

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.722



川西冕宁—德昌 REE 矿带风化型 矿床的矿石类型及成因

李自静, 刘 琰*

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要: 川西冕宁—德昌 REE 矿带中的风化型矿石研究相对缺乏。根据近几年的野外地质调查, 采用电子探针、X 光粉晶衍射、全岩分析等对大陆槽、牦牛坪和木落寨矿床中疑似风化矿的样品进行类型和成因分析。结果表明: 大陆槽风化型矿石中大量粘土矿物(达 40%)和矿石矿物(达 60%)发育, 风化程度高; 相反, 牦牛坪和木落寨疑似风化型矿石中几乎没有粘土矿物, 风化程度低。通过对牦牛坪和木落寨疑似风化型矿石进行地球化学特征、矿物组成分析并与围岩、矿脉的组成和产状对比, 表明疑似风化型矿石主要是由矿脉和围岩在强烈的构造作用下发生机械风化形成。频繁的角砾构造使大陆槽矿石发生强烈的机械风化作用, 并加速了矿石发生一定的水岩反应, 促进矿石发生中等强度的化学风化作用。目前整个矿带中未发现明显的生物风化作用。整个稀土矿带的风化型矿石比南岭离子吸附型稀土矿石的风化程度低, 形成时间较晚(11 Ma), 氟碳铈矿大量保存, 还没有形成离子吸附型矿床。

关键词: 冕宁—德昌; 稀土矿; 风化型矿床; 矿石类型; 成因; 地球化学。

中图分类号: P611.1

文章编号: 1000-2383(2018)04-1307-14

收稿日期: 2017-11-24

Ore Types and Genesis of Weathered Deposits in Mianning-Dechang REE Ore Belt, Western Sichuan Province, Southwestern China

Li Zijing, Liu Yan*

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: The study of weathered ores is relatively limited in the Mianning-Dechang REE ore belt, western Sichuan. According to the geological survey in recent years, ore types and genesis of suspected weathered ore from Dalucao, Maoniuping and Muluozhai deposits were studied through EPMA, XRD and whole rock analysis. The results show that a large number of clay minerals (up to 40%) and ore minerals (up to 60%) are developed in the weathered ore of the Dalucao deposit, and the weathering degree is relatively high. On the contrary, suspected weathered ore types almost have not developed clay minerals from Maoniuping and Muluozhai deposits, and the weathering degree is relatively low. Through the geochemical characteristics and mineral composition analysis of the suspected weathered ore in Maoniuping and Muluozhai deposits, combining the compositions and occurrences of the wall rock and veins, it is obvious that the suspected weathered ore has been formed by mainly mechanically weathering from the nearby veins and wall rock under the strong tectonic action. Frequent breccia activities promote the strong mechanically weathering of weathered ores, and accelerate the water-rock reaction in Dalucao deposit. At present, there is no obvious biological weathering in the ore belt. The weathered ores in the belt have lower weathering degree than that of the Nanling ion adsorption type rare earth elements ores, and the age of the formation of the belt is younger (11 Ma) and a large

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41772044); 中国地质调查局地质调查项目(No.1212011020000150011-03); 中国地质科学院基本科研业务费(Nos. YYWF201509, YYWF201704)。

作者简介: 李自静(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事稀土矿床研究。ORCID: 0000-0002-0829-3448. E-mail: 2522513555@qq.com

* **通讯作者:** 刘琰, ORCID: 0000-0002-9765-6385. E-mail: ly@cags.ac.cn

引用格式: 李自静, 刘琰, 2018. 川西冕宁—德昌 REE 矿带风化型矿床的矿石类型及成因. 地球科学, 43(4): 1307-1320.

amount of bastnaesite preservation, so it has not formed the ion adsorption type deposit.

Key words: Mianning-Dechang; REE deposit; weathered deposit; ore type; ore genesis; geochemistry.

离子吸附型稀土矿床在中国赣南地区广泛发育,是国际上备受关注的重要金属矿产(王登红等, 2017),主要呈离子态赋存于风化壳粘土中。自 20 世纪 70 年代离子吸附型稀土矿床被发现以来,越来越多的国内外科技工作者的目光被其吸引,科学家经过 40 多年的研究,在成矿理论和找矿方面的研究都有了很大的突破(吴澄宇, 1989; Bao and Zhao, 2008; 王登红等, 2013a, 2013b; 付伟等, 2014; Sanematsu and Watanabe, 2016, 赵芝等, 2017);而对内生 REE 矿床中发育的风化型矿石研究较少,需要进一步完善这种矿床的风化型矿石类型的成因过程。

冕宁—德昌 REE 矿带是世界著名的 REE 成矿带,整个矿带长 270 km,宽 15 km,自北向南发育牦牛坪超大型、木落寨中型、里庄小型和大陆槽大型稀土矿床。矿带受新生代发育的一系列走滑断裂控制,形成 3 种不同的矿化样式:牦牛坪式、大陆槽式和里庄式,反映了不尽相同的成矿过程和物理化学条件(Hou *et al.*, 2009, 2015; Liu and Hou, 2017)。成矿物质来自俯冲的大陆岩石圈地幔部分熔融,在部分熔融之前受到俯冲海洋沉积物提供的富 REE 和 CO₂ 的流体交代作用(Hou *et al.*, 2015; Liu and Hou, 2017)。根据近年来的野外地质调查发现,在冕宁—德昌 REE 矿带分布着大量的风化型或疑似风化型矿石,目前已对大陆槽矿床中发育的风化型矿石进行了详细的研究(Liu *et al.*, 2015c),对矿带中的牦牛坪、里庄和木落寨 3 个矿床并未开展研究。因此,本文在前期地质调查的基础上,结合已有的矿床地质、岩石地球化学、成因矿物学研究成果(Hou *et al.*, 2009, 2015; Liu and Hou, 2017; 刘琰等, 2017),选择规模较大的大陆槽矿床、牦牛坪矿床和规模较小的木落寨矿床中破碎严重的矿石进行 X 光粉晶衍射(XRD)、电子探针(EMPA)、主微量元素和岩相学分析,并讨论这些疑似风化型矿石的类型和成因,为建立完善的风化型矿床的矿石类型和成因提供详实的研究实例。

1 地质背景

1.1 区域地质背景

冕宁—德昌 REE 矿带位于四川省的西南部,大地构造位置为青藏高原的东部、扬子克拉通的西缘

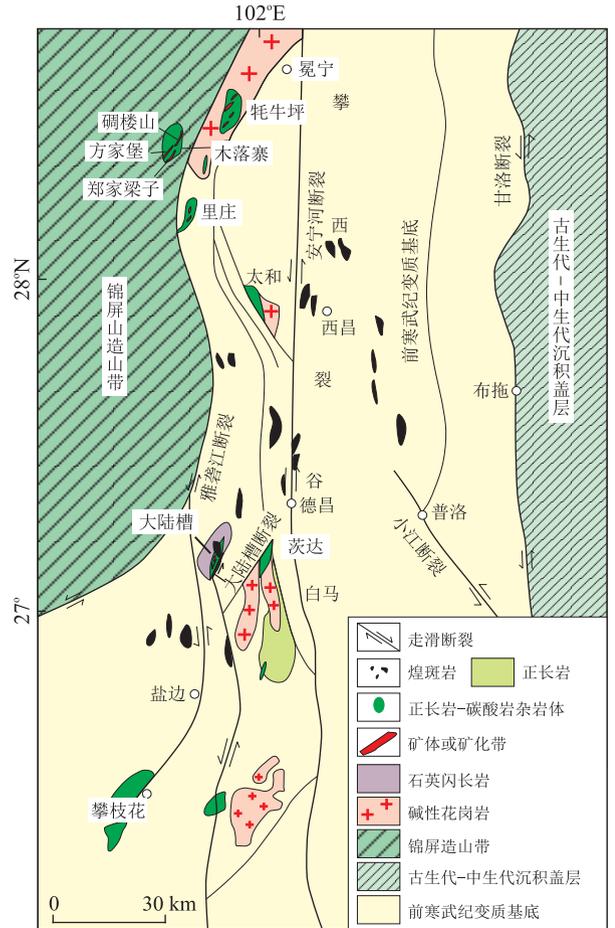


图 1 川西冕宁—德昌稀土成矿带地质构造简图
Fig.1 Sketch of Mianning-Dechang REE ore belt, Sichuan Province

改编自 Hou *et al.* (2009)

(Hou *et al.*, 2009)。扬子克拉通的基底发育着太古代的高级变质岩和元古代变质沉积岩,上面被显生宙碎屑岩和碳酸盐岩覆盖(骆耀南等, 1998)。受印度—亚洲大陆碰撞的影响(60~45 Ma)(Yin and Harrison, 2000; 钟大赉等, 2000; 莫宣学等, 2003),扬子克拉通的西缘卷入到印度—亚洲碰撞带的东部碰撞活动中(Hou *et al.*, 2009)。为吸收和调节高原东部产生的应力应变,发育一系列新生代的走滑断裂系统(侯增谦等, 2006),自西向东分别发育西部的嘉黎和高黎贡走滑断裂、中部包括北段的巴塘—丽江断裂和南段的哀牢山—红河断裂,以及东部的鲜水河和小江走滑断裂(Hou *et al.*, 2009)(图 1)。本区新生代发生的变形主要表现为古新世—始新世转换压扭变形(55~40 Ma)、始新世—

渐新世转换过渡变形(40~38 Ma)、早—中新世转换张扭变形(24~17 Ma)以及晚第三纪以来东西向伸展构造(Wang *et al.*, 2001; Hou *et al.*, 2003).

印度—亚洲大陆碰撞带东缘新生代岩浆活动频繁,构成一条由新生代走滑断裂控制的半连续的钾质火成岩区(Guo *et al.*, 2005),其中与该稀土矿带密切相关的是长达 270 km 的碳酸岩—正长岩杂岩体,两者在时空上密切共生,碳酸岩主要呈岩脉和岩墙产于英碱正长岩体内(Hou *et al.*, 2009).近年来,前人对矿带中的矿石矿物氟碳铈矿和脉石矿物云母、钠铁闪石以及对正长岩中的锆石进行了 LA-ICP-MS、SIMS、Ar-Ar、SHRIMP U-Pb 定年,表明整个矿带形成于 11~27 Ma(大陆槽 12.13±0.19 Ma, 11.32±0.23 Ma; 牦牛坪 22.81±0.31 Ma, 21.3±0.4 Ma; 木落寨 26.77±0.32 Ma, 里庄 27.41±0.35 Ma)(胡文洁等, 2012; Yang *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015a; Ling *et al.*, 2016; Liu and Hou, 2017).矿体主要赋存在正长岩中,少量赋存在碳酸岩和花岗岩中.矿带内各矿床中发育不同的矿石类型,大陆槽矿床中主要为发育 No.1 和 No.3 矿体中的角砾状矿石、角砾岩筒中的碎屑矿石、风化型矿石以及热液脉矿石;牦牛坪矿床中发育粗粒的含方解石—萤石—重晶石等具多孔结构的块状和斑杂状矿石、细脉和网脉型矿石以及混合型矿石;木落寨矿床中主要发育块状的重晶石—方解石—萤石—氟碳铈矿矿石、细网脉矿石和少量的浸染状和带状矿石(Liu and Hou, 2017).除了上述描述的这些矿石之外,根据近年来的地质调查工作,发现各矿床中还存在疑似风化型矿石.

1.2 矿床地质

1.2.1 牦牛坪矿床

牦牛坪矿床位于冕宁—德昌 REE 成矿带的最北部,是矿带中唯一的超大型 REE 矿床,拥有 3.17 Mt 的稀土氧化物(REO),平均 REO 品位为 2.95%.矿区内发育的岩石单元主要有:(1)长 90 km,宽 6~14 km,呈岩柱状产出的花岗岩杂岩体,锆石年龄(U-Pb)为 146 Ma(张云湘等, 1988);(2)泥盆系—二叠系的碎屑岩、灰岩和溢流玄武岩组成的变质地层(厚 1 100 m);(3)含煤三叠系沉积岩系(厚 700 m);(4)流纹岩,其锆石 LA-ICP-MS 年龄为 600~700 Ma;(5)侵入到大孤岛矿体中的碳酸岩—正长岩杂岩体中的石英花岗闪长岩,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 723.1±8.8 Ma(Liu and Hou, 2017).矿床受哈哈断裂控制,广泛发育各种细脉、大脉和细网脉(Hou *et al.*, 2009; Liu and Hou,

2017),沿 NNE 向展布,长 2.65 km,平面呈“S”型(图 2a).矿石矿物主要为氟碳铈矿,含少量的氟碳钙铈矿、方铈矿、独居石和硅铈铈矿等,脉石矿物主要是金云母、萤石、方解石、重晶石、霓辉石、钠铁闪石、钾长石等.围岩主要为碳酸岩—正长岩杂岩体,但矿体主要赋存在正长岩中.矿脉和围岩中裂隙发育.矿床中发育微弱的黑云母化蚀变作用.

随着矿区的开采,目前牦牛坪矿床主要分为两部分,北部的光头山杂岩体和南部的大孤岛主矿体.疑似风化型矿石主要在大孤岛主矿体的南部产出,在伟晶岩阶段的光头山地区几乎不发育.这些疑似风化型矿石与脉体和围岩正长岩呈不规则接触,少量分布其中(图 3).野外观察发现疑似风化型矿石主要分为黑色和黄色两种,两者之间的分布界限不明显(图 3),采样位置如图 2a.黑色疑似风化型矿石颗粒较小,呈粉末状,矿石粒度≤1 mm;黄色疑似风化型矿石呈细粒状、粉末状,少数呈块状,矿石粒度<5 mm(图 3).此外,黄色疑似风化型矿石中含有一些大块的正长岩岩屑或脉体中的矿物碎屑(图 3b).

1.2.2 大陆槽矿床

大陆槽矿床是唯一位于矿带南部的矿床,也是矿带中第二大稀土矿床,受大陆槽走滑断裂的控制.因区域地壳发生抬升,矿区内出露大面积元古代石英闪长岩,东部地区出露侏罗系砂岩.喜马拉雅期的英碱正长岩和霓辉正长岩侵入于石英闪长岩内,碳酸岩则沿构造裂隙侵入(图 2c).发育在英碱正长岩中的 2 个角砾岩筒(长轴直径为 200~400 m,短轴直径为 180~200 m)与稀土成矿作用密切相关.矿床中发育 No.1、No.2 和 No.3 矿体,因受走滑断裂后期活动的影响, No.1 和 No.2 矿体发生位移(图 2c).其中 No.1 和 No.3 矿体产在角砾岩筒中,向下分别延伸 450 m 和 >180 m,厚度分别为 55~175 m 和 13.7~58.4 m.前者的矿物共生组合为萤石+重晶石+霓辉石+氟碳铈矿,后者的矿物共生组合为萤石+天青石+少量霓辉石+少量氟碳铈矿,这些矿物共生组合以角砾状、脉状、细脉状和块状产出(Hou *et al.*, 2009).其中 No.1 矿体是风化型矿石最典型和最为发育的地方,详细的地质特征见 Liu *et al.*(2015c).矿床中碳酸岩较为发育,发育典型的霓长岩化蚀变作用和微弱的黑云母化蚀变作用(Liu and Hou, 2017).

1.2.3 木落寨矿床

木落寨矿床受雅砻江走滑断裂控制,向北与鲜水河断裂相接.矿区主要出露二叠系地层(图 4),上部为峨眉山组(P_{2e})(厚 900~1 100 m),下部为阳新组(P_{1y})(厚 350~400 m).峨

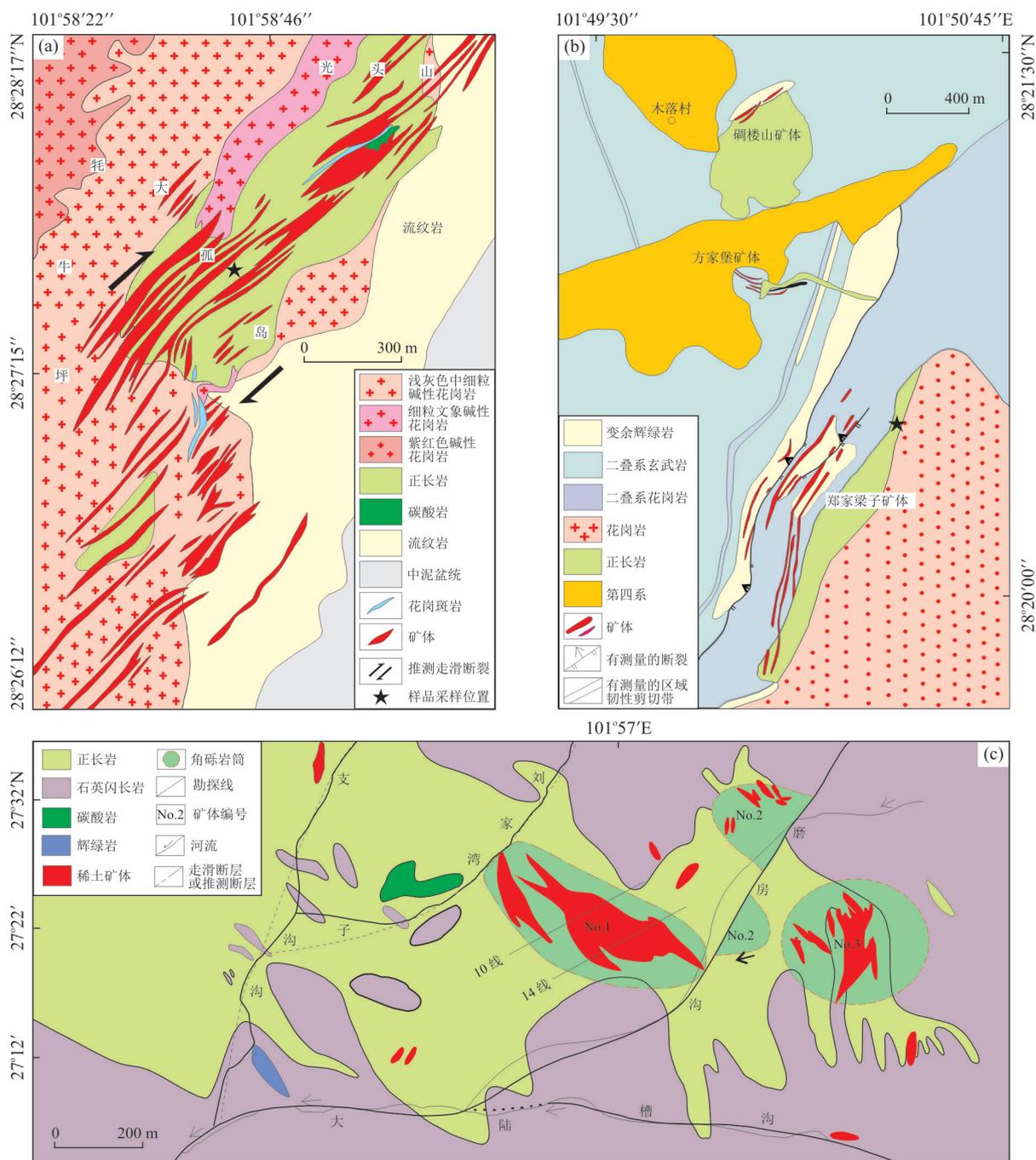


图 2 川西冕宁—德昌稀土矿带各矿床地质简图

Fig.2 Sketches of deposits in Mianning-Dechang REE ore belt, Sichuan Province

图 a, b 据袁忠信等(1995); 图 c 据杨光明等(1998)著四川省德昌县大陆槽稀土矿床成矿条件研究. a. 牦牛坪矿床; b. 郑家梁子矿床; c. 大陆槽矿床

眉山组上部主要为变质玄武岩、绿泥石片岩, 并夹有大理岩透镜体, 厚 400~500 m, 下部为灰绿色块状玄武岩夹杏仁状玄武岩, 含有部分集块岩, 厚 500~600 m; 阳新组上部为灰白色薄层结晶大理岩, 中部为致密块状大理岩, 下部为灰白色粗晶糖粒状白云质大理岩(图 4)(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 2008, 四川省冕宁县南河乡阴山村方家堡稀土

矿区普查报告). 矿床自北向南分为 3 段, 北部为碛楼山矿段, 中部为方家堡矿段, 南部为郑家梁子矿段(图 2b). 方家堡矿段地势较低, 目前已不再开采; 碛楼山矿段呈孤立巨型岩体, 郑家梁子矿段呈巨型薄板状, 2 个矿段均位于矿洞中. 英碱正长岩作为主要的赋矿围岩侵入到上述地层中, 在碛楼山矿段呈岩株状、方家堡矿段呈岩脉状、郑家梁子矿段呈岩墙状

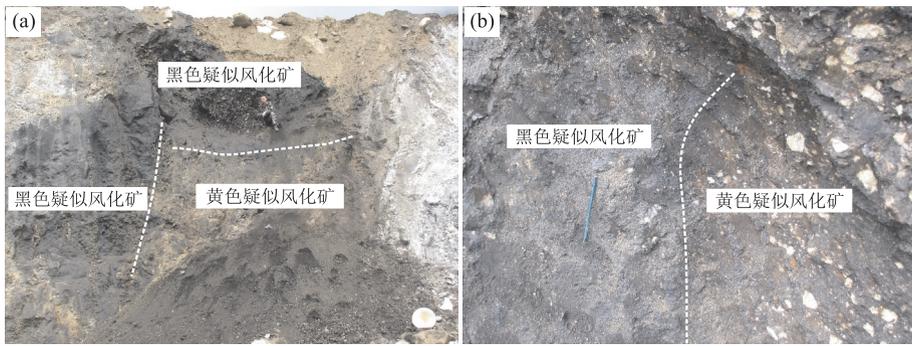


图 3 牦牛坪疑似风化型矿石的野外照片

Fig.3 Field photos of suspected weathered ore from Maoniuping deposit

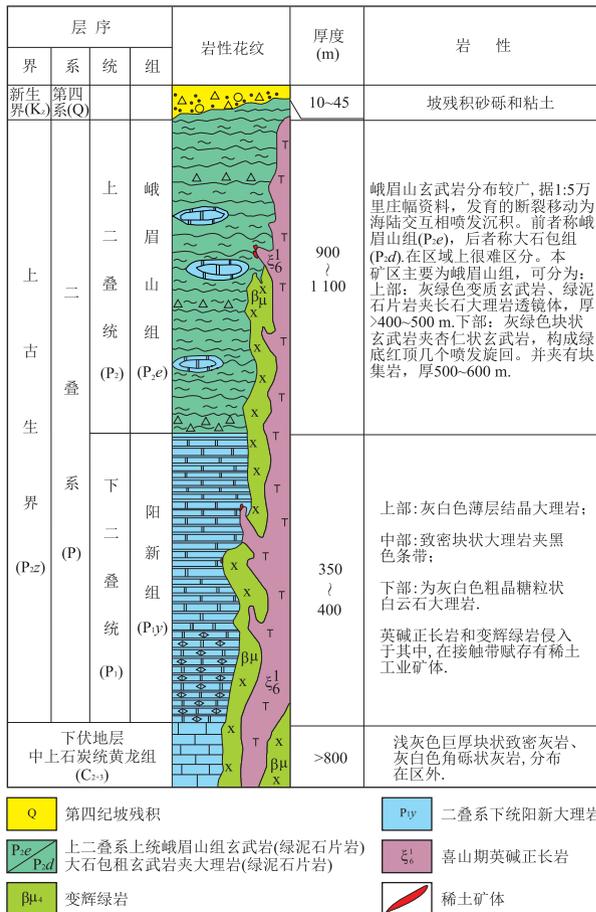


图 4 木落寨矿床二叠系地层和岩浆岩

Fig.4 Schematic stratigraphic and magmatic of the Permian in the Muluozhai deposit

据中国地质科学院矿产综合利用研究所(2008)编四川省冕宁县南河乡阴山村方家堡稀土矿区普查报告

产出,三者在地表互不相连,深部可能是一个相连的岩体。矿体沿 NW 向陡倾,倾角为 60°~75°,长 58~490 m,厚 0.86~25.8 m,呈似层状、条带状、不规则透镜状和细脉状(Hou *et al.*, 2009)。由于木落寨矿床特殊的开采条件,疑似风化型矿石的野外观察不如牦牛

坪矿床方便。这些疑似风化型矿石主要位于矿洞中,呈黄色、黄褐色,主要发育在正长岩和少量大理岩的裂隙中,粒度为 1~5 mm,采样位置如图 2b。

3 分析方法

(1)X 粉晶衍射。样品的粉晶衍射分析在中国地质调查局西安地质调查中心完成,用带有石墨单色仪的 Rigaku D/Mac-RC 和 CuKα₁ 辐射,并且在以下环境持续扫描:40 kV 的电压,80 mA 的电流,8°/min 的扫描速度,光栅 DS=SS=1°,18 °C 的环境温度,30% 的湿度。在内标下,刚玉作为参考矿物,主要矿物的质量组成用 XRD 分析。

(2)电子探针测试。样品的主量元素组成和背散射电子(BSE)图像分析是在中国地质科学院矿产资源研究所,用 JXA-8230 分析获得。硅酸盐和氧化物在 15 kV 的操作环境下进行,电流为 20 mA,波长为 5 μm,天然矿物和人造矿物被用作标准矿物。脉石矿物是通过生产厂家提供的 ZAF 修正程序进行修正。

(3)全岩主微量元素分析。全岩地球化学分析是在中国地质科学院国家测试中心完成。在 25 mL 的瓷坩锅中,将 0.7 g 的全岩粉末样品与 5.3 g 的 Li₂B₄O₇、0.4 g 的 LiF、0.3 g 的 NH₄NO₃ 混合。混合的粉末被转移到铂合金干坩锅中,把 1 mL LiBr 溶液加入到坩锅中,之后把样品干燥。在自动焰熔机内,样品慢慢融化,最后在凉玻璃中进行 X 射线荧光主量元素分析,运用电感耦合等离子体放射性光谱分析测试主量元素,分析误差在 2% 以下。微量元素测试,采取以下步骤:50 mg 的全岩粉末溶解在 1 mL 纯净的 HF 和 0.5 mL HNO₃ 中,并在 15 mL 的 Savillex Teflon 螺旋盖胶囊和 190 °C 环境中放置一天,干燥,与 0.5 mL 的 HNO₃ 混匀,再次干燥,确

保完全混匀.之后,将样品与 5 mL 的 HNO_3 混匀,密封在 130 °C 的烤炉中 3 h.冷却下来后,溶液要转移到塑料瓶中,分析之前稀释到 50 mL.运用电感耦合等离子体放射性光谱分析样品溶液的微量元素.

4 结果

4.1 矿石的矿物组成

牦牛坪黄色疑似风化型矿石与黑色疑似风化型矿石的矿物组成及其含量稍有不同(附表 1).黑色疑似风化型矿石主要是由铁云母(25.0%~83.0%)、氟碳铈矿(11.7%~30.7%)、石英(3.7%~41.3%)和钾长石(0.3%~15.0%)组成,此外,含有少量的方铈矿(0~1.0%)、方解石(0~1.5%)、斜长石(0~0.5%).黄色疑似风化型矿石主要是由石英(43.3%~51.2%)、铁云母(16.0%~24.0%)、钾长石(12.4%~19.5%)、氟碳铈矿(13.9%~18.9%)组成,少量的方解石(0.5%~1.2%)、方铈矿(0.4%~0.9%)和斜长石(0~3.2%)也有发育.黑色疑似风化型矿石较黄色疑似风化型矿石的稀土矿物含量稍高.

木落寨疑似风化型矿石的主要矿物为方解石(32.0%~89.0%)和重晶石(4.0%~56.0%),并含有少量的伊利石(0~1.0%)、纤铁矿、针铁矿、石英、萤石和氟碳铈矿(0~0.5%)等(附表 2).相比于牦牛坪疑似风化型矿石,该矿床中的疑似风化型矿石中氟碳铈矿含量较低,发育极少量的粘土矿物.

位于大陆槽 No.1 矿体中的风化型矿石,其中含有的矿石矿物主要有氟碳铈矿、氟碳钙铈矿和独居石,矿石矿物含量为 5.0%~60.0%;脉石矿物主要有萤石、石英、重晶石和天青石.此外,发育大量的粘土矿物,如伊利石、蒙脱石、高岭石、海泡石等,含量高达 40.0%(Liu *et al.*, 2015c).与前两个矿床相比,大陆槽风化型矿石发育一定量的脉石矿物和大量的稀土矿物并出现大量的粘土矿物,表明大陆槽矿床风化型矿石的风化程度和成矿品位较矿带中的其他矿床高.

就整个矿带的矿化形式来讲,主要是脉状矿化,大量的原生矿石以脉体的形式产出.这些脉体种类较多,按规模大小可分为粗脉、细脉和细网脉,每种类型的脉体根据其中主要矿物含量又可以分成不同的亚类,因此,不同脉体中的矿物含量变化较大,脉石矿物含量不能准确地定量表示.整体上讲,风化型和疑似风化型矿石与原生矿脉相比,部分脉石矿物含量降低,形成一些粘土矿物,氟碳铈矿作为主要的

矿石矿物含量升高.

4.2 岩相学和电子探针分析

背散射图像显示,牦牛坪黑色疑似风化型矿石中发育氟碳铈矿、金云母、石英、钾长石、Fe-Mn 氧化物以及少量的磁铁矿和绿泥石,这些矿物晶体的部分边界被磨成圆状(图 5a,5b).氟碳铈矿呈不规则状、粒状、长条状,有时发生破碎,粒径为 10~500 μm 不等;金云母与氟碳铈矿共生,呈片状、鳞片状,粒径 $>5 \mu\text{m}$;石英,破碎严重,粒径一般为 5~800 μm 不等;大块的钾长石通常被破碎成小块保留在原地,内部或边部夹杂着一些矿物碎屑或 Fe-Mn 氧化物,粒径大于 50 μm ;矿石中还分布着少量粒径为 100~500 μm 的磁铁矿和极少量粒径 $<10 \mu\text{m}$ 的绿泥石(图 5a,5b).黄色疑似风化型矿石发育的矿物种类与黑色疑似风化型矿石相似,主要的区别是前者矿物颗粒较大和氟碳铈矿分布相对较多(图 5c,5d).氟碳铈矿呈粒状、不规则状、长条状,粒径为 10~800 μm ,与黑色风化型矿石相比,磨圆度较低;金云母呈长条状、片状、鳞片状,粒径 10~400 μm ,有时叠加到其他矿物碎屑中;石英,颗粒较大,粒度一般在 50~900 μm 之间,边部常堆积一些矿物碎屑或少量的 Fe-Mn 氧化物;钾长石,破碎严重,构成碎屑结构,颗粒大小为 5~200 μm ;磁铁矿粒径一般为 100~700 μm ,叠加到其他碎屑矿石之上(图 5c,5d).由此可见,大家通常认为的牦牛坪风化矿其实风化程度并不高,缺少粘土矿物的发育,Fe-Mn 氧化物含量的差异可能影响着两类矿石颜色.

大陆槽风化型矿石最大的特征是粘土矿物大量发育,矿物之间的空隙较大,磨圆度较高,矿物呈松散状(图 5e~5h).氟碳铈矿呈块状、长条状叠加到萤石碎屑等其他脉石矿物碎屑之上或沿裂隙分布(图 5f~5g),粒径一般小于 200 μm ;氟碳钙铈矿与氟碳铈矿相似,但粒度较小,一般小于 100 μm ;独居石呈长条状叠加到钾长石或钠长石中,粒径一般小于 80 μm ;伊利石和赤铁矿分布在钠长石中,粒径一般小于 50 μm (图 5f);萤石破碎严重,边部被磨成圆角,未发生较大的位移并保留在原地,粒度一般小于 150 μm (图 5g,5h)(Liu *et al.*, 2015c).

电子探针结果表明,两种疑似风化型矿石中发育的云母为金云母,常见脉石矿物的主量元素含量基本一致,仅有少量的差别(附表 3).黄色疑似风化型矿石和黑色疑似风化型矿石中 Fe-Mn 氧化物中的 MnO 含量分别为 0.04%~2.64%、0.03%,FeO 含量分别为 45.0%~88.3%、76.3%.也就是黑色疑

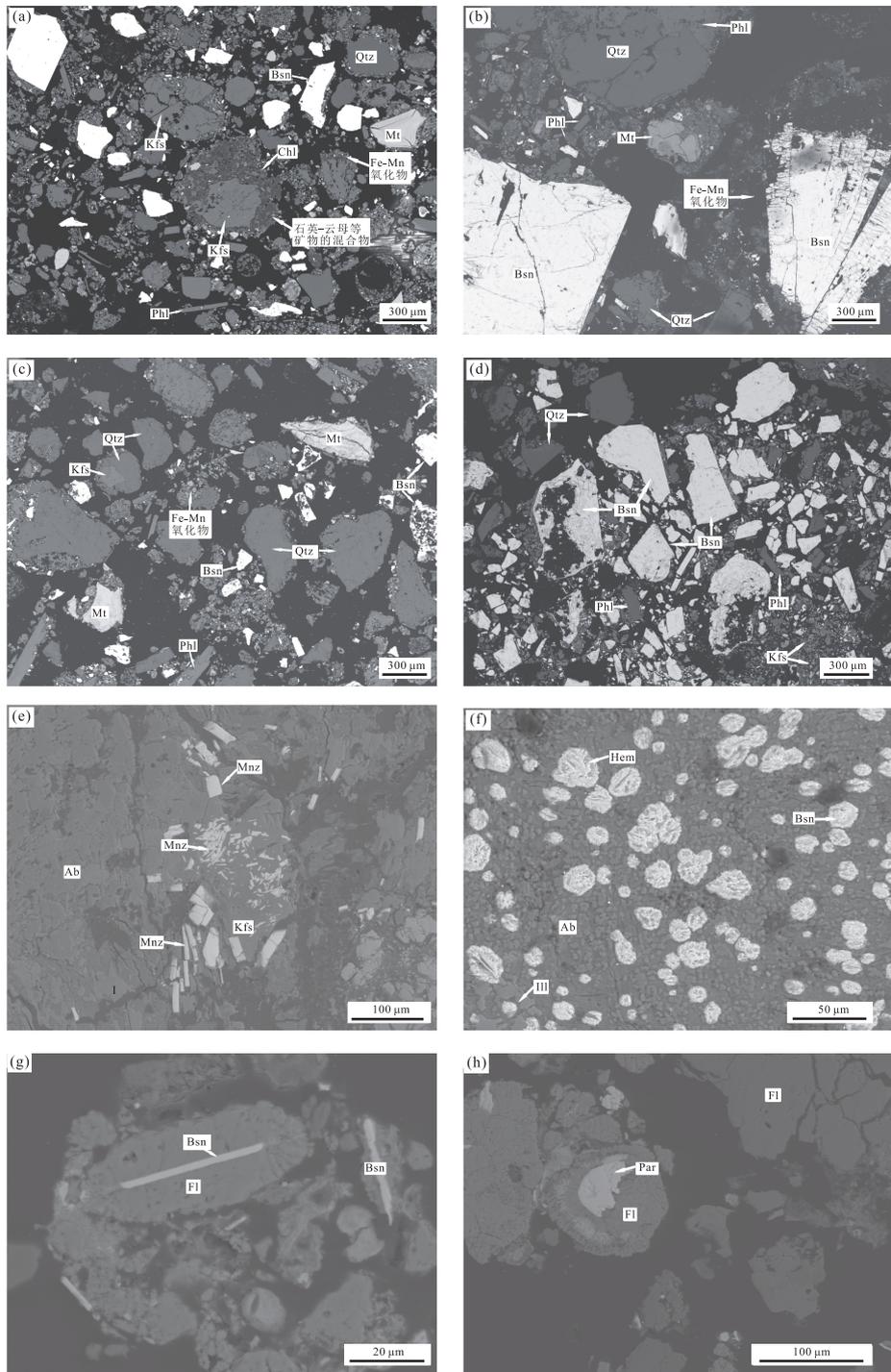


图 5 冕宁—德昌 REE 矿带风化型矿石的背散射照片

Fig.5 BSE images of weathered ores in Mianning-Dechang REE ore belt

a, b. 牦牛坪黑色风化型矿石: a. 氟碳铈矿沿裂隙分布, 钾长石周围分布着一些 Fe-Mn 氧化物和矿物碎屑; b. 块状及长条状的氟碳铈矿。c, d. 牦牛坪黄色风化型矿石: c. 氟碳铈矿、Fe-Mn 氧化物及其他脉石矿物的分布状态; d. 氟碳铈矿的分布状态; e~h. 大陆槽风化矿: e. 长条状的独居石叠加到钠长石中; f. 赤铁矿与氟碳铈矿和伊利石共生, 表明矿石发生风化作用; g. 针状的氟碳铈矿叠加到萤石碎屑中, 构成碎屑支撑结构; h. 块状的氟碳铈矿叠加到萤石碎屑中, 构成碎屑支撑结构。Bsn. 氟碳铈矿; Par. 氟碳钙铈矿; Mnz. 独居石; Kfs. 钾长石; Chl. 绿泥石; Mt. 磁铁矿; Phl. 金云母; Qtz. 石英; Ab. 钠长石; Hem. 赤铁矿; III. 伊利石; Fl. 萤石。e~g 据 Liu *et al.* (2015c)

似风化型矿石中的 Fe-Mn 氧化物中的 FeO 含量较黄色疑似风化型矿石稍高, MnO 稍低(附表 3), 这

种细微的含量变化可能也影响着两类矿石的颜色。两类矿石中的氟碳铈矿中的 La_2O_3 、 Ce_2O_3 含量与

大陆槽未风化型(角砾型)矿石中的氟碳铈矿中相应元素含量相似(Liu *et al.*, 2015b).黄色疑似风化型矿石中氟碳铈矿中的 La_2O_3 的含量为 20.1%~26.9%、 Ce_2O_3 的范围为 29.2%~36.0%,稍高于黑色疑似风化型矿石中的含量(La_2O_3 : 20.2%~22.5%、 Ce_2O_3 : 29.0%~30.8%)(附表 4).

4.3 矿石的主微量元素特征

牦牛坪黄色疑似风化矿的 SiO_2 含量较高,范围为 55.1%~55.3%,高于黑色疑似风化型矿石中的 SiO_2 含量(15.9%~43.2%)和大陆槽风化型矿石中的 SiO_2 含量(5.01%~50.00%)(Liu *et al.*, 2015c),比较接近正长岩围岩中的 SiO_2 含量(67.5%~70.9%)(Hou *et al.*, 2006);黄色疑似风化型矿石与黑色疑似风化型矿石中的 Al_2O_3 含量相近,范围分别为 5.19%~6.27%、2.61%~5.05%,低于大陆槽风化型矿石(Al_2O_3 : 0.11%~13.35%)(Liu *et al.*, 2015c)和正长岩中的含量(Al_2O_3 : 14.7%~16.0%)(Hou *et al.*, 2006);黑色、黄色矿石中 Fe_2O_3 含量分别为 6.21%~8.63%、3.23%~6.14%,均高于正长岩中的含量(0.93%~1.61%)(Hou *et al.*, 2006);大陆槽风化型矿石中的 Fe_2O_3 含量变化大,范围为 0.81%~12.78%(Liu *et al.*, 2015c);牦牛坪两种疑似风化型矿石几乎不含 FeO ;黄色、黑色疑似风化型矿石中的 CaO 含量较低,范围分别为 <0.05%~0.11%、<0.05%~0.17%,低于正长岩中的含量(CaO : 0.15%~1.86%)(Hou *et al.*, 2006);大陆槽风化矿中 CaO 的含量变化较大,范围为 0.21%~44.80%(Liu *et al.*, 2015c); K_2O 在黄色、黑色疑似风化型矿石中的含量分别为: 4.23%~5.40%、1.62%~3.38%,接近正长岩中的含量(4.71%~5.94%)(Hou *et al.*, 2006),高于大陆槽矿床中的含量(0.06%~4.41%)(Liu *et al.*, 2015c), Na_2O 在黄色、黑色矿石和大陆槽矿石中的含量分别为: 0.30%~0.48%、0.01%~0.28%、0.16%~0.34%(Liu *et al.*, 2015c),均低于正长岩中的含量(4.71%~5.90%)(Hou *et al.*, 2006);黄色、黑色疑似风化型矿石和大陆槽风化型矿石中 MgO 的含量分别为 1.24%~1.80%、1.98%~5.19%、0.04%~7.54%(Liu *et al.*, 2015c),均高于正长岩中的含量(0.30%~0.45%)(Hou *et al.*, 2006)(附表 5).牦牛坪黑色疑似风化型矿石与黄色疑似风化型矿石相比, Fe_2O_3 含量升高, SiO_2 降低。 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 和 MgO 在大陆槽风化型矿石中含量变化大,可能与所含有的脉石矿物有关。

牦牛坪两种疑似风化型矿石的微量元素蛛网图和 REE 配分曲线相似(图 6a,6b),与围岩正长岩的配分曲线也极其吻合(图 6e,6f).黑色疑似风化型矿石的 ΣREE 含量为 $201\,758 \times 10^{-6} \sim 307\,690 \times 10^{-6}$,LREE 为 $199\,078 \times 10^{-6} \sim 302\,935 \times 10^{-6}$,HREE 为 $122 \times 10^{-6} \sim 277 \times 10^{-6}$,高于黄色疑似风化型矿石的 ΣREE ($143\,002 \times 10^{-6} \sim 178\,972 \times 10^{-6}$)、LREE($141\,064 \times 10^{-6} \sim 176\,862 \times 10^{-6}$)和 HREE($74.1 \times 10^{-6} \sim 106 \times 10^{-6}$)含量.两类矿石的 LREE/HREE 和 La/Yb 比值相近(黄色风化型矿石:LREE/HREE 为 1 337~2 025、La/Yb 为 959~1 396;黑色风化性矿石:LREE/HREE 为 943~1 817、La/Yb 为 734~1 345)(附表 6).

大陆槽风化型矿石的 ΣREE 和 LREE 含量分别为 $1\,393 \times 10^{-6} \sim 222\,594 \times 10^{-6}$ 、 $1\,297 \times 10^{-6} \sim 220\,886 \times 10^{-6}$;LREE/HREE 和 La/Yb 比值分别为 147~8 495、52~3 961(Liu *et al.*, 2015c),均高于矿脉(ΣREE : $4\,510 \times 10^{-6} \sim 33\,800 \times 10^{-6}$;LREE: $4\,450 \times 10^{-6} \sim 33\,300 \times 10^{-6}$;LREE/HREE: 65.0~101;La/Yb: 296~1 645)(Liu and Hou, 2017)和角砾型矿石(ΣREE : $29\,066 \times 10^{-6} \sim 325\,872 \times 10^{-6}$;LREE: $16\,192 \times 10^{-6} \sim 61\,071 \times 10^{-6}$;LREE/HREE: 46.1~152;La/Yb: 288~667)(Liu *et al.*, 2015b)中相应元素和元素比值的含量.与前面两个矿床相比,木落寨风化型矿石的 REE 含量明显降低,其中 ΣREE 为 $2\,221 \times 10^{-6} \sim 9\,774 \times 10^{-6}$,LREE 为 $2\,116 \times 10^{-6} \sim 9\,704 \times 10^{-6}$;LREE/HREE 和 La/Yb 比值也较小,分别为 68.3~353.0、43.6~271.0(附表 6).因此,风化型和疑似风化型矿石的 ΣREE 、LREE 含量更高,LREE/HREE 和 La/Yb 比值变化较大,LREE 和 HREE 分异更明显。

牦牛坪黄色疑似风化型矿石的 Sr、Ba 含量分别为 $129 \times 10^{-6} \sim 140 \times 10^{-6}$ 、 $178 \times 10^{-6} \sim 260 \times 10^{-6}$ (排除 $1\,765 \times 10^{-6}$),Th、U 含量分别为 $581 \times 10^{-6} \sim 591 \times 10^{-6}$ 、 $30.7 \times 10^{-6} \sim 39.7 \times 10^{-6}$,稍低于黑色疑似风化型矿石中的含量(Sr: $181 \times 10^{-6} \sim 243 \times 10^{-6}$;Ba: $233 \times 10^{-6} \sim 572 \times 10^{-6}$;Th: $824 \times 10^{-6} \sim 1\,253 \times 10^{-6}$;U: $50.8 \times 10^{-6} \sim 181 \times 10^{-6}$)(附表 6);与未风化细脉浸染状矿石(Sr: $249 \times 10^{-6} \sim 11\,400 \times 10^{-6}$;Ba: $786 \times 10^{-6} \sim 9\,078 \times 10^{-6}$;Th: $1.14 \times 10^{-6} \sim 78.8 \times 10^{-6}$;U: $0.51 \times 10^{-6} \sim 19.6 \times 10^{-6}$)相比,两者的 Sr、Ba 含量稍低,Th、U 含量稍高(刘琰等,2012,川西冕宁—德昌稀土成矿带霓辉正长岩和碳酸岩演化与稀土矿床成因).大陆

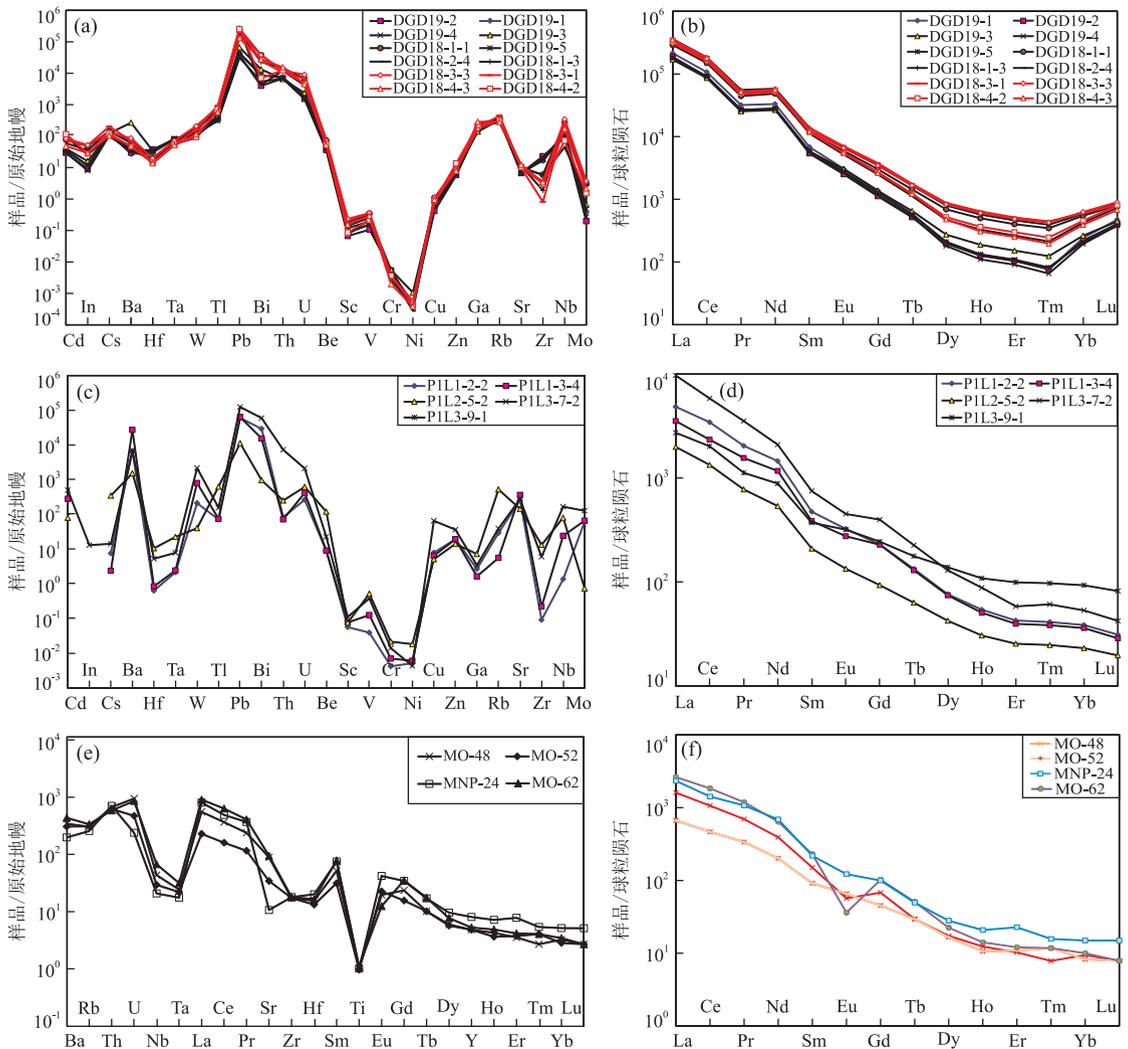


图 6 冕宁—德昌 REE 矿带疑似风化型矿石和主要赋矿围岩(正长岩)的球粒陨石标准化配分模式图

Fig.6 Chondrite-normalized of suspected weathered ore from Mianning-Dechang REE ore belt

据 Sun and McDonough(1989).a.牦牛坪矿床两种疑似风化型矿石的微量元素蛛网图;b.牦牛坪矿床两种疑似风化型矿石的 REE 配分曲线;c.木落寨矿床疑似风化型矿石的微量元素蛛网图;d.木落寨矿床疑似风化型矿石的 REE 配分曲线;e.牦牛坪主要赋矿围岩正长岩的微量元素蛛网图;f.牦牛坪主要赋矿围岩正长岩的 REE 配分曲线;e,f 来自 Hou *et al.*(2006)

槽风化型矿石中 Sr 含量为 $356 \times 10^{-6} \sim 3\ 660 \times 10^{-6}$ (Liu *et al.*, 2015c), 低于矿脉 ($1\ 990 \times 10^{-6} \sim 182\ 000 \times 10^{-6}$) (Liu and Hou, 2017) 和角砾型矿石 ($9\ 796 \times 10^{-6} \sim 1\ 256\ 500 \times 10^{-6}$) (Liu *et al.*, 2015b) 中的含量; Ba、Th、U 的含量在三者中相近 (Liu *et al.*, 2015c). 木落寨疑似风化型矿石中 Sr、Ba 含量较高, 范围分别为 $2\ 869 \times 10^{-6} \sim 7\ 265 \times 10^{-6}$ 、 $16\ 130 \times 10^{-6} \sim 179\ 500 \times 10^{-6}$; Th、U 含量分别为 $5.69 \times 10^{-6} \sim 576 \times 10^{-6}$ 、 $5.27 \times 10^{-6} \sim 101 \times 10^{-6}$ (附表 6). 因此, 疑似风化型矿石和原矿相比, Sr、Ba 等大离子亲石元素含量降低, U、Th 等高场强元素含量升高.

5 讨论

5.1 风化型矿床的矿石类型

牦牛坪和木落寨疑似风化型矿石较大陆槽风化型矿石而言, 缺少粘土矿物. 牦牛坪疑似风化型矿石根据颜色分为黄色和黑色两种, XRD 分析表明黄色疑似风化型矿石主要是由石英 (43.3%~51.2%)、铁云母 (16.0%~24.0%)、钾长石 (12.4%~19.5%)、氟碳铈矿 (13.9%~18.9%) 和少量的方解石 (0.5%~1.2%)、方铈矿 (0.4%~0.9%) 和斜长石 (0~3.2%) 组成; BSE 下含有少量的 Fe-Mn 氧化物和磁铁矿; 黑色疑似风化型矿石主要是由铁云母 (25.0%~83.0%)、氟碳铈矿 (11.7%~30.7%)、石

英(3.7%~41.3%)和钾长石(0.3%~15.0%)以及少量的方铈矿(0~1.0%)、方解石(0~1.5%)、斜长石(0~0.5%)(附表 1)组成;与黄色疑似风化型矿石相比,BSE 下含有稍多的 Fe-Mn 氧化物(图 5a, 5b),且 Fe-Mn 氧化物中的 FeO 含量较黄色疑似风化型矿石稍高(附表 3).黄色和黑色两种疑似风化型矿石的主要区别是石英和铁云母贡献的比例不同,稀土矿物(氟碳铈矿和方铈矿)在黑色疑似风化型矿石中稍微偏高,铁云母和 Fe-Mn 氧化物的含量控制着两种矿石的颜色.木落寨疑似风化型矿石主要是由方解石(32%~89%)、重晶石(4%~56%)组成,部分样品含有极少量的粘土矿物(0~0.5%),氟碳铈矿含量极低,范围为 0~0.5%(附表 2),整体矿石品位较低.

大陆槽风化型矿石与已有牦牛坪、里庄和木落寨等各矿床中发育的矿脉、角砾状等矿石类型相比,脉石矿物(如萤石、重晶石、天青石、方解石、钾长石等)减少,稀土含量明显高于其他矿石类型(牦牛坪矿床平均 REO 为 2.89%;里庄矿床平均 REO 为 1.05%~6.69%;大陆槽矿床平均 REO 为 5.0%;木落寨矿床平均 REO 为 3.97%(Hou *et al.*, 2009),并发育大量的粘土矿物,如伊利石、蒙脱石、高岭石、海泡石等,含量达 40%(Liu *et al.*, 2015c).在这些风化过程中,大量的脉石矿物以及硫化物消失,并发生一系列的化学反应生成一些新的粘土矿物(Liu *et al.*, 2015c),总体风化程度较高.

整体上将冕宁—德昌 REE 矿带中发育的这些风化型和疑似风化型矿石进行对比,发现只有大陆槽矿床出现较多的粘土矿物,风化程度较高;牦牛坪矿床虽然规模大,和木落寨矿床一样,出现的疑似风化型矿石样品主要是机械风化作用,缺少粘土矿物的生成,称之为疑似风化型矿石.

5.2 疑似风化型和风化型矿石成因

冕宁—德昌 REE 矿带各矿床的蚀变程度、矿化特征和矿石类型等有所不同,表明每个矿床所代表的矿化系统中的压力、温度、流体通量和流体活动的持续时间等有很大差异(Hou *et al.*, 2009; Kynicky *et al.*, 2012; Xie *et al.*, 2015).尽管前人提出了冕宁—德昌 REE 矿带中各矿床的矿化模式(Hou *et al.*, 2009; Xie *et al.*, 2015; Hou *et al.*, 2015; Liu and Hou, 2017),但是这些矿化模式中没有考虑到风化作用在形成高品位的矿石中的贡献.笔者对矿带中发育的风化矿石的成因进行讨论.

5.2.1 疑似风化型矿石成因 牦牛坪矿床中疑似

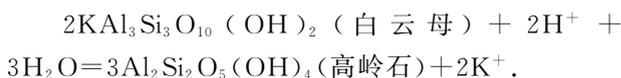
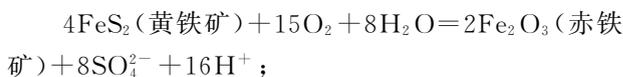
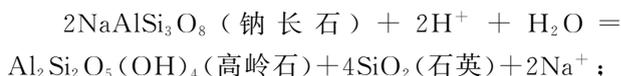
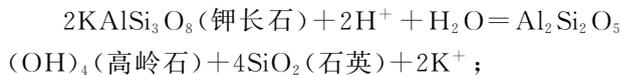
风化型矿石由大量的石英、铁云母、氟碳铈矿组成,并含有少量的钾长石、钠长石和方解石等,与牦牛坪矿床中的矿脉相比,脉石矿物部分缺失,矿石矿物(主要是氟碳铈矿)含量升高.牦牛坪矿床整体受哈断裂控制,矿床中发育大量的次级断裂,形成脉状矿化系统,广泛发育各种类型的脉体(袁忠信等, 1995; Hou *et al.*, 2009; Liu and Hou, 2017),因此,这些脉体可能是疑似风化型矿石的初始矿石来源.疑似风化型矿石的主、微量元素以及 REE 配分曲线等与赋矿围岩正长岩极为相似(图 6a, 6b, 6e, 6f).综合疑似风化型矿石、矿脉和围岩(主要是正长岩)的产出位置、岩相学特征和矿物组合研究,发现围岩和矿脉是这些疑似风化型矿石的初始来源.强烈的构造以及次级构造活动,使得这些脉体和围岩发生强烈的机械风化作用,机械破碎形成更细粒的矿石和矿物,使脉石矿物含量减少的同时稀土矿物含量升高.由于矿石中并没有大量新的矿物生成,因此化学风化作用不明显,并且矿床中未发现明显的生物活动,因此生物风化作用也不显著.

木落寨疑似风化型矿石的主要矿物是方解石和重晶石,此外,少量的伊利石(0~1%)、纤铁矿、针铁矿、石英、萤石和氟碳铈矿(0~0.5%)(附表 2)也有发育.其微量元素蛛网图和稀土元素配分曲线与牦牛坪疑似风化型矿石相似(图 6a, 6b, 6c, 6d).与牦牛坪疑似风化型矿石不同的是其稀土矿物以及 Σ REE (LREE)含量较低,这可能与疑似风化型矿石的初始矿石有关;脉石矿物含量相对较高(附表 2, 附表 6).结合木落寨疑似风化型矿石的产状、矿物组合,该矿床中疑似风化型矿石的原岩也是周围的矿脉和围岩(主要是正长岩).在构造作用下,这些矿脉和围岩发生机械风化作用.根据矿床中发育的地质构造、疑似风化型矿石和其中矿物的粒度以及脉石矿物的含量,表明木落寨疑似风化型矿石不如牦牛坪矿床风化强烈,仅仅发生中等强度的机械风化作用.

5.2.2 风化型矿石的成因 大陆槽矿化发育在顶部较浅的部位,这种较浅的矿化位置,容易使成矿流体发生广泛沸腾作用,最终导致隐爆活动和角砾岩筒的形成;此外,强烈的隐爆角砾活动对碳酸岩—正长岩杂岩体的蚀变提供有利的条件(Liu *et al.*, 2015b, 2015c).大陆槽 No.1 矿体受 2 个断层控制,隐爆角砾活动发育,具有较高的成矿品位和较大的成矿规模,是稀土矿石开采的对象,同时也是风化型矿石的主要产出地.野外观察发现,风化型矿石主要沿 No.1 矿体中的断层分布,宽度从顶部的几厘米

增加到底部的一米。研究表明, No.1 矿体经历了多期的隐爆角砾活动(Liu *et al.*, 2015b, 2015c), 对矿石和矿物产生严重的破坏作用并导致围岩发生强烈的蚀变作用, 因此, 多期次的隐爆角砾活动促进 No.1 矿体中的矿石和矿物发生严重的机械风化, 结果使大量的矿石和矿物的粒度变小。此外, 强烈的围岩蚀变作用, 对矿石和矿物的结构发生破坏, 也有助于风化作用的进行。

大陆槽 No.1 矿体中所发生的强烈的角砾和断层活动促进矿石产生更多的裂隙, 疏通了水和空气进入矿石的通道, 加快矿石发生水岩反应。在水和空气的参与下, 一些脉石矿物发生水化、水解和氧化反应, 形成一些新的矿物, 如钠长石和钾长石转变成高岭石和蒙脱石、霓辉石转变成海泡石、白云母转变成伊利石、蒙脱石转变成伊利石、黄铁矿转变成赤铁矿等, 可能的化学反应如下:



这些反应会使得一些元素发生丢失, 如 K^+ 、 Na^+ 等。中等强度的化学风化作用和强烈的机械风化作用使大量的脉石矿物丢失和一些粘土矿物的形成(含量高达 40%), 进而导致稀土矿物含量升高, 达 60%(Liu *et al.*, 2015c), 促进 REE 的再次富集、形成高品位的矿石。这也是与角砾状矿石和矿脉相比, 脉石矿物减少和稀土矿物含量升高的原因。与牦牛坪和木落寨疑似风化型矿石相似, 矿床中无明显生物活动的痕迹, 生物风化作用不显著。

5.3 风化型矿床的成矿潜力

冕宁—德昌 REE 矿带中风化型矿石中的稀土矿物含量为 5%~60%(Liu *et al.*, 2015c), 范围变化较大, 高于一般矿石中的氟碳铈矿含量(牦牛坪矿床平均 REO 为 2.89%; 里庄矿床平均 REO 为 1.05%~6.69%; 大陆槽矿床平均 REO 为 5.0%; 木落寨矿床平均 REO 为 3.97%)(Hou *et al.*, 2009)。机械风化作用使得部分脉石矿物(如重晶石、天青石、霓辉石、钠铁闪石、方解石、萤石等)发生严重破碎, 形成更细粒的矿物而难以被保存, 留下耐风化的氟碳铈矿、石英等; 化学风化作用使大量粘土矿物形

成。随着机械和化学风化作用的不断进行, 风化型矿石中的脉石矿物逐渐减少, 粘土矿物和耐风化的稀土矿物等在矿石中的含量不断升高。

微量元素也表明风化型矿石的 ΣREE (LREE) 含量较高。牦牛坪黑色和黄色两种疑似风化型矿石的 ΣREE 含量分别为 $201\,758 \times 10^{-6} \sim 307\,690 \times 10^{-6}$ 、 $143\,002 \times 10^{-6} \sim 178\,972 \times 10^{-6}$; LREE 分别为 $199\,078 \times 10^{-6} \sim 302\,935 \times 10^{-6}$ 、 $141\,064 \times 10^{-6} \sim 176\,862 \times 10^{-6}$; HREE 分别为 $122 \times 10^{-6} \sim 277 \times 10^{-6}$ 、 $74.1 \times 10^{-6} \sim 106.0 \times 10^{-6}$ (附表 6)。大陆槽风化型矿石的 ΣREE 和 LREE 含量分别为 $18\,262 \times 10^{-6} \sim 222\,594 \times 10^{-6}$ 、 $17\,701 \times 10^{-6} \sim 220\,886 \times 10^{-6}$ (Liu *et al.*, 2015c), 高于牦牛坪浸染状矿石的 ΣREE ($714 \times 10^{-6} \sim 3\,678 \times 10^{-6}$)、LREE($635 \times 10^{-6} \sim 3\,442 \times 10^{-6}$) 和 HREE($76.01 \times 10^{-6} \sim 33.8 \times 10^{-6}$) 含量(刘琰等, 2012, 川西冕宁—德昌稀土成矿带霓辉正长岩和碳酸岩演化与稀土矿床成因)以及大陆槽矿脉(ΣREE : $4\,510 \times 10^{-6} \sim 33\,800 \times 10^{-6}$; LREE: $4\,450 \times 10^{-6} \sim 33\,300 \times 10^{-6}$)(Liu and Hou, 2017) 和角砾型矿石(ΣREE : $29\,066 \times 10^{-6} \sim 325\,872 \times 10^{-6}$; LREE: $16\,192 \times 10^{-6} \sim 61\,071 \times 10^{-6}$)(Liu *et al.*, 2015b) 中相应元素的含量。

当风化型(或疑似风化型)矿石原岩为高品位的粗脉、角砾状矿石以及其他高品位的矿石类型时, 由于原岩中矿石矿物含量较高, 随着风化作用的持续进行, 大量的脉石矿物减少, 相应的稀土矿物和粘土矿物含量升高, 使得稀土矿物发生原位富集, 形成高品位的矿石类型。此外, 风化作用形成的粘土矿物对稀土元素具有一定的吸附作用, 也促进稀土元素的原位富集。

池汝安等(2012)将离子吸附型稀土矿形成的必要条件总结为 3 个: (1) 稀土元素要有来源——原岩中必须含有稀土矿物, 作为稀土的来源; (2) 赋存稀土元素的稀土矿物和副矿物必须可风化, 满足稀土矿物风化后形成稀土离子的内在条件; (3) 原岩必须处于温暖湿润气候地区, 受生物、物理和化学风化作用, 这能满足原岩风化的外在条件。冕宁—德昌 REE 矿带中的所有矿床属于内生稀土矿床, 具有较高的矿石品位, 并且常见脉石矿物, 萤石、重晶石等矿物中稀土含量较高(Liu and Hou, 2017)。此外, 赋矿围岩正长岩以及少量的碳酸岩也是风化型矿石的重要来源, 这些围岩中的稀土元素含量较高, 尤其是碳酸岩中的稀土含量更高, 达 $33\,759 \times 10^{-6}$ (Hou *et*

al., 2015), 满足了离子吸附型稀土矿形成的第 1 个条件。尽管矿带的形成年龄小(11~27 Ma)(胡文洁等, 2012; Yang *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015a; Ling *et al.*, 2016; Liu and Hou, 2017), 氟碳铈矿还没有被风化, 但大量的脉石矿物, 如萤石、重晶石、方解石等容易风化, 特别是重晶石在矿床中多风化或多孔状、骨架状。风化形成的大量粘土矿物(高达 40%)对稀土元素具有一定的吸附作用, 因此, 满足了第 2 个条件。第 3 个条件中强调气候的作用, 整个矿带位于四川省凉山州, 属于亚热带季风气候, 年降雨量 1 000~1 100 mm, 具有优越的气候条件, 能促进风化作用的进行。从整个矿带上来讲, 目前矿带已发生明显的机械、化学风化作用, 生物风化作用目前不是很明显, 项目组已与中科院生物所进行合作, 后期根据实验结果讨论微生物对风化作用的影响。因此, 就目前的情况, 整个矿带具备形成离子吸附型稀土矿床的潜力。

6 结论

(1) 牦牛坪黄色和黑色疑似风化型矿石主要是由石英、铁云母和氟碳铈矿组成, 含有少量的方钨矿、钾长石、斜长石、方解石等脉石矿物, 几乎不含粘土矿物。两类疑似风化型矿石的主要区别是石英和铁云母含量的不同, 并且铁云母和 Fe-Mn 氧化物的含量控制两类矿石的颜色。木落寨疑似风化型矿石主要是由方解石和重晶石组成, 含少量的氟碳铈矿和极少量的粘土矿物(0~0.5%)。两个矿床与大陆槽矿床相比, 其风化程度较低。

(2) 牦牛坪两类疑似风化型矿石的 REE 配分曲线、微量元素蛛网图与围岩正长岩相似。再结合矿石与围岩、矿脉产状之间的关系以及三者发育的矿物种类, 表明疑似风化型矿石(风化型矿石)的原岩主要是附近的矿脉和围岩, 在强烈的构造和次级构造的活动下, 发生强烈的机械风化作用, 使矿石、矿物发生严重的机械破碎, 脉石矿物降低, 相应的矿石矿物含量升高。由于没有新的矿物(主要是粘土矿物)生成, 因而化学风化作用不明显。相同地, 木落寨矿石主要是矿脉和围岩发生中等强度的机械风化作用形成。

(3) 大陆槽风化型矿石具有较高的稀土含量(达 60%), 大量粘土矿物发育(达 40%)。强烈的构造活动, 特别是断层和角砾活动促进矿石发生强烈的机械风化, 并进而促进矿石发生氧化、水解和水合等一

系列中等强度的化学风化作用, 导致粘土矿物的形成, 并使得稀土矿物原位富集。整个矿带中未发现明显的生物风化作用。根据风化型矿石目前的稀土含量, 具有风化成矿的潜力。

致谢: 感谢中国地质科学院矿产综合利用研究所朱志敏副研究员、四川省地质局川西北地质队的吕丰强工程师、刘大明工程师在野外工作上给予的帮助; 感谢论文审稿过程中匿名审稿专家对本文细致的审阅工作, 并提出宝贵和指导性的修改意见!

References

- Bao, Z. W., Zhao, Z. H., 2008. Geochemistry of Mineralization with Exchangeable REY in the Weathering Crusts of Granitic Rocks in South China. *Ore Geology Reviews*, 33 (3-4): 519-535. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.03.005>
- Chi, R. A., Tian, J., Luo, X. P., et al., 2012. The Basic Research on the Weathered Crust Elution-Deposited Rare Earth Ores. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 3 (4): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Fu, W., Huang, X. R., Yang, M. L., et al., 2014. REE Geochemistry in the Laterite Crusts Derived from Ultramafic Rocks: Comparative Study of Two Laterite Profiles under Different Climate Condition. *Earth Science*, 39(6): 716-732.
- Guo, Z. F., Hertogen, J., Liu, J. Q., et al., 2005. Potassic Magmatism in Western Sichuan and Yunnan Provinces, SE Tibet, China—Petrological and Geochemical Constraints on Petrogenesis. *Journal of Petrology*, 46(1): 33-78. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh061>
- Hou, Z. Q., Liu, Y., Tian, S. H., et al., 2015. Formation of Carbonatite-Related Giant Rare-Earth-Element Deposits by the Recycling of Marine Sediments. *Scientific Reports*, 5: 10231. <https://doi.org/10.1038/srep10231>
- Hou, Z. Q., Ma, H. W., Zaw, K., et al., 2003. The Himalayan Yulong Porphyry Copper Belt—Product of Large-Scale Strike-Slip Faulting in Eastern Tibet. *Economic Geology*, 98(1): 125-145. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.1.125>
- Hou, Z. Q., Pan, G. T., Wang, A. J., et al., 2006. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt; II. Mineralization in Late-Collisional Transformation Setting. *Mineral Deposits*, 25 (5): 521-543 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Tian, S. H., Xie, Y. L., et al., 2009. The Himalayan Mianing-Dechang REE Belt Associated with Carbonatite-Alkaline Complexes, Eastern Indo-Asian Collision Zone, SW China. *Ore Geology Reviews*, 36 (1-3): 65-89.

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.03.001>

- Hou, Z. Q., Tian, S. H., Yuan, Z. X., et al., 2006. The Himalayan Collision Zone Carbonatites in Western Sichuan, SW China—Petrogenesis, Mantle Source and Tectonic Implication. *Earth and Planetary Science Letters*, 244 (1–2): 234–250. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.052>
- Hu, W. J., Tian, S. H., Wang, S. P., et al., 2012. Sm-Nd Isochron Age of Carbonatite from the Maoniuping REE Deposit, Sichuan Province and Their Geological Implications. *Mineral Resources and Geology*, 26(3): 237–241 (in Chinese with English abstract).
- Kynicky, J., Smith, M. P., Xu, C., 2012. Diversity of Rare Earth Deposits: The Key Example of China. *Elements*, 8(5): 361–367. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.5.361>
- Ling, X. X., Li, Q. L., Liu, Y., et al., 2016. In Situ SIMS Th-Pb Dating of Bastnaesite: Constraint on the Mineralization Time of the Himalayan Mianning-Dechang Rare Earth Element Deposits. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31(8): 1680–1687. <https://doi.org/10.1039/c6ja00093b>
- Liu, Y., Chen, C., Shu, X. C., et al., 2017. The Formation Model of the Carbonatite-Syenite Complex REE Deposits in the East of Tibetan Plateau: A Case Study of Dalucao REE Deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 1978–2000 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Chen, Z. Y., Yang Z. S., et al., 2015a. Mineralogical and Geochemical Studies of Brecciated Ores in the Dalucao REE Deposit, Sichuan Province, Southwestern China. *Ore Geology Reviews*, 70: 613–636. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.006>
- Liu, Y., Hou, Z. Q., Tian, S. H., et al., 2015b. 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. *Ore Geology Reviews*, 64: 554–568. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.017>
- Liu, Y., Zhu, Z. M., Chen, C., et al., 2015c. Geochemical and Mineralogical Characteristics of Weathered Ore in the Dalucao REE Deposit, Mianning-Dechang REE Belt, Western Sichuan Province, Southwestern China. *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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 35–79. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2017.01.010>
- Luo, Y. N., Yu, R. L., Hou, L. W., et al., 1998. Longmenshan-Jinpingshan Intracontinental Orogenic Belt. Sichuan Science and Technology Publishing House, Chengdu (in Chinese).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2003. Response of Volcanism to the India-Asia Collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135–148 (in Chinese with English abstract).
- Sanematsu, K., Watanabe, Y., 2016. Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-Type Rare Earth Element Deposits: Reviews in Economic Geology. *Society of Economic Geologists*, 18: 55–79.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London Special Publication*, 42: 313–345.
- Wang, D. H., Chen, Y. C., Wang, R. J., et al., 2013a. Discussion on Some Problems Related to Prospecting Breakthrough in Nanling Region. *Mineral Deposits*, 32(4): 854–863 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Zhao, Z., Yu, Y., et al., 2013b. Progress, Problems and Research Orientation of Ion-Adsorption Type Rare Earth Resources. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5): 796–802 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Yang, J. M., Yan, S. H., et al., 2001. A Special Orogenic-Type Rare Earth Element Deposit in Maoniuping, Sichuan, China—Geology and Geochemistry. *Resource Geology*, 51: 177–188.
- Wang, D. H., Zhao, Z., Yu, Y., et al., 2017. A Review of the Achievements in the Survey and Study of Ion-Adsorption Type REE in China. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(3): 317–325 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. Y., 1989. Rare Earth Mineralization in Weathering Crust—A Nonequilibrium Process. *Mineral Deposits*, 8(4): 85–90 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. L., Li, Y. X., Hou, Z. Q., et al., 2015. A Model for Carbonatite Hosted REE Mineralisation—The Mianning-Dechang REE Belt, Western Sichuan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 70: 595–612. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.10.027>
- Yang, Y. H., Wu, F. Y., Li, Y., et al., 2014. In Situ U-Pb Dating of Bastnaesite by LA-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 29(6): 1017–1023. <https://doi.org/10.1039/c4ja00001c>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280.
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>

- Yuan, Z. X., Shi, Z. M., Bai, G., et al., 1995. The Maoniuping Rare Earth Ore Deposit, Mianning County, Sichuan Province. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, Y. X., Luo, Y. N., Yang, C. X., 1988. The Panxi Rift. Geological Publishing House, Beijing, 224–270 (in Chinese).
- Zhao, Z., Wang, D. H., Pan, H., et al., 2017. REE Geochemistry of a Weathering Profile in Guangxi, Southern China, and Genesis of Ion-Adsorption Type REE Deposit. *Earth Science*, 42(10): 1697–1706 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, D. L., Ding, L., Liu, F. T., et al., 2000. Multi-Direction Layer and Frame Structure of Rock Layers in Orogenic Belt and Its Control on Cenozoic Magmatic Activities—An Example from Sanjiang and Its Neighboring Area. *Science in China (Series D)*, 30(Suppl.): 1–8 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 池汝安, 田君, 罗仙平, 等, 2012. 风化壳淋积型稀土矿的基础研究. *有色金属科学与工程*, 3(4): 1–13.
- 付伟, 黄小荣, 杨梦力, 等, 2014. 超基性岩红土风化壳中 REE 地球化学不同气候风化壳剖面的对比. *地球科学*, 39(6): 716–732.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等, 2006. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用. *矿床地质*, 25(5): 521–543.
- 胡文洁, 田世洪, 王素平, 等, 2012. 四川牦牛坪稀土矿床碳酸岩 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. *矿产与地质*, 26(3): 237–241.
- 刘琰, 陈超, 舒小超, 等, 2017. 青藏高原东部碳酸岩—正长岩杂岩体型 REE 矿床成矿模式—以大陆槽 REE 矿床为例. *岩石学报*, 33(7): 1978–2000.
- 骆耀南, 俞如龙, 侯立玮, 等, 1998. 龙门山—锦屏山陆内造山带. 成都: 四川科学技术出版社.
- 莫登学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2003. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. *地质前缘*, 10(3): 135–148.
- 王登红, 陈毓川, 王瑞江, 等, 2013a. 对南岭与找矿有关问题的探讨. *矿床地质*, 32(4): 854–863.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 等, 2013b. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向. *岩矿测试*, 32(5): 796–802.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 等, 2017. 我国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价新进展. *地球学报*, 38(3): 317–325.
- 吴澄宇, 1989. 风化壳稀土成矿作用——一种不平衡过程. *矿床地质*, 8(4): 85–90.
- 袁忠信, 施泽民, 白鸽, 等, 1995. 川西冕宁牦牛坪轻稀土矿床. 北京: 地震出版社.
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜, 1988. 攀西裂谷. 北京: 地质出版社, 224–270.
- 赵芝, 王登红, 潘华, 等, 2017. 广西某地花岗岩风化壳中稀土元素特征与 iREE 矿床成矿机制. *地球科学*, 42(10): 1697–1706.
- 钟大赉, 丁林, 刘福田, 等, 2000. 造山带岩石层多向层架构造及其对新生代岩浆活动约束——以三江及邻区为例. *中国科学(地球科学)*, 30(增刊): 1–8.