

四川冕宁木落寨稀土矿床稀土矿化与围岩特征

欧阳怀¹⁾, 刘 琰^{2)*}

1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘 要: 木落寨矿床是冕宁—德昌稀土元素(REE)矿带内的主要稀土矿床, 位于矿带北段, 雅砻江断裂以西。该稀土矿床的形成与正长岩-碳酸岩杂岩体密切相关。与冕宁—德昌 REE 矿带中其它矿床例如牦牛坪、大陆槽矿床不同的是, 牦牛坪和大陆槽矿床的围岩主要是石英闪长岩, 而木落寨 REE 矿床中围岩较复杂, 主要有大理岩、绿片岩、碱性花岗岩等。已有研究表明石英闪长岩并不是牦牛坪和大陆槽矿床稀土元素的主要来源, 对木落寨矿床来说, 围岩对成矿的作用还需进一步研究。采用 ICP-MS 与 XRF, 对大理岩和绿片岩这两种主要的围岩进行主微量元素分析, 全岩稀土配分曲线显示轻稀土亏损(大理岩 $3 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$, 绿片岩 $62 \times 10^{-6} \sim 74 \times 10^{-6}$), 重稀土平坦, 总稀土含量低(大理岩 $4 \times 10^{-6} \sim 21 \times 10^{-6}$, 绿片岩 $86 \times 10^{-6} \sim 97 \times 10^{-6}$), 与本次研究的木落寨正长岩中稀土含量($592 \times 10^{-6} \sim 2026 \times 10^{-6}$)和以往研究的冕宁—德昌成矿带其他三个矿床的碳酸岩-正长岩杂岩体中稀土含量(碳酸岩 $2470 \times 10^{-6} \sim 40807 \times 10^{-6}$, 正长岩 $630 \times 10^{-6} \sim 3233 \times 10^{-6}$)相比, 大理岩和绿片岩中稀土元素含量过低, 显示在稀土物质来源上, 这两种围岩可能对成矿贡献不大, 根据剖面展示, 矿体大部分出现在正长岩裂隙中, 极少部分出现在正长岩和大理岩接触面中, 大理岩可能提供碳酸根离子, 促进交代和成矿作用的进行。木落寨矿石类型主要是细脉浸染型, 少量为条带型。通过手标本、镜下和 BSE 图像观察, 脉石矿物主要有萤石+方解石+重晶石+石膏+黄铁矿+方铅矿+石英+金云母等, 矿石矿物为氟碳铈矿, 氟碳铈矿叠加在已形成的脉石矿物之上, 显示矿床主要形成于热液阶段最晚期。

关键词: 木落寨稀土矿床; 大理岩; 绿片岩; 氟碳铈矿; 矿石类型

中图分类号: P618.7; P588.122; P611.13 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2018.031901

REE Mineralization and Characteristics of Wall Rocks in the Muluozhai REE Deposit, Mianning County, Sichuan Province

OUYANG Huai¹⁾, LIU Yan^{2)*}

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: The Muluozhai deposit is a main REE deposit in the Mianning–Dechang REE belt, which is located in the north of the belt and the west of Yalong River fault. The formation of this REE deposit was closely related to the carbonate-syenite complexes. Unlike other REE deposits in the Mianning–Dechang REE belt, such as the Maoniuping deposit and the Dalucao deposit, whose main wall rocks are quartz diorite, the wall rocks in the Muluozhai deposit are more complex, and the main types are marble, green schist, alkali granite and some other rocks. It has been shown that quartz diorite was not the main REE source of Maoniuping and Dalucao deposit, and the effect of these wall rocks on mineralization of the Muluozhai deposit needs further studies. ICP-MS and XRF were used to analyze the major and trace elements of the main wall rocks—marble and green schist, the REE

本文由国家自然科学基金(编号: 41772044)、中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: YYWF201509; YYWF201704)和中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011020000150011-03)联合资助。

收稿日期: 2018-01-06; 改回日期: 2018-03-11; 网络首发日期: 2018-03-20。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 欧阳怀, 男, 1992 年生。硕士研究生。地质工程专业。主要从事稀土矿床研究。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。E-mail: 18811762533@163.com。

*通讯作者: 刘琰, 男, 1982 年生。博士后, 副研究员。主要从事稀土和稀有金属矿床研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: ly@cags.ac.cn。

patterns of these wall rocks exhibit a declined LREE ($3\times 10^{-6}\sim 20\times 10^{-6}$ for marble, $62\times 10^{-6}\sim 74\times 10^{-6}$ for green schist), flat HREE, low total REE content ($4\times 10^{-6}\sim 21\times 10^{-6}$ for marble, $86\times 10^{-6}\sim 97\times 10^{-6}$ for green schist). Compared with the REE content ($592\times 10^{-6}\sim 2\,026\times 10^{-6}$) of syenite of Muluoheizhai and total REE in carbonate-syenite complexes of other three deposits in the Mianning-Dechang metallogenic belt (carbonate $2\,470\times 10^{-6}\sim 40\,807\times 10^{-6}$, syenite $630\times 10^{-6}\sim 3\,233\times 10^{-6}$) studied in the past, the REE values of marble and green schist are too low, as shown in the source of REE materials, and hence these two types of wall rocks might not have contributed much to ore formation. According to the profile display, most of the orebodies appear in the syenite fractures, with a few occurring in the contact surface between syenite and marble, and marble probably provided CO_3^{2-} and promoted metasomatism and mineralization. The orebodies of the Muluoheizhai deposit are mainly of veinlet dissemination type, followed by stripe type. Hand specimens as well as microscopic and BSE image observations show that gangue minerals are mainly fluorite + calcite + barite + gypsum + pyrite + galena + quartz + phlogopite, and ore mineral is bastnaesite. Bastnaesite overlies these gangue minerals, indicating that the deposit was mainly formed at the latest stage of the hydrothermal period.

Key words: Muluoheizhai REE deposit; marble; green schist; bastnaesite; ore type

木落寨矿床是冕宁—德昌 REE 成矿带中的重要稀土矿床,该成矿带主要包括牦牛坪、大陆槽、木落寨和里庄稀土矿床。迄今为止,前人对木落寨稀土矿床进行了成矿年龄、流体包裹体等研究(田世洪等, 2005, 2006, 2008; 周家云等, 2006; 谢玉玲等 2008; Hou et al., 2009, 2015; Yang et al., 2014; Liu et al., 2015a; Ling et al., 2016; Liu and Hou, 2017),但是至今为止,对木落寨矿床的控矿构造、矿石特征、围岩与成矿的关系等尚不清楚。

大陆槽稀土矿床的形成与上地幔混熔物质上侵以及与碱性杂岩有关(万德芳和田世洪, 2004),牦牛坪稀土矿床的形成有大量的地幔物质的参与(田世洪等, 2003)。大陆槽、牦牛坪矿区矿体主要赋存在正长岩里,并侵位到石英闪长岩中。已有研究认为,大陆槽、牦牛坪矿区稀土物质来源于新生代的碳酸岩-正长岩杂岩体,而与石英闪长岩无关(Liu and Hou, 2017)。对木落寨矿床来说,大理岩和绿片岩这两种围岩是否对成矿有所贡献也值得研究;其次由于川西稀土矿带中只有木落寨矿床中存在大量的大理岩围岩,其矿物成分中含碳酸根离子,这与氟碳铈矿之间是否有联系也是疑惑之一。

本次在两年的 1: 5000 矿区岩性-构造-矿化-蚀变野外地质调查基础上,对木落寨两种主要的含矿围岩——大理岩和绿片岩进行全岩地球化学特征分析,并与该矿区正长岩和冕宁—德昌 REE 矿带上其他三个主要矿床的正长岩-碳酸岩的地球化学特征进行了对比,对稀土矿化与围岩的关系进行了研究。在木落寨矿洞地质现象观察和剖面测量的基础上,对矿区控矿构造和矿体特征进行了探讨。通过矿石手标本观察,矿石中矿物的电子探针(EPMA)和背散射图像(BSE)分析,对矿石的岩相学特征、各矿物之间的穿插关系进行了探讨,并大致确定了矿物的生成顺序。

1 区域地质

冕宁—德昌 REE 矿带位于扬子地台康滇台隆西缘,青藏高原东部。已有资料表明,世界上多数大型内生稀土矿床主要赋存于大陆裂谷带,如美国芒廷帕斯稀土矿位于美国西部盆地-山脉裂谷带,加拿大奥卡稀土铌矿位于北美圣劳伦斯—蒙特利坚裂谷带、东非肯尼亚、扎伊尔和坦桑尼亚的一系列稀土矿位于东非裂谷带。中国亦不例外,如内蒙古白云鄂博稀土矿床产于内蒙地台北缘狼山—白云鄂博裂谷带,辽宁赛马的稀土-铀矿赋存于华北地台北缘辽东裂谷带等,这些矿床的存在表明张裂构造是世界上大型内生轻稀土矿的共同构造特征(胡泽松等, 2008; Wu et al., 2016)。

与上述内生轻稀土矿床不同的是,冕宁—德昌 REE 矿带中的矿床是产于攀西裂谷碰撞环境中的 REE 矿床(Yin and Mark, 2000; Hou et al., 2003),攀西裂谷是随着地幔柱的活动,在扬子地台康滇台隆西缘的早古生代地台盖层及其基底基础上以近南北向形式发展起来的陆缘裂谷(图 1B),该裂谷作用发育于晚古生代。雅砻江断裂带和锦屏山断裂带之间的北北东向狭长地带的地层,除缺失寒武系、奥陶系、侏罗系、白垩系外,自晚震旦世至晚三叠世各时代地层均有出露,总厚大于两千米,裂谷带侵入或喷出了大量的富含碱质超镁铁质岩、基性岩和酸性岩,并随之带来了大量的稀土元素,冕宁—德昌 REE 矿带内的主要断裂方向为北北东向,在安宁河断裂以西(胡泽松等, 2008),带内由西向东依次分布有雅砻江断裂、安宁河断裂、小江断裂、甘洛断裂等(图 1B)。印亚大陆碰撞带的东部边缘发育了许多新生代的走滑断裂(图 1A),吸收并且调节了印度—亚洲大陆碰撞所产生的应力应变(侯增谦等, 2008),冕宁—德昌 REE 矿带稀土成矿与这一系列

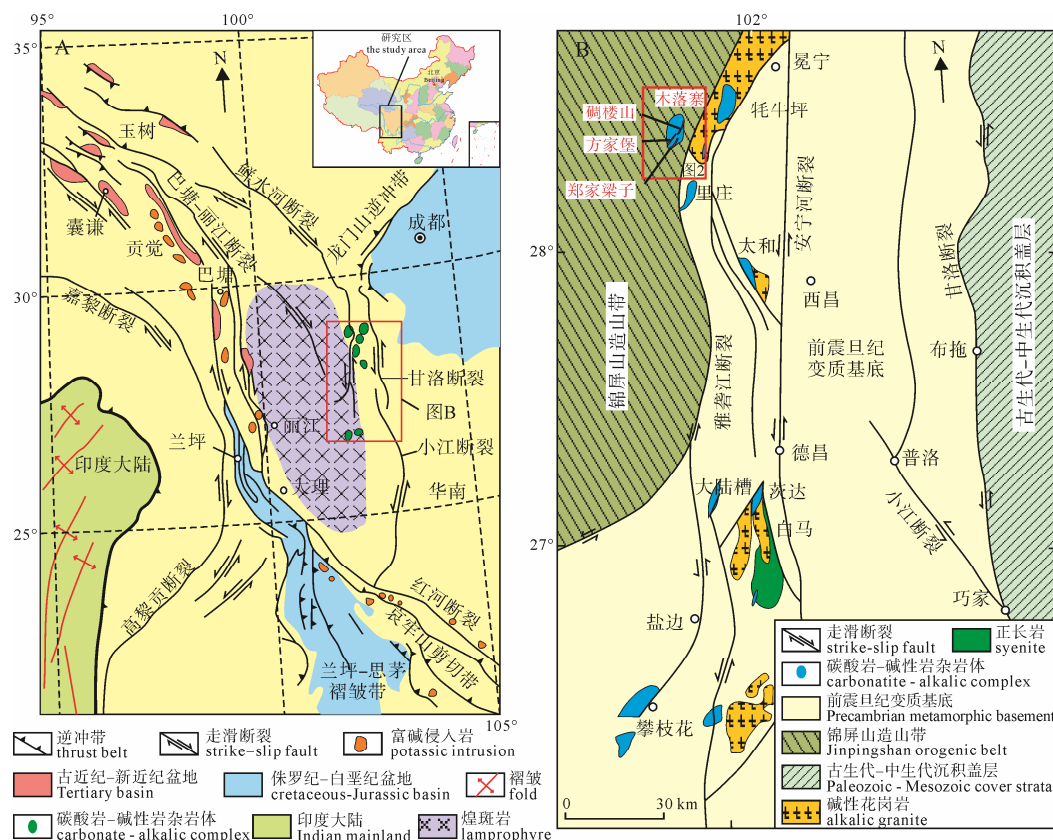


图 1 西藏东部新生代构造图(A)(Wang et al., 2001)及川西新生代受活化断层控制的碳酸岩-碱性杂岩体分布范围的构造简图(B)(据袁忠信等, 1995 修改)

Fig. 1 Cenozoic tectonic map of eastern Tibet (A) (after Wang et al., 2001) and simplified tectonic map showing the distribution of Himalayan carbonatite-alkalic complexes controlled by reactivated faults in western Sichuan (B) (modified after YUAN et al., 1995)

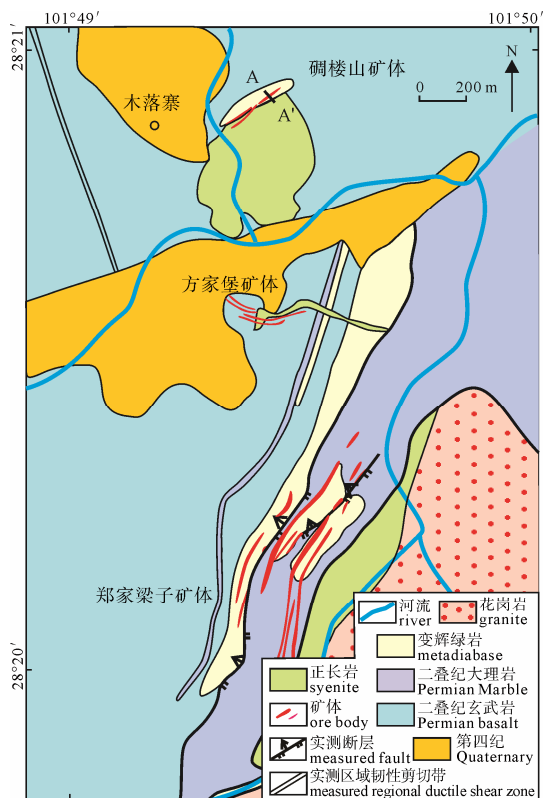


图 2 木落寨矿区地质图(据胡泽松等, 2008 修改)
Fig. 2 Geological map of the Muli ore district (modified after HU et al., 2008)

新生代走滑断裂系统有关, 并与碳酸岩-正长岩碱性杂岩体有关, 从而形成了川西冕宁—德昌 REE 矿带。这条稀土矿带在复杂的走滑断裂活动中分两次形成 (11 Ma 和 25—27 Ma)(Yang et al., 2014; Liu et al., 2015a; Ling et al., 2016; Liu and Hou, 2017), 并受区域构造活动的控制分别形成隐爆角砾岩型(大陆槽)、大脉型(牦牛坪)、细脉浸染型(里庄)等不同矿化类型和矿化模式的稀土矿床。相比之下, 由于木落寨的交通、气候和开采现场条件所限, 而且是唯一采用洞采的方式进行开采的矿床, 目前该稀土矿床研究程度较低。

2 矿床地质

木落寨稀土矿床分为碛楼山、方家堡和郑家梁子三个矿段。碛楼山矿段分布在矿区北部, 规模较小, 方家堡矿段分布在矿区中部, 目前已不再开采, 郑家梁子矿段分布在矿区东南部, 地势较高, 延伸较远(图 2)。矿床位于冕宁—德昌 REE 矿带的北部区域, 受雅砻江走滑断裂控制, 与鲜水河北段相连, 矿区主要包含四个主要岩性单位: (1)正长岩为稀土矿化的母岩, 在矿区的三个矿段中都有发现, 长度和宽度小于 700 m; (2)形成于新生代的花岗岩;

(3)位于玄武岩和二叠系石灰岩中的变辉绿岩,被新生代正长岩侵入,在断裂接触中可以发现包含稀土矿物的细脉和小细脉;(4)在新生代正长岩围绕的东南部发现的碱性花岗岩(Liu and Hou, 2017)。

通过对木落寨矿床碉楼山矿段的剖面(图 3, 图 4A, B)观察,发现正长岩侵入灰白色大理岩中,由于矿区条件限制,本次的剖面观测长度有限,无法揭露所有的地质信息,在局部的正长岩和大理岩的接触面中未发现矿体大量出现,但在接触面中可见和稀土矿化有关的萤石化和碳酸盐化等围岩蚀变,矿体主要赋存在正长岩中,控矿岩体主要是正长岩,围岩主要是大理岩和绿片岩。本次根据野外矿区地质调查及图 2 矿区地质图,发现矿区北部和西南部出露二叠纪灰绿色变质玄武岩,靠近断层和矿带附近,多变质为绿片岩,片理构造发育。绿片岩具定向构造,基质主要有斜长石,含量占比 50%~55%,新生矿物有 35%~40%的阳起石和 5%~10%的绿泥石,白云母较少。中二叠统阳新组大理岩分布在矿区中东部,呈北东走向延伸长 > 3 400 m,宽 200~900 m。根据岩性特征将阳新组地层划分为三段:下段(P_{2Y_1})为白云石大理岩,为近矿围岩之一,中粗粒,糖粒状构造,厚度 > 130 m;中段(P_{2Y_2})为块状大理岩夹黑色条带,厚度 > 100 m;上段(P_{2Y_3})薄层状大理岩,厚度 > 50 m。大理岩主要成分为方解石,大理岩表面覆盖黄铁矿、萤石和石膏等矿物,黄铁矿和石膏含量较多,萤石粒径最大可达 1 cm,与正长岩的接触带位置出现大量的萤石和重晶石,大理岩延伸较好,层面较平直,少许部位弯曲,产状大致为 $195^\circ \angle 15^\circ$ 。正长岩分为灰白色正长岩和红褐色正长岩两种,前者主要由正长石、钾长石、石英和少量的霓辉石组成,副矿物为黄铁矿、紫色萤石等,含量较少,岩石呈中-细粒结构,块状构造;后者岩石中黑色矿物为霓辉石,肉红色矿物为钾长石,含约 5%的黄铁矿,粒度较小,1 mm 左右。矿区内的控矿构造,被茶铺子断裂带形成的入字型分枝断层控制,主要有三组:以北北东向和北东向($30^\circ \sim 40^\circ$)断裂为主,次为东西走向断裂构造控矿,

矿区出露的岩浆岩有英碱正长岩、碱性花岗岩、二长花岗岩和花岗斑岩等。剖面中可见矿脉清晰,矿脉形状不一,有的呈倾斜宽脉状,有的呈规则或不规则的波浪状,厚 1~5 m 不等,围岩矿化不明显,蚀变较少,指示木落寨的成矿作用主要是充填作用,且矿脉及其周围均有萤石伴生,肉眼可见矿脉中含有氟碳铈矿+石膏+方解石+石英+重晶石+黄铁矿等矿物,剖面的 54~56 m 位置有厚度超过 2 m 的绿色萤石,分布在矿脉周围。

3 矿物学与矿相学特征

通过对矿体剖面(图 4A, B)、矿石手标本(图 4C, D)和 BSE 图观察(图 4E, F, G, H),笔者总结了矿石中各矿物的特征和矿物生成顺序(图 5)。

矿石矿物主要为氟碳铈矿,脉石矿物为萤石+方解石+重晶石+石膏+黄铁矿+方铅矿+石英+金云母等,根据剖面 and BSE 图观察,石膏分布非常广泛。手标本下,氟碳铈矿为黄色-深黄色,半自形-自形,玻璃光泽,呈不规则长条板状,长 0.5~3 cm,宽 0.2~0.6 cm,以颗粒状和细脉状分布在脉石矿物中(图 4A, B, C, D),主要形成于热液阶段晚期。萤石,紫色到紫黑色,以半自形角砾状和致密集合体状分布在矿石中,粒径 0.5~1 cm(图 4B, C)。方解石,乳白色,解理较好,解理面光滑,呈半自形-他形块状,粒度 0.2~0.5 cm(图 4A, B, C)。石膏为浅黄色到白色,解理面光滑,半自形-他形板状,厚 0.2~0.3 cm,颜色易与氟碳铈矿相混淆(图 4A, B, D),在碉楼山矿段中大面积出露。黄铁矿,铜黄色或金色,金属光泽,风化较弱,半自形-自形立方体状,大多数呈团块状的集合体出现(图 4A, C, D)。方铅矿,铅灰色,金属光泽,呈团块状出现在石膏中,常与黄铁矿夹杂在一起,与黄铁矿密切共生(图 4A, D)。

背散射(BSE)图像显示,氟碳铈矿具有两种显然不同的形状,一种为小颗粒状,另一种为长条状,显示氟碳铈矿可能有 2 个世代;零散小颗粒状的氟碳铈矿叠加在早期的萤石、石膏和方铅矿之上(图 4E),板状、柱状的氟碳铈矿叠加在早期的萤石、石

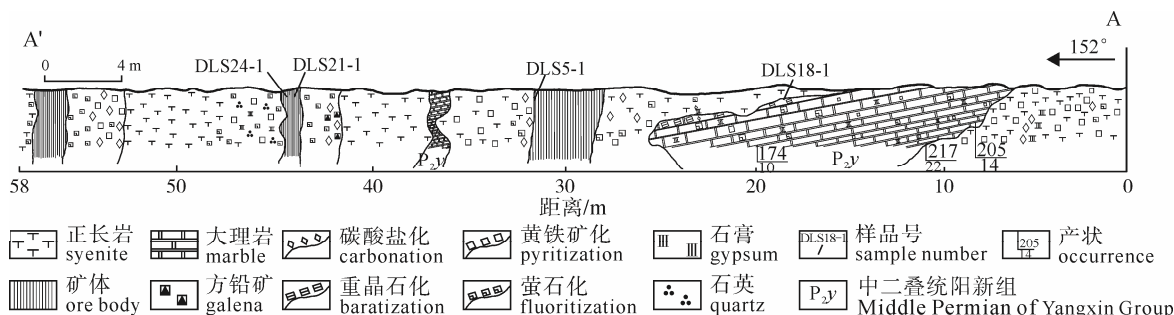


图 3 木落寨矿床碉楼山矿段 9 号矿洞实测地质剖面图

Fig. 3 Measured geological section along No. 9 mine of Diaoloushan ore block in the Muluozhai deposit

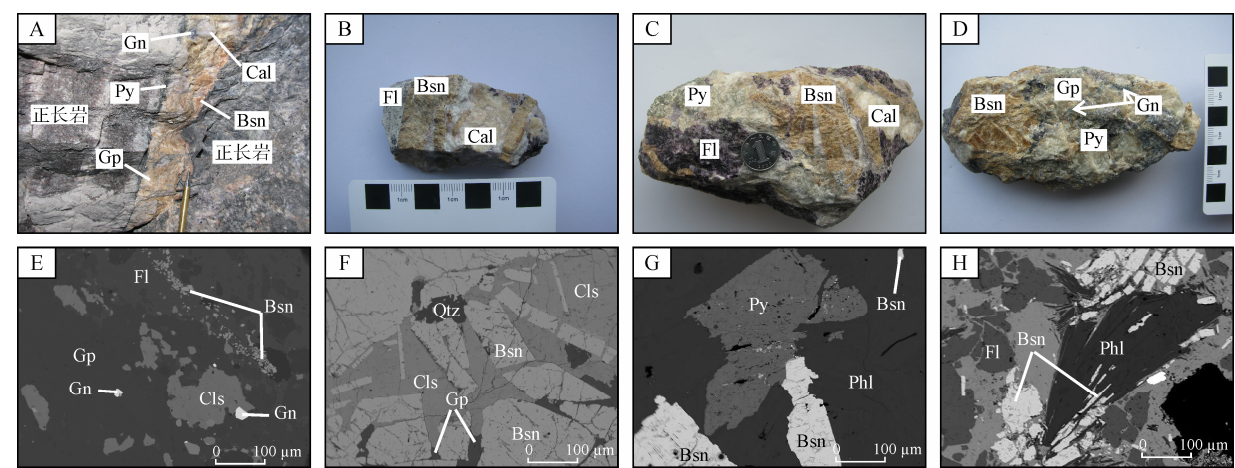


图 4 木落寨剖面、典型矿石及 BSE 图

Fig. 4 Geological section, typical ore and BSE images of Muluozaizhai

A-正长岩裂隙中充填矿脉，矿脉主要由氟碳铈矿、石膏、少量的黄铁矿、方铅矿和方解石组成；B-条带型碳酸岩矿石，萤石、氟碳铈矿和方解石呈条带状平行分布，萤石和方解石被氟碳铈矿切穿；C-浸染型碳酸岩矿石，氟碳铈矿呈细脉状与萤石、黄铁矿和方解石共生，萤石和方解石被氟碳铈矿切穿，黄铁矿呈浸染状出现在矿石中；D-浸染型碳酸岩矿石，左侧氟碳铈矿较多，氟碳铈矿呈块状与石膏、方铅矿和黄铁矿共生，黄铁矿和方铅矿呈浸染状出现在矿石中；E-BSE 图像下，氟碳铈矿呈零散的小颗粒状叠加在早期的萤石+石膏+方铅矿之上，方铅矿颗粒较小，一部分叠加在石膏上，一部分叠加在天青石之上；F-BSE 图像下，氟碳铈矿呈板状、柱状，叠加在早期的石英+石膏+天青石之上；G-BSE 图像下，氟碳铈矿呈柱状叠加在金云母之上，黄铁矿也叠加在金云母之上；H-氟碳铈矿裂隙发育，金云母与氟碳铈矿相互穿插，同时萤石呈浸染状出现在基质之上；

Cal-方解石；Py-黄铁矿；Fl-萤石；Bsn-氟碳铈矿；Gn-方铅矿；Gp-石膏；Cls-天青石；Qtz-石英；Phl-金云母

A-syenite fissure filled with veins, which are mainly composed of bastnaesite, gypsum, a small amount of pyrite, galena and calcite; B-band-type carbonatite ore, fluorite, bastnaesite and calcite in striped parallel distribution, fluorite and calcite cut off by bastnaesite; C-disseminated carbonate ore, bastnaesite, as a small vein, intergrowing with fluorite, pyrite and calcite, fluorite and calcite cut off by bastnaesite, pyrite exhibiting dissemination in the ore; D-disseminated carbonate ore, a large area of bastnaesite on the left side, bastnaesite, with lump shape intergrowing with gypsum, galena and pyrite, galena and pyrite exhibiting dissemination in the ore; E-BSE images showing bastnaesite as scattered small grains overlying the early fluorite, gypsum, galena; galena particles are small, with one part overlying the gypsum, the other overlying the celestite; F-BSE images showing bastnaesite overlying the early quartz, gypsum and celestite with plate and columnar shape; G-BSE image showing bastnaesite overlying the phlogopite with columnar shape, and the pyrite overlying the phlogopite; H-bastnaesite fissure well developed, phlogopite and bastnaesite interspersed with each other, and fluorite appearing as disseminations in the matrix;

Cal-calcite; Py-pyrite; Fl-fluorite; Bsn-bastnaesite; Gn-galena; Gp-gypsum; Cls-celestite; Qtz-quartz; Phl-phlogopite

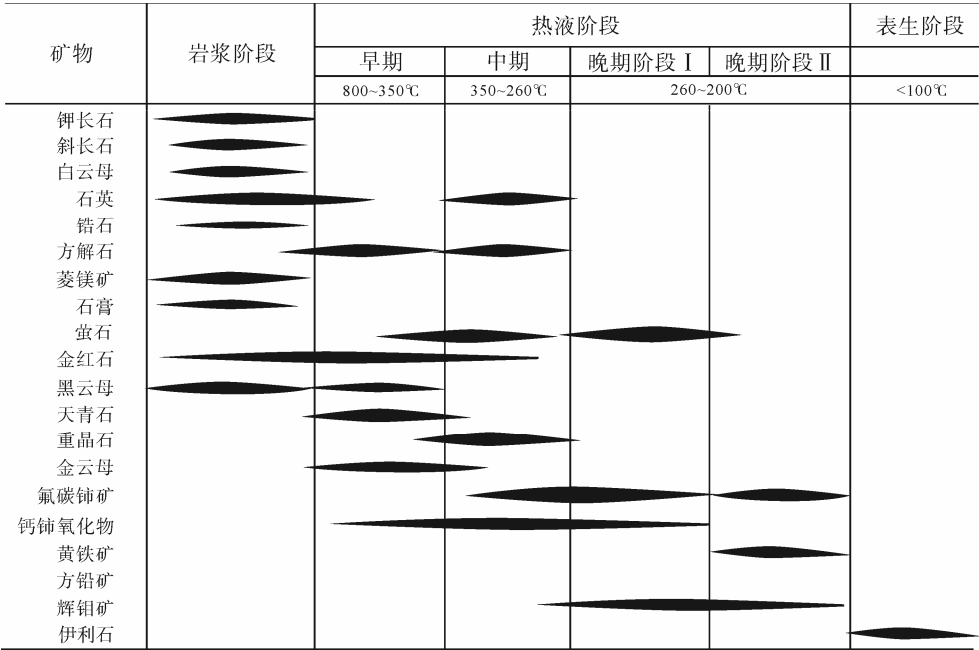


图 5 木落寨稀土矿床矿物生成顺序表

Fig. 5 Mineral generation sequence of the Muluozaizhai REE deposit

英、石膏、黄铁矿、金云母和天青石之上(图 4F, G, H), 有的氟碳铈矿裂隙发育, 与金云母相互穿插, 两种矿物密切共生(图 4H); 黄铁矿叠加在金云母之上(图 4G); 方铅矿颗粒较小, 一部分叠加在石膏上,

一部分叠加在天青石上(图 4E)。电子探针数据(表 1)显示,菱镁矿与方解石类质同象,天青石与重晶石类质同象。根据各种矿物的叠加关系,可见氟碳铈矿叠加在已有的脉石矿物之上,据此判断氟碳铈矿形成于热液阶段晚期。根据剖面观测、手标本和电子探针探测大致确认了木落寨矿床存在的矿物种类。在牦牛坪和大陆槽矿床中,重晶石和芒硝中都发现有石膏的熔融包裹体;其次木落寨矿洞剖面显示,石膏在矿体中呈片状出现,无固定的沉积层位,因此本次推断石膏是火成的,在岩浆阶段出现。根据前人对冕宁—德昌稀土矿带的研究(Liu and Hou, 2017),四个矿床均属于碳酸岩型稀土矿床,有着相似的矿物生成顺序。通过野外观察和实验并与牦牛坪和大陆槽矿床进行深入对比,推测出木落寨矿床中矿物的生成顺序(图 5)。

4 样品测试方法

矿石样品的电子探针测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。仪器型号为 JXA-8230,硫化物使用 20 kV 加速电压,硅酸盐和氧化物使用 15 kV 加速电压,电流为 20 nA,根据矿物颗粒大小,束斑直径选择 5 μm 或 1 μm 。标样采用天然矿物或合成化合物,分析精度约为 0.01%。

在中国地质科学院国家地质测试中心对 5 个正长岩、5 个大理岩和 2 个绿片岩样品进行主微量元素特征分析。Axios 波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF)对两种围岩和正长岩的主量元素进行分析,分析精度达 5%;高分辨率等离子质谱仪(ICP-MS)对正长岩、大理岩和绿片岩的微量元素进行分析,分析精度达 10%。然后在 25 mL 瓷坩埚中,将粉末样品与 5.3 g $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 0.4 g LiF 和 0.3 g NH_4NO_3 混合。然后将粉末混合物转移到铂合金坩埚中,在样品干燥之前,加入 1 mL LiBr 溶液。然后样品在自动火焰熔融机中熔化,冷却的玻璃用于 XRF 主量元素分析。分析误差<2%,FeO 含量通过化学滴定法测定。这个过程 Liu 等(2015b, c)也有描述。

5 测试结果

5.1 电子探针测试结果

对矿石样品进行了电子探针实验测试,测试结果见表 1。矿石中金云母相对富集 MgO (18.42%~22.83%), 相对贫 FeO^T (4.15%~11.36%), 富 F (2.36%~3.22%), 原子数比 Mg/Fe 介于 2.92~9.91 之间,表明该云母为金云母。7 个测点具有较高的 CaO (26.32%~32.55%)和 MgO (9.65%~19.30%)(表

1), CO_2 含量在实验中无法进行测量,根据实验测试结果可知,所测试的矿物为富镁方解石,菱镁矿含量相对较低,两种矿物同属碳酸盐类,菱镁矿与方解石类质同象。重晶石的测试结果较好,总体含量接近 100%,具有较高的 BaO (34.51%~56.41%)、SrO (12.48%~27.47%)和 SO_3 (30.57%~37.24%)(表 1),所测试的矿物为富铈重晶石,天青石占比相对较少,两种矿物同属硫酸盐类,天青石与重晶石类质同象。

5.2 围岩主微量元素特征

大理岩和绿片岩的主量元素数据(表 2)显示,大理岩中 CaO 的含量为 55.2%~55.4%, CO_2 含量为 39.9%~41.7%,指示大理岩的主要矿物成分为方解石。大理岩中 Ba (61.4×10^{-6} ~ 293×10^{-6}), Sr (98.3×10^{-6} ~ 158×10^{-6}), Nb (0.05×10^{-6} ~ 0.24×10^{-6}), Ta 为 0.05×10^{-6} ; 绿片岩的 Ba (22.0×10^{-6} ~ 54.3×10^{-6}), Sr (73.4×10^{-6} ~ 173×10^{-6}), Nb (9.7×10^{-6} ~ 15.0×10^{-6}), Ta 为 0.55×10^{-6} ~ 0.89×10^{-6} ,微量元素配分曲线(图 6D)显示,两种围岩大离子亲石元素(Ba、U、La、Sr 和 Pb)和高场强元素(Nb、Ta、P、Zr 和 Ti)都较低,但前者显示为相对的正异常,后者表现为明显的负异常。围岩全岩稀土配分曲线显示,大理岩的 LREE(La-Nd)亏损(3×10^{-6} ~ 20×10^{-6}),从 La 到 Nd 呈下降趋势, HREE (Er-Lu)平坦(图 6C),含量为 0.21×10^{-6} ~ 0.37×10^{-6} ,其中 Er 和 Yb 相对负异常(Er 含量 0.06×10^{-6} ~ 0.15×10^{-6} , Yb 含量 0.05×10^{-6} ~ 0.13×10^{-6}),总稀土含量低,为 4×10^{-6} ~ 21×10^{-6} (平均 $\Sigma\text{REE}=10.6\times 10^{-6}$), LREE/HREE 比值为 9.14~52.7; 绿片岩 LREE 也呈亏损状态(62×10^{-6} ~ 74×10^{-6}), HREE 平坦(图 6C),含量为 4.40×10^{-6} ~ 5.04×10^{-6} ,总稀土含量较大理岩高,为 86×10^{-6} ~ 97×10^{-6} (平均 $\Sigma\text{REE}=91.5\times 10^{-6}$),稀土配分曲线整体呈较平缓的下降趋势, LREE/HREE 比值为 12.3~16.89(表 2)。

正长岩的主量元素数据(表 2)显示,其 Al_2O_3 的含量为 6.77%~14.48%, SiO_2 含量为 1.62%~68.77%。正长岩的 Ba (472×10^{-6} ~ $22\ 120\times 10^{-6}$), Sr (189×10^{-6} ~ $187\ 200\times 10^{-6}$), Nb (9.68×10^{-6} ~ 182×10^{-6}), Ta 为 0.37×10^{-6} ~ 1.88×10^{-6} ;微量元素配分模式(图 6B)显示,正长岩的大离子亲石元素(Ba、U、La、Sr 和 Pb)含量较高,高场强元素(Nb、Ta、P、Zr 和 Ti)含量较低,前者显示为相对的正异常,后者表现为明显的负异常。正长岩稀土配分曲线呈右倾的下降趋势,正长岩的 LREE 为 554×10^{-6} ~ $1\ 880\times 10^{-6}$, HREE 为 3.72×10^{-6} ~ 16.0×10^{-6} ,总体 REE 含量为 592×10^{-6} ~ $2\ 026\times 10^{-6}$ (图 6A),与大理岩和绿片岩相比,木落寨正长岩总稀土含量较高。

表 1 木落寨稀土矿床矿石中主要矿物电子探针结果(wt%, 质量分数)
Table 1 The results of EPMA of ore major minerals in the Muluozhai REE deposit (wt%, mass fraction)

样品编号	矿物名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	SO ₃	BaO	SrO	F	Total
ZJLZ7-2-q3-1	金云母	46.29	0.14	7.759	4.15	0.12	22.83	0.00	0.15	10.32	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	3.22	95.03
ZJLZ7-2-q6-1	金云母	42.41	0.75	10.810	11.36	0.07	18.42	0.01	0.26	9.77	0.00	0.00	0.15	0.03	0.01	0.00	2.36	96.41
ZJLZ8-1-q3-3	金云母	42.44	0.88	11.480	11.05	0.26	19.43	0.00	0.16	9.82	0.00	0.02	0.15	0.00	0.04	0.00	2.70	98.43
DLS18-1-7-3	重晶石	0.04	0.00	0.07	0.00	0.03	0.00	1.36	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	37.24	34.51	27.47	—	100.82
DLS18-1-7-4	重晶石	0.02	0.06	0.15	0.03	0.01	0.01	0.08	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	30.57	56.41	12.48	—	99.92
DLS18-1-7-3	重晶石	0.04	0.00	0.07	0.00	0.03	0.00	1.36	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	36.75	34.51	27.47	—	100.33
DLS18-1-7-4	重晶石	0.02	0.06	0.15	0.03	0.01	0.01	0.08	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	30.68	56.41	12.48	—	100.03
DLS5-1-2	方解石	0.02	0.00	0.00	8.82	1.53	17.57	31.78	0.15	0.07	0.00	0.01	0.00	—	—	—	—	59.95
DLS5-1-3	方解石	0.00	0.00	0.00	7.25	1.65	16.76	31.31	0.10	0.02	0.00	0.02	0.02	—	—	—	—	57.13
DLS5-1-4	方解石	0.05	0.00	0.00	8.92	2.31	15.40	30.37	0.02	0.03	0.01	0.04	0.00	—	—	—	—	57.15
DLS18-1-7-1	方解石	0.32	0.02	0.13	4.47	3.08	19.30	32.55	0.04	0.02	0.00	0.05	0.53	—	—	—	—	60.51
DLS21-1-2	方解石	0.00	0.05	0.01	10.80	8.98	9.65	26.32	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	—	—	—	—	55.88
DLS24-1-3-1	方解石	0.01	0.00	0.00	9.38	6.42	12.20	28.88	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	—	—	—	—	56.90
DLS24-1-3-2	方解石	0.01	0.00	0.01	11.18	5.80	11.95	29.26	0.00	0.00	0.01	0.03	0.06	—	—	—	—	58.31

注: “—”代表未测试项。

表 2 正长岩、大理岩和绿片岩的主量元素($\omega_B/\%$)及微量元素($\omega_B/10^{-6}$)分析
Table 2 Analyses of major elements ($\omega_B/\%$) and trace elements ($\omega_B/10^{-6}$) from syenite, marble and green schist

样品编号	P2L2-5-2b	P2L2-5-3b	P2L2-6-1	P2L3-7-3	P2L3-9-4	ZJLZ 01-1	ZJLZ 01-2	ZJLZ 01-3	ZJLZ 01-4	ZJLZ 01-5	ZJLZ 03	DLS 02
样品名称	正长岩	正长岩	正长岩	正长岩	正长岩	大理岩	大理岩	大理岩	大理岩	大理岩	绿片岩	绿片岩
SiO ₂	68.80	68.70	68.20	67.90	34.70	0.80	0.25	0.12	0.83	0.23	44.30	49.30
TiO ₂	0.24	0.24	0.27	0.31	0.88	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	1.90	1.78
Al ₂ O ₃	13.50	13.90	13.50	13.10	7.59	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	11.10	12.00
Fe ₂ O ₃	0.76	0.57	0.20	0.03	3.12	0.01	0.02	0.03	0.00	0.00	4.86	6.44
FeO	0.90	0.93	1.33	1.79	6.75	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	8.86	4.99
MnO	0.06	0.05	0.06	0.06	0.68	0.04	0.07	0.09	0.06	0.03	0.18	0.14
MgO	0.64	0.45	0.59	0.68	15.40	0.22	0.31	0.31	0.27	0.28	11.70	12.60
CaO	2.10	1.82	2.01	2.83	7.63	55.50	55.20	55.30	55.40	55.20	7.58	4.62
Na ₂ O	4.74	4.24	4.26	4.69	0.81	0.01	0.08	0.01	0.00	0.00	2.82	3.66
K ₂ O	5.59	6.30	6.53	4.78	6.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03
P ₂ O ₅	0.05	0.04	0.11	0.10	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01	0.17	0.12
H ₂ O ⁺	0.61	0.53	0.50	0.60	1.59	1.19	0.77	1.10	0.81	0.76	4.47	4.54
CO ₂	1.46	1.40	1.93	3.75	12.60	39.90	40.50	41.50	41.20	41.70	2.71	0.17
LOI	2.09	2.28	2.84	4.09	13.10	43.40	43.50	43.30	42.60	43.20	6.18	4.48
Total	101.50	101.50	102.30	104.70	111.20	97.80	97.30	98.60	98.70	98.30	100.70	100.40
Li	20.80	25.20	11.10	6.26	205.00	0.32	0.41	2.53	0.35	0.13	26.90	3.58
Be	7.55	4.42	3.45	2.03	40.80	0.05	0.05	0.12	0.06	0.05	1.88	0.75
Cr	6.96	4.20	4.38	6.03	1 413	16.40	19.30	26.70	24.30	13.80	1 080	791.00
Mn	448.00	329.00	409.00	458.00	5 849	32.80	47.90	41.20	48.80	24.30	1 498	1183
Ga	21.70	18.80	18.50	18.80	14.60	0.07	0.09	0.10	0.05	0.05	21.20	17.40
Rb	106.00	131.00	149.00	97.90	522.00	0.56	0.31	0.72	0.46	0.09	2.74	0.30
Sr	1 912.00	1 734.00	2 622.00	1 905.00	1 311.00	119.00	128.00	158.00	154.00	98.30	173.00	73.40
Cd	0.09	<0.05	0.09	0.06	0.31	0.10	1.98	0.11	0.11	0.07	0.19	0.08
Ba	4 743	6 129	9 280	3 922	3 188	293.00	61.40	237.00	223.00	154.00	54.30	22.00
Tl	0.76	0.80	1.01	0.68	4.69	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Pb	82.40	33.20	113.00	26.30	34.20	10.10	22.30	3.30	2.08	0.67	4.59	1.22
Bi	0.22	0.16	0.44	0.17	<0.05	0.05	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Th	67.40	55.30	55.60	78.40	8.43	0.46	0.34	0.28	0.20	0.18	1.68	0.89
U	19.00	4.93	5.34	6.38	29.60	0.18	0.28	0.26	0.37	0.23	0.60	0.16
Nb	38.10	29.70	20.20	16.10	15.80	0.14	0.24	0.11	0.07	0.05	15.00	9.70
Ta	0.88	0.75	0.75	0.75	0.37	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.89	0.55
Zr	507.00	275.00	214.00	340.00	43.50	0.98	1.39	0.41	0.85	0.26	131.00	114.00
Hf	10.20	6.71	6.46	8.36	1.60	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	3.98	3.59
Sn	1.54	1.31	1.27	1.88	1.15	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	1.28	1.38
Sb	0.18	0.25	0.48	0.95	0.27	0.06	0.05	0.14	0.07	0.05	0.59	0.24
Ti	1 500.00	1 388.00	1 490.00	1 876.00	5 873.00	12.70	24.40	16.20	8.37	5.74	12 965.00	11 329.00
As	2.28	1.56	1.26	1.43	2.96	0.19	0.28	0.30	0.22	0.43	1.11	0.72
V	34.30	24.80	23.40	43.10	179.00	3.42	7.43	5.95	4.86	3.67	363.00	326.00
La	610.00	138.00	148.00	160.00	521.00	2.70	2.11	6.45	2.66	1.03	14.70	12.60
Ce	839.00	274.00	273.00	307.00	890.00	4.80	3.32	8.93	2.74	0.95	34.10	26.60
Pr	76.70	32.20	29.50	34.90	100.00	0.54	0.40	0.98	0.35	0.14	4.70	4.01
Nd	216.00	124.00	103.00	123.00	369.00	1.92	1.47	3.18	1.23	0.53	20.80	18.80
Sm	23.60	19.70	14.30	18.00	59.40	0.39	0.28	0.52	0.26	0.14	5.10	4.79
Eu	4.95	5.03	3.44	4.49	13.60	0.12	0.08	0.15	0.08	0.05	1.79	1.74
Gd	13.60	12.00	9.93	11.00	33.50	0.23	0.31	0.45	0.23	0.15	5.35	5.44
Tb	1.43	1.44	1.11	1.28	3.96	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.80	0.84
Dy	5.88	6.07	5.08	5.43	16.90	0.12	0.25	0.27	0.20	0.14	4.41	4.89
Ho	0.85	0.90	0.75	0.82	2.74	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.78	0.89
Er	2.23	2.03	1.76	1.85	6.80	0.06	0.14	0.15	0.14	0.10	2.04	2.33
Tm	0.35	0.28	0.26	0.27	1.14	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.30	0.34
Yb	2.28	1.65	1.50	1.61	7.09	0.05	0.13	0.12	0.11	0.09	1.80	2.09
Lu	0.33	0.21	0.20	0.23	0.95	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.26	0.28
Sc	3.37	2.93	3.23	3.82	20.30	0.44	0.39	0.37	0.25	0.35	41.50	30.50
Y	25.60	23.30	19.90	22.00	76.60	1.10	2.26	2.87	2.84	2.39	20.60	21.80
ΣREE	1 797.20	617.51	591.83	669.88	2 026.08	11.13	8.69	21.40	8.20	3.52	96.93	85.64
LREE	1 741.70	568.20	553.50	624.90	1 880.00	9.96	7.30	19.54	6.98	2.65	74.30	62.01
HREE	5.19	4.17	3.72	3.96	15.98	0.21	0.37	0.37	0.35	0.29	4.40	5.04
LREE/HREE	335.59	136.26	148.79	157.80	117.65	47.43	19.73	52.81	19.94	9.14	16.89	12.30

Hou 等(2006)研究的冕宁—德昌 REE 矿带中其他三个矿床的碳酸岩-正长岩杂岩体的总稀土含量非常高(碳酸岩 $2\ 470\times 10^{-6}\sim 40\ 807\times 10^{-6}$; 正长岩 $630\times 10^{-6}\sim 3\ 233\times 10^{-6}$)(表 3), 碳酸岩 LREE/HREE 比值为 79.1~1 427, 正长岩 LREE/HREE 比值为 7.47~753(图 6E, F), 正长岩与碳酸岩的稀土含量以及轻重稀土比值特征都非常相似。

6 讨论

6.1 围岩与成矿关系

木落寨矿床围岩主微量测试分析显示, 大理岩的总稀土含量较低, 为 $4\times 10^{-6}\sim 21\times 10^{-6}$, 其中轻稀土含量($2.65\times 10^{-6}\sim 19.5\times 10^{-6}$)高于重稀土($0.21\times 10^{-6}\sim 0.37\times 10^{-6}$), LREE/HREE 比值为 9.14~52.7, 轻重稀土均呈亏损状态; 绿片岩总稀土含量也较低, 为 $86\times 10^{-6}\sim 97\times 10^{-6}$, 其中轻稀土含量($62.0\times 10^{-6}\sim 74.3\times 10^{-6}$)也高于重稀土

($4.40\times 10^{-6}\sim 5.04\times 10^{-6}$), LREE/HREE 比值为 12.3~16.89, 轻重稀土也均呈亏损状态; 正长岩的总体稀土含量为 $592\times 10^{-6}\sim 2\ 026\times 10^{-6}$, 其中轻稀土含量为 $554\times 10^{-6}\sim 1\ 880\times 10^{-6}$, 重稀土含量为 $3.72\times 10^{-6}\sim 22.0\times 10^{-6}$ 。与大理岩和绿片岩相比, 木落寨正长岩的总稀土含量非常高。且图 6(E, F)显示, Hou 等(2006)研究的冕宁—德昌 REE 矿带中牦牛坪、大陆槽和里庄三个稀土矿床的碳酸岩-正长岩杂岩体的总稀土含量非常高(碳酸岩 $2\ 470\times 10^{-6}\sim 40\ 807\times 10^{-6}$; 正长岩 $630\times 10^{-6}\sim 3\ 233\times 10^{-6}$), 稀土含量中轻稀土含量远高于重稀土, 碳酸岩 LREE/HREE 比值为 79.1~1 427, 正长岩 LREE/HREE 比值为 7.47~753(表 3), 正长岩与碳酸岩的稀土含量以及轻重稀土比值特征都更为相似。与本次研究的木落寨正长岩和前人研究的冕宁—德昌 REE 矿带中其他三个稀土矿床的正长岩和碳酸岩相比, 大理岩和绿片岩围岩的总稀土含量和轻重

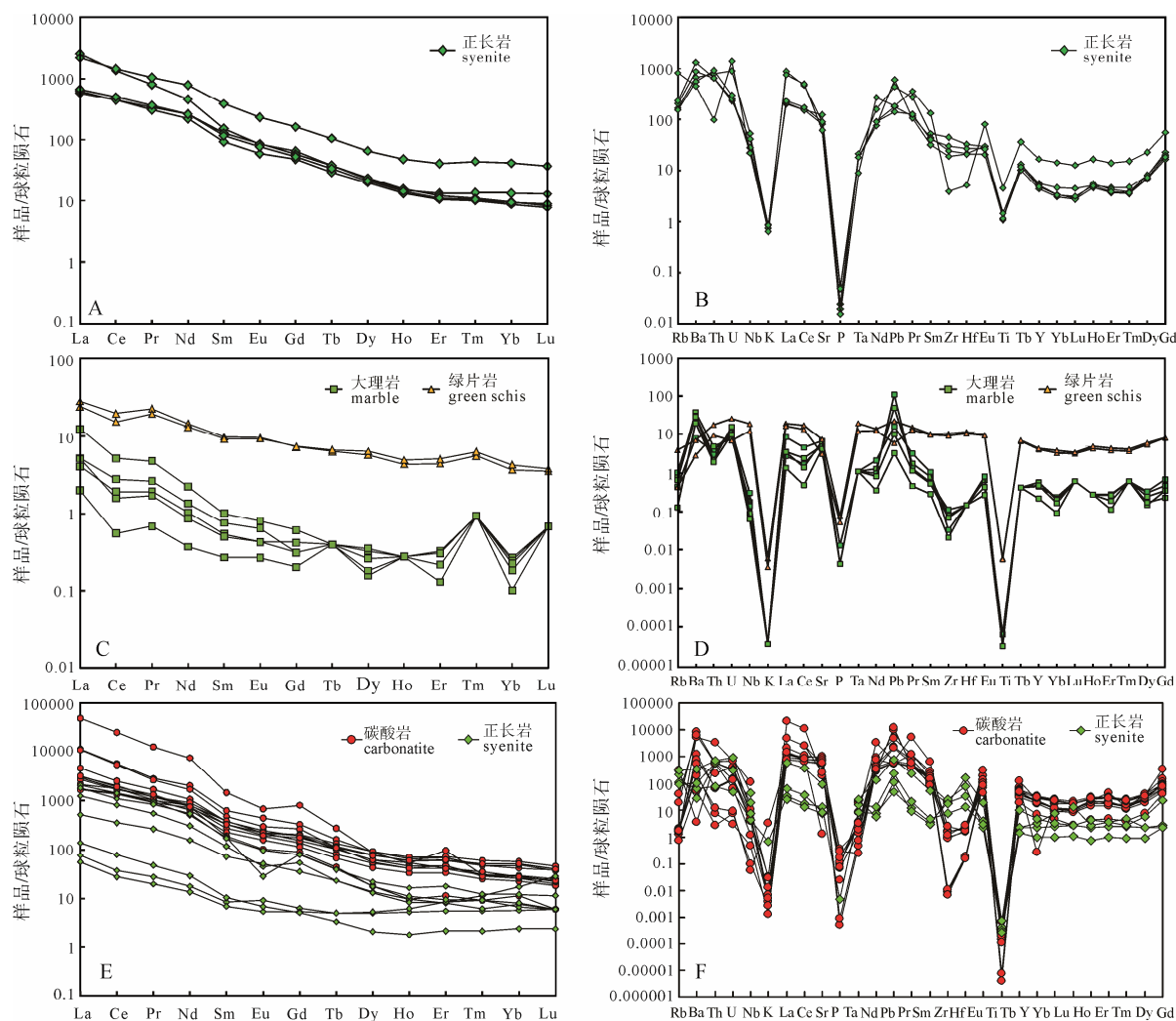


图 6 木落寨矿区正长岩(A、B)、大理岩和绿片岩(C、D)以及冕宁—德昌稀土矿带牦牛坪、大陆槽、里庄矿床碳酸岩和正长岩稀土元素和微量元素球粒陨石标准化曲线图(E、F)(据 Hou et al., 2006 修改)

Fig. 6 Chondrite-normalized patterns of REE and trace elements of syenite (A, B), marble and green schist (C, D) in the Muluozaishan mining area and carbonatite and syenite in Maoniuping, Dalucao, Lizhuang deposits of the Mianning-Dechang REE metallogenic belt (E, F) (modified after Hou et al., 2006)

表 3 冕宁—德昌 REE 矿带矿床中碳酸岩和正长岩中稀土元素含量($\omega_B/10^{-6}$)(数据引自 Hou et al., 2006)
Table 3 The content of REE ($\omega_B/10^{-6}$) from carbonate and syenite in the Mianning-Dechang REE belt deposit (the data after Hou et al., 2006)

样品编号	DL-17	DL-20	DL-22	LZ-01	LZ-02	LZ-03	MN-2-6	MNP-11	MNP-10	MNP-16	SM-6B	DL-12	DL-14	LZ-07	MO-48	MO-52	MO-62	MN-2 4
样品名称	碳酸岩	碳酸岩	碳酸岩	碳酸岩	碳酸岩	碳酸岩	碳酸岩	碳酸岩	碳酸岩	碳酸岩	碳酸岩	正长岩	正长岩	正长岩	正长岩	正长岩	正长岩	正长岩
La	946.00	884.00	1 400.00	3 400.00	14 700.00	3 300.00	815.70	524.00	648.00	514.00	965.00	23.80	17.40	42.60	381.00	158.00	625.00	554.00
Ce	1 600.00	1 400.00	2 000.00	4 500.00	19 600.00	4 300.00	1 329	1 143.00	1 395.00	1 079.00	1 523.00	30.30	22.40	63.30	651.00	285.00	1 125	870.00
Pr	141.00	124.00	203.00	337.00	1 500.00	317.00	146.40	120.00	142.00	110.00	160.00	3.37	2.42	5.86	66.00	32.00	113.00	102.00
Nd	451.00	384.00	636.00	1 200.00	4 400.00	1 000.00	487.40	468.00	542.00	422.00	444.00	10.70	8.15	17.50	183.00	94.00	300.00	322.00
Sm	52.90	44.10	72.10	121.00	279.00	91.70	63.48	74.30	74.70	63.50	37.00	1.65	1.35	2.03	23.00	14.00	35.00	33.40
Eu	13.90	11.60	18.00	32.10	49.60	21.80	16.33	16.40	16.40	14.40	7.50	0.67	0.40	0.50	3.30	3.80	2.10	7.08
Gd	35.30	29.60	48.50	84.00	206.00	67.90	39.30	53.00	50.30	45.50	23.00	1.63	1.41	1.33	14.00	9.30	21.00	20.50
Tb	3.87	3.21	4.87	7.65	13.00	5.26	4.82	6.27	5.53	5.20	2.10	0.24	0.24	0.16	1.10	1.10	1.90	1.85
Dy	16.80	13.90	19.70	28.70	27.80	18.00	20.13	29.70	25.30	24.40	5.80	1.63	1.72	0.68	4.40	4.20	5.70	7.10
Ho	2.98	2.42	3.29	4.71	3.79	3.00	3.90	5.04	4.16	4.33	0.70	0.38	0.45	0.13	0.70	0.60	0.80	1.18
Er	8.52	7.13	9.59	14.40	20.20	9.86	8.64	15.10	12.70	13.10	2.40	1.17	1.78	0.46	1.70	1.80	2.00	3.76
Tm	0.99	0.82	1.02	1.53	1.02	0.92	1.16	1.94	1.53	1.65	0.30	0.18	0.37	0.07	0.20	0.30	0.30	0.40
Yb	5.40	4.70	5.82	8.81	6.12	5.45	5.83	12.00	10.10	10.80	2.40	1.20	3.64	0.51	1.60	1.40	1.70	2.54
Lu	0.65	0.61	0.74	1.26	0.83	0.80	0.77	1.53	1.24	1.33	0.20	0.20	0.95	0.08	0.20	0.20	0.20	0.38
ΣREE	3 279.31	2 910.09	4 422.63	9 741.16	36 407.36	9 141.69	2 942.86	2 470.28	2 928.96	2 309.21	3 173.40	77.12	62.68	135.21	1 331.20	605.70	2 233.70	1 926.19
LREE	3 138.00	2 792.00	4 239.00	9 437.00	35 800.00	8 917.00	2 778.50	2 255.00	2 727.00	2 125.00	3 092.00	68.17	50.37	129.26	1 281.00	569.00	2 163.00	1 848.00
HREE	15.56	13.26	17.17	26.00	28.17	17.03	16.40	30.57	25.57	26.88	5.30	2.75	6.74	1.12	3.70	3.70	4.20	7.08
LREE/HREE	201.67	210.56	246.88	362.96	1 270.86	523.61	169.42	73.77	106.65	79.06	583.40	24.79	7.47	115.41	346.22	153.78	515.00	261.02

稀土比值都非常低,因此在稀土元素上,这两种围岩可能对成矿贡献不大。冕宁—德昌稀土矿带的断裂构造活动在新生代,该成矿带中的牦牛坪、大陆槽、里庄矿床中的萤石、重晶石、方解石和天青石脉石矿物中的 Sr-Nd-Pb 同位素组成差异较小,这几种脉石矿物的 Sr-Nd-Pb 同位素组成与碳酸岩和正长岩非常相似,这三者的一致性指示它们具有共同的来源,因此该稀土成矿带中矿床的成矿物质可能来源于碳酸岩-正长岩杂岩体(Liu and Hou, 2017),结合本次对木落寨中正长岩、大理岩和绿片岩的主微量测试分析,并根据剖面展示,矿体大部分出现在正长岩裂隙中,极少部分出现在正长岩和大理岩接触面中,因此笔者认为木落寨矿床的成矿也与正长岩密切相关,大理岩和绿片岩这两种围岩可能都不是成矿物质的主要来源,大理岩可能提供 CO_3^{2-} , 促进交代和成矿作用的进行。

6.2 矿体特征

根据矿洞剖面观察测量和野外地质调查发现,木落寨矿区内褶皱被断裂所破坏,断裂总体呈向西倾的单斜构造。断裂对稀土成矿起着重要的控制作用。矿区内的控矿构造,为茶铺子断裂带形成的入字型分枝断层控制,主要有三组:以北北东向和北东向($30^\circ\sim 40^\circ$)断裂为主,次为东西走向断裂构造控矿,矿体在延长和延深方面都扩大了远景。茶铺子—巴折区域性断裂是新发现的槽台边界断层,从南部(里庄幅)延伸至本矿区。该断裂带呈南北向,倾向西,在其两盘常有长 100~600 m,宽 100~300 m 的片理化带相伴,玄武岩均变质为绿泥片岩。矿区内的次级控矿容矿断层与茶铺子—巴折区域性断裂呈“入字型”相交,这些分枝断层为直接的储矿构造,有其成生关系。张性断裂控矿,矿体延长和延深的规模均小。而张扭性断裂控矿,矿体延长和延深的规模都较大。

根据野外和矿段剖面观察,发现正长岩侵入灰白色大理岩中,矿化主要发生在正长岩中,少部分蚀变发生在正长岩和大理岩的接触面中,控矿岩体主要是新生代正长岩,围岩主要是大理岩和绿片岩。剖面显示围岩矿化不明显,蚀变较少,显示成矿主要为充填作用,交代作用次之。由于矿区的控矿断裂为张性断裂,矿体延长和延深的规模均小,长度在 100~300 m 之间,深度在 70~100 m 之间。从剖面(图 3)可以看出,矿脉规模大多数为 1~2 m,少部分位置可达 5 m 左右,与牦牛坪的张扭性断裂控矿和与大陆槽断层及其次级断层和由稀土矿化作用所控制的隐爆角砾岩事件而成矿相比,木落寨矿床矿体的规模较小,延伸较短,该矿床规模较小可能与其缺少伟晶岩阶段,并且矿化期次较少有关。

6.3 矿石特征

根据矿体特征和手标本观察,本次认为木落寨矿石类型主要为细脉浸染型,少量为条带型。细脉浸染型矿石为浸染状构造,主要脉石矿物有萤石+方解石+重晶石+石膏+黄铁矿+方铅矿+石英+金云母等,矿石矿物为氟碳铈矿。已有研究认为,木落寨的矿石类型可划分为 3 种:块状萤石-氟碳铈矿矿石、浸染状和条带状矿石(侯增谦等, 2008),本次研究与前人研究的木落寨矿石类型基本一致,而与牦牛坪矿床的大脉型和大陆槽的隐爆角砾岩型相比差异较大。

根据宏观的矿物共生和穿插关系、背散射图像下反映出来的矿物特征和叠加关系以及野外观察,发现脉石矿物和稀土矿物主要生成在热液阶段(图 5),菱镁矿与方解石类质同象,天青石与重晶石类质同象;萤石被石膏、方解石、菱镁矿叠加,同时又叠加在这 3 种矿物之上;方铅矿叠加在石膏和天青石之上;金云母与氟碳铈矿密切共生;氟碳铈矿主要呈细颗粒状和板柱状,叠加在萤石+方解石+重晶石+石膏+黄铁矿+方铅矿+石英+金云母等脉石矿物之上,表明氟碳铈矿形成于成矿流体结晶的热液阶段最晚期。通过野外观察和实验并与牦牛坪和大陆槽矿床矿物生成顺序(Liu and Hou, 2017)进行深入对比,大致推测出木落寨矿床中矿物的生成顺序。

7 结论

(1)木落寨矿床围岩全岩地球化学特征分析显示,大理岩稀土含量为 $4\times 10^{-6}\sim 21\times 10^{-6}$,绿片岩稀土含量为 $86\times 10^{-6}\sim 97\times 10^{-6}$,与本次研究的木落寨正长岩稀土含量($592\times 10^{-6}\sim 2\ 026\times 10^{-6}$)和已研究的冕宁—德昌 REE 矿带牦牛坪、大陆槽、里庄的碳酸岩、正长岩的总稀土含量(碳酸岩 $2\ 470\times 10^{-6}\sim 40\ 807\times 10^{-6}$;正长岩 $630\times 10^{-6}\sim 3\ 233\times 10^{-6}$)相比都非常低;表明大理岩和绿片岩可能都不是木落寨矿床成矿物质的主要来源,大理岩可能提供 CO_3^{2-} , 促进交代和成矿作用的进行。

(2)与张扭性断裂控矿的牦牛坪和隐爆角砾岩事件成矿的大陆槽不同的是,木落寨为张性断裂控矿,稀土矿体赋存在被断层控制的裂隙内,断裂对稀土成矿起着重要的控制作用,矿化主要发生在正长岩中,少部分发生在正长岩和大理岩的接触面中,围岩矿化不明显,蚀变较少,显示成矿作用以充填作用为主,交代作用为次。

(3)野外地质观察、矿物手标本观察、电子探针测试分析表明,木落寨矿石类型主要为细脉浸染型,少量为条带型。木落寨矿床缺少伟晶岩阶段,矿石

中矿物主要形成在热液阶段, 矿物宏观和微观研究指示氟碳铈矿形成于热液阶段的最晚期。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41772044), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (Nos. YYWF201509 and YYWF201704), and China Geological Survey (No. 1212011020000150011-03).

参考文献:

- 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-德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 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, 丁悌平, 毛景文. 2003. 四川牦牛坪稀土矿床地幔流体成矿的碳、氢、氧、硫同位素证据[J]. 地球学报, 24(6): 543-547.
- 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): 177-187.
- 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, 张桂兰, 侯增谦, 丁悌平, 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.
- 万德芳, 田世洪. 2004. 攀西大陆槽稀土矿床深源成矿流体的稳定同位素证据[J]. 地球学报, 25(2): 161-164.
- 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.
- 袁忠信, 施泽民, 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.
- 周家云, 沈冰, 朱志敏, 刘飞燕. 2006. 四川冕宁木洛稀土矿床地质特征[J]. 稀有金属, 30(4): 494-499.

References:

- HOU Zeng-qian, LIU Yan, TIAN Shi-hong, YANG Zhi-ming, XIE Yu-ling. 2015. Formation of carbonatite related giant rare-earth-element deposits by the recycling of marine sediments[J]. Sci. Reports, 5: 10231.
- HOU Zeng-qian, MA Hong-wen, KHIN Z, ZHANG Yu-quan, WANG Ming-jie, WANG Zeng, PAN Gui-tang, TANG Ren-li. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product by large-scale strike-slip faulting in Eastern Tibet[J]. Economic Geology, 98: 125-145.

- HOU Zeng-qian, TIAN Shi-hong, XIE Yu-ling, YANG Zhu-sen, YUAN Zhong-xin, YIN Shu-ping, YI Long-sheng, FEI Hong-cai, ZOU Tian-ren, BAI Ge, LI Xiao-yu. 2009. The Himalayan Mianning-Dechang REE belt associated with carbonatite-alkaline complexes, eastern Indo-Asian collision zone, SW China[J]. Ore Geology Reviews, 36: 65-89.
- HOU Zeng-qian, TIAN Shi-hong, YUAN Zhong-xin, XIE Yu-ling, YIN Shu-Ping, YI Long-sheng, FEI Hong-cai, YANG Zhi-ming. 2006. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: petrogenesis, mantle source and tectonic implication[J]. Earth and Planetary Science Letters, 244: 34-250.
- HOU Zeng-qian, TIAN Shi-hong, YUAN Zhong-xin, YANG Zhu-sen, YIN Shu-ping, FEI Hong-cai, ZHOU Tian-ren, LI Xiao-yu, YANG Zhi-ming. 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]. Acta Petrologica Sinica, 27(2): 145-176(in Chinese with English abstract).
- HU Ze-song, SHEN Bing, ZHU Zhi-min, LIU Fei-yan, CHEN Jia-biao, ZHOU Jia-yun, XIONG Wen-liang. 2008. Exploration report of Fangjiabao REE deposit in Yinshan Village. Whole report not acquired, Nanhe town, Mianning County, Sichuan Province[R]. Chengdu: Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- LING Xiao-xiao, LI Qiu-li, LIU Yan, LIU Yu, TANG Guo-qiang, LI Xian-hua. 2016. In situ SIMS Th-Pb dating of bastnaesite: constraint on the mineralization time of the Himalayan Mianning-Dechang rare earth element deposits[J]. The Royal Society of Chemistry, 1680-1687.
- LIU Yan, CHEN Zhen-yu, YANG Zhu-sen, SUN Xiag, ZHU Zhi-min, ZHANG Qi-chao. 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 Yan, HOU Zeng-qian, TIAN Shi-hong, ZHANG Qi-chao, ZHU Zhi-min, LIU Jian-hui. 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, 554-568.
- LIU Yan, HOU Zeng-qian. 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: 35-79.
- LIU Yan, ZHU Zhi-min, CHEN Chao, ZHANG Shu-pin, SUN Xiang, YANG Zhu-sen, LIANG Wei. 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.
- TIAN Shi-hong, DING Ti-ping, MAO Jing-wen. 2003. Mantle Fluids Involved in the ore-forming process of the Maoniuping REE Deposit, sichuan: Evidence of C, H, O and S Isotopes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 24(6): 543-547(in Chinese with English abstract).
- TIAN Shi-hong, HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, CHEN Wen, YANG Zhi-ming, YUAN Zhong-xin, XIE Yu-ling, FEI Hong-cai, YIN Shu-ping, LIU Ying-chao, LI Zheng, LI Xiao-yu. 2008. Geochronology of REE deposits in Mianning-Dechang REE metallogenic belt: Constraints on duration of hydrothermal activities and tectonic model for carbonatite-alkalic complexes in southwestern Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 177-187(in Chinese with English abstract).
- TIAN Shi-hong, HOU Zeng-qian, YUAN Zhong-xin, CHEN Wen, XIE Yu-ling, FEI Hong-cai, YIN Shu-ping, YI Long-sheng, ZHOU Su. 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 Shi-hong, ZHANG Gui-lan, HOU Zeng-qian, DING Ti-ping, XIE Yu-ling, YUAN Zhong-xin, BAI Ge, ZOU Tian-ren. 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).
- WAN De-fang, TIAN Shi-hong. 2004. Stable Isotope Evidence of Deep Source Ore-forming Fluid in the Dalucao REE Deposit of the Panxi Rift[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(2): 161-164(in Chinese with English abstract).
- WANG Jiang-hai, YIN An, MARK H T, GROVE M, ZHANG Yu-quan, XIE Guang-hong. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 88: 123-133.
- WU Bin, WANG Ru-cheng, YANG Jin-hui, WU Fu-yuan, ZHANG Wen-lan, GU Xiang-ping, ZHANG Ai-cheng. 2016. Zr and REE mineralization in sodic lujavrite from the Saima alkaline complex, northeastern China: A mineralogical study and comparison with potassic rocks[J]. *Lithos*, 262: 232-246.
- XIE Yu-ling, TIAN Shi-hong, HOU Zeng-qian, CHEN Wei, YIN Shu-ping, GAO Sheng. 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).
- YANG Yue-heng, WU Fu-yuan, LI Yang, YANG Jin-hui, XIE Lie-wen, LIU Yan, ZHANG Yan-bin, HUANG Chao. 2014. In situ U-Pb dating of bastnaesite by LA-ICP-MS[J]. *J. Anal. Atom. Spectrom*, 29: 1017-1023.
- YIN An, MARK H T. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibet an orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280.
- YUAN Zhong-xin, SHI Ze-min, BAI Ge, WU Cheng-yu, CHI Ru-an, LI Xiao-yu. 1995. The Maoniuping rare earth ore deposit, Mianning county, Sichuan Province[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- ZHOU Jia-yun, SHEN Bing, ZHU Zhi-min, LIU Fei-yan. 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).