjialiangzi ore block, the marble is obviously different from the other deposits' surrounding rock-syenite in the ore belt. In order to further clarify the relationships between marble, syenite and REE source, this study conducted comparative analyses of the geochemical characteristics of related rocks and ores. The REE content of syenite is $1211 \times 10^{-6} \sim 2974 \times 10^{-6}$, and the REE distribution curve is characterized by light rare earth element enrichment and heavy rare earth element depletion. The near-mineral alteration marble has a right-dip REE distribution curve, and the total REE content is $1131 \times 10^{-6} \sim 1935 \times 10^{-6}$, while the total REE content of fresh far marble away from the ore body is $8.20 \times 10^{-6} \sim 8.69 \times 10^{-6}$, which shows that fresh marble may not provides a source of rare earth materials. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ of fresh marble varies from 1.3‰ to 1.6‰, and the $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ ranges from 23.2‰ to 23.7‰. It shows that the fresh marble is the product of metamorphism of marine carbonate. The variation of the $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ of altered marble is 0.4‰ to 0.7‰, and the $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ is between 15.7‰ and 16‰, which indicates that the marble is affected by hydrothermal alteration and underwent carbonate dissolution. The changes of $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ values of fresh marble and altered marble are small (0.4‰~1.6‰), indicating that these two marbles are homologous. Near-mineral marble may be only a product of dissolution and alteration of carbonate rocks. The range of $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ of calcite in the vein is -4.6‰ to -4.7‰, and $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ is between 11.8‰ and 12.5‰, which shows that the carbonate magma undergoes low temperature alteration, which proves that the vein and marble are not. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values of bastnaesite in ore are 18.3143~18.3629, 15.6243~15.6349 and 38.6197~38.7309. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values of syenite is 18.3233~18.3568, 15.6298~15.6360 and 38.6664~38.6880. The comparison shows that the Sr-Nd-Pb isotope data of the syenite and carbonate in the three deposits are close, and it is likely that they are from the same syenite-carbonate complex. The existing diagenesis and metallogenic ages of the Mulozhai deposit are different due to the different testing methods and test minerals. In this study, phlogopite, which is closely co-existing with bastnaesite, was used for the Ar-Ar determination. In view of the fact that the phlogopite and bastnaesite do not have multiple stages in the ore, the age of the formation of phlogopite (27.6 ± 0.2) Ma is a good representative of the metallogenic age.

Key words: geology, metallogenic characteristics, geochemistry, material source, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age, Zhengjialiangzi ore block

木落寨中型稀土矿床位于冕宁-德昌REE矿带北段(侯增谦等, 2008), 是该矿带中第三大REE矿床, 由北向南分布碉楼山、方家堡(废弃)以及郑家梁子矿段。前人已对木落寨矿床进行了地质特征(田世洪等, 2005; 周家云等, 2006)、成矿作用(Hou et al., 2009; Liu et al., 2017)、成岩成矿年龄(田世洪等, 2006; 2008; Yang et al., 2014; Liu et al., 2015a; Ling et al., 2016)和流体包裹体(谢玉玲等, 2008)等方面研究, 但野外样品及数据均集中于碉楼山矿段。相比之下, 由于交通、气候和开采现场条件的限制, 采用洞采方式进行开采的郑家梁子矿段的地质研究工作十分薄弱, 需要进一步研究。

已有研究表明, 冕宁-德昌REE成矿带与碳酸岩-碱性正长岩在时空分布上密切相关(侯增谦等,

2008)。牦牛坪、里庄和大陆槽矿床的矿体主要赋存于碳酸岩-正长岩杂岩体中, 而在郑家梁子矿段中, 大理岩为主要的赋矿围岩, 矿洞内的观察显示, 少部分矿脉位于正长岩中, 碳酸岩出露极少, 大理岩与成矿之间的物质供应关系目前还不清楚。在1:5000野外地质调查的过程中, 对郑家梁子矿段Ⅱ期工程8号矿洞进行详细的剖面测量, 并查明矿石类型、控矿构造、成矿与大理岩之间的关系。通过对手标本的野外和镜下观察分析, 确定主要矿物的生成顺序。在此基础上, 对大理岩和正长岩进行全岩地球化学分析, 并对近矿、远矿大理岩以及矿脉中的方解石做微量元素与C-O同位素分析, 结合正长岩与氟碳铈矿的Sr-Nd-Pb同位素研究, 对稀土矿化和成矿物质来源作进一步探讨。

根据前人研究所得,木落寨金云母 Ar-Ar 年龄为 (35 ± 1) Ma (田世洪等, 2008); 木落寨氟碳铈矿 U-Pb 年龄为 (31.8 ± 2.1) Ma、 (33.0 ± 2.6) Ma 和 (33.3 ± 2.6) Ma (Yang et al., 2014); 氟碳铈矿 SIMS Th-Pb 年龄为 (26.9 ± 0.2) Ma (Ling et al., 2016)。由于测试技术和样品选取的不同导致测得的成矿年龄之间的差距较大,也可能成矿和热液活动的多期次性导致了不同年龄测试结果的出现,因此,有必要对矿物形成是否存在多期次进行研究。故文章选取郑家梁子矿段的典型矿石对其氟碳铈矿和金云母进行岩相学研究,并选取矿石中与氟碳铈矿共生的金云母进行年龄测试,进一步厘定郑家梁子矿段的成矿年龄。

1 区域地质背景

川西冕宁-德昌 REE 矿带(图1)位于扬子克拉通西缘,攀西裂谷带北段西侧,受雅砻江走滑断裂控制,北与鲜水河断裂相接(侯增谦等, 2008)。扬子克拉通西缘经新生代的碰撞造山作用,形成印度-亚洲大陆碰撞带东缘的锦屏山造山带。随之产生一系列新生代的走滑断裂系统,由西向东分布有西部的嘉黎、高黎贡走滑断裂,中部的巴塘-丽江(SN向)、哀牢山-红河(NW向)断裂,以及东部的鲜水河、小江走滑断裂。这些走滑断裂对印度-亚洲大陆碰撞引起的应力应变有吸收和调节的作用(侯增谦等, 2008)。

在印度-亚洲大陆碰撞带东缘,新生代频繁的岩浆活动使该地区形成一条由一系列新生代走滑断裂控制的半连续的钾质火成岩区(Guo et al., 2005)。该区东部发育有碳酸岩,与碱性正长岩一起构成川西的碳酸岩-碱性正长岩杂岩体(图1)。这些杂岩体大多侵位于元古代结晶基底和古生代—中生代沉积盖层中(田世洪等, 2006),常与稀土矿化在时空分布上关系密切,为 REE 矿床主要的赋矿围岩。杂岩体的形态规则不一,沿次级断裂呈 NNE、NNW 向展布,产状接近矿体产状,且其成岩时代与稀土矿成矿时代相近。冕宁-德昌 REE 矿带从北到南依次分布牦牛坪超大型、木落寨中型、里庄小型以及大陆槽大型 REE 矿床。

2 矿床地质特征

木落寨矿床位于冕宁-德昌 REE 矿带北段,是该矿带内的第三大矿床,从北到南可分为碉楼山-方家

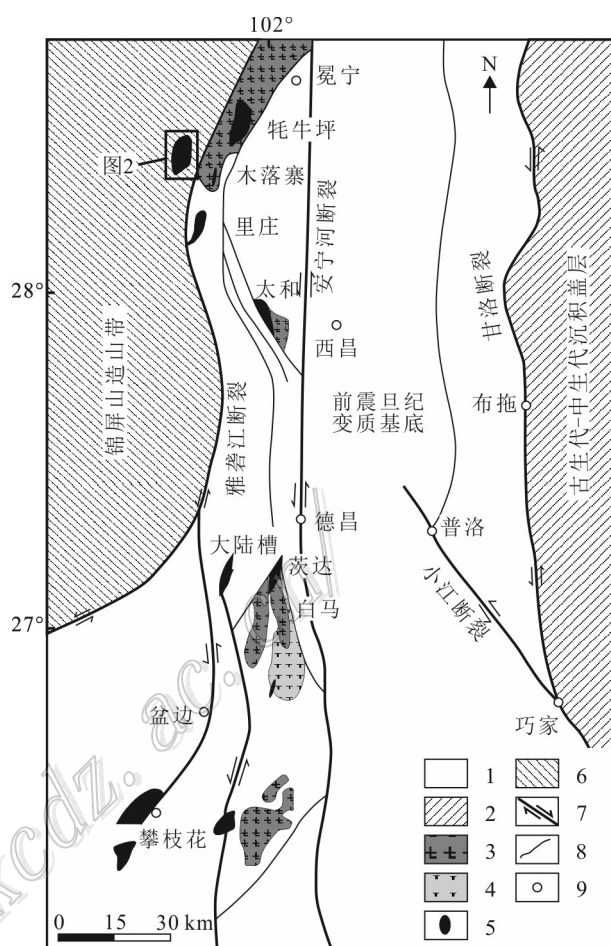


图1 川西新生代受活化断层控制的碳酸岩-碱性杂岩体分布范围的构造简图(据袁忠信等, 1995 修改)

1—前震旦纪变质基底; 2—古生代-中生代沉积盖层; 3—碱性花岗岩; 4—正长岩; 5—碳酸岩-碱性岩杂岩体; 6—锦屏山造山带; 7—走滑断裂; 8—地质界线; 9—地名

Fig.1 Structural diagram of the distribution range of carbonate-alkaline complexes controlled by activated faults in the Lenzozoic in western Sichuan (modified after Yuan et al., 1995)

1—Pre-Sinian metamorphic basement; 2—Paleozoic-Mesozoic sedimentary cover strata; 3—Alkalic granite; 4—Syenite; 5—Carbonatite-alkalic complex; 6—Jinshengshan orogenic belt; 7—Strike-slip fault; 8—Geological boundary; 9—Toponym

堡-郑家梁子3个矿段,其中碉楼山为一孤立岩体,方家堡矿段目前已基本废弃,郑家梁子矿段为北东-南西向的巨形板状矿体,地势较高,为木落寨矿区的主要赋矿段,也是本次重点研究的对象(图2)。

郑家梁子矿段主要出露古生代二叠纪地层,包括峨眉山组和阳新组,上二叠统峨眉山组主要为灰绿色变质玄武岩和角砾状玄武岩,靠近断层和矿带

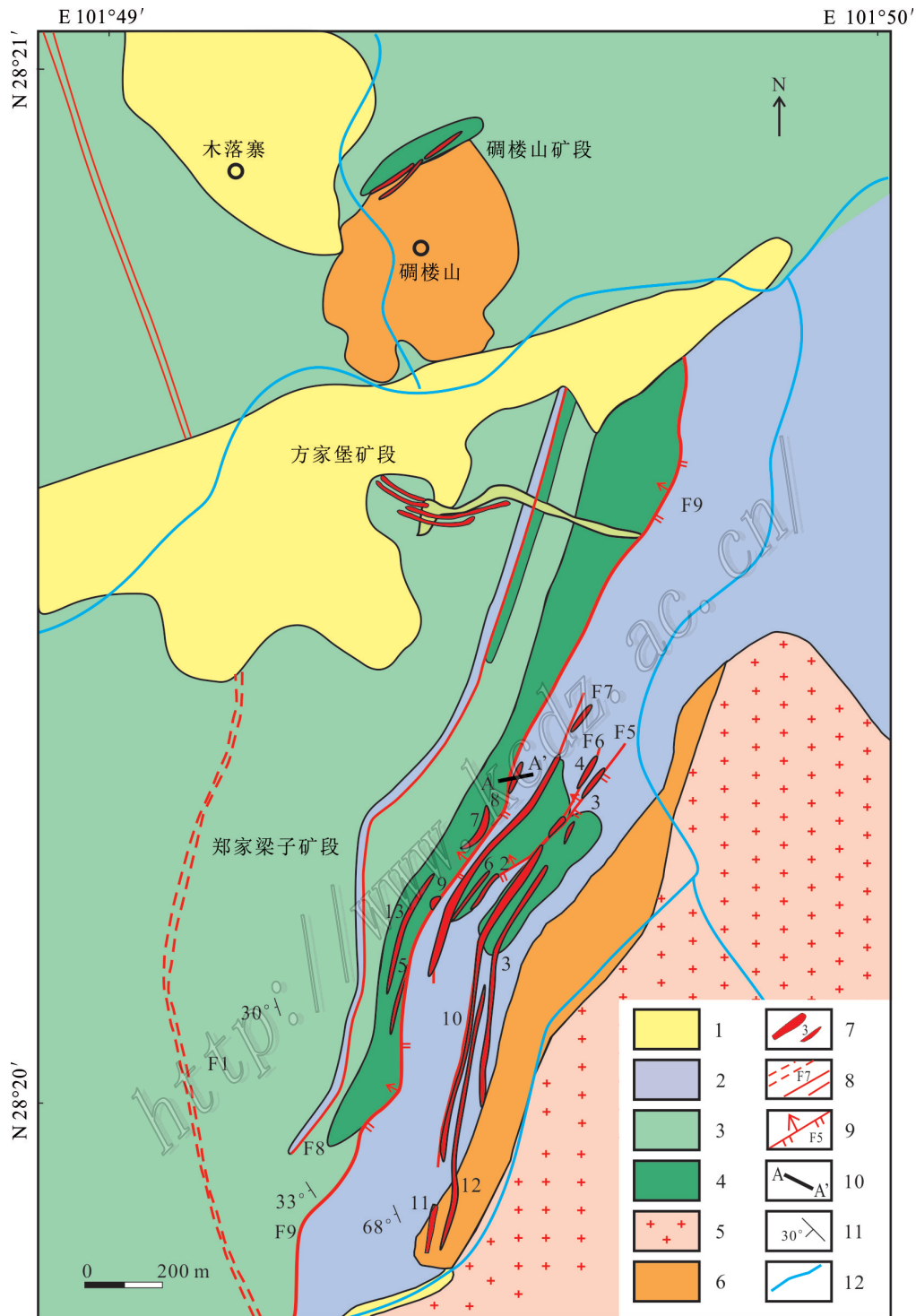


图2 木落寨矿床REE矿体分布及相关构造简要地质图(据胡泽松等,2008修改)

1—第四系;2—二叠纪大理岩;3—二叠纪玄武岩;4—绿泥石片岩;5—碱性花岗岩;6—正长岩;7—矿体及编号;8—推测、实测区域韧性剪切带及编号;9—实测断层及编号;10—实测剖面;11—产状;12—河流

Fig.2 Simplified geological map showing distribution of REE ore bodies and associated structures in Muluozhai deposit (Modified from Hu et al., 2008)

1—Quaternary; 2—Permian marble; 3—Permian basalt; 4—Chlorite schist; 5—Alkali granite; 6—Syenite; 7—Ore body and its number; 8—Presumed and measured ductile shear zones in the region and its number; 9—Measured fault and its number; 10—Measured section; 11—Occurrence; 12—River

附近,多变质为绿泥石片岩,片理构造发育。矿物成分主要为绿泥石(60%~70%),微粒石英、长石占20%~30%,副矿物有磁铁矿等。根据岩性特征将中二叠统阳新组划分为3段:下段(P_2y^1)为白云石大理岩,属于近矿围岩,中粗粒,厚度>135 m;中段(P_2y^2)为块状大理岩,厚度>100 m;上段(P_2y^3)为薄层状大理岩,厚度>50 m。受区域动力变质影响,峨眉山组玄武岩变为绿泥石片岩,而阳新组灰岩则变质为大理岩(周家云等,2006)。

矿区内的断裂构造发育,被棉纱湾断裂带与其次级断裂形成的“入”字形断层所控制,以北北东向($30^\circ\sim 40^\circ$)断裂为主,为矿体的延展和延深提供了空间和通道。F1区域性断层(茶铺子-巴折)从南部里庄延伸至本矿区(图2),该断裂呈南北向,经历过多次活动,发育韧性剪切带。次级控矿断层(F5-9)在空间上与F1呈“入”字形分布,为直接的储矿构造。郑家梁子矿段目前已发现和圈定的矿体共12个(图2),其中3、4、7、8、9与12号矿体为矿区主要矿体,单个矿体长200~400 m(个别可达700 m),厚度为1~27.5 m,储量为0.06 Mt,品位(REO)为3.17%~4.46%。矿体呈脉状、透镜状、似层状等产出,平行或雁行排列。大部分矿体赋存在大理岩中(图3a、b),只有11和12号以及3号矿体的局部产于正长岩。矿体主要受F5、F6、F7与F9共4条张性断层所控制,埋藏和延深都较大(胡泽松等,2008)。通过对郑家梁子矿段Ⅱ期工程8号矿洞内长约80 m的剖面观察(图4)发现,该矿段的稀土矿脉主要赋存于大理岩的层间裂隙以及少部分绿泥石片岩与大理岩的接触带上,呈雁列状和宽度不一的网脉状、平行脉状分布。该矿洞内围岩发育张性断裂,断裂中部有粗细不等的矿脉填充,宽5~40 cm,部分含断层角砾(图3c)。矿体整体走向与分布不规律,但在小范围内与含矿的大理岩裂隙产状相同。矿脉与围岩之间的接触界线清晰,脉体内矿物与围岩矿物共生组合差异较大,指示矿脉主要是由充填形成的。

在矿体与大理岩的接触面上可见与稀土矿化相关的重晶石化、萤石化、黄铁矿化等围岩蚀变,矿化主要发生在大理岩中。矿石矿物为氟碳铈矿。脉石矿物由萤石、重晶石、方解石、石英、云母、黄铁矿等组成。重晶石呈粗粒团块状,经历一定淋滤作用。黄铁矿常与氟碳铈矿伴生,中细粒,自形-半自形。萤石细粒状,常呈块状集合体。木落寨矿区萤石有多种颜色:绿色、无色和紫色,但郑家梁子矿段仅可

见紫色萤石,呈半自形-自形晶粒,具半透明、透明状玻璃光泽,常与氟碳铈矿伴生,与稀土矿化关系密切。

3 矿石矿相学特征

3.1 矿石特征

通过对矿洞中矿脉(图5a、b)的观察可知,矿脉整体呈暗色,主要的矿石矿物为黄褐色氟碳铈矿,呈浸染状或短柱状发育于脉石矿物解理和裂隙中,长2~5 cm,宽0.1~2 cm,半自形-自形晶。脉石矿物主要为方解石、萤石、重晶石及少量的黄铁矿和方铅矿,其中,方解石呈白色块状,解理和裂隙发育,充填有氟碳铈矿、萤石、黄铁矿等矿物;萤石呈致密集合体状发育于方解石中;重晶石叠生在方解石和萤石之上;黄铁矿与方铅矿呈粒状集合体分布于方解石和氟碳铈矿中。

浸染状矿石手标本(图5c、d),整体为黄白色,氟碳铈矿主要呈浸染状发育于方解石的解理中,为黄褐色,长1~5 cm,宽0.2~1 cm,半自形-自形,部分呈粒状集合体嵌于方解石与萤石间,玻璃光泽,约占30%。主要的脉石矿物可见方解石、萤石、重晶石、黄铁矿和方铅矿。方解石呈白色团块状,解理发育,半自形-他形,粒度0.5~3 cm,约40%。萤石为紫黑色,呈粒状分布于方解石中,常与氟碳铈矿共生,半自形-他形,粒径<0.2 cm,整体约占15%。方铅矿为钢灰色,单矿物呈粒状分布于方解石中,粒径小于0.1 cm,集合体呈0.5~1 cm的脉状切穿方解石和氟碳铈矿,约10%。

3.2 矿物特征

郑家梁子稀土矿段在成矿过程中,萤石、重晶石对于成矿作用极为重要。故而笔者选取典型矿石,对矿石中的氟碳铈矿以及方解石、萤石等脉石矿物进行镜下观察与电子探针分析,总结各种矿物的特征和生成顺序。

氟碳铈矿颜色从黄褐色到浅黄色不等。从BSE图可以看出,氟碳铈矿晶形大多数为半自形-自形柱状,晶型单一且较完整,显示其只存在一个世代,切入到方解石和萤石当中(图5e~h),多沿方解石脉的解理方向结晶,显示其结晶空间充足,物质来源充分。方解石为含矿热液的主要产物,在矿石中含量为35%~60%之间,白色,致密块状,中细粒较自形,被萤石、氟碳铈矿等矿物切穿,形成于热液阶段早

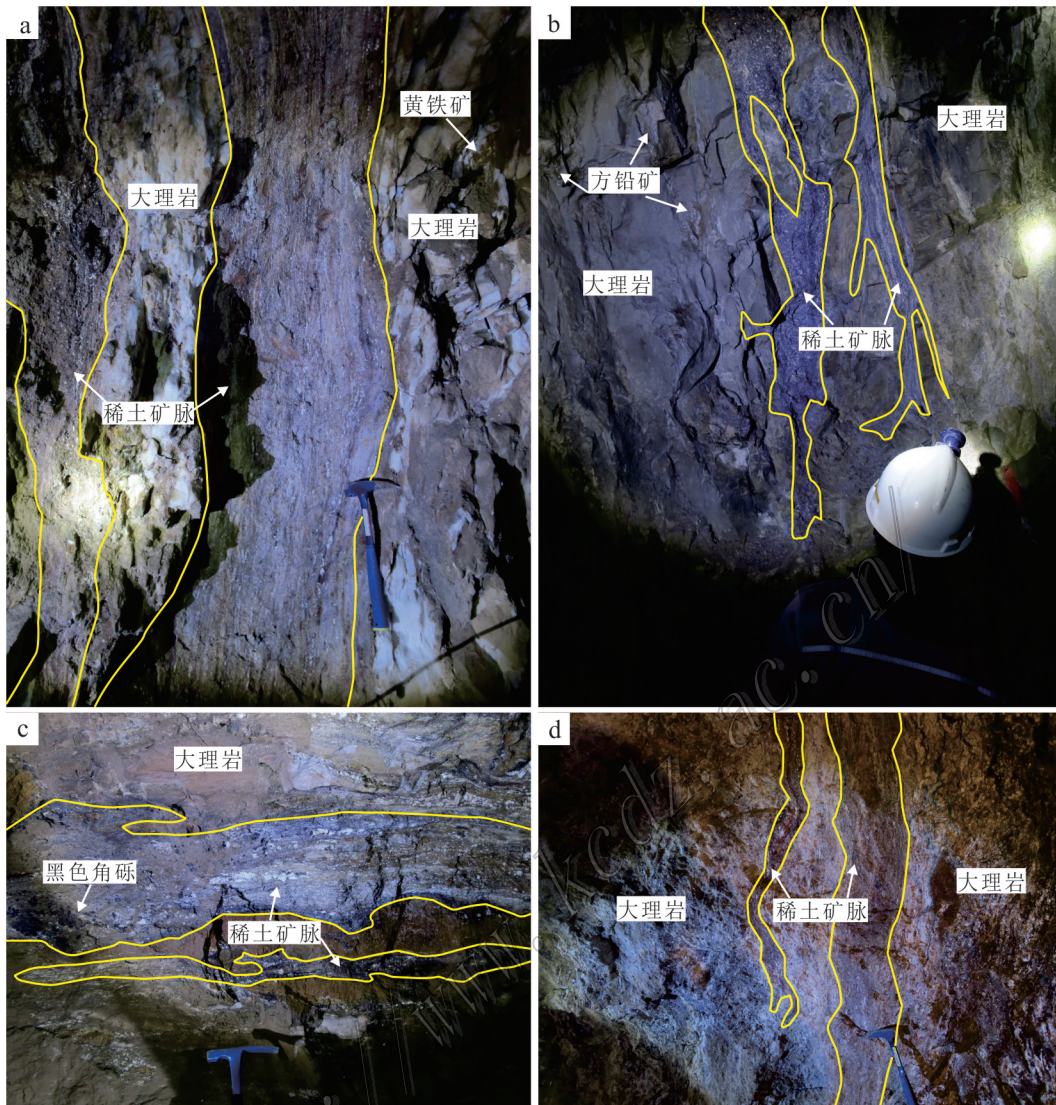


图3 郑家梁子矿段8号矿洞中矿脉与大理岩照片

- a. 稀土矿粗脉与大理岩的分界,大理岩中含黄铁矿脉;
- b. 稀土矿细脉与大理岩的分界,大理岩中含方铅矿脉;
- c. 含黑色角砾稀土矿脉,矿脉顺层发育;
- d. 稀土矿细脉与大理岩的分界,大理岩内方解石颗粒粗大

Fig. 3 Photos of veins and marble from the No. 8 mine in Zhengjialiangzi ore block

- a. The boundary between the coarse REE veins and the marble containing pyrite veins;
- b. The boundary between the REE stringers and the marble containing galena veins;
- c. REE veins with black breccia developed in bedding;
- d. The boundary between the REE stringers and the marble containing coarse calcite

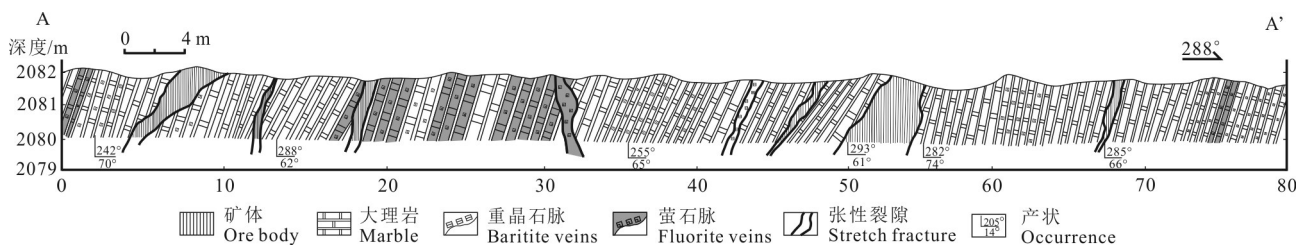


图4 郑家梁子矿段8号矿洞实测地质剖面图

Fig.4 Measured geological section along the No.8 mine of Zhengjialiangzi ore block

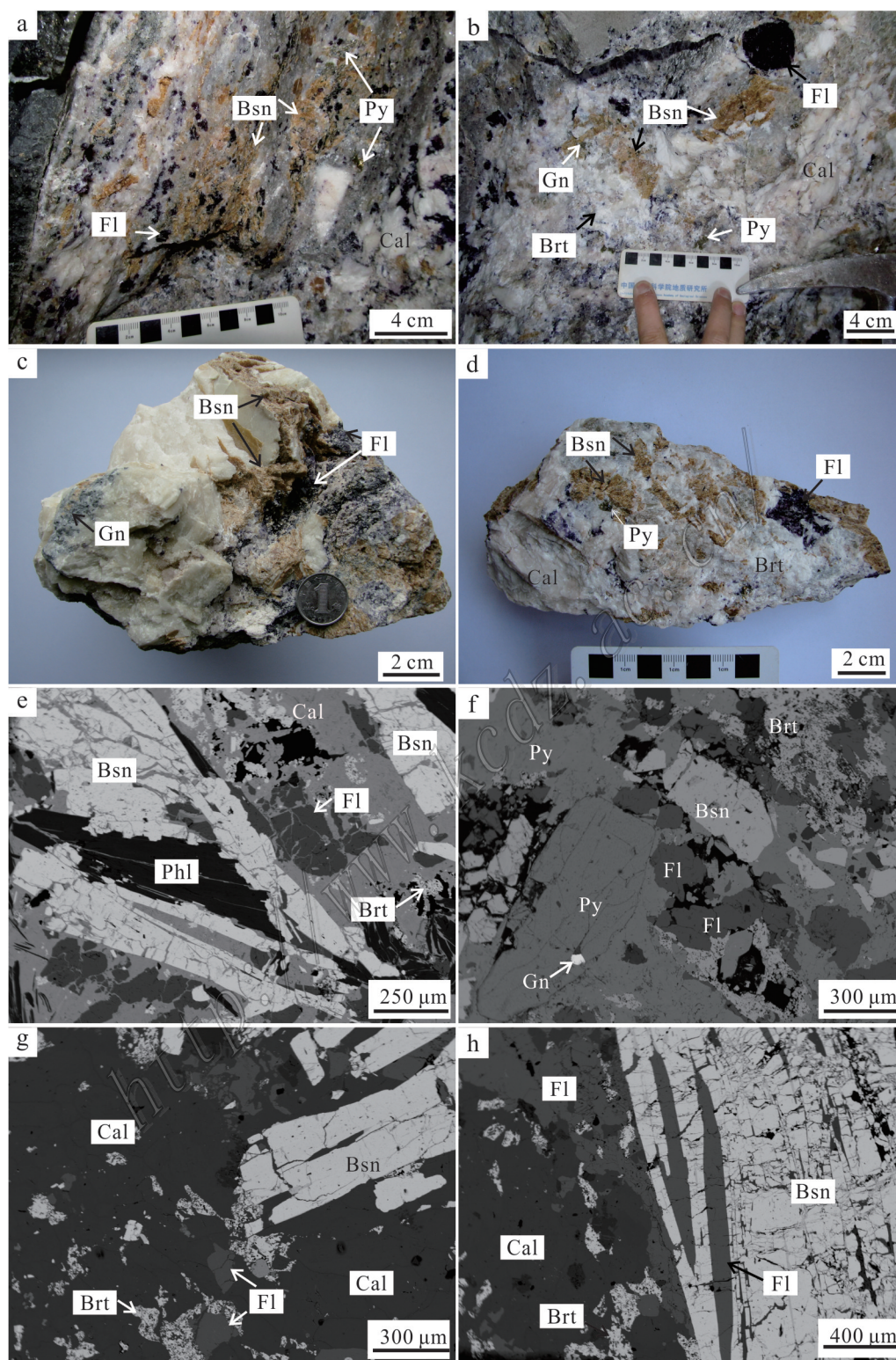


图5 郑家梁子矿段矿脉、典型矿石及显微结构照片

a. 野外照片, 氟碳铈矿呈浸染状穿插方解石, 叠加在紫色萤石上, 可见黄铁矿; b. 矿脉野外照片, 氟碳铈矿穿插方解石, 紫色萤石与重晶石呈集合体穿插方解石中, 可见方铅矿+黄铁矿; c. 浸染状矿石, 含黄褐色氟碳铈矿+白色方解石+灰色方铅矿+紫色萤石; d. 浸染状矿石, 含黄褐色氟碳铈矿+白色方解石+白色重晶石+紫黑色萤石+黄铁矿; e. BSE 图下氟碳铈矿呈长柱状, 晶型完整, 叠加在早期生成的方解石、萤石之上, 与金云母密切共生; f. BSE 图下氟碳铈矿呈柱状叠加在萤石上, 黄铁矿叠加在氟碳铈矿上, 方铅矿

穿插黄铁矿; g. BSE图下氟碳铈矿呈长柱状, 产在方解石上, 萤石叠加在重晶石上, 二者穿插方解石;
 h. BSE图下柱状氟碳铈矿叠加在萤石上, 萤石和重晶石叠加在方解石上
 Cal—方解石; Bsn—氟碳铈矿; Fl—萤石; Phl—金云母; Gn—方铅矿; Py—黄铁矿; Brt—重晶石

Fig. 5 Photos of vein, typical ore and microstructure of breccia ore from the Zhengjialiangzi ore block

a. Field photo of ore vein, the bastnaesite is impregnated with intercalated calcite, superimposed on purple fluorite, visible pyrite; b. Field photo of ore vein, the bastnaesite is interspersed with calcite, purple fluorite and barite are aggregated with calcite, visible galena + pyrite; c. Dip-like ore with yellow-brown bastnaesite + white calcite + gray galena + purple fluorite; d. Dip-like ore, containing yellow-brown bastnaesite + white calcite + white barite + purple black fluorite + pyrite; e. In the BSE diagram, the bastnaesite is long columnar and completely in crystal form. It is superimposed on the calcite and fluorite formed earlier and closely associated with the phlogopite.; f. In the BSE diagram, the bastnaesite is superimposed on the fluorite in a column, the pyrite is superimposed on the bastnaesite, and the galena is interspersed with pyrite; g. In the BSE diagram, the bastnaesite is long columnar, superimposed on the calcite, and the fluorite is superimposed on the barite. They are interspersed with calcite; h. In the BSE diagram, columnar bastnaesite is superimposed on fluorite, and fluorite and barite are superimposed on calcite
 Cal—Calcite; Bsn—Bastnaesite; Fl—Fluorite; Phl—Phlogopite; Gn—Galena; Py—Pyrite; Brt—Barite

期。萤石颜色从紫色到紫黑色不等, 他形, 镜下显示其呈粒状集合体产在方解石与氟碳铈矿中。方铅矿单颗粒为细粒, 钢灰色, 呈集合体不规则带状或脉状分布, 切穿方解石和氟碳铈矿。显微镜下BSE图(图5e)显示金云母呈板片状, 与氟碳铈矿密切共生, 叠加在早期形成的方解石之上。

野外剖面观察以及电子探针实验可以确定郑家梁子矿段矿物的共生组合为方解石、氟碳铈矿、萤石、钾长石、方铅矿以及较少的重晶石与金云母。根据穿插关系确定氟碳铈矿晚于方解石早于方铅矿形成, 显示矿物生成顺序为方解石-萤石-重晶石-金云母-氟碳铈矿-黄铁矿-方铅矿。通过详细的观察并与同一成矿带内碳酸岩型稀土矿床的

牦牛坪和大陆槽矿床矿物生成顺序(Liu et al., 2017)进行对比, 划分出郑家梁子矿段矿物的生成顺序表(图6)。

4 样品分析方法

样品取自四川冕宁县木落寨矿床郑家梁子矿段, 在矿洞内采集浸染状矿石、近矿蚀变大理岩、远矿新鲜大理岩及正长岩。

本文对郑家梁子矿段内的浸染状矿石进行了电子探针测试, 电子探针实验是在中国地质科学院矿产资源研究所完成, 用JXA-8230型电子探针分析和配套的电脑采集。硫化物在20 kV的操作环境下进

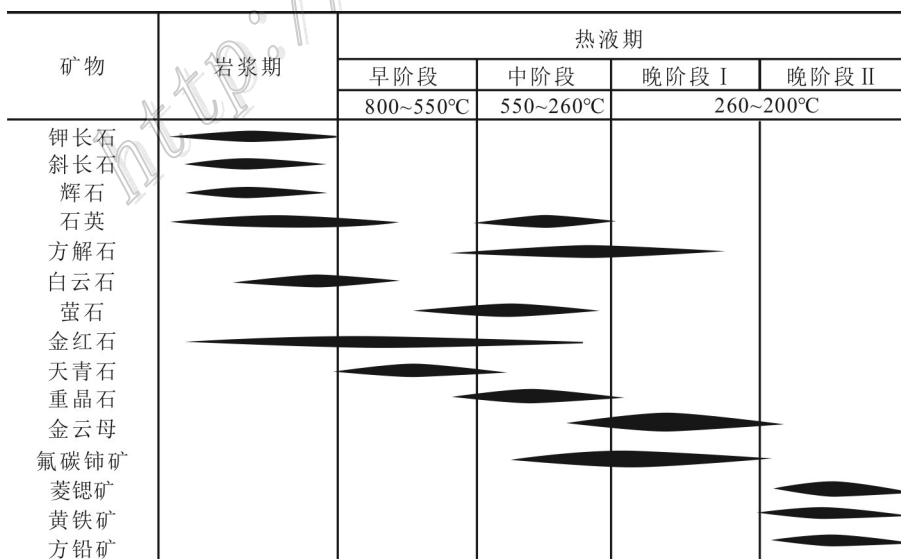


图6 郑家梁子矿段矿物生成顺序表

Fig.6 Mineral generation sequence of the Zhengjialiangzi ore block

行,硅酸盐和氧化物在15 kV的操作环境下进行,电流为20 mA的,波长为5 μm 。分析精度为0.01%。

全岩地球化学分析在国土资源部中国地质科学院国家地质测试中心完成。主量元素的分析是在荷兰帕纳科公司Axios波长色散X射线荧光光谱仪(XRF)上完成,分析进度优于5%;微量元素的分析则在高分辨率等离子质谱仪(ICP-MS)上完成,分析精度优于10%。相关测试流程见Liu等(2015b; 2015c)。

LA-ICP-MS碳酸盐矿物原位微量测试在南京聚谱检测科技有限公司完成。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于矿物表面,能量密度为6.06 J/cm²,束斑直径为40 μm ,频率为5 Hz,共剥蚀40 s,剥蚀气溶胶由氦气送入ICP-MS完成测试。碳酸盐矿物选用美国NIST生产的熔融玻璃NIST 610和NIST 612作为测试标样。

碳氧同位素分析在国土资源部同位素地质重点实验室MAT-251EM型质谱计上完成。碳酸盐样品采用正磷酸方法,分析精度均为 $\pm 0.2\%$,C和O相对标准分别为V-PDB和V-SMOW。

Sr-Nd-Pb同位素组成在中国地质科学院同位素地质实验室进行分析。Sr同位素测量在MAT262质谱仪上进行。Sr同位素比的质量分数校正基于 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375\ 21$ 。国际标准NBS987的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710\ 250\pm 10(2\sigma)$ 。Nd同位素测量在Nu Plasma HRMC-ICP-MS(Nu Instruments)262质谱仪上进行。同位素分馏校正基于 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 。国际标准是JMC Nd₂O₃, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511\ 125\pm 10(2\sigma)$ 。对于Sr,整个程序空白小于 $10^{-9}\ \text{g}$,对于Nd,小于 $5\times 10^{-11}\ \text{g}$ 。分析误差以 2σ 给出。使用Rb、Sr、Sm和Nd元素的浓度计算 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值,并且使用SHRIMP计算初始 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值。根据相应正长岩的年龄计算初始 ϵ_{Nd} 值和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。Pb同位素的测量分析使用以下国际标准NBS981的值: $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.1674\pm 0.0004$; $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.914\ 78\pm 0.000\ 18$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.9402\pm 0.0070$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.4966\pm 0.0030$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.7155\pm 0.0120(2\sigma)$ 。

用于Ar-Ar定年的矿物为浸染状矿石中的金云母,用超声波清洗纯度较高的金云母。清洗后的金云母放到石英瓶中,然后再送到核反应堆中进行中子照射。该工作是在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行的,使用B4孔道,中子流密度约为

$2.65\times 10^{13}\ \text{n}\ \text{cm}^{-2}\ \text{S}^{-1}$ 。照射总时间为1502 min,积分中子通量为 $2.39\times 10^{18}\ \text{n}\ \text{cm}^{-2}$;标准样也要在该时候接受中子照射:标样为国内的ZBH-25黑云母,它的标准年龄为 $(132.7\pm 1.2)\ \text{Ma}$, $w(\text{K})$ 为7.6%。使用石墨炉对金云母样品进行阶段升温加热,每个温度阶段加热10 min,然后净化20 min。利用多接收稀有气体质谱仪Helix MC进行质谱分析,每个峰值都收集20组数据,等这些数据回归到时间零点值后再进行校正。通过分析照射过的K₂SO₄和CaF₂来获得照射过程中所产生的干扰同位素校正系数,这些系数值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})\text{Ca}=0.000\ 239\ 8$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})\text{K}=0.004\ 782$ 和 $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})\text{Ca}=0.000\ 806$ 。 ^{37}Ar 通过放射性衰变校正; ^{40}K 衰变常数 $\lambda=5.543\times 10^{-10}\ \text{a}^{-1}$ (Steiger et al., 1977);用ISOPLOT软件来获得坪年龄及对应的正、反等时线年龄(Ludwig, 2001)。坪年龄误差在表中为 2σ 。陈文等(2006)和张彦等(2006)对这些实验流程有详细的描述。

5 测试结果分析

5.1 电子探针分析

郑家梁子矿段浸染状矿石中主要矿物的电子探针数据(表1)表明,主要的矿石矿物氟碳铈矿富集轻稀土元素。其中,轻稀土元素氧化物La₂O₃+Ce₂O₃+Pr₂O₃+Nd₂O₃+Sm₂O₃>56.83%,金云母富集 $w(\text{MgO})$ (21.2%~21.5%),富 $w(\text{F})$ (7.27%~7.86%),相对贫 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ (3.45%~3.68%)。重晶石显著富集 $w(\text{BaO})$ (63.2%~63.3%)与 $w(\text{SO}_3)$ (32.6%~32.8%)。长石富集 $w(\text{SiO}_2)$ (66.3%~66.8%)、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (17.4%~17.9%)以及 $w(\text{K}_2\text{O})$ (15.1%~15.4%),表明其为钾长石。

氟碳铈矿及与之共生的金云母中富集F表明矿物体含有较高的F离子,前人研究证明富F的流体有利于稀土元素的运移和富集(Williams-Jones et al., 2000; 2014)。

5.2 全岩与矿物稀土元素分析

本次研究选取郑家梁子矿段中近矿大理岩3件、远矿大理岩2件和正长岩2件样品进行全岩稀土元素分析,结果(表2)显示,近矿大理岩总稀土元素含量为 $1535\times 10^{-6}\sim 1936\times 10^{-6}$,LREE= $1473\times 10^{-6}\sim 1858\times 10^{-6}$,HREE= $61.6\times 10^{-6}\sim 98.6\times 10^{-6}$,LREE/HREE=17.0~23.9,稀土元素配分曲线呈右倾趋势(图7a)。远矿大理岩总稀土元素含量为 $8.20\times 10^{-6}\sim 8.69\times 10^{-6}$,LREE= $7.32\times 10^{-6}\sim 7.66\times 10^{-6}$,HREE= $0.88\times 10^{-6}\sim 1.03\times$

表1 郑家梁子矿段浸染状矿石中主要矿物电子探针结果

Table 1 Electron probe results of major minerals within disseminated ore from the Zhengjialiangzi ore block

组分	氟碳铈矿		金云母		重晶石		钾长石	
	P1L2-5-2-3	P1L2-5-2-4	P1L2-5-2-1	P1L2-5-2-2	ZJLZ18403-2-3	ZJLZ18403-2-4	P1L2-5-2-7	P1L2-5-2-8
	w(B)/%							
SiO ₂	0	0.04	50.5	51.3	0.04	0.05	66.8	66.3
TiO ₂	0	0	0.39	0.44	0	0.02	0	0
Al ₂ O ₃	0	0	6.67	5.72	0.29	0.25	17.4	17.9
FeO ^T	0	0.01	3.68	3.45	0.01	0.06	0.26	0.10
MnO	0	0	0	0.01	0.02	0.06	0	0.02
MgO	0	0	21.5	21.2	0.01	0.02	0	0
CaO	0.14	0.12	0	0.01	0.24	0.13	0	0
Na ₂ O	0	0.01	0.13	0.12	0.12	0.20	0.36	0.26
K ₂ O	0.01	0.01	10.3	10.1	0.02	0	15.1	15.4
P ₂ O ₅	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0
F	8.15	8.47	7.27	7.86	0.05	0.10	0.15	0
Cl	0.05	0.05	0	0.01	0	0	0	0
SO ₃	0.01	0.01	0	0.03	32.8	32.6	0	0
BaO	0	0	0.05	0	63.3	63.2	0.05	0.08
SrO	0.25	0.12	0	0	2.40	2.72	0	0
La ₂ O ₃	14.3	13.8	0	0	0	0	0.06	0.10
Ce ₂ O ₃	33.7	32.9	0.05	0.05	0.04	0.04	0.08	0
Pr ₂ O ₃	2.81	2.85	0	0	0	0	0.01	0
Nd ₂ O ₃	6.01	5.97	0.02	0.03	0.08	0.12	0.01	0.05
Sm ₂ O ₃	0.02	0.11	0	0	0	0	0.03	0
Eu ₂ O ₃	0	0	0.08	0.09	0.05	0	0	0
总和	65.4	64.4	101	100	99.5	99.6	100	100

注:由于氟碳铈矿中含CO组分,电子探针未检测CO₂成分,2个氟碳铈矿电子探针分析结果总和低。

10⁻⁶, LREE/HREE=7.44~8.32。而正长岩总稀土元素含量为 1211 × 10⁻⁶~2974 × 10⁻⁶, 其中 LREE=1173 × 10⁻⁶~2906 × 10⁻⁶, HREE=38.1 × 10⁻⁶~68.7 × 10⁻⁶, 具有较高的 LREE/HREE(30.8~42.5)与 La_N/Yb_N 比值(93.4~192), 同样呈右倾的稀土元素配分曲线(图 7a), 无明显 Ce、Eu 异常。通过对比可知, 郑家梁子矿段的正长岩与牦牛坪、里庄的碳酸岩-正长岩有相似的稀土元素富集特征, 稀土元素含量与轻、重稀土元素比值都非常接近。

对矿脉中的氟碳铈矿与方解石以及远矿新鲜大理岩中的方解石各 3 件进行单矿物稀土元素分析, 结果(表 3)显示, 氟碳铈矿总稀土元素含量为 835 297 × 10⁻⁶~838 805 × 10⁻⁶, LREE=832 228 × 10⁻⁶~837 078 × 10⁻⁶, HREE=1727 × 10⁻⁶~3069 × 10⁻⁶, LREE/HREE=271~485, 稀土元素配分曲线呈右倾趋势, 没有明显的 Ce、Eu 异常(图 7b); 矿脉中的方解石总稀土元素含量为 829 × 10⁻⁶~997 × 10⁻⁶, LREE=799 × 10⁻⁶~

967 × 10⁻⁶, HREE=30.2 × 10⁻⁶~47.0 × 10⁻⁶, LREE/HREE=18.6~32.0, 稀土元素配分曲线也呈右倾趋势, 与氟碳铈矿相比倾斜度较小(图 7b); 新鲜大理岩中的方解石总稀土元素含量为 3.96 × 10⁻⁶~16.7 × 10⁻⁶, LREE=3.77 × 10⁻⁶~16.5 × 10⁻⁶, HREE=0.19 × 10⁻⁶~0.38 × 10⁻⁶, LREE/HREE=19.8~75.0。

5.3 C-O 同位素分析

本文对郑家梁子矿段的 9 件样品(1 号矿脉中的方解石 3 件, 近矿大理岩 3 件, 远矿新鲜大理岩 3 件)进行 C-O 同位素测试分析, 其中 3 件方解石的 δ¹³C_{V-PDB} 变化范围为 -4.6‰~-4.7‰, δ¹⁸O_{V-SMOW} 介于 11.8‰~12.5‰ 之间, 属于低温蚀变的产物; 3 件远矿新鲜大理岩的 δ¹³C_{V-PDB} 变化范围为 1.3‰~1.6‰, δ¹⁸O_{V-SMOW} 介于 23.2‰~23.7‰ 之间, 属于海相碳酸盐岩变质的产物; 3 件近矿大理岩的 δ¹³C_{V-PDB} 变化范围为 0.4‰~0.7‰, δ¹⁸O_{V-SMOW} 介于 15.7‰~16.0‰ 之间(表 4, 图 8)。

表 2 郑家梁子矿段正长岩、大理岩全岩稀土元素分析结果

Table 2 REE results of syenite and marble from the Zhengjialiangzi ore block

组分	正长岩		大理岩(近矿)			大理岩(远矿)	
	P3L1-1-0	ZJLZ19-2	P1L1-2-3	P1L1-4-7	P1L2-5-1	MLZ01-2	MLZ01-4
	$w(B)/10^{-6}$						
La	847	323	380	462	378	2.11	2.66
Ce	1398	539	699	895	791	3.32	2.74
Pr	137	59.4	80.4	99.9	96.9	0.4	0.35
Nd	455	216	270	342	341	1.47	1.23
Sm	56.4	29.0	33.4	46.0	50.0	0.28	0.26
Eu	12.3	6.66	10.1	12.7	14.6	0.08	0.08
Gd	34.3	16.3	29.6	40.2	45.9	0.31	0.23
Tb	3.86	2.11	3.38	4.28	5.34	0.05	0.05
Dy	16.7	9.97	14.2	17.7	24.1	0.25	0.20
Ho	2.49	1.56	2.30	2.66	3.65	0.05	0.05
Er	5.45	3.71	6.19	6.89	9.98	0.14	0.14
Tm	0.81	0.57	0.80	0.87	1.30	0.05	0.05
Yb	4.55	3.46	4.57	4.81	7.32	0.13	0.11
Lu	0.58	0.46	0.58	0.60	0.97	0.05	0.05
ΣREE	2974	1211	1535	1936	1770	8.69	8.20
LREE	2906	1173	1473	1858	1672	7.66	7.32
HREE	68.7	38.1	61.6	78.0	98.6	1.03	0.88
LREE/HREE	42.3	30.8	23.9	23.8	17.0	7.44	8.32

表 3 郑家梁子矿段方解石、氟碳铈矿稀土元素分析结果

Table 3 REE results of calcite and bastnaesite from the Zhengjialiangzi ore block

组分	方解石(矿脉)			氟碳铈矿			方解石(大理岩)		
	ZJLZ10-1	ZJLZ10-2	ZJLZ10-3	ZJLZ8-1	ZJLZ8-8	ZJLZ1(2)-1	ZJLZ4-1-1	ZJLZ4-1-2	ZJLZ4-1-2
	$w(B)/10^{-6}$								
La	182	227	160	384497	363240	325665	7.26	1.69	7.29
Ce	410	464	387	352531	366135	377283	6.71	1.34	7.18
Pr	48	50.4	44.7	25840	27612	30657	0.5	0.12	0.56
Nd	194	194	177	69248	76091	91490	1.26	0.55	1.31
Sm	31.4	25.6	24.3	3117	3526	6168	0.14	0.06	0.11
Eu	7.99	5.64	5.67	406	474	965	0.02	0.01	0.05
Gd	22.4	15.5	15.6	1782	1552	2583	0.07	0.03	0.08
Tb	2.3	1.47	1.47	58.1	56.5	125	0.02	0	0.01
Dy	11	6.35	6.88	85.3	92.9	285	0.14	0.08	0.04
Ho	1.85	1.18	1.14	7.56	7.98	27.1	0.02	0.01	0.01
Er	4.63	2.66	2.61	14.6	15.4	39.8	0.05	0.02	0.05
Tm	0.63	0.38	0.35	0.53	0.53	2.13	0.01	0.01	0.01
Yb	3.67	2.35	1.99	1.40	1.13	6.28	0.07	0.03	0.02
Lu	0.48	0.29	0.25	0.19	0.16	0.50	0	0.01	0
ΣREE	920	997	829	837589	838805	835297	16.3	3.96	16.7
LREE	873	967	799	835639	837078	832228	15.9	3.77	16.5
HREE	47.0	30.2	30.3	1950	1727	3069	0.38	0.19	0.22
LREE/HREE	18.6	32.0	26.4	429	485	271	41.8	19.8	75.0

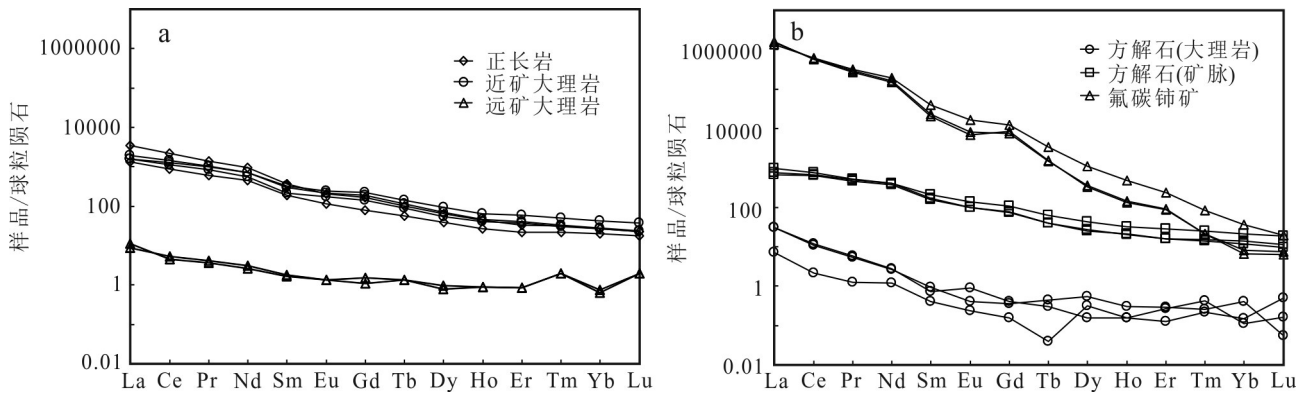


图7 郑家梁子矿段正长岩、大理岩(a)和方解石、氟碳铈矿(b)稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(标准化值据Sun et al., 1989)
 Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns for syenite and marble (a), calcite and bastnaesite (b) of the Zhengjialiangzi ore block (normalized values after Sun et al., 1989)

5.4 Sr-Nd-Pb 同位素

郑家梁子矿段正长岩和矿石中的氟碳铈矿的Sr-Nd-Pb同位素分析结果见表5,来自矿段中2个不同剖面的正长岩的¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd值均较低(0.0491~0.0794),¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd的值变化小(0.512387~0.512414),(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i的值介于0.705423~0.705915之间,且ε_{Nd}(t)值变化不大(-4.21~-3.69),均为负值,Nd二阶段模式年龄值(T_{DM}(Ga))为0.70~0.82。在(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-ε_{Nd}(t)图(图9a)中,样品投影点落在富集地幔I与富集地幔II连线附近,且靠近富集地幔I。

正长岩的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb分别为18.3233~18.3568,15.6298~15.6360和38.6664~38.6880,氟碳铈矿的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb分别为18.3143~18.3629,15.6243~15.6349

和38.6197~38.7309。在²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb图(图9b)中,2种样品4个投影点均位于富集地幔I与富集地幔II连线,且二者投影几乎重叠。

5.5 Ar-Ar 年龄

用于年龄测定的样品为与氟碳铈矿共生的金云母,测试结果见表6。从表6和图10中可以看出:样品ZJLZ15-8年龄谱微波波动。从图10中可以看出占³⁹Ar总释放量约98.8%的连续的7个温度段给出了ZJLZ15-8的反等时线年龄为(27.11±0.53)Ma(MSWD=5.4)和坪年龄(27.60±0.20)Ma(MSWD=0.64)。由年龄谱特征来看,样品中均不含过剩氩,且⁴⁰Ar/³⁶Ar初始值为310±20与大气值在误差范围内一致。

表4 郑家梁子矿段大理岩与矿脉中方解石C-O同位素组成
 Table 4 C-O isotopic compositions of calcite in marble and vein from the Zhengjialiangzi ore block

样号	样品名称	δ ¹³ C _{V-PDB} /‰	δ ¹⁸ O _{V-PDB} /‰	δ ¹⁸ O _{V-SMOW} /‰
ZJLZ3-3	远矿大理岩	1.3	-7.0	23.7
ZJLZ3-4	远矿大理岩	1.3	-7.5	23.2
ZJLZ4-4	远矿大理岩	1.6	-7.3	23.4
ZJLZ8-5-2	方解石	-4.7	-18.5	11.8
ZJLZ8-5-3	方解石	-4.6	-17.9	12.5
ZJLZ8-5-4	方解石	-4.7	-18.1	12.3
ZJLZ7-1-1	近矿大理岩	0.7	-14.5	16
ZJLZ7-1-2	近矿大理岩	0.4	-14.8	15.7
ZJLZ2-2	近矿大理岩	0.7	-13.2	17.3

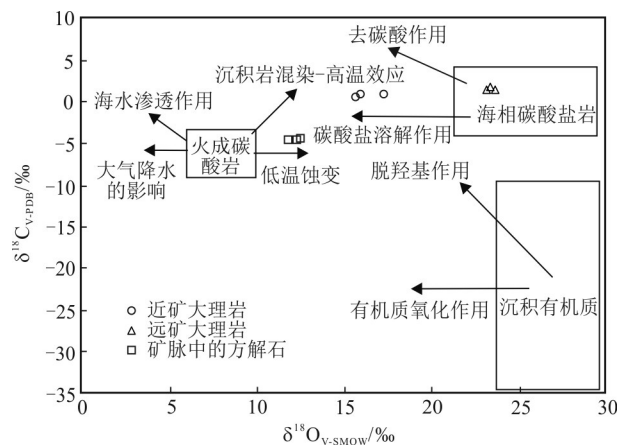


图8 郑家梁子矿段大理岩与矿脉中方解石C-O同位素组成
 Fig 8 C-O isotopic compositions of calcite in marble and vein from the Zhengjialiangzi ore block

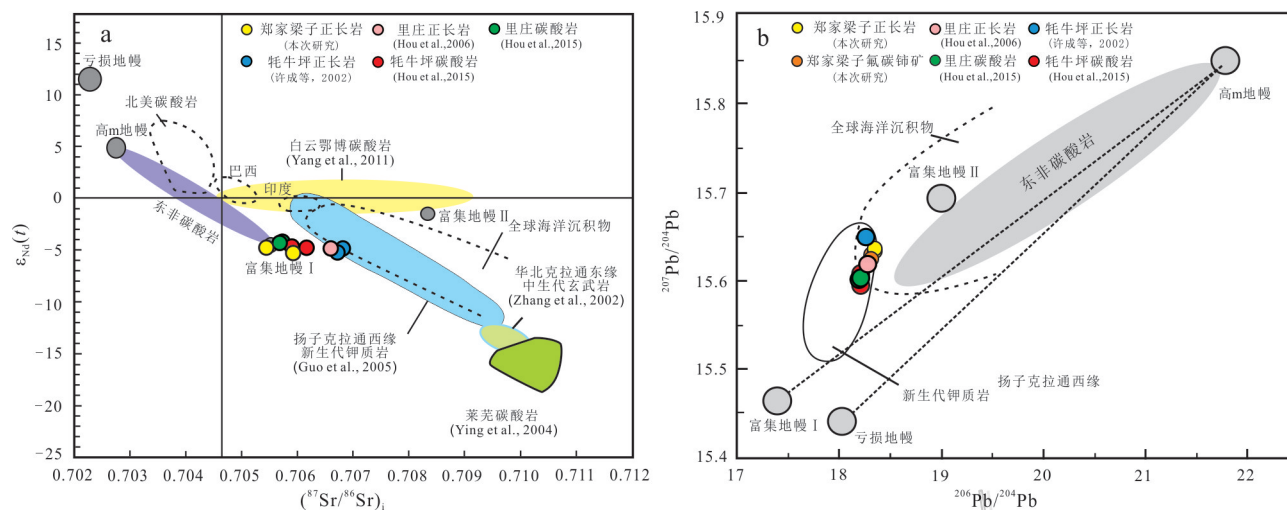


图 9 郑家梁子矿段正长岩 Sr-Nd-Pb(a)和氟碳铈矿 Pb 同位素组成(b)(据 Hou et al., 2015 修改)

Fig. 9 Sr-Nd-Pb isotopic compositions of syenite (a) and Pb isotopic compositions of bastnaesite from the Zhengjialiangi ore block (b, modified after Hou et al., 2015)

表 5 郑家梁子矿段正长岩 Sr-Nd-Pb 和氟碳铈矿 Pb 同位素组成

Table 5 Sr-Nd-Pb isotopic compositions of syenite and Pb isotopic compositions of bastnaesite from the Zhengjialiangi ore block

样号	样品名称	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _t	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	ε _{Nd} (t)	T _{DM} /Ga	备注
ZJLZ-102	氟碳铈矿	18.314	15.624	38.620								本文
ZJLZ-103-2	氟碳铈矿	18.363	15.635	38.731								本文
P1L3-7-3	正长岩	18.357	15.636	38.688	11.430	0.705915	0.705915	0.04910	0.512387	-4.2	0.70	本文
P3L1-1-0	正长岩	18.323	15.630	38.666	7.607	0.705423	0.705423	0.07940	0.512414	-3.7	0.82	本文
MNP-15-1	正长岩	18.270	15.648	38.611	1.770	0.706796	0.706796	0.07796	0.512422	-3.7	0.82	许成等,2002
LZ-08	长石(正长岩)	18.295	15.618	38.557	0.034	0.706578	0.706578	0.07792	0.512423	-3.7	0.82	Hou et al.,2006
MNP11-1-5	碳酸岩	18.224	15.608	38.505	0.002	0.705897	0.705896	0.08385	0.512439	-3.6	0.84	Hou et al.,2015
MNP-147	碳酸岩	18.221	15.594	38.453	0.002	0.706156	0.706155	0.09410	0.512417	-3.7	0.94	Hou et al.,2015
LZ11-1-4	碳酸岩	18.213	15.604	38.426	0.001	0.705674	0.705674	0.07295	0.512453	-3.2	0.76	Hou et al.,2015
LZ11-1-5	碳酸岩	18.209	15.601	38.416	0.001	0.705733	0.705732	0.07459	0.512449	-3.1	0.77	Hou et al.,2015

6 讨论

6.1 构造与成矿特征

川西冕宁-德昌稀土成矿带位于印度-亚洲大陆碰撞带东缘,该矿带内的矿床受一系列新生代走滑断裂系统控制(Hou et al., 2009)。整个矿带中不同矿床均受不同类型的控矿构造控制,并形成不同的矿化样式。根据已有研究,牦牛坪矿床主要受 2 组走滑断裂控制,多期次的构造活动及张性裂隙的发育控制其矿化特征,主要发育有粗脉状矿石(Guo et al., 2019);大陆槽矿床主要受 3 组断裂控制,矿体发

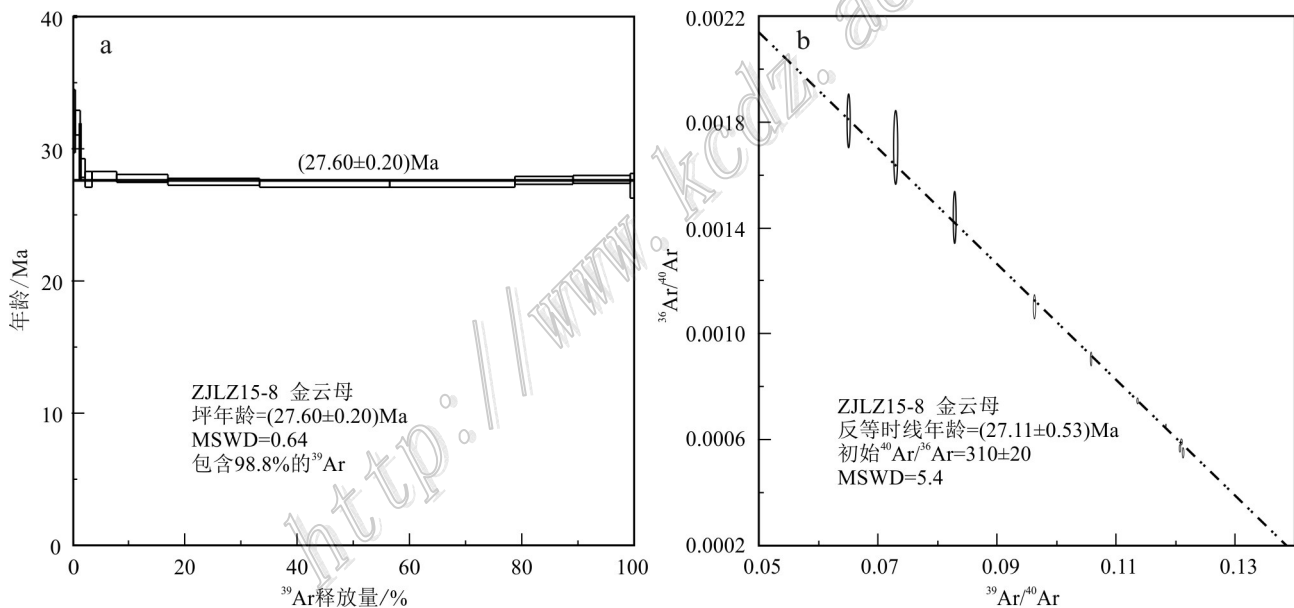
育在 2 个角砾岩筒中,多期次隐爆角砾岩活动形成了以角砾岩型为主的矿石;里庄矿床构造活动相对较弱,主要发育浸染状矿石(Hou et al., 2009; Liu et al., 2017)。木落寨矿床整体受多次活动的棉纱湾断裂控制,该断裂与次级控矿断裂呈“入”字型相交,这一控矿构造与川西其他稀土矿明显不同。根据野外填图和已有地质调查结果显示,郑家梁子矿段矿脉主要赋存在大理岩的断裂破碎带内和张性裂隙中,少量赋存于正长岩中,这些断裂和张性裂隙为成矿流体的运移和沉淀提供了通道和空间。流体进入断裂裂隙中,大气降水的加入导致成矿流体的温度降低,破坏了稀土络合物,最终导致稀土

表6 郑家梁子矿段矿石中金云母ZJLZ15-8 Ar-Ar阶段升温测年结果

Table 6 Ar-Ar step-heating results of phlogopite ZJLZ15-8 from the Zhengjialiangzi ore block

$T/^\circ\text{C}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_0/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/\%$	$^{39}\text{Ar}/\%$	年龄 $\pm 2\sigma/\text{Ma}$
800	62.9949	0.2083	0	0.0022	2.27	0.12	5.80 ± 11.6
900	38.0326	0.1015	0	0.0227	21.12	0.48	32.10 ± 4.80
970	20.7833	0.0433	0	0.0145	38.44	1.24	31.97 ± 1.84
1020	15.3853	0.0279	0	0.0143	46.31	2.20	28.54 ± 1.42
1060	12.0726	0.0175	0	0.0122	57.18	3.44	27.66 ± 1.20
1100	10.3975	0.0115	0	0.0134	67.16	7.81	27.98 ± 0.66
1140	9.4568	0.0085	0	0.0144	73.29	16.87	27.77 ± 0.60
1180	8.8072	0.0066	0	0.0136	77.92	33.24	27.49 ± 0.56
1220	8.4520	0.0055	0	0.0135	80.69	56.43	27.33 ± 0.54
1250	8.2700	0.0049	0.0076	0.0136	82.50	78.66	27.34 ± 0.54
1280	8.2899	0.0047	0.0010	0.0133	83.19	89.13	27.63 ± 0.56
1340	8.2509	0.0045	0	0.0131	83.74	99.28	27.68 ± 0.58
1400	13.7218	0.0234	0	0.0131	49.49	100.00	27.21 ± 1.84

注: W=14.26 mg, J=0.002238。

图10 郑家梁子矿体矿石中金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄(a)和反等时线年龄(b)Fig. 10 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spectra (a) and inverse isochron age (b) for phlogopite from the Zhengjialiangzi ore block

物质大规模沉淀(Williams-Jones et al., 2014; Liu et al., 2018; Shu et al., 2019; Zheng et al., 2019)。根据裂隙的发育程度最终形成多组粗细、形态特征不同的矿脉(图4), 矿脉规模0.2~5 m不等, 产状多为 $280^\circ \angle 65^\circ$ 。

郑家梁子矿段中, 矿脉与围岩之间接触界线清晰, 且矿脉与围岩中的矿物共生组合不同, 因此认为

矿体的形成以热液充填为主, 交代作用为次。根据野外矿体露头 and 手标本的观察, 结合室内分析, 笔者认为郑家梁子矿段中的矿石类型以浸染状为主。矿石矿物为氟碳铈矿, 主要的脉石矿物有方解石+萤石+重晶石+石英+金云母+黄铁矿+方铅矿等。矿脉与手标本照片(图5a~d)显示, 氟碳铈矿出现在热液阶段的晚期, 叠加在先生成的方解石、重晶石、萤石

之上;由镜下照片(图5e~h)可得,方解石常被萤石、氟碳铈矿及重晶石切穿,形成于热液阶段早期。氟碳铈矿叠加在已经形成的方解石、萤石、重晶石及金云母等脉石矿物之上,形成于热液阶段晚期。黄铁矿叠加在氟碳铈矿之上,而方铅矿又叠加在黄铁矿上,故其形成于末期。故本次研究可得主要矿物的生成顺序为方解石-萤石-金云母-重晶石-氟碳铈矿-黄铁矿-方铅矿。此外,电子探针数据(表1)显示矿石中偶尔会出现蚀变强烈的长石,可能是正长岩蚀变后的残余。

6.2 大理岩、正长岩与成矿的关系

前人对冕宁-德昌稀土成矿带的研究表明该成矿带内4个主要矿床的岩体和矿体均形成于新生代,且成矿均与碳酸岩-正长岩杂岩体有关(Hou et al., 2015)。本次研究的郑家梁子矿段矿体主要赋存在大理岩和正长岩中,受交通和开采条件限制,矿区开采段目前尚未发现大规模的碳酸岩岩体。本次研究认为该矿段内正长岩可能提供了成矿物质,而大理岩仅是一种赋矿围岩,并未参与成矿。郑家梁子矿脉旁的大理岩稀土元素含量为 $1131 \times 10^{-6} \sim 1936 \times 10^{-6}$,而远离矿脉的新鲜大理岩稀土元素含量仅为 $8.20 \times 10^{-6} \sim 8.69 \times 10^{-6}$ (表2),新鲜大理岩中很少富集稀土元素,而近矿大理岩可能受成矿热液的蚀变作用,导致其稀土元素含量升高。对矿脉中的方解石和氟碳铈矿以及新鲜大理岩中的方解石进行单矿物稀土元素分析可得,氟碳铈矿总稀土元素含量为 $835\ 297 \times 10^{-6} \sim 838\ 805 \times 10^{-6}$,LREE/HREE值为271~485,稀土元素配分曲线呈右倾趋势,无明显的Ce、Eu异常,矿脉中的方解石总稀土元素含量为 $829 \times 10^{-6} \sim 997 \times 10^{-6}$,LREE/HREE值为18.6~32.0,稀土元素配分曲线特征与近矿大理岩相似(图7b),新鲜大理岩中的方解石稀土元素含量极低($3.96 \times 10^{-6} \sim 16.7 \times 10^{-6}$)(表3),因此,笔者认为郑家梁子矿段的大理岩并未提供成矿所需的稀土物质,而大理岩与矿脉中的方解石是否同源有待进一步研究。

为进一步分析大理岩和成矿之间的关系,对郑家梁子矿段的9件样品(1号矿脉中的方解石3件,近矿大理岩3件,远矿新鲜大理岩3件)进行C-O同位素测试分析,其中,3件远矿新鲜大理岩属于海相碳酸盐岩变质的产物;3件近矿大理岩属于碳酸盐岩溶解的产物。二者之间的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 数据(0.4‰~1.6‰)变化很小,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 数据(7.2‰~8.0‰)由远矿到近矿变化幅度较大(表4)表明二者同源。而在野外

地质调查过程中发现大理岩与矿脉的接触面常常伴有方解石颗粒变粗的重结晶现象,这一现象印证了碳酸盐岩受成矿流体影响发生蚀变。综上所述,赋矿大理岩仅为成矿提供了赋矿空间,并未有稀土物质供应等。3件选自矿脉中的方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围(表4)为-4.6‰~-4.7‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 介于11.8‰~12.5‰之间,其C、O同位素特征与大理岩明显不同,指示大理岩可能也没有为成矿流体提供碳酸根离子。在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 关系图解(图8)中投点位置位于火成碳酸岩区域右侧,属于岩浆热液受低温蚀变的产物,指示这种富含 CO_2 的成矿流体进入大理岩的张性裂隙后温度降低,稀土元素在此沉淀并富集成矿(Liu et al., 2018)。

矿带中与木落寨矿床相邻的牦牛坪矿床是中国第二大稀土矿床,该矿床产于与稀土成矿有关的碳酸岩-正长岩杂岩体中,前人对其Sr-Nd同位素的研究认为其成矿物质具有深源特征(Hou et al., 2006)。在成矿岩石组成、矿体结构构造以及矿床地球化学特征等方面,木落寨矿床与牦牛坪矿床十分相似,而与牦牛坪矿床不同的是,该矿段碳酸岩出露极少,只见到硅酸盐熔体分异形成的正长岩,其原因可能为该矿段矿体规模较小,不易出露(周家云等,2006)。故本文选取矿段内的正长岩进行相关的地球化学研究,在郑家梁子矿段中,正长岩全岩总稀土元素含量为 $1211 \times 10^{-6} \sim 2974 \times 10^{-6}$,其中轻稀土元素含量($1173 \times 10^{-6} \sim 2906 \times 10^{-6}$)高于重稀土元素含量($38 \times 10^{-6} \sim 68.7 \times 10^{-6}$),LREE/HREE比值为30.76~42.47(表2),稀土元素配分曲线呈右倾(图7a)。与整个稀土矿带其他3个矿床的正长岩($630 \times 10^{-6} \sim 3233 \times 10^{-6}$)相比,总稀土元素含量较高,轻、重稀土元素比值特征也相似(Hou et al., 2006)。笔者对郑家梁子矿段中的正长岩进行Sr-Nd同位素测试,结果显示正长岩样品的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的值为0.512 387~0.512 414, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 的值介于0.705 423~0.705 915之间,且 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化不大(-4.21~-3.69),均为负值。而牦牛坪与里庄的正长岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值分别为0.512 422与0.512 423, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 的值分别为0.706 796与0.706 578, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值相等且均为负值(-3.7),碳酸岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值的范围分别为0.512 417~0.512 439与0.512 449~0.512 453, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值的范围分别0.706 896~0.706 155与0.705 674~0.705 732, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为-3.6~-3.7与-3.2~-3.1(表5,许成等,2002;Hou et al., 2006;2015)。尽管正

长岩与碳酸岩的 Sr-Nd 同位素组成有轻微差别,但 3 个矿床的 Sr-Nd 同位素特征极为相似,投图(图 9a)显示其均位于富集地幔 I 与富集地幔 II 之间,说明郑家梁子矿段的正长岩与矿带中另外 2 个矿床的碳酸岩-正长岩可能有着共同的物质来源,即该矿带的成矿流体均源自于同一碳酸岩-正长岩岩体。

选取郑家梁子矿段中的正长岩以及矿石中的氟碳铈矿进行 Pb 同位素测试分析,并与牦牛坪、里庄矿床碳酸岩-正长岩的 Pb 同位素数据对比。矿石中氟碳铈矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 18.3143~18.3629、15.6243~15.6349 和 38.6197~38.7309,正长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 18.3233~18.3568, 15.6298~15.6360 和 38.6664~38.6880(表 5,许成等,2002;Hou et al., 2006;2015)。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 9b)显示,氟碳铈矿与正长岩在 Pb 同位素组成投点上几乎重叠,且二者与牦牛坪、里庄的碳酸岩-正长岩 Pb 同位素特征及其相似,均位于富集地幔 I 与富集地幔 II 之间,显示郑家梁子矿段成矿物质主要来自矿区内的正长岩或者隐伏的碳酸岩。

6.3 成矿年龄

前人使用不同的测试手段和不同的测试矿物已对木落寨矿床成岩、成矿年龄做了一定研究,如木落寨金云母 Ar-Ar 年龄为 $(35\pm 1)\text{Ma}$ (田世洪等,2008);木落寨氟碳铈矿 U-Pb 年龄为 $(31.8\pm 2.1)\text{Ma}$ 、 $(33.0\pm 2.6)\text{Ma}$ 和 $(33.3\pm 2.6)\text{Ma}$ (Yang et al., 2014);木落寨氟碳铈矿 SIMS Th-Pb 年龄为 $(26.9\pm 0.2)\text{Ma}$ (Ling et al., 2016)。木落寨正长岩锆石 U-Pb 年龄为 $(26.77\pm 0.32)\text{Ma}$ (Liu et al., 2015a),木落寨侵入年龄的正长岩锆石 U-Pb 年龄为 $(28.0\pm 0.3)\text{Ma}$ (Ling et al., 2016)。相对于新生代成矿来说,测试技术和样品选取的不同会使这些成岩成矿年龄较大,最大可达 6 Ma。其中,木落寨氟碳铈矿的形成年龄和正长岩锆石 U-Pb 年龄基本一致,约为 27 Ma(Ling et al., 2016),很可能接近了真实的成岩成矿年龄。鉴于云母定年属于常规测试手段,则木落寨的成矿是否存在多期次,需要进一步对矿石中的云母和氟碳铈矿进行详细的岩相学研究。

笔者通过对郑家梁子矿段的手标本观察和电子探针实验工作,发现该矿段浸染状矿石中金云母与氟碳铈矿密切共生,矿物共生组合比较稳定,并不存在明显的多期次的成矿过程。而金云母作为与氟碳铈矿密切共生的蚀变矿物,可以很好的限定矿石矿

物形成的时间。在此基础上,本次研究采用金云母的 Ar-Ar 定年方法,测得金云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 反等时线年龄为 $(27.1\pm 0.53)\text{Ma}$ (MSWD=5.4),对应的坪年龄为 $(27.6\pm 0.2)\text{Ma}$ (MSWD=0.64),坪年龄和反等时线年龄具有很好的一致性。与前人测得该矿区中正长岩的锆石年龄 $(26.77\sim 28\text{Ma})$ 在误差范围内,成岩和成矿时代基本一致,因此,本次测试金云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 $(27.6\pm 0.2\text{Ma})$ 可代表郑家梁子矿段的成矿年龄。

7 结论

(1) 木落寨矿床郑家梁子矿段整体受棉纱湾断裂及其次级断裂控制,发育于大理岩中的张性断裂对该矿段的成矿起主要控制作用,矿脉主要以充填形式发育于大理岩的张性裂隙和破碎带中。矿石类型为浸染状,主要矿物的生成顺序为方解石-萤石-重晶石-金云母-氟碳铈矿-黄铁矿-方铅矿。

(2) 郑家梁子矿段矿体主要赋存在大理岩中,部分赋存在正长岩。结合野外地质调查、岩相学以及稀土元素与 C-O 同位素特征分析可知,该矿段中的大理岩由海相碳酸盐岩变质而成,只是赋矿围岩,并未提供成矿物质。正长岩和氟碳铈矿与整个矿带中正长岩-碳酸岩的 Sr-Nd-Pb 同位素特征对此分析,结果显示正长岩及可能隐伏的碳酸岩是主要的成矿物质来源。

(3) 该矿段内主要矿物的岩相学特征显示氟碳铈矿和金云母的形成未存在多期次性,与氟碳铈矿密切共生的金云母 Ar-Ar 同位素测年结果表明,金云母的坪年龄为 $(27.60\pm 0.20)\text{Ma}$,与正长岩的锆石年龄数值在误差范围内保持较好的一致性,该年龄可以代表郑家梁子矿段的成矿年龄。

致谢 野外地质调查得到四川万凯丰稀土有限公司相关领导和工作人员的支持;审稿专家对文章的修改提出了宝贵意见,在此一并表示诚挚谢意。

References

- Chen W, Zhang Y, Zhang Y Q, Jin G S and Wang Q L. 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau-evidence from Ar-Ar thermochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 867-872 (in Chinese with English abstract).

- Guo D X and Liu Y. 2019. Occurrence and geochemistry of bastnäsite in carbonatite-related REE deposits, Mianning-Dechang REE belt, Sichuan Province, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 107:266-282.
- Guo Z F, Hertogen J, Liu J Q, Pasteels P, Boven A, Punzalan L, He H Y, Luo X J and Zhang W H. 2005. Potassic magmatism in western Sichuan and Yunnan Provinces, SE Tibet, China: Petrological and geochemical constraints on petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 46(1): 33-78.
- Hou Z Q, Tian S H, Yuan Z X, Xie Y L, Yin S P, Yi L S, Fei H C and Yang Z M. 2006. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1-2): 234-250.
- Hou Z Q, Tian S H, Xie Y L, Yuan Z X, Yang Z S, Yin S P, Fei H C, Zou T R, Li X Y and Yang Z M. 2008. Mianning-Dechang Himalayan REE Belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Asian collision zone, southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 145-176(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Tian S H, Xie Y L, Yang Z S, Yuan Z X, Yin S P, Yi L S, Fei H C, Zou T R, Bai G and Li X Y. 2009. The Himalayan Mianning-Dechang REE Belt associated with carbonatite-alkaline complexes, eastern Indo-Asian collision zone, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 65-89.
- Hou Z Q, Liu Y, Tian S H, Yang Z M and Xie Y L. 2015. Formation of carbonatite-related giant rare-earth-element deposits by the recycling of marine sediments[J]. *Scientific Reports*, 5: 10231.
- Hu Z S, Shen B, Zhu Z M, Liu F Y, Chen J B, Zhou J Y and Xiong W L. 2008. Exploration report of Fangjiabao REE deposit in Yinshan Village. Nanhe town, Mianning County, Sichuan Province[R]. Chengdu: Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Ling X X, Li Q L, Liu Y, Yang Y H, Liu Y, Tang G Q and Li X H. 2016. In situ SIMS Th-Pb dating of Bastnäsite: Constraint on the mineralization time of the Himalayan Mianning-Dechang rare earth element deposits[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31: 1680-1687.
- Liu Y, Hou Z Q, Tian S H, Zhang Q C, Zhu Z M and Liu J H. 2015a. Zircon U-Pb ages of the Mianning-Dechang syenites, Sichuan Province, southwestern China: Constraints on the giant REE mineralization belt and its regional geological setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 554-568.
- Liu Y, Chen Z Y, Yang Z S, Sun X, Zhu Z M and Zhang Q C. 2015b. Mineralogical and geochemical studies of brecciated ores in the Dalucao REE deposit, Sichuan Province, southwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 70:613-636.
- Liu Y, Zhu Z M, Chen C, Zhang S P, Sun X, Yang Z S and Liang W. 2015c. Geochemical and mineralogical characteristics of weathered ore in the Dalucao REE deposit, Mianning-Dechang REE Belt, western Sichuan Province, southwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 71: 437-456.
- Liu Y and Hou Z Q. 2017. A synthesis of mineralization styles with an integrated genetic model of carbonatite-syenite-hosted REE deposits in the Cenozoic Mianning-Dechang REE metallogenic belt, the eastern Tibetan Plateau, southwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137(15): 35-79.
- Liu Y, Anton R, Hou Z Q, Song W L and Jindřich Kynický. 2018. Development of REE mineralization in the giant Maoniuping deposit (Sichuan, China): Insights from mineralogy, fluid inclusions, and trace-element geochemistry[J]. *Mineralium Deposita*, doi: org/10.1007/s00126-018-0836-y.
- Ludwig K R. 2001. Isoplot/Ex, rev. 2.49: A geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley geochronological center[M]. Special Publication, (1a):1-58.
- Shu X C and Liu Y. 2019. Fluid inclusion constraints on the hydrothermal evolution of the Dalucao carbonatite-related REE deposit, Sichuan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 41-57.
- Steiger R H and Jager E. 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(3): 359-362.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42 (1): 313-345.
- Tian S H, Zhang G L, Hou Z Q, Ding T P, Xie Y L, Yuan Z X, Bai G and Zhou T R. 2005. Stable isotope data from Muluozhai REE deposit in Mianning County, Sichuan Province, and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 24(6): 647-655(in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Hou Z Q, Yuan Z X, Chen W, Xie Y L, Fei H C, Yin S P, Yi L S and Zhou S. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of rocks and ores from the Muluozhai REE deposit in Mianning County, Sichuan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2431-2436(in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Hou Z Q, Yang Z S, Chen W, Yang Z M, Yuan Z X, Xie Y L, Fei H C, Yin S P, Liu Y C, Li Z and Li X Y. 2008. Geochronology of REE deposits in Mianning-Dechang REE metallogenic belt: Constraints on duration of hydrothermal activities and a tectonic model for the carbonatite-alkalic complexes in southwestern Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 177-187(in Chinese with English abstract).
- Williams-Jones A E, Samson I M and Olivo G R. 2000. The genesis of hydrothermal fluorite-REE deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico[J]. *Econ. Geol.*, 95(2): 327-341.
- Williams-Jones A E and Migdisov A A. 2014. Rare earth element transport and deposition by hydrothermal fluids[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(8): 472-474.
- Xie Y L, Tian S H, Hou Z Q, Chen W, Yin S P and Gao S. 2008. Discussion of migration and precipitation mechanics in Muluo REE deposit Mianning County, West Sichuan Province: Evidence from fluid inclusion in bastnaesite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3):

- 555-561(in Chinese with English abstract).
- Xu C, Huang Z L, Liu C Q, Qi L, Li W B and Guan T. 2002. Geochemistry of carbonatites in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 32(8): 635-643(in Chinese with English abstract).
- Yang K F, Fan H R, Santosh M, Hu F F and Wang K Y. 2011. Mesoproterozoic carbonatitic magmatism in the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, North China: Constraints for the mechanism of super accumulation of rare earth elements[J]. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 122-131.
- Yang Y H, Wu F Y, Li Q, Yang J H, Xie L W, Liu Y, Zhang Y B and Huang C. 2014. In situ U-Pb dating of bastnaesite by LA-ICP-MS[J]. *Anal Atom Spectrom*, 29: 1017-1023.
- Ying J F, Zhou X H and Zhang H F. 2004. Geochemical and isotopic investigation of the Laiwu-Zibo carbonatites from western Shandong Province, China and implications for their petrogenesis and enriched mantle source[J]. *Lithos*, 75(3-4): 413-426.
- Yuan Z X, Shi Z M, Bai G, Wu C Y, Chi R A and Li X. Y. 1995. The Maoniuping rare earth ore deposit, Mianning County, Sichuan Province[M]. Beijing: Seismological Press. 1-150(in Chinese).
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G and Yin J F. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241-254.
- Zhang Y, Chen W, Chen K L and Liu X Y. 2006. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ^{39}Ar recoil loss-Examples from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province[J]. *Geological Review*, 52(4): 556-561(in Chinese with English abstract).
- Zheng X and Liu Y. 2019. Mechanisms of element precipitation in carbonatite-related rare-earth element deposits: Evidence from fluid inclusions in the Maoniuping deposit, Sichuan Province, southwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 218-238.
- Zhou J Y, Shen B, Zhu Z M and Liu F Y. 2006. Geological features of Muluo REE deposit in Mianning, Sichuan Province[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 30(4): 494-499(in Chinese with English abstract).
- 陈文,张彦,张岳桥,金贵善,王清利. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. *岩石学报*, 22(4): 867-872.
- 侯增谦,田世洪,谢玉玲,袁忠信,杨竹森,尹淑苹,费红彩,邹天人,李小渝,杨志明. 2008. 川西冕宁-德昌新生代稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型[J]. *矿床地质*, 27(2): 145-176.
- 胡泽松,沈冰,朱志敏,刘飞燕,陈家彪,周家云,熊文良. 2008. 四川省冕宁县南河乡阴山村方家堡稀土矿区普查报告[R]. 成都: 中国地质科学院矿产综合利用研究所.
- 田世洪,张桂兰,侯增谦,丁梯平,谢玉玲,袁忠信,白鸽,邹天人. 2005. 四川冕宁木落寨稀土矿床稳定同位素研究及其意义[J]. *矿床地质*, 24(6): 647-655.
- 田世洪,侯增谦,袁忠信,陈文,谢玉玲,费红彩,尹淑苹,衣龙升,周肃. 2006. 四川冕宁木落寨稀土矿床成岩成矿的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[J]. *岩石学报*, 22(10): 2431-2436.
- 田世洪,侯增谦,杨竹森,陈文,杨志明,袁忠信,谢玉玲,费红彩,尹淑苹,刘英超,李政,李小渝. 2008. 川西冕宁-德昌 REE 成矿带成矿年代学研究: 热液系统维系时限和构造控矿模型约束[J]. *矿床地质*, 27(2): 145-176.
- 谢玉玲,田世洪,侯增谦,陈伟,尹淑苹,高升. 2008. 四川冕宁木落寨稀土矿床稀土元素迁移与沉淀机制: 来自稀土矿物中流体包裹体的证据[J]. *岩石学报*, 24(3): 555-561.
- 许成,黄智龙,刘丛强,漆亮,李文博,管涛. 2002. 四川牦牛坪稀土矿床碳酸岩地球化学[J]. *中国科学: 地球科学*, 32(8): 635-643.
- 袁忠信,施泽明,白鸽,吴澄宇,池汝安,李小渝. 1995. 四川冕宁牦牛坪轻稀土矿床[M]. 北京: 地震出版社. 1-150.
- 张彦,陈文,陈克龙,刘新宇. 2006. 成岩混层(I/S) Ar-Ar 年龄谱型及 ^{39}Ar 核反冲丢失机理研究-以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. *地质论评*, 52(4): 556-561.
- 周家云,沈冰,朱志敏,刘飞燕. 2006. 四川冕宁木落寨稀土矿床地质特征[J]. *稀有金属*, 30(4): 494-499.

附中文参考文献