

四川冕宁里庄稀土元素矿床矿石类型及金云母 Ar-Ar 年龄*

李德良¹, 刘 琰^{2*}, 郭东旭², 舒小超¹, 姜 恒¹, 陈 超¹, 欧阳怀¹, 郑 旭¹, 李自静²

(1 中国地质大学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 四川冕宁-德昌稀土元素成矿带长约 270 km, 宽 15 km, 该成矿带包括牦牛坪超大型、大陆槽大型、木落寨中型和里庄小型稀土元素矿床及一系列矿点和矿化点。里庄稀土元素矿床作为矿带中唯一矿化特征以细脉浸染状为主的矿床, 该矿床细脉浸染状矿化特征的成因和围岩蚀变特征尚未得到详细研究。文章将通过详细野外调查和室内研究, 总结矿石类型和碳酸岩、正长岩蚀变特征, 揭示细脉浸染状矿化特征的成因。研究表明, 里庄矿床矿石类型以细脉浸染状为主, 兼有少量角砾状。细脉浸染状矿石呈致密块状, 矿物共生组合主要为氟碳铈矿+方解石+萤石+天青石+金云母, 大规模的氟碳铈矿形成于热液阶段晚期并叠加在早期方解石、萤石和天青石等脉石矿物之上。细脉浸染状矿石全岩稀土元素配分显示 LREE 富集($33430 \times 10^{-6} \sim 46530 \times 10^{-6}$), HREE 亏损($160 \times 10^{-6} \sim 192 \times 10^{-6}$), 稀土元素总量高($33620 \times 10^{-6} \sim 46690 \times 10^{-6}$), 全岩稀土元素配分特征与碳酸岩和正长岩相似, 但后者稀土元素总量较低。与牦牛坪发育脉状矿化系统、大陆槽角砾岩筒系统相比, 里庄矿化特征以细脉浸染状为主, 其可能是由于张性裂隙不发育造成的。区内正长岩-碳酸岩杂岩体广泛发育强烈的蚀变作用。正长岩发育典型霓长岩化, 这种蚀变以钾长石被钠长石交代为特征, 并形成次生鳞片状黑云母, 少量半自形氟碳铈矿叠加在钠长石和黑云母之上。碳酸岩广泛发育红化, 其原生表面洁净的方解石被流体交代, 大量氟碳铈矿叠加在蚀变方解石之上。矿区矿体赋存在正长岩-碳酸岩杂岩体中, BSE 图像及显微镜观察显示氟碳铈矿叠加在蚀变碳酸岩-正长岩之上, 结合已有数据发现矿石及部分脉石矿物与碳酸岩-正长岩在微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征的一致, 表明碳酸岩-正长岩杂岩体提供了本矿床稀土元素矿化的物质来源。此次研究中发现, 在里庄矿床中大量发育与氟碳铈矿密切共生的金云母。文章对该金云母进行了 Ar-Ar 同位素测年, 获得金云母形成年龄为(26.0±1.1) Ma, 误差范围内与已报道的氟碳铈矿 SIMS Th-Pb 年龄和正长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄一致, 进一步说明 REE 成矿与正长岩-碳酸岩在成因上具有一致性。

关键词 地球化学; 矿石类型及成因; 围岩蚀变; 物质来源; ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄; 里庄矿床

中图分类号: P618.7

文献标志码: A

Ore types and phlogopite Ar-Ar age in Lizhuang REE deposit, Mianning County, Sichuan Province

LI DeLiang¹, LIU Yan², GUO DongXu², SHU XiaoChao¹, JIANG Heng¹, CHEN Chao¹, OUYANG Huai¹, ZHENG Xu¹ and LI ZiJing²

(1 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 2 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The Mianning-Decahng REE belt of Sichuan is 270 km long and 15 km wide, and includes superlarge Mao-

* 本文得到中国地质科学院基本科研业务费(编号:YYWF201509、YYWF201705)、中国地质调查项目(编号:1212011020000150011-03)和国家自然科学基金面上项目(编号:41772044)联合资助

第一作者简介 李德良,男,1992年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:lideliang3243@163.com

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

收稿日期 2017-07-06; 改回日期 2018-06-11。秦思婷编辑。

niuping deposit, large Dalucao deposit, middle Muluozhai deposit, small Lizhuang deposit and a series of mineralized spots. In the whole REE belt, the Lizhuang deposit is the the only one with stringer-disseminated characteristics. The causes of mineralization characteristics and main features of altered carbonatite and syenite have not been studied in detail. Based on field geological investigation and indoor study, the authors have emphatically summarized ore types and features of altered carbonatite and syenite and revealed stringer-disseminated ore genesis. It is found that the main ore types in the Lizhuang deposit are stringer-disseminated type and minor breccia type. Stringer-disseminated ore is massive and has stable mineral assemblage, mainly consisting of bastnaesite, calcite, fluorite, celestite and phlogopite. Large scale bastnaesite formed in the late hydrothermal stage and overlies the early calcite, fluorite and celestite. The rare earth elements distribution curves of stringer-disseminated ore show LREE enrichment ($33430 \times 10^{-6} \sim 46530 \times 10^{-6}$), HREE loss ($160 \times 10^{-6} \sim 192 \times 10^{-6}$), and high rare earth content ($33620 \times 10^{-6} \sim 46690 \times 10^{-6}$). The characteristics of rare earth elements distribution of stringer-disseminated ore is consistent with those of carbonatite and syenite, but the last two are lower in total amounts of rare earth elements. Compared with Maoniuping with developed vein mineralization system and Dalucao with breccia pipe, the mineralization characteristics of Lizhuang mainly are stringer-disseminated type, and the reason may be due to the undeveloped extension fracture. The syenite-carbonate complex in the area shows strong alteration. The syenite with typical fenitization is characterized by the replacement of K-feldspar by albite, with secondary scaly biotite. Minor bastnaesite is superimposed on the albite and biotite. The carbonatite widely develops reddening alteration. The primary calcite with clean surface was altered by fluid, and a large amount of bastnaesite is superimposed on the altered calcite. Orebodies are present in the syenite and carbonate rocks, BSE images and microscopic observations show that the bastnaesite is superimposed on the altered carbonatite-syenite. In combination with the available data, the authors found that features of ore and some gangue minerals are consistent with the characteristics of trace elements and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of carbonatite-syenite, indicating that the carbonate-syenite complex provided the source of REE mineralization. In addition, there were lots of metallogenic ages in the previous studies. However, there exist obvious differences between these ages; there is no good consistency due to different testing techniques and different test minerals. The systematic field geological mapping, microscopic observation and electron microprobe analysis show that the phlogopite is closely associated with bastnaesite in the Lizhuang deposit. The phlogopite Ar-Ar plateau age is (26.0 ± 1.1) Ma, which is very close to the previously reported zircon SHRIMP U-Pb age of syenite and SIMS Th-Pb age of bastnaesite within the error range, and this further explain genetic consistency between REE mineralization and syenite-carbonatite.

Key words: geochemistry, ore types and genesis, alteration, material source, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age, Lizhuang deposit

里庄稀土元素矿位于四川冕宁县西南约 49 km, 为冕宁-德昌稀土元素成矿带中一个小型的碳酸岩型稀土元素矿床, 其北部有牦牛坪超大型、木落寨中型稀土元素矿床, 南部有大陆槽大型矿床(图 1)。该成矿带位于印度-亚洲大陆碰撞带东缘, 该区域新生代岩浆活动极为频繁, 形成了一系列由新生代走滑断裂控制的钾质火成岩区(图 1), 这些岩浆活动在 35 Ma 达到高峰(Guo et al., 2005)。侯增谦等(2008)基于里庄、牦牛坪和大陆槽矿床不同矿化样式、矿体构造和流体包裹体数据, 提出了一个“三层楼”式矿化模式: 深部形成细

脉浸染状矿体(里庄式); 中部形成了脉状矿体(牦牛坪式); 上部形成角砾岩筒矿体(大陆槽式)。前人已经明确了牦牛坪矿床主要受 2 组走滑断裂影响, 频繁的构造活动和较发育的张性裂隙, 控制了牦牛坪脉状矿化特征(侯增谦等, 2008; Hou et al., 2009; Liu et al., 2017)。大陆槽矿床受 3 组走滑断裂控制, 构造活动频繁, 多期次热液活动, 控制了大陆槽角砾状矿化特征(侯增谦等, 2008; Hou et al., 2009; Liu et al., 2015b)。然而对于细脉浸染状矿化特征(里庄式矿体)的成因却不清楚, 因此有必要重新梳理里庄矿床中细脉浸染状矿石结构构

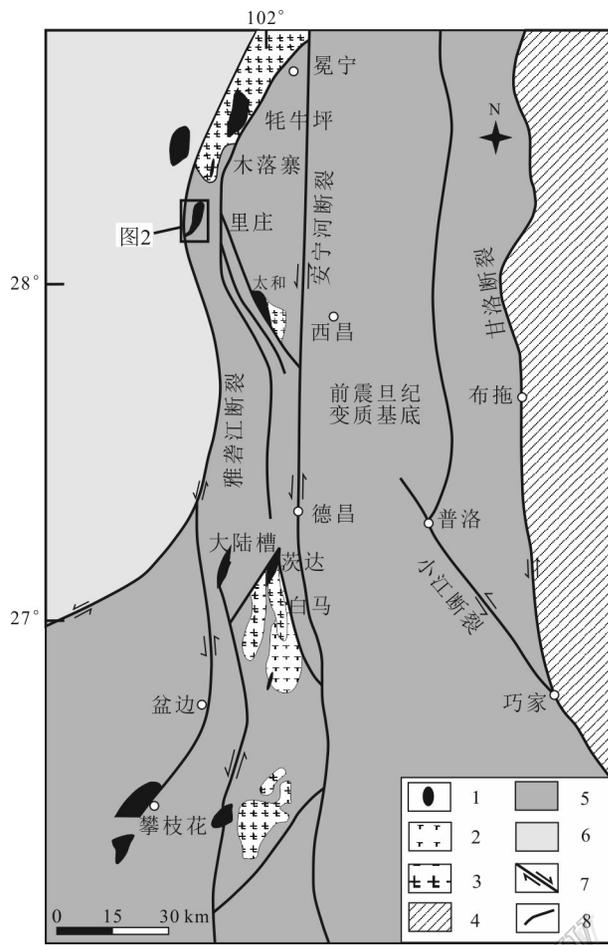


图1 川西新生代受活化断层控制的碳酸岩-碱性杂岩体分布范围的构造简图(据袁忠信等,1995修改)

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

Fig. 1 Sketch tectonic map showing the distribution of Himalayan carbonatite-alkalic complexes controlled by reactivated faults in western Sichuan (modified after Yuan et al., 1995)

- 1—Carbonatite-alkalic complex; 2—Syenite; 3—Alkaline granite;
4—Paleozoic-Mesozoic cover strata; 5—Precambrian metamorphic basement; 6—Jinpingshan orogenic belt;
7—Strike-slip fault; 8—Fracture

造,并结合野外地质调查,揭示里庄矿床细脉浸染状矿化特征的成因。同时,里庄矿区内正长岩和碳酸岩发育强烈蚀变,目前对于正长岩和碳酸岩的蚀变特征还缺少研究。

以往的研究中,对里庄矿床有许多成岩成矿年龄报道。如黑云母 Ar-Ar 年龄 (30.5 ± 0.4) Ma (田世洪等, 2008), 矿石矿物氟碳铈矿 SIMS Th-Pb 和 ICP-

MS U-Pb 年龄分别为 (28.4 ± 0.2) Ma (Ling et al., 2016) 和 (33.0 ± 2.1) Ma (Yang et al., 2014) 以及正长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 (27.41 ± 0.35) Ma (Liu et al., 2015a)。然而由于不同测试手段以及不同测试矿物,使得这些成矿年龄之间存在较大差异 (1~6 Ma), 没有较好的一致性。同时,氟碳铈矿代表的成矿年龄 ((28.4 ± 0.2) Ma 和 (33.0 ± 2.1) Ma) 均早于正长岩成岩年龄 ((27.41 ± 0.35) Ma), 这与地质事实不相符。前人报道的里庄矿床成矿年龄的矛盾之处,限制了对该矿床的进一步研究。经最近几年野外和室内工作,里庄矿床矿石中大量发育与氟碳铈矿密切共生的金云母,因此,笔者选择该类金云母重新准确厘定矿床形成年龄。

本文拟通过对里庄矿床野外地质调查、矿物电子探针成分分析、矿石与围岩全岩主微量分析、矿石 X 光粉晶衍射和金云母 Ar-Ar 同位素测年等一系列研究,重点总结细脉浸染状矿石和正长岩、碳酸岩蚀变特征,揭示细脉浸染状矿化成因以及进一步约束里庄矿床成矿年龄。

1 矿床地质概况

里庄稀土元素矿床 ($101^{\circ}52'17''E, 28^{\circ}13'21''N$) 位于青藏高原东缘,安宁河次级走滑断裂西侧以及雅砻江走滑断裂东侧,区域构造形迹以北北东向构造为主(图1)。矿区无区域上的大断裂(图2),在矿区中部见一左行走滑断裂,长约 200 m,产状 $350^{\circ} \angle 76^{\circ}$,岩石挤压破碎明显,大都形成断层泥。该断层为压扭性断层,断距不大,对矿体破坏较轻微。矿区碳酸岩-碱性岩杂岩体在地表出露宽约 100 m,长 400 m,主要由 NNW 向碳酸岩和正长岩组成,侵入在厚约 1000 m 的志留系—三叠系碎屑岩和碳酸盐岩中。碳酸岩和正长岩的构造破碎带或裂隙往往成为稀土元素矿的富集地段。矿体主要以脉状赋存在碳酸岩和正长岩中(图3b)。

矿区内地层主要为志留系—三叠系碎屑岩和碳酸盐岩以及第四系冲、洪积物及残坡积物。志留系—三叠系碎屑岩和碳酸盐岩分布于矿区东北侧。第四系冲、洪积物及残坡积物广泛分布于矿区西南冲沟两侧及区内缓坡地带(图2)。受区域构造的影响,矿区内岩石遭受不同程度破碎或片理化,裂隙发育。

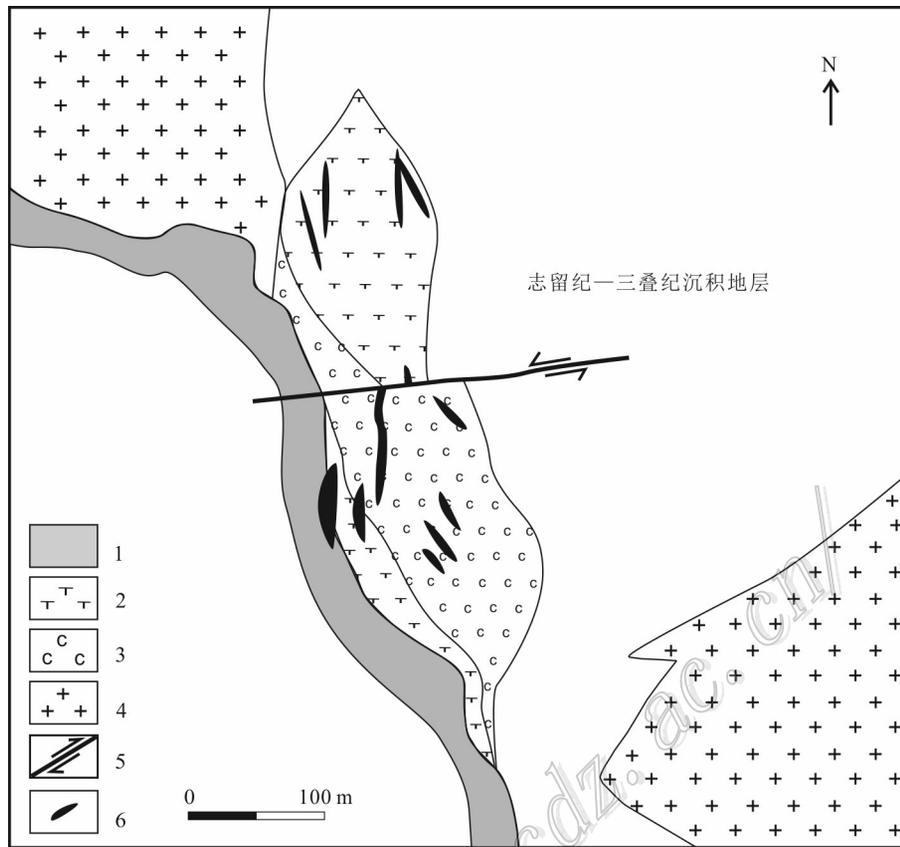


图2 里庄矿区构造简图(据侯增谦等,2008修改)

1—第四系;2—正长岩;3—碳酸岩;4—碱性花岗岩;5—走滑断裂;6—矿体

Fig. 2 Geological sketch map of the Lizhuang deposit (modified after Hou et al., 2008)

1—Quaternary;2—Syenite;3—Carbonatite;4—Alkaline granite;5—Strike-slip fault;6—Orebody

区内岩浆岩类主要有正长岩、碳酸岩、碱性花岗岩和少量角砾岩(图2)。成矿母岩主要为碳酸岩,分布于矿区中南部,呈灰白色,细粒结构,块状构造。碳酸岩主要矿物有方解石,少量黑云母、长石、石英及氟碳铈矿。矿区内正长岩与稀土矿化关系密切,发育不同程度碳酸盐化、霓长岩化及矿化。霓辉正长岩主要分布于矿区中北侧,呈浅褐灰色,中细粒结构,块状构造,主要矿物为长石、霓辉石,少量钠铁闪石、石英和金属矿物。黑云母辉石正长岩分布于中北侧局部地段,呈浅褐灰色,岩石呈块状构造,主要矿物有长石、辉石、黑云母,少量石英、磷灰石及金属矿物。角砾岩整体呈褐色,具有典型的碎屑支撑结构,碎屑主要由棱角状-圆状正长岩和碳酸岩角砾以及方解石、萤石、天青石矿物角砾组成,其基质由细粒方解石、石英和氟碳铈矿组成。碱性花岗岩分布于矿区东南侧和西北侧,中细粒花岗结构,块状构造,由钾长石、斜长石、石

英、黑云母组成。

区内的岩浆岩大都经历了低-中变质作用,主要为动力变质作用及热液接触交代变质作用,形成了黑云母角岩、大理岩、长石石英片岩等变质岩。动力变质作用表现为岩石片理化、劈理化、岩石碎粒化等,且有绿泥石等应力矿物产生。热液接触交代变质作用直接与成矿有关,主要为碳酸盐化、碳酸岩和正长岩的“红化”、霓长岩化和硅化。碳酸盐化分布于整个矿体,受热液及动力变质作用的影响,呈变晶结构、集合体块状构造产出,变质矿物出现方解石。碳酸岩的“红化”表现为碳酸岩中方解石的蚀变和肉眼不可见氟碳铈矿的形成引起的岩石颜色变红。正长岩的“红化”表现为后期含矿热液与正长岩的相互交代引起正长岩颜色发红。霓长岩化早于稀土元素矿化,这一蚀变过程体现在后期碳酸岩交代早期的正长岩时,使得正长岩中原生矿物细粒化,可能有利于成矿流体萃取正长岩中稀

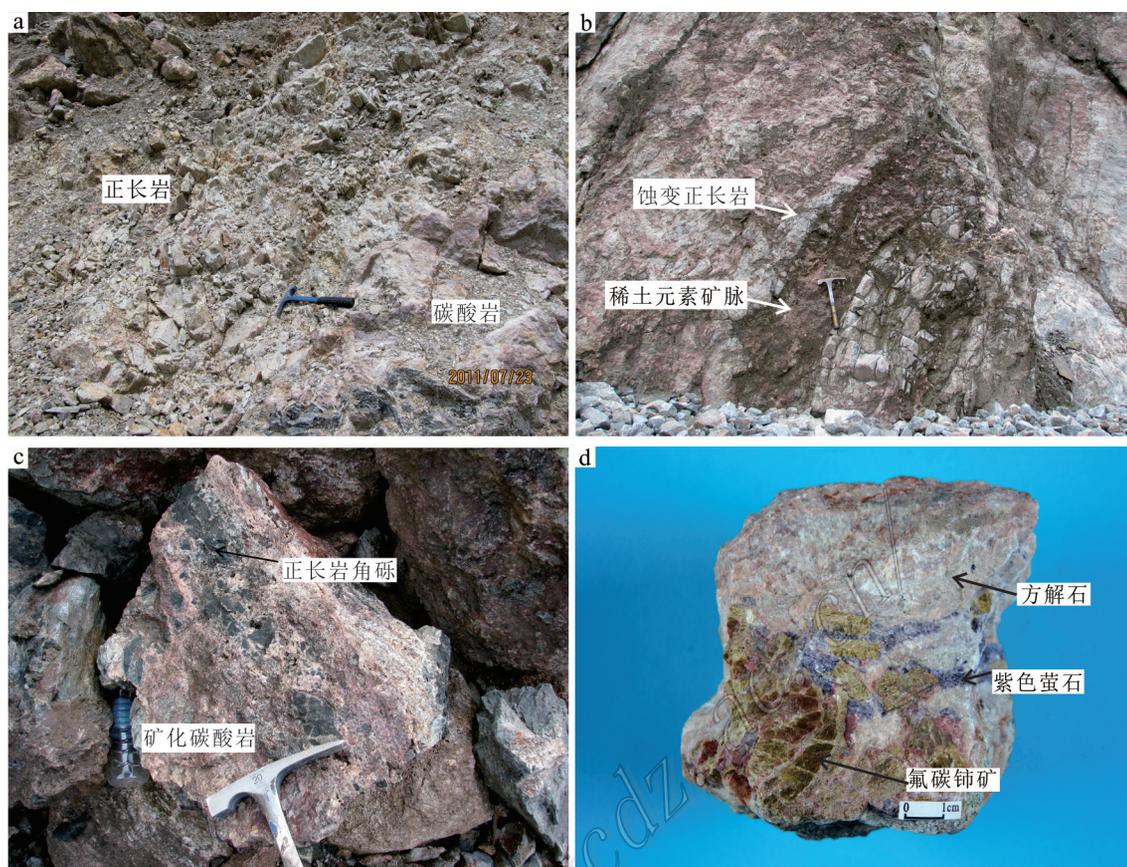


图3 里庄REE矿床野外照片

- a. 里庄矿床正长岩与红色碳酸岩接触边界; b. 里庄红色碳酸岩矿脉, 赋存于正长岩中; c. 里庄红色矿化碳酸岩, 含正长岩角砾;
d. 里庄红色细脉浸染状矿石、氟碳铈矿呈细脉状或斑块状分布于方解石和紫色萤石中

Fig. 3 Field photos of the Lizhuang REE deposit

- a. The contact belt with syenite and red carbonatite in the Lizhuang deposit; b. Lizhuang red carbonatite ore vein occurring in syenite;
c. Lizhuang red mineralized carbonatite with syenite breccia; d. Lizhuang red disseminated ore and stringer and massive bastnaesite within calcite and purple fluorite

土元素。硅化使得岩石颜色变浅、变致密, 有他形粒状变晶石英分散于岩石之中。

2 矿石类型

2.1 细脉浸染状矿石

在手标本下(图4a、b), 红色细脉浸染状矿石以细脉-浸染状构造为主, 整体呈粉红色, 主要的矿石矿物为氟碳铈矿。氟碳铈矿为黄褐色, 部分以细脉状集中分布在方解石中, 单个晶体呈自形-半自形柱状、板状, 长1~2 cm, 宽0.1~0.5 cm, 另一部分呈他形粒状集合体, 粒度多在0.1~1 cm, 大者1~5 cm, 小者<0.1 cm, 以稀疏浸染状或斑杂状嵌于方解石、萤石颗粒间。主要的脉石矿物有方解石、萤石。方

解石为白色, 部分为红色, 呈他形粒状不规则相间分布, 白色者颗粒粗大, 粒径约3~10 cm, 红色者结晶细小, 多呈细粒结构, 粒径<0.1 cm。萤石为矿区内分布较广泛的脉石矿物之一, 分为紫黑色或绿色, 部分呈半自形-他形粒状产出, 粒度多在0.01~1 cm, 部分呈细脉状分布在方解石中, 紫黑色萤石与氟碳铈矿密切共生。在显微镜以及背散射图像下, 天青石大量发育, 并以柱状或填隙状产出。金云母在单偏光下呈现黄绿色(图4d), 棱角明显, 伴随着氟碳铈矿的形成, 叠加在早期的方解石上。氟碳铈矿多呈柱状或条带状, 大规模叠生在早期的方解石、萤石和天青石之上, 表明氟碳铈矿形成于热液阶段的最晚期。氟碳铈矿裂纹较发育, 与萤石、天青石和金云母密切共生。

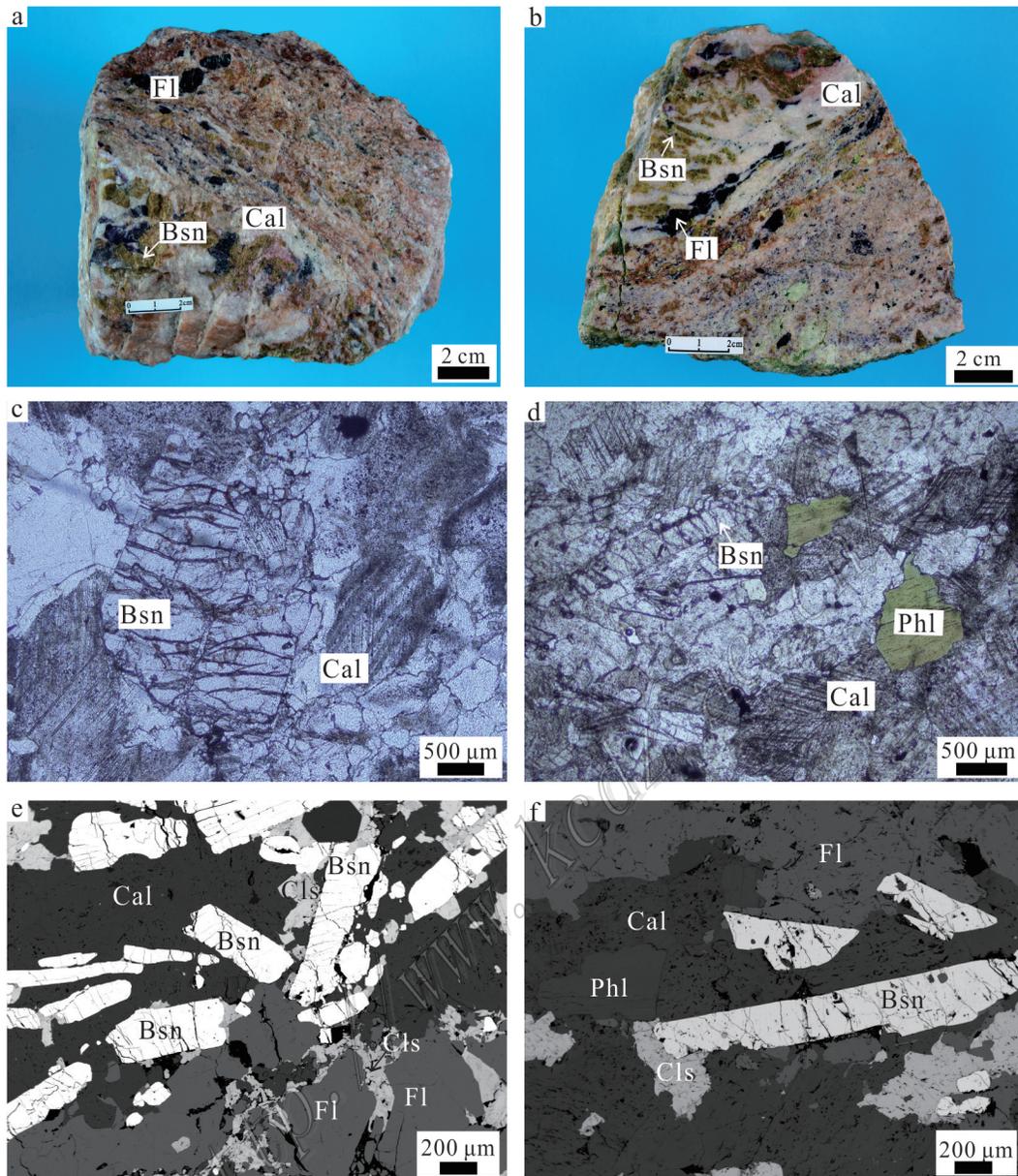


图4 里庄REE矿床细脉浸染状矿石手标本及显微结构照片

- a. 红色浸染状矿石手标本,局部矿化,其中有黄褐色氟碳铈矿+红色方解石+紫色萤石;b. 红色浸染状矿石剖光面,局部矿化,其中有黄褐色氟碳铈矿+红色方解石+紫色萤石;c. 显微镜下柱状氟碳铈矿叠生在早期的云雾状方解石之上,氟碳铈矿裂纹发育;d. 显微镜下大量柱状氟碳铈矿叠生在早期的云雾状方解石之上,氟碳铈矿裂纹发育,出现了黄绿色棱角状金云母;e. BSE图像下氟碳铈矿晶形较好,呈长柱状裂纹较发育,叠加在早期的天青石、萤石方解石之上,大颗粒的萤石遭受破坏后,裂纹被后期的天青石和方解石充填;f. BSE图像下氟碳铈矿晶形较好,呈长柱状裂纹较发育,叠加在早期的天青石、萤石方解石之上,有金云母出现,解理发育

Cal—方解石;Bsn—氟碳铈矿;Fl—萤石;Cls—天青石;Phl—金云母

Fig. 4 Photos of hand specimens and microstructure of disseminated ore from the Lizhuang REE deposit

- a. Red disseminated ore hand specimens and local mineralization, with mineral assemblage of brown bastnaesite, red calcite and purple fluorite; b. Red disseminated ore profile and local mineralization, with mineral assemblage of brown bastnaesite, red calcite and purple fluorite; c. Photomicrograph showing columnar bastnaesite overlying early cloudy calcite, with developed crack; d. Photomicrograph showing columnar bastnaesite deposits in the early cloudy calcite, and yellow-green phlogopite with smooth edge angle; e. BSE image showing columnar bastnaesite overlying early calcite, celestite and fluorite, and the late celestite and calcite filled in bulky fluorite after its destruction; f. BSE image showing bastnaesite with better crystal shape, developing crack, and overlying the early celestite, fluorite and calcite, and phlogopite with developed cleavage

Cal—Calcite; Bst—Bastnaesite; Fl—Fluorite; Cls—Celestite; Phl—Phlogopite

2.2 角砾状矿石

在手标本下,角砾状矿石整体呈褐色(图5a、b),具有典型的碎屑支撑结构,碎屑主要由棱角状-圆状正长岩、碳酸岩和矿石角砾以及方解石、萤石矿物角砾组成,碎屑粒径一般在1~2 cm,大者>4 cm。其基质由细粒方解石和少量氟碳铈矿组成,粒径<0.01 cm,肉眼不可见。结合BSE图像(图5c、d),角砾状矿石的角砾中矿石矿物主要为氟碳铈矿,呈长柱状,叠加在早期的方解石、天青石和萤石之上,角砾中各种矿物之间特征与细脉浸染状矿石所体现的一致。基

质中只出现了少量小颗粒他形氟碳铈矿,氟碳铈矿叠加在早期细粒的方解石之上。与角砾状矿石相比,细脉浸染状矿石中氟碳铈矿颗粒较大并且数量也多,因此,细脉浸染状矿石是里庄矿床中主要的矿石类型。

3 正长岩和碳酸岩蚀变特征

矿区内出露较多正长岩和碳酸岩,两者都不同程度地发生了蚀变。正长岩发育典型霓长岩化,蚀变前呈灰白(图6a),主要由长石、石英以及少量黑云

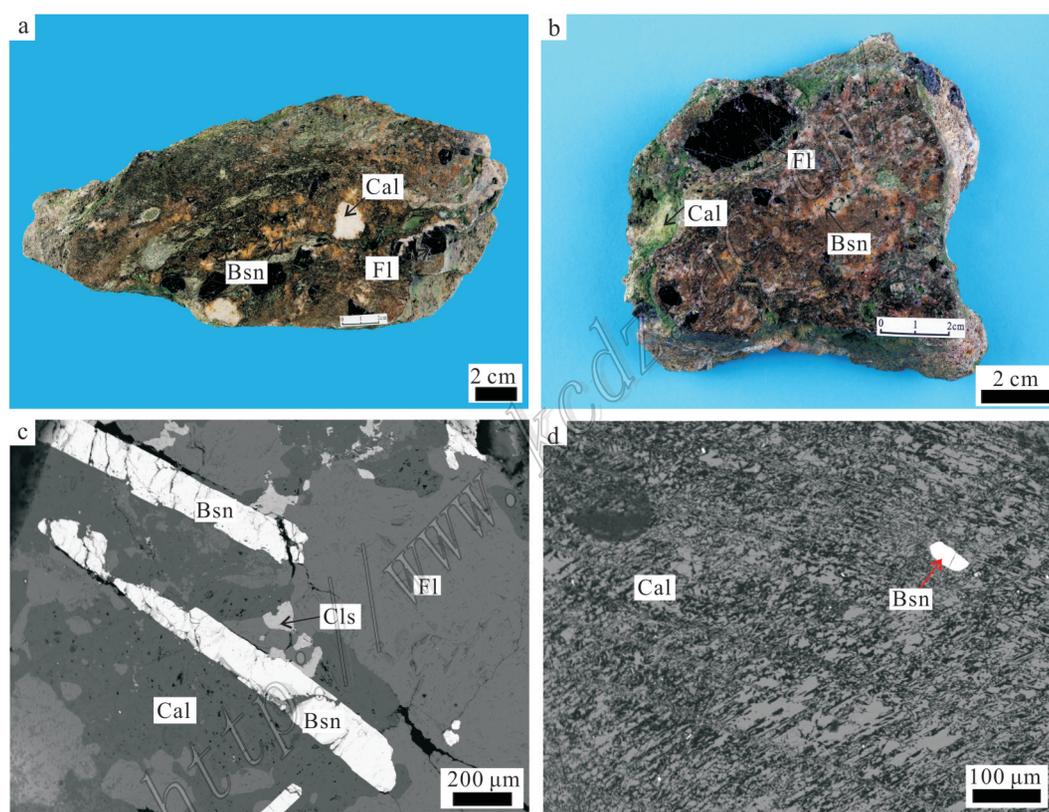


图5 里庄REE矿床角砾状矿石手标本及显微结构照片

- a. 褐色角砾状矿石手标本,具有典型的碎屑支撑结构,碎屑主要由棱角状正长岩、碳酸岩角砾以及方解石、萤石矿物角砾组成,其基质由细粒的方解石和氟碳铈矿组成;b. 褐色角砾状矿石剖光面,具有典型的碎屑支撑结构,碎屑主要由棱角状正长岩和碳酸岩角砾以及方解石、萤石矿物角砾组成,其基质由细粒的方解石和氟碳铈矿组成;c. BSE图像,角砾中氟碳铈矿晶形较好,呈长柱状,叠加在早期的天青石、萤石方解石之上,萤石颗粒较大;d. BSE图像,基质中少量小颗粒棱角圆滑的氟碳铈矿叠加在细粒的方解石之上

Cal—方解石;Bsn—氟碳铈矿;Fl—萤石;Cls—天青石

Fig. 5 Photos of hand specimens and microstructure of breccia ore from the Lizhuang REE deposit

- a. Brown breccia ore hand specimens, with typical clastic support structure, and the fragment mainly composed of angular syenite and carbonatite breccia and calcite and fluorite mineral breccia, the matrix composed of fine calcite and bastnaesite; b. Brown breccia ore profile, with typical clastic support structure, the fragment mainly composed of angular syenite and carbonatite breccia and calcite and fluorite mineral breccia, the matrix composed of fine calcite and bastnaesite; c. BSE image showing long column bastnaesite with good crystal form and overlying the early celestite, fluorite and calcite, with coarse fluorite; d. BSE image showing minor smooth bastnaesite overlying fine calcite

Cal—Calcite; Bst—Bastnaesite; Fl—Fluorite; Cls—Celestite

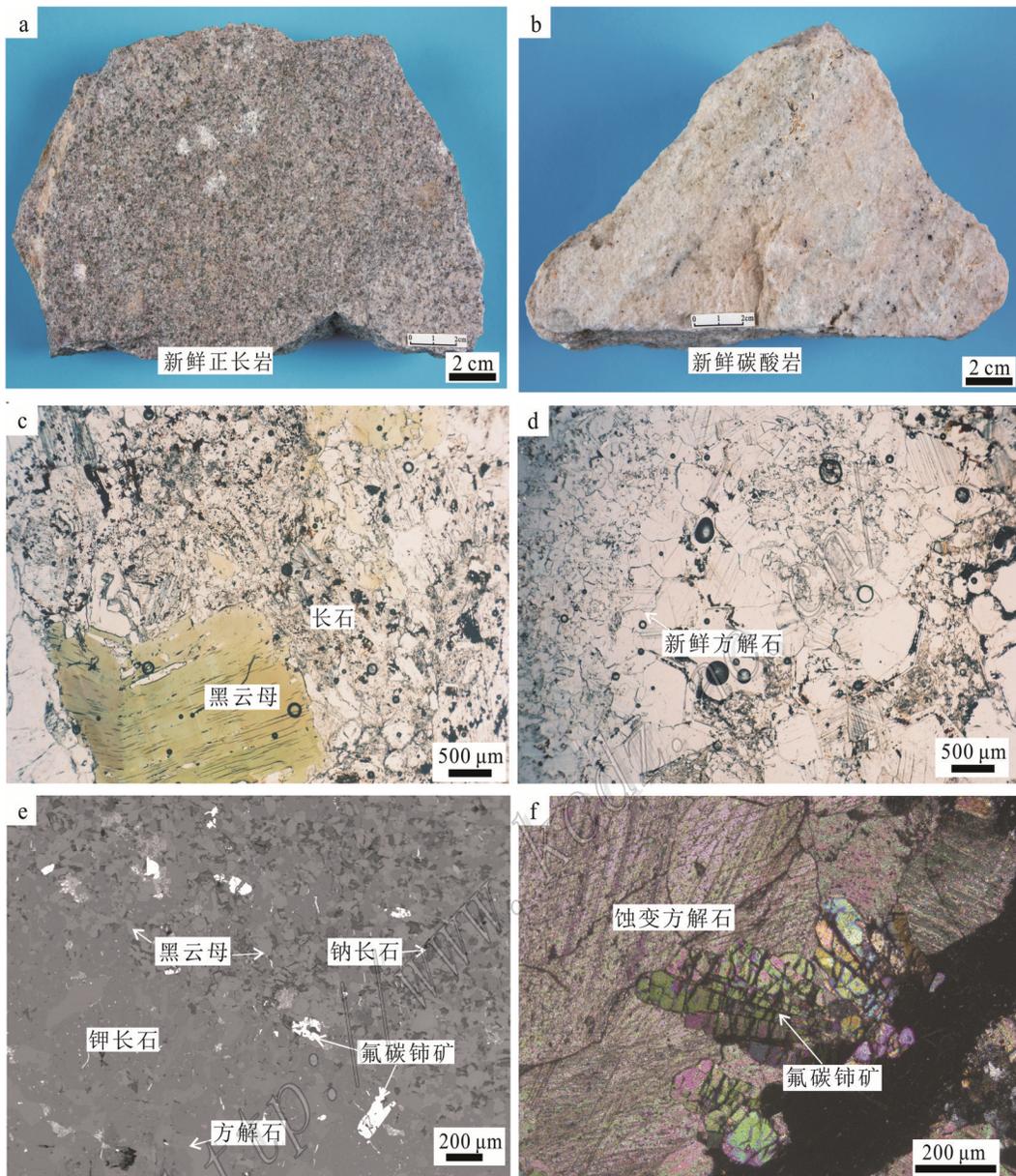


图6 里庄正长岩和碳酸岩蚀变特征

- a. 新鲜灰白正长岩手标本; b. 新鲜白色碳酸岩手标本; c. 新鲜正长岩显微镜下照片, 大片黄绿色黑云母和颗粒状长石; d. 新鲜碳酸岩显微镜下照片, 可见不等粒洁净方解石; e. 蚀变正长岩BSE图像, 细粒黑云母、钠长石和钾长石, 出现了少量半自形氟碳铈矿; f. 蚀变碳酸岩显微镜下照片, 方解石浑浊化, 条带状氟碳铈矿叠生在蚀变方解石之上

Fig. 6 Alteration of syenite and carbonatite in the Lizhuang deposit

- a. Fresh and gray syenite hand specimens; b. Fresh and white carbonatite hand specimens; c. Microscopic image of fresh syenite, mineral assemblage of yellow-green coarse biotite and fine feldspar; d. Photomicrograph of carbonatite, visible heterogranular and clean calcite; e. BSE image of altered syenite, with mineral assemblage of K-feldspar, biotite and celestite; f. Photomicrograph of altered carbonatite, banding bastnaesite overlying the altered calcite

母组成, 蚀变后为灰黑色(图3b), 其中原生钾长石被交代成细小颗粒, 形成了次生细粒钠长石、鳞片状黑云母, 少量半自形氟碳铈矿叠加在长石和黑云母之

上(图6e)。新鲜碳酸岩呈灰白色, 主要由方解石和少量黑云母组成, 其中方解石表面较洁净(图6d)。蚀变后呈现红色(图3c), 原生表面较洁净的方解石

表1 里庄REE矿床细脉浸染状矿石中主要矿物电子探针结果

Table 1 Electron microprobe analyses of major minerals within stringer-disseminated ore from the Lizhuang REE deposit

组分	氟碳铈矿				金云母		氟碳铈矿		磷灰石	
	LZ10-3-1	LZ10-3-2	LZ10-4-1	LZ10-4-2	LZ10-5-1	LZ10-5-2	LZ10-6-2	LZ10-6-2	LZ15-1-1	LZ15-1-2
	<i>w</i> (B)/%									
SiO ₂	0.06	0.13	0.11	0.14	42.50	42.74	0.03	0.03	0.77	0.79
TiO ₂	0	0	0	0	0.56	0.65	0	0	0	0
Al ₂ O ₃	0	0	0	0	9.63	9.63	0.02	0	0.09	0
FeO ^T	0	0	0	0.03	10.34	9.55	0	0.03	0.04	0.09
MgO	0	0	0	0	18.02	18.03	0	0	0.07	0.07
CaO	0.10	0.07	0.09	0.09	0	0	0.11	0.05	45.80	46.85
Na ₂ O	0	0	0	0	0.13	0.09	0	0	0.18	0.33
K ₂ O	0.01	0	0	0.03	9.83	9.96	0	0.02	0	0
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0	0	0	0.01	0.06	0	33.45	39.11
F	8.74	8.05	8.43	8.21	4.98	5.87	8.85	8.77	2.47	3.54
Cl	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0
SO ₃	0	0	0.01	0	0.02	0	0	0.01	0.54	0.53
BaO	0	0	0.08	0.07	0.06	0.03	0.02	0.12	0	0.02
ThO ₂	0.69	0.56	0.71	0.32	0.05	0	0.70	0.29	0	0.07
La ₂ O ₃	13.86	13.50	14.15	13.19	0	0.06	14.57	15.14	0.22	0.19
Ce ₂ O ₃	38.07	37.67	37.46	38.41	0	0.04	38.24	38.10	1.03	0.97
Pr ₂ O ₃	5.75	6.30	5.18	5.15	0.16	0	5.13	5.91	0	0.18
Nd ₂ O ₃	6.65	7.19	6.72	8.11	0.05	0	6.21	7.04	0.53	0.28
Sm ₂ O ₃	0.26	0.20	0	0.13	0.06	0.19	0.03	0.28	0.04	0
Eu ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0.16	0	0	0	0
Gd ₂ O ₃	4.50	4.66	4.16	4.30	0	0	4.55	4.71	0.15	0.01
总和	78.73	78.37	77.13	78.21	96.42	97.02	78.54	80.51	85.40	93.03

注:6个氟碳铈矿电子探针分析结果总和低,是由于氟碳铈矿中含CO₃²⁻组分,电子探针未检测CO₂成分。

w(CaO) (45.80% 和 46.85%) 和 *w*(P₂O₅) (33.45%~39.11%), 富 *w*(F) (2.47% 和 3.54%)。云母相对富 *w*(MgO) (18.02% 和 18.03%)、贫 *w*(FeO^T) (9.55% 和 10.34%)、富 *w*(F) (4.98% 和 5.87%), Mg 与 Fe 原子数比值介于 3.1~3.4, 表明该种云母为金云母。磷灰石和金云母中明显富 F, 指示成矿流体具有较高的 F 离子含量, 已有研究表明, 富 F 环境利于 REEs 的迁移和沉淀 (韩吟文等, 2003; Williams-Jones et al., 2000; 2014; 蓝廷广等, 2011)。

5.2 全岩主微量元素分析

里庄矿床中细脉浸染状矿石全岩主、微量元素具体数据见表 2。细脉浸染状矿石有较低的 *w*(SiO₂) (1.49%~2.59%)、*w*(MgO) (0.25%~0.51%) 和 *w*(FeO) (0.45%~0.70%), 富集 REEs (33 620×10⁻⁶~46 690×

10⁻⁶)、Sr (53 040×10⁻⁶~74 410×10⁻⁶)、Ba (35 300×10⁻⁶~58 420×10⁻⁶) 和 Mn (2401×10⁻⁶~2720×10⁻⁶), 尤其富集 LREE (34 130×10⁻⁶~46 530×10⁻⁶), 较高的 La_N/Yb_N 比值 (1043~1183) 和 LREE/HREE 比值 (174~282), 稀土元素配分呈现较右倾曲线 (图 7a), 没有明显的 Ce 和 Eu 异常。在微量元素蜘蛛图 (图 7b) 中, 细脉浸染状矿石中富集 Ba、U、La、Sr、Pb、Eu 等大离子亲石元素, 而高场强元素 (HFSE: Nb、Ta、P、Zr、Ti) 相对亏损。角砾状矿石富集 REEs (1540×10⁻⁶~16700×10⁻⁶), 具有较高的 LREE/HREE 比值 (56.7~175), 具体 REEs 数据见表 2。细脉浸染状矿石和角砾状矿石具有相似的稀土元素配分曲线 (图 7a), 但细脉浸染状矿石有较高稀土元素总量和 LREE/HREE 比值。

里庄碳酸岩 (样品编号分别为 LZ01、LZ02、

表 2 里庄矿床细脉浸染状矿石、角砾状矿石、正长岩全岩主量元素、微量元素分析结果

Table 2 Major element and trace element analyses of disseminated ore, breccia ore and syenite from Lizhuang

组分	浸染状矿石			正长岩		组分	浸染状矿石			正长岩		角砾状矿石					
	LZ01	LZ02	LZ03	LZ05	LZ21		LZ01	LZ02	LZ03	LZ05	LZ21	LZ1	LZ5	LZ6			
	<i>w</i> (B)/%						<i>w</i> (B)/10 ⁻⁶										
SiO ₂	1.49	2.59	2.49	66.68	64.73	Bi	3.25	104	20.7	0.16	0.17						
TiO ₂	0.02	0.05	0.03	0.12	0.35	Th	236	222	300	256	9.99						
Al ₂ O ₃	0.26	0.60	0.48	14.90	14.50	U	3.55	40.3	13.4	43.3	2.68						
Fe ₂ O ₃	0.47	2.36	0.14	1.15	2.08	Nb	1.38	13.2	6.94	18.2	6.27						
FeO	0.53	0.70	0.45	0.30	1.01	Ta	0.25	0.21	0.13	0.88	0.43						
MnO	0.33	0.36	0.32	0.07	0.13	Zr	0.40	6.48	1.55	493	232						
MgO	0.31	0.51	0.25	0.11	0.39	Hf	0.19	0.37	0.21	13.5	6.37						
CaO	42.50	37.70	37.30	2.90	2.36	Sn	0.19	0.66	0.36	1.38	1.71						
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	5.49	0.85	Sb	0.08	0.36	0.12	0.10	0.17						
K ₂ O	0.16	0.34	0.15	5.47	10.70	Ti	89.1	246	99.5	708	2217						
P ₂ O ₅	0.00	0.17	0	0.09	0.07	W	0.75	5.95	1.25	0.46	2.60						
H ₂ O ⁺	0.52	0.33	0.58	0.32	0.38	As	3.97	4.13	5.97	2.04	0.71						
CO ₂	20.80	18.90	20.50	1.85	1.55	V	80.2	221	89.6	637	1995						
LOI	21.90	18.80	21.70	2.24	2.11	La	13030	11930	16240	76.9	38.9	5740	1600	436			
总和	89.29	83.41	84.39	101.69	101.21	Ce	16410	16350	22990	161	85.3	7970	2000	717			
	<i>w</i> (B)/10 ⁻⁶					Pr	1133	1195	1693	21.5	10.9	655	179	72.6			
Li	34.2	36.3	15.6	5.38	9.45	Nd	3303	3669	5221	84.3	42.4	2120	577	256			
Be	0.63	2.15	0.51	5.83	1.29	Sm	212	244	329	13.1	9.39	161	69.1	29.9			
Cr	15.90	12.50	35.60	5.84	5.89	Eu	42.2	48.0	59.4	3.46	2.22	31.2	20.4	6.85			
Mn	2484	2720	2401	430	1142	Gd	95.6	122	98	8.15	8.07	60.1	37.4	14.7			
Co	3.48	3.74	1.26	1.42	2.51	Tb	11.6	12.3	13.2	0.94	1.25	4.78	3.36	1.27			
Ni	7.08	6.72	6.35	1.39	2.45	Dy	27.3	28.7	28.1	4.36	7.48	15.6	11.8	5.31			
Cu	23.8	7.10	2.99	7.33	3.20	Ho	3.92	4.20	3.75	0.77	1.55	2.91	2.01	0.93			
Zn	38.1	52.3	24.8	25.7	41.9	Er	12.7	13.6	12.7	2.11	4.58	4.91	4.19	1.92			
Ga	26.3	27.1	36.6	27.2	16.7	Tm	1.13	1.16	0.92	0.30	0.68	0.85	0.61	0.29			
Rb	17.3	30.3	10.9	136	206	Yb	7.90	8.20	6.84	2.01	4.45	5.41	3.75	1.97			
Sr	53040	72720	74410	634	272	Lu	1.08	1.12	0.93	0.31	0.69	0.64	0.57	0.36			
Mo	127	188	28.5	0.67	0.92	Sc	4.23	5.46	6.99	1.97	12.9						
Cd	1.06	3.20	0.71	0.08	0	Y	125	129	103	21.0	43.7						
In	0	0	0	0	0.13	ΣREE	34290	33620	46690	379	217	16700	4500	1540			
Cs	0.33	0.76	0.28	1.09	2.86	LREE	34130	33430	46530	360	189	16600	4440	1510			
Ba	55850	35300	58420	2292	2363	HREE	161	191	164	18.9	28.7	95.2	63.6	26.7			
Tl	0.08	0.42	0.11	0.78	1.16	LREE/HREE	211	174	282	19.0	6.58	175	69.8	56.7			
Pb	231	4990	482	30.1	26.3	La _N /Yb _N	1183	1043	1703	27.4	6.27	761	306	158			

注:比值单位为1;3个浸染状矿石主量元素结果总和低,是由于其含有较高的F、BaO、SrO含量,本次测试未分析。

LZ03)和一个正长岩(样品编号为LZ07)全岩主微量元素数据引自Hou等(2006)中的表3。2个正长岩全岩主、微量具体数据见表2。碳酸岩有较低的*w*(SiO₂)(1.56%~2.61%)、*w*(MgO)(0.33%~0.73%)和*w*(FeO)

(0.16%~0.63%),C/FM(100CaO/(CaO+Fe₂O₃+FeO+MnO+MgO))比值介于94~98,属于典型的钙质碳酸岩,强烈富集Sr(4000×10⁻⁶~10 600×10⁻⁶)、Ba(35 400×10⁻⁶~60 800×10⁻⁶)和REEs(9140×10⁻⁶~40 800×10⁻⁶),

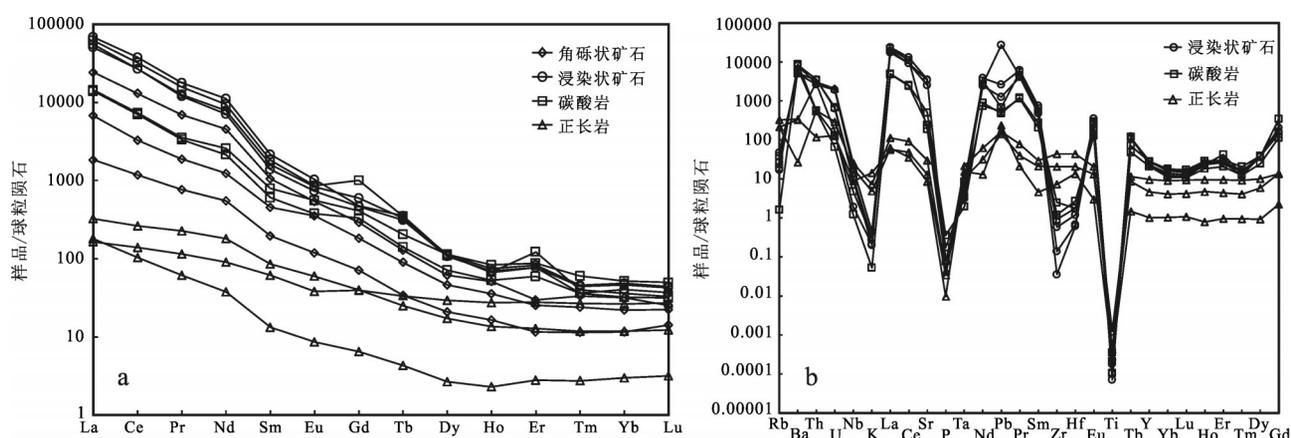


图7 里庄浸染状矿石、角砾状矿石、碳酸岩和正长岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)

和微量元素球粒陨石标准化蜘蛛图(b)(标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and trace element spider diagram (b) for disseminated ore, breccia ore and carbonatite and syenite from the Lizhuang deposit (normalized values after Sun et al., 1989)

跟世界范围内碳酸岩的平均值相接近(Woolley et al., 1989)。正长岩有较高的 $w(\text{SiO}_2)$ (66.68% 和 74.75%) 和碱性组分 ($w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})>9.10\%$)，富集 Sr (181×10^{-6} 和 634×10^{-6})、Ba (2292×10^{-6} 和 2363×10^{-6})，贫 REEs (135×10^{-6} 和 379×10^{-6})。从微量元素蜘蛛图(图7b)可见，Sr、La、Ba 等元素在碳酸岩中富集，而 Rb、Zr、Hf、Nb、Ta、P、Ti 在正长岩中相对富集。

5.3 X光粉晶衍射结果

里庄矿床中角砾状矿石的粉晶衍射结果见表3。鉴于角砾状矿石含较多肉眼不可见的氟碳铈矿，因此，采用X光粉晶衍射测试方法。结果表明，角砾状矿石中主要的矿石矿物有氟碳铈矿(2.00%~5.7%)和钽铋铈矿(2.00%)，脉石矿物有方解石(6.0%~76.0%)、石英(2.0%~46.6%)、萤石(7.0%~14%)、云母(3.0%~28%)和重晶石(3.0%)。所测试的4个角砾状矿石样品中矿物共生组合较稳定。

5.4 Ar-Ar 年龄

从表4和图8a、b可看出，金云母样品 LZ13-1-

11-3 年龄谱略微波动，中占 ^{39}Ar 总释放量约 95% 的连续 8 个温度段给出了里庄矿床矿石中金云母反等时线年龄 (27.4 ± 2.9) Ma (MSWD=0.31) 和坪年龄 (26.0 ± 1.1) Ma (MSWD=0.41) (图 8a、b)。由年龄谱特征来看，样品中均不含过剩氩，且 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 276.9 ± 36.4 与大气值在误差范围内一致，因此，坪年龄可以很好地代表该样品的形成时代。

6 讨论

6.1 矿化特征与成因

里庄稀土元素矿床中矿石类型以细脉浸染状为主，兼有少量角砾状。细脉浸染状矿石以细脉-浸染状构造为主，整体呈浅红色，主要的矿石矿物为氟碳铈矿，主要的脉石矿物有方解石、萤石、天青石和金云母(图4e、f)。结合手标本以及BSE图像，氟碳铈矿多呈柱状或条带状，以细脉状或星散浸染状嵌于方解石、紫色萤石和天青石中(图4)。氟碳铈矿裂纹

表3 里庄稀土矿床角砾状矿石粉晶衍射结果

Table 3 Powder diffraction results of breccia ore from the Lizhuang REE deposit

样品编号	矿床	岩石类型	稀土元素含量	脉石矿物	稀土元素矿物
LZ1	里庄	角砾状矿石	2%	方解石(76%)，萤石(14%)，重晶石(3%)，云母(3%)，石英(2%)，石墨(1%)	氟碳铈矿
LZ5	里庄	角砾状矿石	2%	天青石(31%)，氟铁云母(23%)，方解石(21%)，钾长石(11%)，石英(9%)，重晶石(3%)	钽铋铈矿
LZ6	里庄	角砾状矿石	2%	钾长石(30%)，黑云母(28%)，石英(18%)，斜长石(16%)，方解石(6%)	氟碳铈矿
LZ14-3	里庄	角砾状矿石	6%	石英(46%)，方解石(29%)，萤石(7%)，黑云母(7%)，黄铁矿(5%)	氟碳铈矿

表 4 里庄矿床矿石中金云母 Ar-Ar 阶段升温测年结果
Table 4 Ar-Ar step-heating results of phlogopite from the Lizhuang deposit

激光功率	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$	$^{40}\text{Ar}^*/\%$	$^{39}\text{Ar}_k/\%$	t/Ma	
							年龄	2 σ
样品编号:LZ13-1-11-3 照射参数J=0.000 496 70±0.000 024 84								
1.50W	7.311430	47.046556	0.014880	2.91421	39.86	17.43	25.99	3.21
1.60W	7.789556	118.057046	0.017843	2.51681	32.31	7.15	22.47	5.81
1.70W	6.494205	325.246172	0.012657	2.75377	42.40	2.60	24.57	12.95
1.80W	5.347104	42.096617	0.008349	2.88011	53.86	20.88	25.69	2.23
1.90W	5.032879	25.675774	0.007140	2.92301	58.08	33.16	26.07	1.59
2.00W	3.661303	234.584635	0.001461	3.23013	88.22	3.29	28.78	9.35
2.10W	4.734433	78.069037	0.005680	3.05801	64.59	10.15	27.26	3.64
2.20W	4.314288	257.564290	0.002824	3.48312	80.73	3.16	31.02	10.58
2.30W	3.975942	374.893412	0.000315	3.88833	97.80	2.18	34.59	14.06

发育,叠生在早期的方解石、萤石和天青石等脉石矿物之上,形成于热液阶段的最晚期。同时,氟碳铈矿在 BSE 图像中无明显变化,表明其组分差异较小。氟碳铈矿单一的条带状形貌、稳定的矿物共生关系和较小的成分差异,表明细脉浸染状矿石中氟碳铈矿只存在一个矿物世代。角砾状矿石整体呈褐色,具有典型的碎屑支撑结构,碎屑主要由棱角状-圆状正长岩、碳酸岩和矿石角砾以及方解石+萤石+天青石矿物角砾组成,其基质由细粒方解石和氟碳铈矿组成。角砾状矿石中矿石矿物主要为氟碳铈矿和少量钽铋铈矿。角砾状矿石中大多数氟碳铈矿呈长柱状,叠加在早期的大颗粒方解石、萤石和天青石之上(图 5c),少量他形氟碳铈矿叠加在早期细粒方解石

之上(图 5d)。角砾状矿石中氟碳铈矿在形状和矿物共生组合都存在较大差异,表明其具有 2 个矿物世代。与细脉浸染状矿石不同的是,角砾状矿石中含有许多肉眼不可见的氟碳铈矿,棱角较圆滑。这 2 类矿石矿物组合存在一定差异,细脉浸染状矿石矿物组合为氟碳铈矿+方解石+萤石+天青石+金云母,而角砾状矿石矿物组合为氟碳铈矿+钽铋铈矿+方解石+萤石+天青石+云母+长石+石英(表 4)。

相比于牦牛坪和大陆槽矿床,里庄矿床缺少伟晶岩阶段,只有岩浆阶段和热液阶段。根据前人研究成果(Hou et al., 2009; Liu et al., 2017),牦牛坪稀土元素矿床中,主要矿物生成顺序大体为长石-云母-方解石-重晶石/无色萤石-紫色萤石-氟碳铈矿-方铅矿/

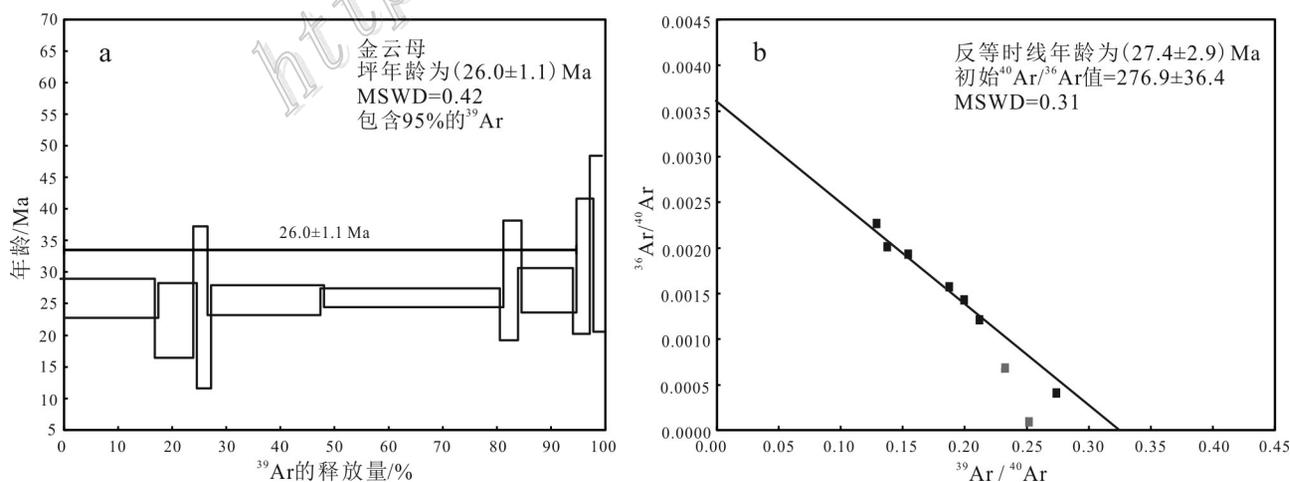


图 8 里庄矿床矿石中金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄(a)和反等时线年龄(b)

Fig. 8 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spectra (a) and inverse isochron age (b) for phlogopite from the Lizhuang deposit

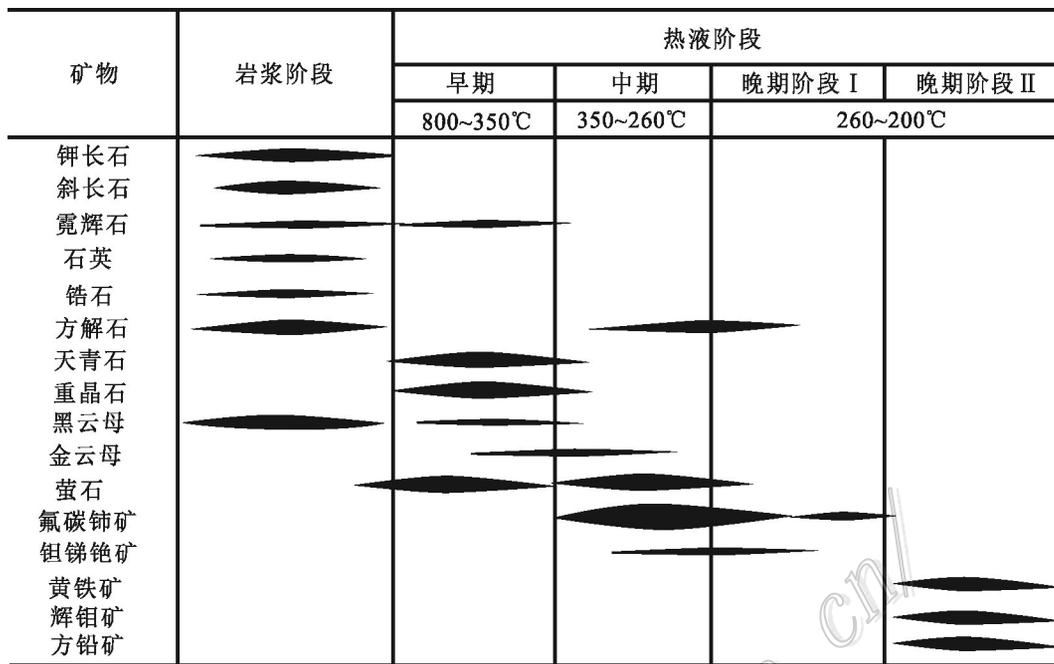


图9 里庄REE矿床中矿物生成顺序表

Fig. 9 Paragenetic sequence of ore and gangue minerals within the Lizhuang REE deposit

黄铁矿,大陆槽稀土元素矿床(李小渝, 2005; Hou et al., 2009; Liu et al., 2015b; Liu et al., 2017)矿物生成大致为长石-白云母-石英-天青石-紫色萤石-氟碳铈矿。同时,结合宏观的矿物共生和穿插关系、BSE图像反应出来的矿物特征及叠加关系,将里庄矿床中主要矿物的生成顺序大体归纳为长石-石英-霓辉石-黑云母-方解石-天青石/重晶石-萤石-金云母-氟碳铈矿/钽铋铈矿-辉钼矿/黄铁矿-方铅矿(图9)。

整个成矿带中4个矿床发育不同矿石类型,这主要跟构造活动强度和频繁程度、围岩和控矿构造等因素有关。如该矿带北部的牦牛坪超大型矿床(图1),其矿体主要受2组走滑断裂,断裂延伸数10 km,断距约为10 m左右,频繁的构造活动以及较发育的张性裂隙,控制了牦牛坪以粗脉状为主的矿化特征。该成矿带南部大陆槽大型矿床(图1),其1号矿体主要受3组走滑断裂控制,而3号矿体只受1组走滑断裂控制。由于较频繁构造活动,使得大陆槽矿床中1号矿体比3号矿体更发育角砾状矿石。该成矿带北部的木落寨中型矿床,其矿区遭受深大断裂切割,局部可见一些延伸达数10 m,宽1~5 m的张性裂隙,使得木落寨矿床发育厚约1~5 m的矿脉。在近几年野外地质调查中发现,里庄矿床矿体只受1组走滑断裂控制(图2),断裂延伸约200 m,断距约5

m,地表可见深度约为5 m,深部深度未知。其断裂规模较小,只能使得区内岩石产生不同程度的破碎或片理化,张性空间不发育,只能为含矿流体运移和沉淀提供一些狭窄的空间,氟碳铈矿以及脉石矿物萤石均呈细脉浸染状构造产出。综上所述,构造活动弱和张性裂隙不发育是矿区形成细脉浸染状矿化特征的主要原因。

6.2 成矿物质来源

经过近几年的野外地质调查发现,矿区内碳酸岩、正长岩出露较多,在空间上密切共生(图3a、c),稀土矿体常以脉状赋存在碳酸岩-正长岩杂岩体中(图3b)。正长岩和碳酸岩都不同程度低发生了围岩蚀变。结合野外地质观察、BSE图像及显微镜观察发现,正长岩发育典型霓长岩化,其中原生钾长石遭受交代,新生了一些细粒钠长石和鳞片状黑云母,钾长石部分保留。少量半自形氟碳铈矿叠加在细粒钠长石和黑云母等新生矿物之上(图6c、e)。碳酸岩广泛发育红化蚀变,具体体现在原生表面洁净的方解石遭受流体交代,表面浑浊化,大量氟碳铈矿叠加在蚀变方解石之上(图6d、f)。

矿区中细脉浸染状矿石、角砾状矿石、碳酸岩和正长岩稀土元素配分呈现相似右倾曲线(图7a),没有明显的Ce和Eu异常,均具有较高LREE/HREE比

值。细脉浸染状矿石和碳酸岩有相似的微量元素分布特征(图7b),富集Sr、La、Ba等元素,亏损Rb、Zr、Hf、Nb、Ta、P和Ti等元素。矿石与碳酸岩、正长岩在微量元素组成特征的相似性表明其具有同源性。同时结合前人研究成果,即该矿床中脉石矿物长石、方解石和萤石的Sr-Nd-Pb同位素组成差异甚小,其Sr-Nd-Pb同位素组成与碳酸岩和正长岩极为相似。碳酸岩和正长岩与脉石矿物在Sr-Nd-Pb同位素组成上的一致性表明了三者具有共同的来源(Hou et al., 2006; Liu et al., 2017)。

矿区稀土元素矿体赋存在正长岩和碳酸岩岩体中,BSE图像及显微镜观察显示氟碳铈矿叠加在蚀变碳酸岩-正长岩之上,并结合已有数据发现矿石及部分脉石矿物与碳酸岩-正长岩在微量元素和同位素组成特征的一致,表明碳酸岩-正长岩杂岩体提供了本矿床稀土元素矿化的物质来源。

6.3 成矿年龄

目前已获得里庄矿床正长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (27.41 ± 0.35) Ma (Liu et al., 2015a), 褐色浸染状矿石中典型矿物黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (30.5 ± 0.4) Ma (田世洪等, 2008), 氟碳铈矿的 SIMS Th-Pb 年龄为 (28.4 ± 0.2) Ma (Ling et al., 2016) 和 ICP-MS U-Pb 年龄为 (33.0 ± 2.1) Ma (Yang et al., 2014)。这些年龄由于不同的测试方法和不同的测试矿物以及自身误差,使得年龄间有较大差异(1~6 Ma),没有很好的一致性。对于新生代较年轻的小型热液矿床,其热液持续较短,这么宽泛的年龄分布,限制了对该矿床的进一步研究。比如,正长岩锆石年龄可以代表围岩成岩年龄,然而这一成岩年龄小于其他3个成矿年龄,表明了成矿早于成岩,这与基本地质事实相矛盾。因此,有必要对里庄矿床成矿年龄进行重新精确厘定。系统的野外地质调查、显微镜下观察和电子探针工作表明,里庄矿床中大量发育与氟碳铈矿大量密切共生的金云母(图4),因此,金云母的年龄可以代表矿床成矿年龄。本次测得里庄矿床中细脉浸染状矿石中金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 (26.0 ± 1.1) Ma (MSWD=0.41), 所对应的反等时线年龄为 (27.4 ± 2.9) Ma (MSWD=0.31), 所测坪年龄与反等时线具有很好的一致性。同时坪年龄 (26.0 ± 1.1) Ma (MSWD=0.41) 非常接近氟碳铈矿 SIMS Th-Pb 年龄 (28.4 ± 0.2) Ma (Ling et al., 2016) 及正长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 (27.41 ± 0.35) Ma (Liu et al.,

2015a), 三者有较好的一致性。因此,可以认为 (26.0 ± 1.1) Ma 是里庄稀土元素成矿年龄并进一步指示 REE 成矿与正长岩-碳酸岩在成因上具有一致性。

7 结 论

(1) 矿区矿石类型可分为细脉浸染状和角砾状,以细脉浸染状为主。细脉浸染状、角砾状矿石中有相似的矿物共生组合,为氟碳铈矿+方解石+萤石+天青石+金云母。氟碳铈矿叠加在早期方解石、萤石和天青石之上,形成于热液阶段晚期。矿区内构造活动弱和张性裂隙不发育是矿区形成细脉浸染状矿化特征的主要原因。

(2) 矿区正长岩发育典型霓长岩化,这种蚀变以钾长石被钠长石交代为特征,并形成次生鳞片状黑云母。碳酸岩广泛发育红化,其原生表面洁净的方解石被流体交代,大量氟碳铈矿叠加在蚀变方解石之上。

(3) 结合野外地质、岩相学、年代学以及微量元素、同位素组成特征,认为碳酸岩-正长岩杂岩体提供了本矿床稀土矿化的物质来源。

(4) 通过对里庄矿床中细脉浸染状矿石中与氟碳铈矿密切共生的金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究,获得金云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 (26.0 ± 1.1) Ma, 该年龄可以认为是里庄稀土元素矿床的主要成矿年龄。

志 谢 本文在编写过程中得到课题组的帮助和指导,在此深表谢意!同时感谢审稿专家提出的宝贵修改意见!

References

- 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.
- Han Y W, Ma Z D, Zhang H F, Zhang B R, Li F L, Gao S and Bao Z Y. 2003. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-370 (in Chinese).
- He H Y, Wang X L, Jin F, Zhou Z H, Wang F, Yang L K and Zhu R X.

2006. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the early Jehol Biota from Fengning, Hebei Province, northern China[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(4): 1-8.
- 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: 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.
- Lan T G, Fan H R, Hu F F, Yang K F and Wang Y. 2011. Genesis of the Weishan REE deposit, Shandong Province: Evidences from Rb-Sr isochron age, LA-MC-ICPMS Nd isotopic compositions and fluid inclusions[J]. *Geochimica*, 40 (5): 428-442 (in Chinese with English abstract).
- Li X Y. 2005. Geological characteristics of Dalucao REE deposit in Dechang County, Sichuan Province[J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 151-160(in Chinese with English abstract).
- 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 Bastnäs site: 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, Yang Z S and Tian S H. 2013. Mineralization of the Dalucao REE deposit at Himalayan Mianning-Dechang REE belt in the eastern Indo-Asian Collision Zone, SW China[C]. *Proceedings of 12th Biennial SGA meeting, Uppsala, Sweden*. 1435-1438.
- 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, 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.
- Snyder R L and Bish D L. 1989. Quantitative analysis[A]. In: Bish D L and Post J E, eds. *Modern powder diffraction mineralogical society of America*[C]. 101-144(chapter 5).
- 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, 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 from the Mianning-Dechang REE belt: Constraints on the duration of hydrothermal activities and a tectonic model for the carbonatite-alkalic complexes in Sichuan, SW China[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.
- Woolley A R and Kempe D R C. 1989. Carbonatite: Nomenclature, average chemical compositions, and element distribution[A]. In: Bell K, ed. *Carbonatite: Genesis and Evolution*[C]. London: Unwin, Hyman. 1-14.

- 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.
- 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[C]. Beijing: Seismological Press. 1-150 (in Chinese).
- Zhang F, Qiu H N, He H Y, Yang L K, Su F, Wang Y and Wu L. 2009. Brief introduction to ArArCALC-Software for data reduction $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology[J]. *Geochimica*, 38 (1): 53-56(in Chinese with English abstract).
- 李小明, 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.
- 蓝廷广, 范洪瑞, 胡芳芳, 杨奎峰, 王永. 2011. 山东微山稀土矿床成因: 来自云母 Rb-Sr 年龄、激光 Nd 同位素及流体包裹体的证据[J]. *地球化学*, 40(5): 428-442.
- 李小渝. 2005. 四川德昌大陆槽稀土矿床地质特征[J]. *矿床地质*, 24(2): 151-160.
- 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.
- 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[C]. 北京: 地震出版社. 1-150.
- 张凡, 邱华宁, 贺怀宇, 杨列坤, 苏菲, 王英, 吴林. 2009. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学数据处理软件 ArArCALC 简介[J]. *地球化学*, 38 (1): 53-56.

附中文参考文献

- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 张本仁, 李方林, 高山, 鲍征宇. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1-370.
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森, 尹淑苹, 费红彩, 邹天人,

<http://www.kcdz.ac.cn/>