

金雅楠,王登红,于扬等. 2026. 四川冕宁龙家沟稀土矿地质特征及成因初探. 岩石学报,42(06): 2105-2119, doi: 10.18654/1000-0569/2026.06.09; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.06.09

四川冕宁龙家沟稀土矿地质特征及成因初探^{*}

金雅楠¹ 王登红^{2**} 于扬² 刘善宝² 王伟^{1,3} 赵芝² 于泓² 何斌³ 纪德宝⁴ 赵瑞淮²
JIN YaNan¹, WANG DengHong^{2**}, YU Yang², LIU ShanBao², WANG Wei^{1,3}, ZHAO Zhi², YU Feng², HE Bin³, JI DeBao⁴ and ZHAO RuiWei²

1. 成都理工大学地球与行星科学学院,成都 610059
2. 中国地质科学院矿产资源研究所,深地探测与矿产勘查全国重点实验室,自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037
3. 中稀(凉山)稀土有限公司,冕宁 615600
4. 四川省地质矿产(集团)有限公司,成都 610017
1. *College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*
2. *MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*
3. *China Rare Earth (Liangshan) (Group) Co., Ltd., Mianning 615600, China*
4. *Sichuan Geology and Mineral Resources (Group) Co., Ltd., Chengdu 610017, China*
- 2025-04-11 收稿, 2026-03-08 改回.

Jin YN, Wang DH, Yu Y, Liu SB, Wang W, Zhao Z, Yu F, He B, Ji DB and Zhao RW. 2026. Geological characteristics and genesis of REE ore in Longjiagou, Mianning, Sichuan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 42(6): 2105-2119, doi: 10.18654/1000-0569/2026.06.09; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.06.09

Abstract The Maoniuping REE deposit, situated at the northern extremity of Panxi alkaline-carbonate REE metallogenic belt, represents the second largest light REE deposit in China and the second supersized deposit in the world. The Maoniuping REE ore belt consists of three ore sections with satisfying metallogenic conditions and prospecting potential, i. e., from north to south, the small-scale Sanchahe deposit, the ultra-large type Maoniuping deposit and the medium-scale Puwugou deposit (the original Baozi Mountain deposit). In recent years, we have discovered a thick REE orebody in the Longjiagou area, located east of the Puwugou REE deposit. In order to find out its ore characteristics, diagenesis and metallogenic ages to discuss the genesis of the orebody, this study conducted comprehensive investigations of ore petrography, diagenetic-metallogenic geochronology and mineral geochemistry. Analytical results reveal zircon U-Pb age of the syenite is 26.7 ± 0.3 Ma ($n=8$, MSWD=1.2), while U-Pb age of the bastnäsite is 30.9 ± 1.6 Ma ($n=23$, MSWD=1.6), all belonging to the Himalayan Period. Geochemical data of the bastnäsite indicate that the REE pattern curves of different bastnäsite types exhibit a pronounced right-leaning mode, showing strong enrichment in LREE with weak negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.79 \sim 0.89$, mean value of 0.85) and insignificant Ce anomalies ($\delta\text{Ce}=0.84 \sim 1.06$, mean value =0.95), along with relative losses of HFSE such as Nb, Ta, Zr and Hf. In the syenite, bastnäsite displays lower $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{N}}$ values (1743 ~ 4157) and higher Th/U ratios (254 ~ 348), suggesting that the formation of the Longjiagou REE deposit underwent a complex evolutionary process. This finding further confirms that the Longjiagou area and the Maoniuping deposit district belong to the same deep-seated alkaline-carbonatite complex, resulting from multi-phase and multi-stage evolution of the same magmatic-hydrothermal system. The discovery of the Longjiagou REE deposit holds significant implications for expanding the prospecting scope in the peripheral areas of Maoniuping deposit.

Key words Panxi area; Characteristics of orebody; Ore type; Ages of syenite and bastnäsite; Bastnäsite

^{*} 本文受中国地质调查局项目(DD20230034、DD202602109201、DD20230290)、中国地质科学院深地探测与矿产勘查全国重点实验室基本科研业务费项目(JKYDM2025106)、新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(ZKKJ202412)和中国稀土集团有限公司科技项目(HE2310)联合资助。

第一作者简介: 金雅楠,女,1995年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: jinyanan1995_03@163.com

^{**} 通讯作者: 王登红,男,1967年生,研究员,博士生导师,主要从事矿产资源研究工作,E-mail: 847544588@qq.com

摘要 牦牛坪稀土矿床是我国第二大轻稀土矿床,位于攀西碱性岩-碳酸岩型稀土成矿带的北端,也是目前全球开采的第二大稀土矿山。牦牛坪稀土矿带自北向南包括三岔河、牦牛坪及普悟沟(原包子山矿点)三个矿段,具备良好的成矿条件和找矿潜力。近年,在普悟沟稀土矿床东部龙家沟地区探获厚大稀土矿体,为查明此处稀土矿矿石特征、成岩成矿时代,探讨其成因,本文对其开展了矿相学、成岩成矿年代学、矿物地球化学特征研究。测试结果显示,正长岩锆石 U-Pb 年龄为 26.7 ± 0.3 Ma ($n=8$, MSWD=1.2), 氟碳铈矿 U-Pb 年龄为 30.9 ± 0.6 Ma ($n=23$, MSWD=1.6), 均为喜馬拉雅期产物。氟碳铈矿地球化学数据表明,不同类型氟碳铈矿稀土配分曲线呈明显右倾趋势,强烈富集轻稀土元素,具有 Eu 弱负异常($\delta\text{Eu}=0.79 \sim 0.89$, 平均为 0.85), Ce 异常不显著($\delta\text{Ce}=0.84 \sim 1.06$, 平均为 0.95), 相对亏损 Rb、Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素等特征。正长岩中氟碳铈矿具有更低的 $(\text{La}/\text{Nb})_N$ 值(1743~4157)与更高的 Th/U 比值(254~348), 表明龙家沟稀土矿的形成经历了复杂的演化过程。同时,也证实了龙家沟地区与牦牛坪矿区属于同一个深部碱性岩-碳酸岩杂岩体,为同一岩浆-热液系统多期次、多阶段演化的结果。龙家沟稀土矿的发现对后续拓展牦牛坪外围找矿空间具有重要指示性意义。

关键词 攀西地区; 矿体特征; 矿石类型; 正长岩和氟碳铈矿年龄; 氟碳铈矿

中图法分类号 P588.15; P597.3; P618.7

稀土资源在全球范围内分布不均。据 2023 年美国地质调查局最新统计报告显示,中国稀土产量占据主导地位,资源储量位居世界第一,其余稀土储量主要集中在越南(16.9%)、俄罗斯(16.2%)、巴西(16.2%)和印度(5.3%)等国家,加拿大、泰国、格陵兰、蒙古、朝鲜及南非等国家也有少量分布(USGS, 2023)。我国稀土矿产资源整体分布呈现出“南重北轻”的特点,稀土矿床类型多样,其中以大型、超大型碳酸岩型稀土矿床最为重要,约占中国总稀土储量的 65% (张培善, 1989; Kynick *et al.*, 2012)。

牦牛坪矿床位于冕宁-德昌稀土成矿带,是带内规模最大且最具代表性的超大型碳酸岩型稀土矿床,产量仅次于内蒙古白云鄂博稀土矿床。矿床具有稀土矿物颗粒粗大、易筛选和采选治效益好等特点,属于优质稀土资源(李芳积和曾兴兰, 2003)。前人对牦牛坪矿床已开展大量系统研究工作,在矿床地质特征(蒲广平, 1988; 陈从德和蒲广平, 1991; 蒋明全, 1992; 袁忠信等, 1995; 阳正熙等, 2000)、成岩成矿时代(袁忠信等, 1993; 胡文洁等, 2012; Yang *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015; Ling *et al.*, 2016; Weng *et al.*, 2022)、矿床成因和成矿作用等方面(王登红等, 2002; 许成等, 2003; 田世洪等, 2006a, b; Xie *et al.*, 2009; Hou *et al.*, 2015; Liu and Hou, 2017)取得了突出进展。同时牦牛坪矿床周围配套产出普悟沟(中型)稀土矿床、三岔河(小型)稀土矿床以及众多稀土矿点和矿化点,表明牦牛坪矿带仍具有良好成矿条件及找矿潜力。

2023 年当地地质队对普悟沟矿床东部龙家沟地区进行了详细的稀土矿产地质调查,并通过钻探认证探获高品位、厚大氟碳铈矿萤石重晶石方解石型脉状矿石(方解石型脉状矿石),由此引发各方关注(赵芝等, 2023; 于扬等, 2023)。该类型稀土矿形成时代、赋矿围岩及与牦牛坪矿床之间是否存在成因联系需进行讨论,因此本文通过对龙家沟地区新探明的稀土矿体地质特征、矿石类型的详细描述,同时开展了矿相学、正长岩锆石 U-Pb 年代学、氟碳铈矿 U-Pb 年代学及氟碳铈矿单矿物地球化学的研究,并将研究成果与牦牛坪矿床进行综合对比,初步探究龙家沟稀土矿成因机制,为后续

开展牦牛坪矿床及外围成矿规律和成矿机制研究提供理论支持,以进一步扩大找矿成果,实现增储上产。

1 区域地质背景

冕宁-德昌稀土成矿带大地构造位于扬子板块西缘(袁忠信等, 1995; 骆耀南和俞如龙, 2001)。新生代受印度-亚洲大陆碰撞,导致在青藏高原东部形成碰撞造山带-锦屏山造山带,并形成一系列新生代走滑断裂,包括东部鲜水河-安宁河断裂、小江断裂,中部的巴塘-丽江断裂、金沙江-哀牢山断裂,西部的嘉黎断裂、高黎贡断裂(阳正熙等, 2000; Wang *et al.*, 2001; Hou *et al.*, 2003; 侯增谦等, 2006; Hou and Cook, 2009)。该稀土成矿带北起冕宁,南至德昌大陆乡,位于锦屏山缝合带以东约 100~200km,长约 150km,宽 10km,带内发育一系列与成矿相关的碱性岩-碳酸岩杂岩体(袁忠信等, 1993; 牛贺才和林传仙, 1994; 李小渝和何庆, 2000, 图 1a)。

区域内出露地层包括前寒武纪变质基底、中生代-古生代沉积盖层以及新生代地层。其中,前寒武纪沉积盖层主要由花岗片麻岩、角闪岩等高级变质岩组成,构成扬子地台西缘古老结晶基底。在基底之上,不连续覆盖从震旦系到三叠系的沉积地层,以碳酸盐岩、碎屑岩、白云质灰岩、砂页岩为主,碳酸盐岩作为围岩时,因其脆性特征产生的裂隙为含矿流体提供空间。新生代地层主要为一些小型断陷盆地中的陆相碎屑沉积,与下覆地层呈不整合接触,多覆盖在矿体之上。区域岩浆活动具有多期性,但与稀土成矿直接相关的为喜马拉雅时期岩浆岩,主要包括燕山期中酸性侵入岩和喜马拉雅期的碱性岩-碳酸岩杂岩体,杂岩体由碱性正长岩、碳酸岩、碱性花岗岩及基性岩脉构成,强烈的岩浆-热液交代作用形成霓长岩化、碳酸盐化、萤石化、重晶石化、绢云母化和绿泥石化等围岩蚀变现象,是导致稀土矿物最终富集沉淀的关键过程。

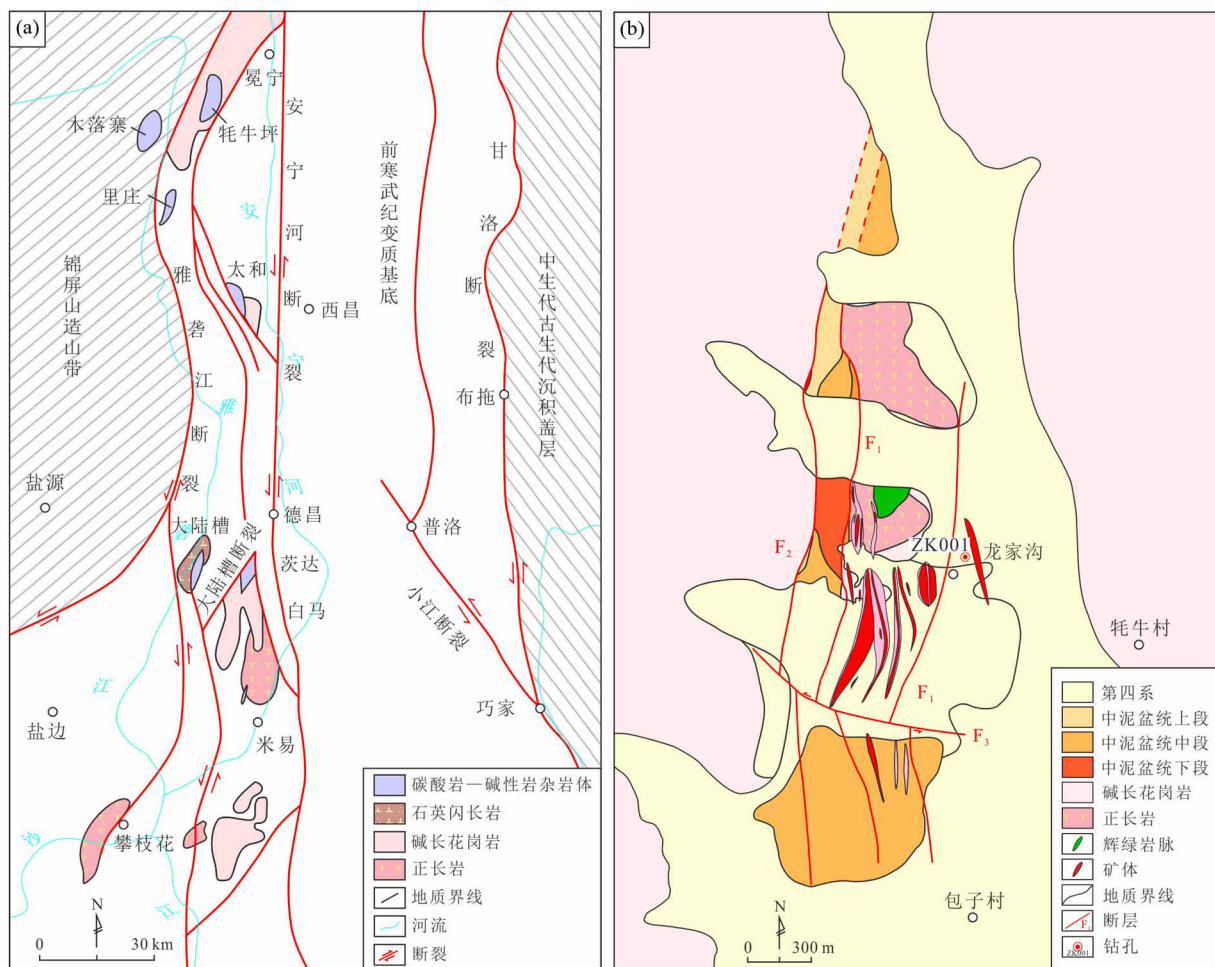


图1 川西新生代碱性岩-碳酸岩杂岩体及其控制的稀土矿床分布构造简图(a,据袁忠信等, 1995)及冕宁龙家沟-普悟沟稀土矿床区域地质图(b)

Fig.1 Cenozoic alkaline-carbonate complex in western Sichuan and its controlled REE deposit distribution structure map (a, modified after Yuan *et al.*, 1995) and regional geological map of Longjiagou-Puwugou deposit in Mianning (b)

2 龙家沟-普悟沟稀土矿床地质特征

龙家沟稀土矿位于普悟沟矿床东侧,受冕西碱长花岗岩的侵入,区内地层已残缺不全,仅残留第四系及中泥盆统(图1b)。第四系在区内十分发育,中泥盆统主要分布于牦牛坪背斜西翼,雅砻江断裂东侧,呈 NE-SW 向展布,与上覆泥盆系变质石英砂岩地层呈整合接触。区内共发育 3 条断裂, F_1 、 F_2 为成矿前断裂,其中 F_1 为哈哈断裂带分支,为龙家沟地区最主要的控矿构造,长约 2.62km,呈 NNE-SSW 向纵贯全区,受多次岩浆岩侵入岩石多发生碎裂岩化,为稀土矿体的形成提供了优越的容矿空间。 F_2 断裂位于 F_1 断裂西侧,与 F_1 断裂相距约 150~300m,整体走向 NNE,倾向 NW,稀土矿化较弱。 F_3 断裂发生在成矿后,近 NW-SE,切错含矿带及 F_1 、 F_2 断裂,未见明显矿化(图1b)。

围岩主要为碱长花岗岩和正长岩,同时还夹杂大理岩、

辉长岩和变质石英砂岩(图2)。碱长花岗岩呈紫红色和灰白色,具中-粗粒结构,块状构造和斑杂状构造,主要矿物为碱性长石(40%~60%)和石英(20%~30%),次要矿物为斜长石(10%)、黑云母(5%~10%)和角闪石(5%),副矿物多见磁铁矿、榍石、磷灰石和锆石等,发育黄铁矿化、磁铁矿化、绿泥石化(图2a-b)。辉长岩呈灰绿色,具中-细粒结构、辉长结构、块状构造,主要矿物为斜长石(65%)、辉石(30%)、角闪石和黑云母等(5%),其中可见白色方解石碳酸岩脉呈网状状错综穿插其中,脉宽 1mm~2cm,黄铁矿等硫化物呈星点状分布(图2c)。变质石英砂岩呈灰白色、浅黄色,相对完整,局部破碎,具中细粒结构、块状构造,可见方解石型矿脉沿裂隙呈细脉状、枝杈状充填(图2e)。大理岩呈白色-灰白色,具粒状变晶结构、块状构造,整体较为破碎,局部呈团块状。主要矿物为方解石和白云石,次要矿物为石英、云母等。可见细脉状方解石碳酸岩脉,局部发育星点状黄铁矿(图2d)。正长岩呈灰白色,具中-细粒结构、交代残余

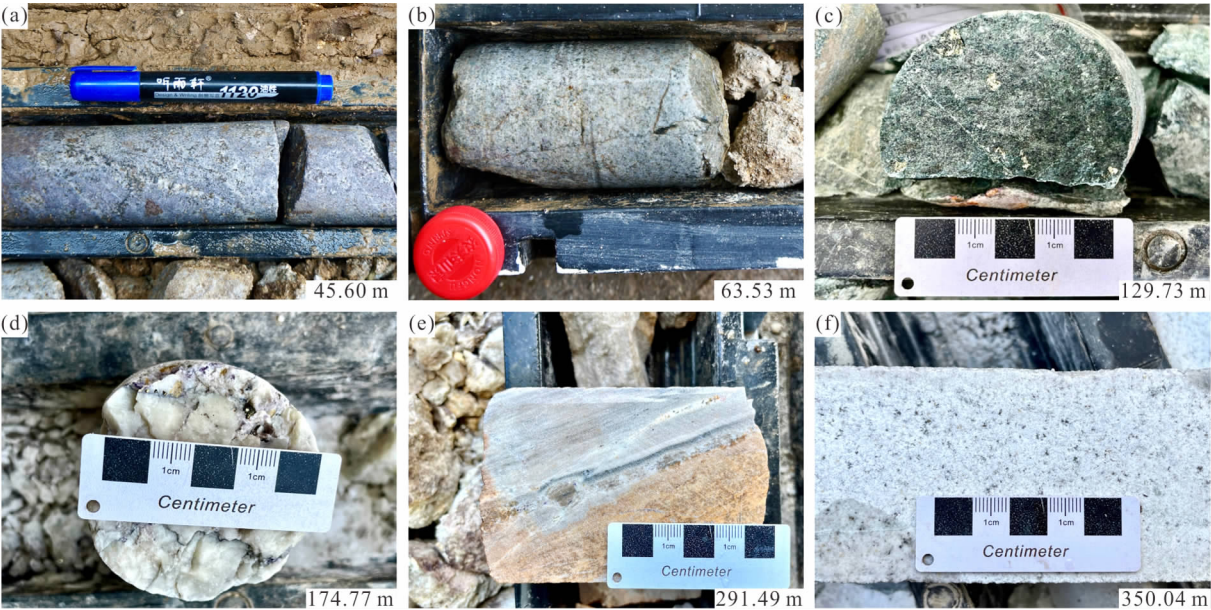


图2 龙家沟地区稀土矿围岩特征

(a)块状紫红色碱长花岗岩;(b)块状灰白色碱长花岗岩;(c)辉长岩中可见方解石细脉及零星黄铁矿化;(d)块状大理岩中穿插方解石型矿脉及零星黄铁矿化;(e)变质石英砂岩中见方解石型细脉;(f)氟碳铈矿呈浸染状分布于正长岩中。图中数值代表孔深

Fig. 2 Characteristics of surrounding rocks from Longjiagou area

(a) massive purplish red alkali granite; (b) massive gray white alkali granite; (c) calcite veins and sporadic pyritization can be observed in the gabbro; (d) calcite veins and sporadic pyritization are interspersed within massive marble; (e) calcite veins are found in metamorphic quartz sandstone; (f) bastnäsite with disseminated structure in syenite. The value in the figure represents the hole depth

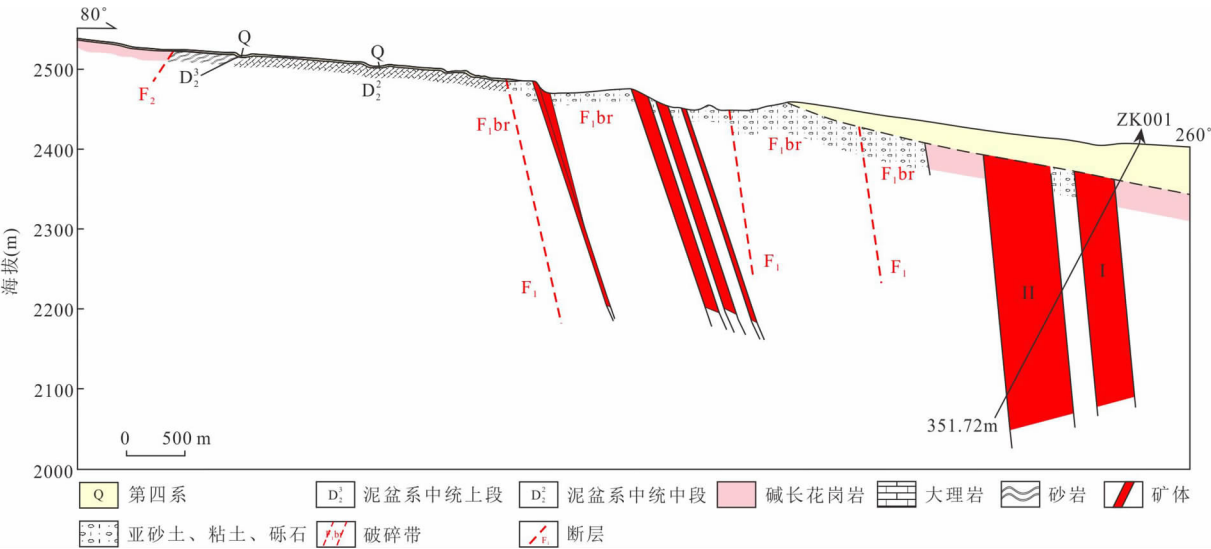


图3 龙家沟地区 ZK001 矿体剖面图

Fig. 3 Sectional map of ZK001 orebody in Longjiagou area

结构,块状构造,主要矿物组成为碱性长石(60%)和斜长石(10%),次要矿物为石英、霓石和黑云母等,局部可见稀土矿化、黄铁矿化和方铅矿化,氟碳铈矿呈粒状、浸染状分布(图2f)。

龙家沟稀土矿体表层被厚度超过40m的第四系残坡积物覆盖,属于隐伏式、半隐伏式矿体,整体走向呈NNE,倾向

NWW,与哈哈断裂带产状相一致。ZK001 钻孔总进尺351.72m,在63.53~268.58m处共圈定三层稀土矿体,呈透镜状、沿NNE向延伸,整体为大脉、细网脉状,总视厚度超100m,单脉最厚处可达17m,其中超过5m的脉体共有8条,矿体属于完全隐伏式,整体处于破碎带之中(赵芝等,2023;于扬等,2023,图3)。笔者在岩心编录基础上,对钻孔依据

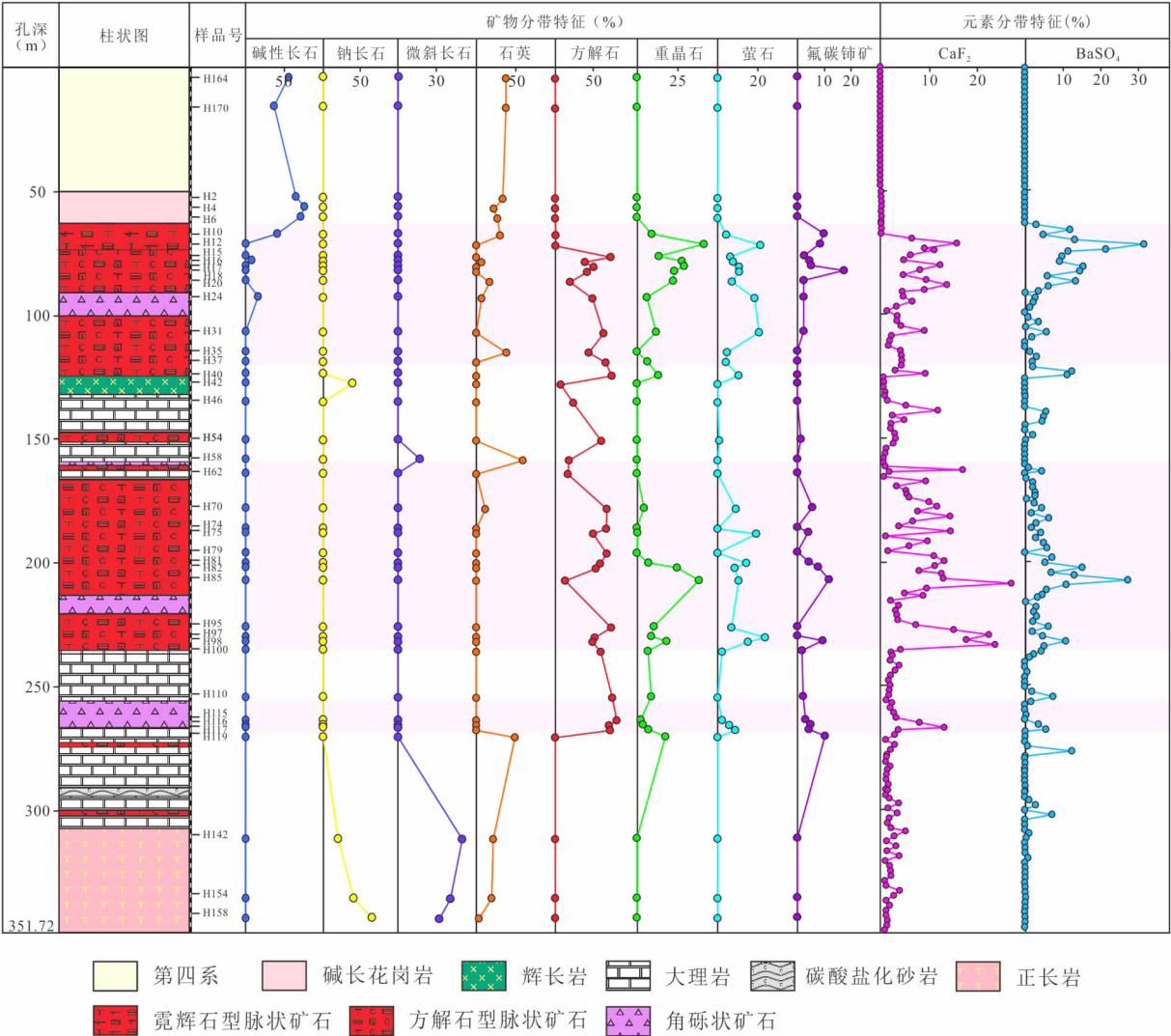


图4 龙家沟地区 ZK001 钻孔综合柱状图
Fig. 4 Comprehensive histogram of ZK001 bore hole in Longjiagou area

同层内 2m 为一个组合样采集 186 件样品,对全孔进行 CaF_2 和 BaSO_4 含量进行分析。由于钻孔揭露岩心大部分样品呈破碎状,难以准确分辨岩石和矿石类型,因此,选取 41 件典型样品进行多晶 X 射线衍射分析(XRD)(附表 1、图 4)。

依据结构构造将矿石类型划分为脉状矿石和角砾状矿石。脉状矿石多呈大脉状、细脉-浸染状,整体呈松散土状,局部见块状矿石(图 5a-d);角砾状矿石系在构造应力作用下,将泥盆系、二叠系砂岩地层破碎成角砾状,被后期方解石型矿脉充填而成,具有典型碎裂结构、角砾状构造(图 5e-f)。依据 XRD 测试结果,按照脉石矿物组合将脉状矿石进一步划分为氟碳铈矿霓辉石萤石重晶石型脉状矿石(霓辉石型脉状矿石)和氟碳铈矿萤石重晶石方解石型脉状矿石(方解石型脉状矿石),其中,后者为龙家沟区内最主要的矿石类型。

(1)霓辉石型脉状矿石(Ⅰ号矿体 63.53 ~ 76.31m):黑色-灰黑色,整体呈松散土状或泥状(图 5a)。矿物组成为:氟

碳铈矿(12% ~ 14%) + 重晶石(30% ~ 40%) + 萤石(5% ~ 20%) + 石英(5% ~ 10%) + 黏土(2% ~ 5%),氟碳铈矿呈细粒状、砂糖状,粒径 0.5 ~ 1mm,局部矿石具条带状构造(图 5b);

(2)方解石型脉状矿石(Ⅰ号矿体 76.31 ~ 125.73m 及 Ⅱ号矿体 163.31 ~ 268.58m):灰白色-灰紫色,绝大多数呈土状,极易捏碎,仅偶见块状、斑杂状(图 5c)。矿物组成为:氟碳铈矿(5% ~ 20%) + 萤石(5% ~ 20%) + 重晶石(10% ~ 30%) + 方解石(20% ~ 70%),氟碳铈矿呈蜡黄-土黄色,具油脂光泽,多呈板柱状、粒状不均匀分布在矿体中,粒径约 2mm ~ 1.5cm;方解石呈灰白色,具中-粗粒结构、半自形结构;萤石粒度大小不一,粒径基本在 1 ~ 5mm 之间,以不同程度紫色萤石为主;重晶石风化程度高,形成空洞,部分残留下的重晶石构成蜂窝状构造。矿石多发生碳酸盐化、萤石化和重晶石化,可见少量黄铁矿、辉钼矿、方铅矿等(图 5d);



图5 龙家沟地区 ZK001 钻孔矿石特征

(a) 风化灰黑色霓辉石型脉状矿石; (b) 条带状霓辉石型脉状矿石; (c) 灰白色方解石型脉状矿石; (d) 方解石型脉状矿石; (e) 角砾状矿石; (f) 角砾状矿石手标本特征。Aea-霓辉石; Bar-重晶石; Bas-氟碳铈矿; Cal-方解石; Fl-萤石

Fig. 5 Ore characteristics in ZK001 from Longjiagou area

(a) weathered gray-black aegirine-augite type vein ore; (b) strip aegirine-augite type vein ore; (c) gray-white calcite vein-type ore; (d) calcite-type vein ore; (e) characteristics of breccia ore; (f) characteristics of hand specimens for breccia ore. Aea-aegirine-augite; Bar-barite; Bas-bastnaesite; Cal-calcite; Fl-fluorite

(3) 角砾状矿石: 灰绿色, 具块状构造和角砾状构造 (图 5e)。矿石中角砾多为砂岩地层, 由方解石型矿脉充填, 矿脉中见紫色萤石、重晶石和氟碳铈矿角砾, 其中萤石角砾粒径约 1~2cm, 重晶石角砾约 2~2.5cm; 氟碳铈矿具细粒状和短柱状不均匀分布 (图 5f)。

3 样品特征及分析方法

3.1 样品特征

锆石 U-Pb 定年样品为正长岩 (ZK001-45), 岩石呈灰白色, 具半自形粒状结构, 块状构造, 可见轻微稀土矿化和黄铁矿化 (图 2f)。主要矿物为钾长石 (65%) 和斜长石 (15%), 次要矿物为石英 (10%)、黑云母 (5%)、角闪石 (5%) 等暗色矿物, 副矿物为磷灰石、磁铁矿、榍石和锆石等。氟碳铈矿 U-Pb 测年样品采自龙家沟矿体 189.2m 处方解石型脉状矿石

(ZK001-29), 矿石具中-细粒半自形粒状结构、斑杂状构造、块状构造。氟碳铈矿呈蜡黄色, 具油脂光泽, 以板柱状为主, 粒径约 0.2~1cm (见后文)。

通过详细的岩相学观察, 依据氟碳铈矿形态特征和共生矿物组合将氟碳铈矿划分成 4 种类型并分别对其进行主量、微量元素测试。

I: 氟碳铈矿主要呈浸染状赋存在正长岩之中。具自形-半自形结构, 与碱性长石、石英等矿物密切共生, 粒径约 0.2~1 mm (图 6a);

II-1: 细粒状氟碳铈矿。分布于霓辉石型脉状矿石之中, 由于后期强烈风化作用导致破碎成粒状、砂糖状, 矿石中主要含重晶石、萤石和霓辉石 (图 5b);

II-2: 板柱状氟碳铈矿。主要与萤石、重晶石和方解石等矿物共生, 表面裂隙十分发育, 粒径大小不等, 粒径约 0.1mm~0.5cm (图 6b-c);

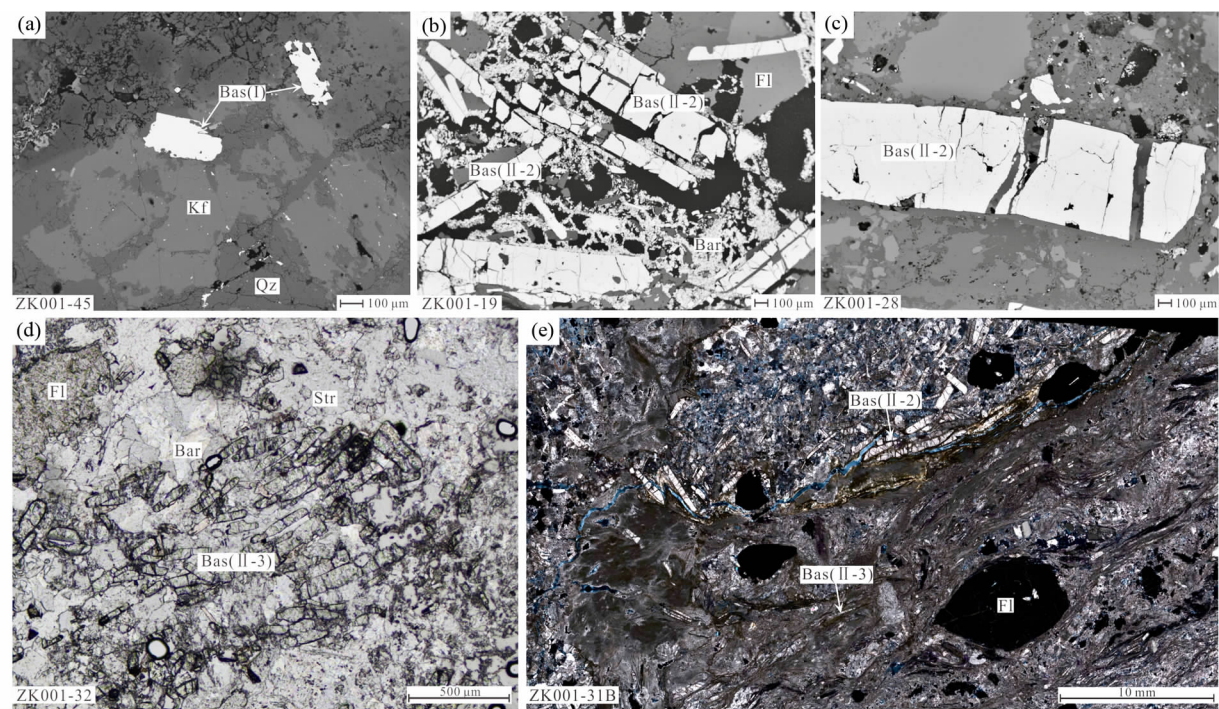


图6 四川冕宁龙家沟地区 ZK001 钻孔氟碳铈矿背散射照片与显微镜下照片

(a) 正长岩中氟碳铈矿(Ⅰ)与碱性矿物共生(BSE);(b-c) 氟碳铈矿(Ⅱ-2)呈板柱状、长柱状(BSE);(d) 方解石脉中氟碳铈矿(Ⅱ-3)呈短柱状与菱锆矿共生(单偏光);(e) 角砾和方解石脉中氟碳铈矿(正交偏光). Kf-钾长石; Qz-石英; Str-菱锆矿

Fig. 6 Backscattered electron images and microphotographs for bastnäsite characteristics in ZK001 from Longjiagou area
(a) bastnäsite (Ⅰ) in syenite coexists with alkaline mineral (under BSE); (b-c) bastnäsite (Ⅱ-2) has plate columnar shape and long columnar shape (under BSE); (d) bastnasite (Ⅱ-3) in calcite vein has short columnar shape and associated with strontianite (under plane-polarized light); (e) bastnäsite in breccias and calcite vein (under cross-polarized light). Kf-potassium feldspar; Qz-quartz; Str-strontian

Ⅱ-3:方解石脉中氟碳铈矿。多呈短柱状,粒径较小,约0.1~0.2mm,在 BSE 镜下观察发现,此类型氟碳铈矿与萤石、重晶石、方解石和菱锆矿等共生(图 6d-e)。

3.2 分析方法

多晶 X 射线衍射分析(XRD)在中国地质科学院矿产资源研究所完成。采用正压法制样,测试仪器为德国布鲁克多晶 X 射线衍射仪 D8 DISCOVERY。测试条件为电流 40mA、电压 40kV,扫描范围 2°~70°,扫描步长 0.02°,每步扫描时间 0.25s。数据处理软件为 MID JADE 8.6(授权版),PDF 数据库 PDF4+2023(授权版),矿物半定量-定量分析采用全谱拟合法。

锆石(ZK001-45)U-Pb 年龄、氟碳铈矿(ZK001-29)U-Pb 年龄和氟碳铈矿单矿物微量元素测试均在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点实验室完成。激光采用 Revolution S-155 型 193 nm 准分子激光,ICP-MS 为 Thermo FIsler 的 Element XR,剥蚀过程以氦气作载气、氦气为补偿气以调节灵敏度,二者进入 ICP 之前在激光样品池中混合,在能量密度 5J/cm²,激光束斑 24μm,频率 5Hz 的条件下进行。每个时间分辨分析数据包括大约 15~20s 的空白信号和 45s 的样品信号。锆石 U-Pb 定年采用 NIST 610 作为

外标,在正式剥蚀前需先进行 2s 的预剥蚀清除样品表面污染,每个测试点采集 20s 的空白信号和 40s 的样品信号;氟碳铈矿 U-Pb 定年采用氟碳铈矿标准 K-9 作外标进行同位素分馏校正,每分析 10 个样品点,分析 2 次 K-9。采用 ICPMSDataCal、Iolite version 4.0 软件对仪器进行校正和数据离线处理(Vermeech, 2018)。

氟碳铈矿主量元素测试在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点实验室完成。采用日本电子公司 JXA-iHP200F Hyper Probe 型电子探针仪(EPMA)在加速电压 15kV,20nA 束流,束斑直径 3~5μm 条件下获得氟碳铈矿主量元素成分信息(Paton *et al.*, 2011)。

偏最小二乘法判别分析(PLS-DA):是一种多元统计方法,它将偏最小二乘回归(PLS)与判别分析相结合。其核心目标是在最大化两个或多个样本组之间差异的同时,建立变量与类别标签之间的关联,因此适用于高维、共线性数据的分类和变量筛选。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年和氟碳铈矿 U-Pb 定年

龙家沟正长岩锆石测年分析结果详见表 1,对应锆石阴

表 1 龙家沟地区正长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of syenite from the Longjiagou area

测点号	同位素比值						年龄 (Ma)				谐和度
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	(%)
ZK001-45-1	0.04590	0.00273	0.02766	0.00183	0.00433	0.00013	27.7	1.8	27.8	0.8	100
ZK001-45-2	0.04822	0.00431	0.02823	0.00213	0.00420	0.00013	28.3	2.1	27.0	0.8	95
ZK001-45-3	0.05621	0.00554	0.03347	0.00314	0.00431	0.00015	33.4	3.1	27.7	1.0	79
ZK001-45-4	0.04191	0.00820	0.02417	0.00501	0.00420	0.00029	24.2	5.0	27.0	1.9	90
ZK001-45-5	0.05151	0.00362	0.02984	0.00220	0.00418	0.00012	29.8	2.2	26.9	0.7	89
ZK001-45-6	0.06522	0.00868	0.03831	0.00534	0.00423	0.00012	38.1	5.2	27.2	0.8	60
ZK001-45-7	0.05987	0.01187	0.03408	0.00626	0.00448	0.00030	33.9	6.1	28.8	1.9	82
ZK001-45-8	0.05062	0.00377	0.02814	0.00222	0.00401	0.00008	28.2	2.2	25.8	0.5	91
ZK001-45-9	0.08230	0.01887	0.05002	0.01270	0.00427	0.00019	49.1	12.1	27.5	1.2	21
ZK001-45-10	0.04535	0.00311	0.02670	0.00182	0.00426	0.00013	27.4	0.8	26.7	1.8	98
ZK001-45-11	0.04562	0.00361	0.02555	0.00178	0.00417	0.00014	26.8	0.9	25.6	1.8	96
ZK001-45-12	0.05961	0.01296	0.03524	0.00743	0.00429	0.00023	35.1	7.2	27.6	1.4	73
ZK001-45-13	0.06170	0.01173	0.03417	0.00806	0.00393	0.00026	34.0	7.9	25.3	1.6	65
ZK001-45-14	0.05240	0.00502	0.03157	0.00333	0.00434	0.00014	31.5	3.3	27.9	0.9	87
ZK001-45-15	0.05131	0.00399	0.02963	0.00239	0.00417	0.00014	29.6	2.4	26.8	0.9	90
ZK001-45-16	0.04655	0.00197	0.02698	0.00132	0.00418	0.00015	26.9	0.9	27.0	1.3	100
ZK001-45-17	0.05100	0.00309	0.02881	0.00185	0.00407	0.00012	28.8	1.8	26.2	0.8	90
ZK001-45-18	0.04976	0.00322	0.03009	0.00192	0.00437	0.00014	30.1	1.9	28.1	0.9	93
ZK001-45-19	0.05211	0.00412	0.02902	0.00220	0.00402	0.00008	29.0	2.2	25.8	0.5	88
ZK001-45-20	0.04596	0.00297	0.02559	0.00182	0.00400	0.00014	25.6	1.8	25.8	0.9	100
ZK001-45-21	0.05006	0.00287	0.02810	0.00187	0.00398	0.00011	28.1	1.8	25.6	0.7	90
ZK001-45-22	0.05001	0.00307	0.02749	0.00152	0.00404	0.00012	26.0	0.8	27.5	1.5	94
ZK001-45-23	0.04862	0.00245	0.02764	0.00125	0.00417	0.00013	26.8	0.8	27.7	1.2	97
ZK001-45-24	0.04537	0.00319	0.02608	0.00185	0.00415	0.00016	26.7	1.1	26.1	1.8	98
ZK001-45-25	0.04810	0.00270	0.02745	0.00146	0.00412	0.00013	26.5	0.9	27.5	1.4	96
ZK001-45-26	0.04758	0.00322	0.02673	0.00142	0.00408	0.00014	26.2	0.9	26.8	1.4	98
ZK001-45-27	0.04822	0.00241	0.02810	0.00162	0.00420	0.00017	28.1	1.6	27.0	1.1	96

表 2 龙家沟地区 LA-ICP-MS 氟碳铈矿 U-Pb 定年结果

Table 2 LA-ICP-MS bastnäsite U-Pb dating results from the Longjiagou area

测点号	Th/U		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)	
	($\times 10^{-6}$)			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				1σ		1σ		1σ		1σ	
ZK001-1	3839	36	107	0.60047	0.02532	1.03461	0.06743	0.01249	0.00075	31.4	1.6
ZK001-2	4383	31	141	0.19435	0.01483	0.14701	0.01005	0.00575	0.00023	31.4	1.8
ZK001-3	5401	39	140	0.22267	0.01965	0.17266	0.01184	0.00594	0.00023	31.0	2.3
ZK001-4	5327	34	155	0.20550	0.02203	0.15362	0.01454	0.00575	0.00035	31.3	1.9
ZK001-5	5655	45	127	0.28078	0.01477	0.23923	0.01127	0.00638	0.00020	32.5	1.8
ZK001-6	5020	33	151	0.22682	0.01501	0.19212	0.01199	0.00620	0.00025	29.8	1.7
ZK001-7	5188	33	155	0.23635	0.01784	0.18046	0.01100	0.00575	0.00022	32.1	1.7
ZK001-8	4289	29	149	0.20299	0.01692	0.15968	0.01098	0.00593	0.00024	29.6	1.6
ZK001-9	6312	48	130	0.24051	0.01381	0.18587	0.00930	0.00573	0.00019	29.9	1.6
ZK001-10	6223	47	134	0.23420	0.01714	0.17961	0.01011	0.00574	0.00020	30.0	1.5
ZK001-11	4515	42	107	0.20192	0.01368	0.14800	0.00918	0.00555	0.00022	31.0	2.3
ZK001-12	4609	32	145	0.31300	0.01798	0.27495	0.01391	0.00661	0.00026	27.5	3.3
ZK001-13	4505	49	91	0.45765	0.01869	0.44911	0.02301	0.00734	0.00029	33.1	2.2
ZK001-14	6196	40	153	0.28073	0.01760	0.25447	0.01445	0.00676	0.00026	30.4	3.0
ZK001-15	6186	43	144	0.31247	0.04807	0.26306	0.03670	0.00648	0.00029	32.2	3.5
ZK001-16	6223	44	142	0.31387	0.03713	0.27777	0.03048	0.00688	0.00053	32.4	1.9
ZK001-17	6255	44	141	0.25174	0.01793	0.20690	0.01209	0.00638	0.00022	31.0	1.8
ZK001-18	4332	33	132	0.24210	0.01718	0.18911	0.01255	0.00601	0.00022	28.5	2.3
ZK001-19	3833	34	113	0.32437	0.02460	0.25655	0.01480	0.00617	0.00025	32.5	2.1
ZK001-20	5839	31	189	0.22948	0.02140	0.18498	0.01767	0.00620	0.00030	29.3	2.1
ZK001-21	5359	32	166	0.24431	0.03164	0.16640	0.01267	0.00570	0.00025	31.9	2.6
ZK001-22	4848	31	157	0.28112	0.02278	0.24230	0.02063	0.00651	0.00038	30.8	3.4
ZK001-23	3328	26	130	0.33997	0.04402	0.28507	0.02822	0.00682	0.00042	31.4	1.6

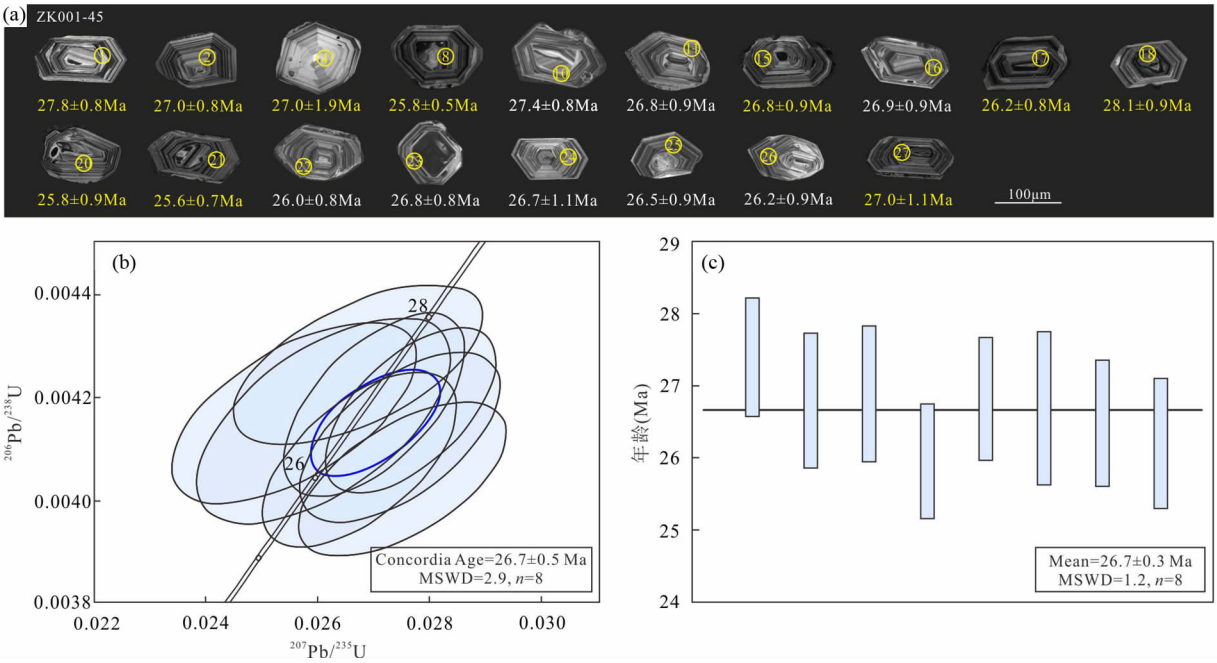


图 7 龙家沟地区正长岩锆石 U-Pb 年龄

(a) 正长岩中锆石 CL 图像 (黄色字体为谐和度超过 90%, 但并未参与拟合的锆石年龄); (b) 锆石 U-Pb 年龄谐和图; (c) 锆石 U-Pb 加权平均年龄图

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia and weighted average age diagrams of syenite from Longjiagou area

(a) cathodoluminescence (CL) image of zircon in syenite, where the yellow font indicates zircon ages with concordance exceeding 90%, which were not incorporated into the fitting process; (b) zircon U-Pb age of concordia diagram; (c) zircon U-Pb age of weighted average diagram

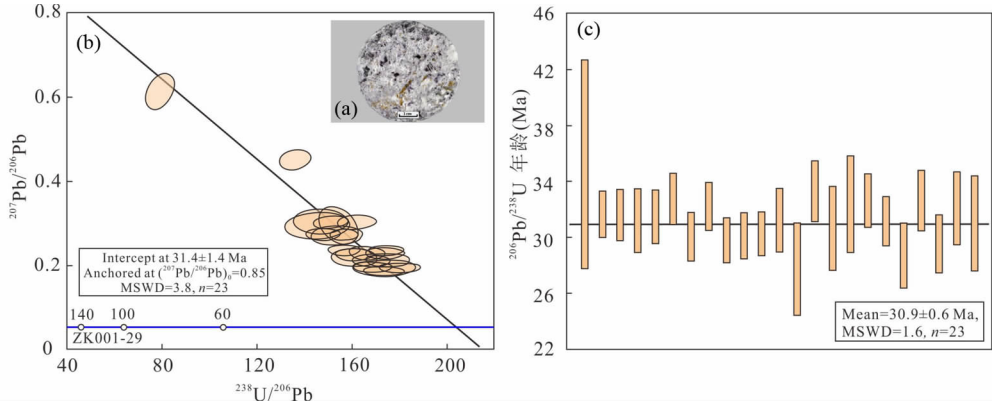


图 8 龙家沟地区氟碳铈矿的 T-W 谐和图 (b) 与加权平均年龄 (c)

Fig. 8 Bastnäsite Tera-Wasserburg concordia diagram (b) and weighted average age diagram (c) from the Longjiagou area

极发光图像 (CL)、谐和图和加权平均年龄图分别见图 7。正长岩中锆石多呈自形-半自形粒状结构, 晶形较好, 粒径大小约 100 ~ 120μm, 长宽比多集中在 1.2 : 1 ~ 1.4 : 1, 发育典型岩浆震荡环带, 为岩浆成因锆石 (吴元保和郑永飞, 2004; 图 7a)。共测得 27 组年龄数据, 其中拟合谐和数据共 8 组, 正长岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 26.0 ~ 27.4Ma 之间, 加权平均年龄 26.7 ± 0.3Ma (n = 8, MSWD = 1.2, 图 7b-c), 整体年龄谐和, 可代表正长岩形成年龄为喜马拉雅期。

龙家沟地区氟碳铈矿 U-Pb 测年分析结果详见表 2。此次共获得 23 个有效数据点, Th 含量为 $3328 \times 10^{-6} \sim 6312 \times 10^{-6}$ 、U 含量为 $26 \times 10^{-6} \sim 49 \times 10^{-6}$, 相对应 Th/U 为 91 ~ 189, 平均 139.08。获取氟碳铈矿 U-Pb 加权平均年龄 30.9 ± 0.6Ma, 代表龙家沟矿体中稀土矿的成矿年龄 (图 8b-c)。

4.2 氟碳铈矿地球化学特征

氟碳铈矿单矿物主、微量测试样品采自岩心, 由于霓辉

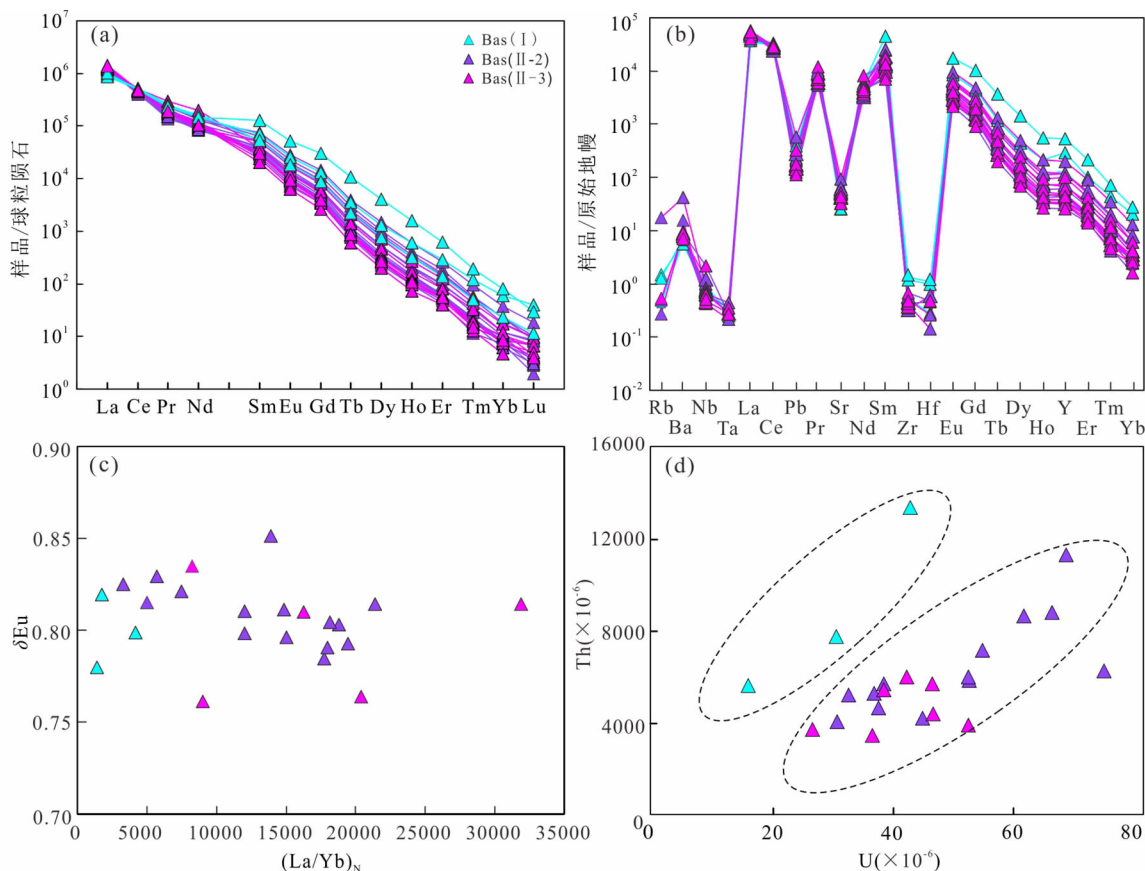


图9 龙家沟地区氟碳铈矿微量元素图解(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

(a) 氟碳铈矿球粒陨石标准化稀土元素配分图; (b) 氟碳铈矿原始地幔标准化微量元素蛛网图; (c) $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - δEu 关系图解; (d) U-Th 关系图解

Fig. 9 Trace elements diagrams of bastnäsite from the Longjiagou area (normalization values from Sun and McDonough, 1989)

(a) chondrite-normalized REE patterns for bastnäsite; (b) primitive mantle-normalized multi-element patterns for bastnäsite; (c) the $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - δEu diagram; (d) the U-Th diagram

石型脉状矿石风化程度高,已成泥土状,因此仅选择其他几类氟碳铈矿进行成分分析。共取得主量元素数据 37 组,微量和稀土元素数据 23 组,结果详见附表 2、附表 3。不同类型氟碳铈矿球粒陨石配分图显示明显右倾趋势,强烈富集 LREE,均表现出 Eu 弱负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.79 \sim 0.89$, 平均 0.85), Ce 异常不明显 ($\delta\text{Ce} = 0.84 \sim 1.06$, 平均 0.95), 相对亏损 Rb($0 \sim 11.46 \times 10^{-6}$)、Nb($0.31 \times 10^{-6} \sim 1.56 \times 10^{-6}$)、Ta($0 \sim 0.02 \times 10^{-6}$)、Zr($0 \sim 15.11 \times 10^{-6}$) 和 Hf($0 \sim 0.34 \times 10^{-6}$) 等元素(图 9a-b)。正长岩中氟碳铈矿(Ⅰ)与方解石型脉状矿石中氟碳铈矿(Ⅱ)相比,其具有较低的 $(\text{La}/\text{Nb})_N$ (1743 ~ 4157) 和较高的 Th/U (254 ~ 348) (图 9c-d)。

5 讨论

5.1 龙家沟稀土矿成岩成矿时代

成岩成矿年代学对研究成矿过程、矿床成因机制和建立成矿模式具有重要指示性意义。前人对牦牛坪成矿母岩年

龄已开展大量研究,例如:Liu *et al.* (2015) 测得正长岩中锆石年龄 $21.3 \pm 0.4\text{Ma}$ 、 $22.8 \pm 0.3\text{Ma}$; Ling *et al.* (2016) 采用 SIMS Th-Pb 法获得正长岩中锆石年龄 $26.6 \pm 0.3\text{Ma}$; 胡文洁等(2012) 采用 Sm-Nd 对碳酸岩进行定年, 结果为 $29.9 \pm 1.7\text{Ma}$ 。

氟碳铈矿作为研究区中最主要的矿石矿物,近年来被广泛应用于 U-Pb 定年中,可以准确的测定出稀土矿的形成年龄,为研究碳酸岩-碱性岩型稀土矿床形成时代及构造地质背景提供重要线索。前人分别采用 LA-ICP-MS U-Pb 法直接对牦牛坪矿床中氟碳铈矿进行定年,测得年龄为 $30.7 \pm 3.0\text{Ma}$ (Yang *et al.*, 2014); Th-Pb 法定年结果为 $25.7 \pm 0.2\text{Ma}$ (Ling *et al.*, 2016); 原位氟碳铈矿 U-Th-Pb 年龄则分别为 $28.1 \pm 0.5\text{Ma}$ 、 $27.5 \pm 0.6\text{Ma}$ 、 $26.3 \pm 1.2\text{Ma}$ 、 $26.4 \pm 2.2\text{Ma}$ (Weng *et al.*, 2022)。U-Pb 定年已可以准确制约牦牛坪矿床成矿事件时代。

鉴于以往研究,本文对龙家沟地区 ZK001 钻孔中揭露出的正长岩开展锆石 U-Pb 定年(此类型岩石在地表出露面积

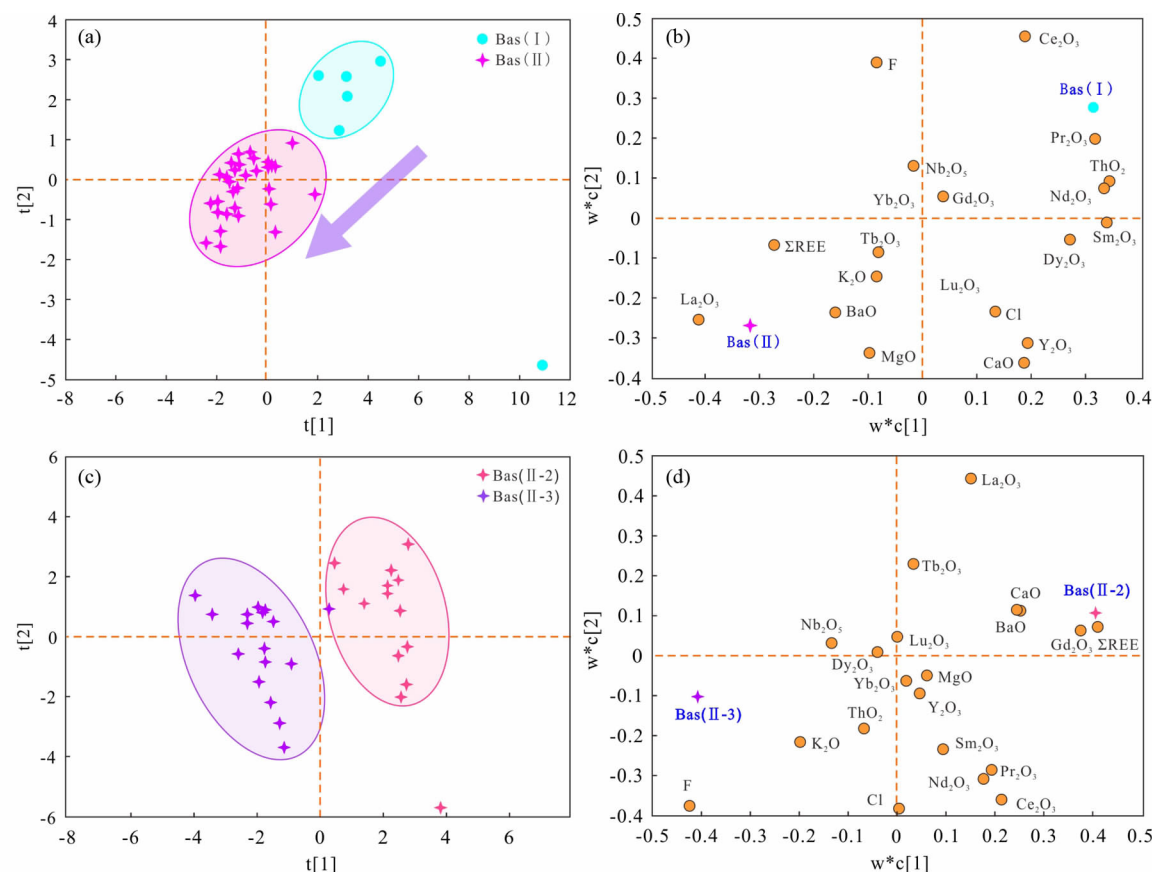


图 10 龙家沟地区不同类型氟碳铈矿成分特征 PLS-DA 图解

(a) 正长岩中氟碳铈矿(Ⅰ)与方解石型矿石中氟碳铈矿(Ⅱ)得分图;(b) 正长岩中氟碳铈矿(Ⅰ)与方解石型矿石中氟碳铈矿(Ⅱ)载荷图;
(c) 不同类型方解石型矿石中氟碳铈矿得分图;(d) 不同类型方解石型矿石中氟碳铈矿载荷图

Fig. 10 PLS-DA diagrams of the compositions of different types of bastnäsite from the Longjiagou area

(a) Score Plot of bastnäsite(Ⅰ) syenite and bastnäsite(Ⅱ) in calcite type ore;(b) Loading Plot of bastnäsite(Ⅰ) syenite and bastnäsite(Ⅱ) in calcite type ore;(c) Score Plot of bastnäsite in different types of calcite type ore;(d) Loading Plot of bastnäsite in different types of calcite type ore

很小),获得正长岩中锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $26.7 \pm 0.3\text{Ma}$ ($n=8$, $\text{MSWD}=1.2$), 氟碳铈矿 U-Pb 年龄为 $30.9 \pm 1.6\text{Ma}$ ($n=23$, $\text{MSWD}=1.6$)。结合正长岩与氟碳铈矿在空间上接触关系及矿化蚀变分带特征,表明正长岩与龙家沟稀土矿来源于同一母岩浆,与稀土矿化存在密切成因联系。但测得的年龄数据显示,成岩时间相比成矿时间晚 4Myr,表明成矿物质来源并非已经凝固的正长岩本身,而是来源于深部、富含 REE 的母岩浆系统,标志着区域深部曾发生过强烈的碱性岩浆活动。4Myr 时间差对于岩浆-热液成矿系统的演化来说是一个合理的窗口期,表明成矿岩体侵位是一个连续的地质过程。此次研究结果显示,龙家沟稀土矿成矿母岩与区域上牦牛坪稀土矿床成矿母岩相同,属于同一个深部巨大的碱性岩-碳酸岩杂岩体。

5.2 氟碳铈矿的成因

矿物的成因对揭示矿体和矿床成因研究提供重要指示性线索和证据。本文通过对龙家沟稀土矿不同类型氟碳铈

矿的形态特征、成分特征及矿物共生组合等方面进行对比,揭示不同类型氟碳铈矿的形成环境之间的差异。氟碳铈矿之前普遍被学者们认为是热液活动产物,近年来对氟碳铈矿单矿物深入研究成果显示其亦可形成于早期高温高压的岩浆阶段,这意味着氟碳铈矿可能参与到深部稀土元素循环过程(Weng *et al.*, 2022; Yuan *et al.*, 2024)。

不同类型氟碳铈矿成分特征差异对成矿流体演化过程及矿床成因研究具有一定的指示性意义(Guo and Liu, 2019)。本文借助 SMICA14.1 软件对不同类型的氟碳铈矿地球化学数据进行偏最小二乘法(PLS-DA)归类分析,此分析方法相比于 SPSS 拟合出的模型具有更前的可视性和直观性,其中 $t[1]$ 、 $t[2]$ 代表样本在主成分上的得分,看样本的分组; $w*c[1]$ 、 $w*c[2]$ 表示在前两个成分下,自变量对因变量的影响权重矩阵,看变量间作用。结果显示,正长岩中氟碳铈矿(Ⅰ)与方解石型脉状矿石中氟碳铈矿(Ⅱ)成分存在显著差异,正长岩中氟碳铈矿更富集 Th、Pr、Nd 等元素,反应可能存在深部流体参与,矿石中氟碳铈矿则相对富集 La 和

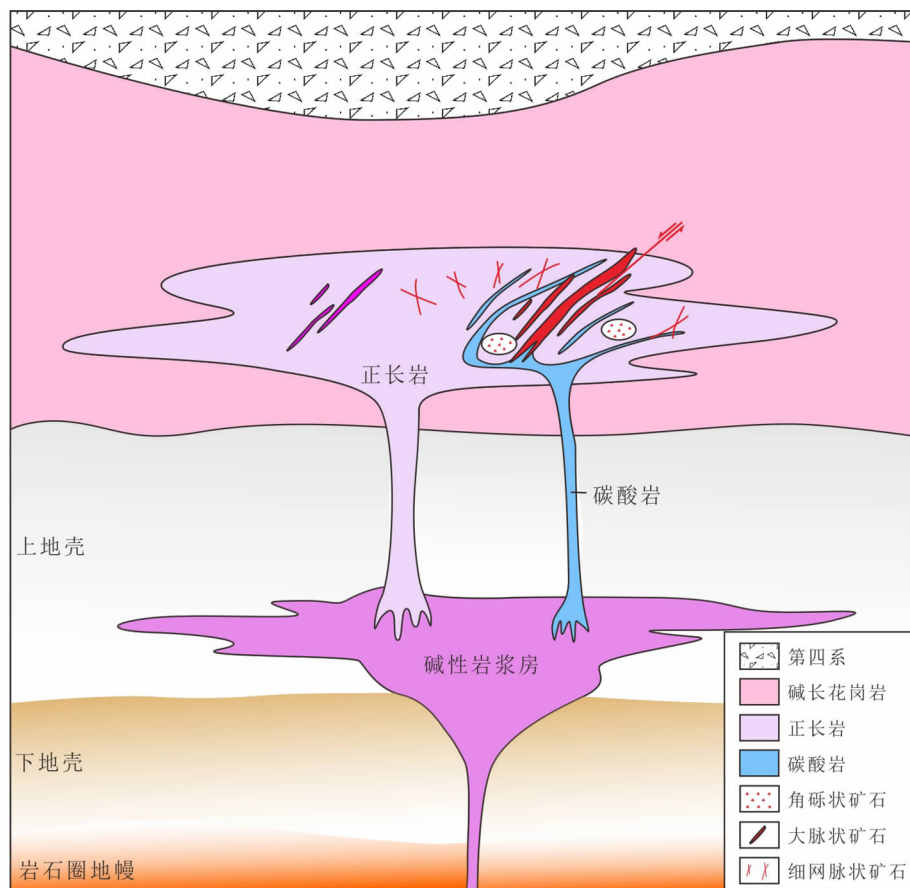


图 11 龙家沟稀土矿成因模式示意图

Fig. 11 Schematic diagram of genetic model of REE from the Longjiagou area

Σ REE, 整体从岩石到矿石氟碳铈矿稀土含量具有逐渐富集趋势(图 10a-b)。矿石中不同类型氟碳铈矿成分也存在一定差异,粒状、板柱状和长柱状氟碳铈矿(Ⅱ-2)富集 Σ REE、Ba、Ca 等,表明此类型氟碳铈矿多与重晶石、方解石等矿物共生;方解石脉中氟碳铈矿(Ⅱ-3)明显富集 F、K,多与萤石共生且后期可能遭受到蚀变(图 10c-d)。

从现有矿物学信息来看,龙家沟稀土矿至少经历了两个成矿过程:首先,由碱性硅酸质岩浆自深部携带稀土物质,经过向上运移及复杂的岩浆演化过程,氟碳铈矿在正长岩中得到初步富集,但由于物理化学条件差异,导致氟碳铈矿分布不均仅在局部出现,此过程中仅形成少量独立的稀土矿物,呈星散状、孤立状被碱性长石包裹或位于碱性长石与石英晶体之间,形成较低的稀土矿化,未成规模;其次,在进一步形成工业矿体的过程中,龙家沟稀土矿受到强烈的热液流体叠加,热液改造使稀土物质发生活化迁移,沿着构造裂隙形成的区域上涌形成大脉状、网脉状矿石,在构造强烈处方解石型矿脉充填因构造破碎的砂岩地层形成角砾状矿石,不同类型氟碳铈矿的形态特征和成分特征差异表明龙家沟稀土矿的形成过程具有多阶段性(图 11)。

5.3 龙家沟稀土矿的发现对牦牛坪矿带成因启示

龙家沟稀土矿位于牦牛坪矿床外围南部、普悟沟矿床东侧。龙家沟地区厚实、高品位稀土矿的发现无疑表明牦牛坪外围仍存在较大找矿潜力,对后续牦牛坪矿床外围勘查工作具有重要启示性意义。

经野外地质调查和钻探验证表明,龙家沟稀土矿与牦牛坪矿床围岩同为冕西碱长花岗岩,并揭露出正长岩,矿体走向都严格受哈哈断裂带控制,呈 NNE 向倾斜,具有相同构造控矿规律,矿体均处于破碎带之中,多呈大脉状,破碎程度高。并依据结构构造将矿石类型划分成为脉状矿石和角砾状矿石,其中脉状矿石依据矿物共生组合可进一步划分成霓辉石型脉状矿石和方解石型脉状矿石。其中牦牛坪矿床现阶段主要以霓辉石型脉状矿石为主,而龙家沟矿石主要为方解石型脉状矿石和角砾状矿石,角砾状矿石中的角砾为灰绿色砂岩,被方解石型矿脉充填,而牦牛坪矿床中角砾状矿石中角砾为萤石、重晶石和氟碳铈矿,二者在主要矿石类型上存在一定差异。综合以上信息认为,龙家沟地区与牦牛坪矿区属于同一个深部碱性岩-碳酸岩杂岩体。

通过本文成岩成矿年代学和氟碳铈矿单矿物研究结果,

表明两个矿床成矿均与喜马拉雅期碱性岩-碳酸岩杂岩体密切相关,应形成于同一次成矿事件,为同一套岩浆-热液体系并受多期热液叠加演化而成。二者均形成于同一构造背景之下,同受新生代印度-欧亚板块碰撞影响,因此具有相似的成因模式(袁忠信等, 1995; 田世洪等, 2006a, 2008; 侯增谦等, 2008; 秦朝建等, 2008; Yang *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015; Ling *et al.*, 2016; Liu and Hou, 2017; Liu *et al.*, 2019)。并依据上述证据提出牦牛坪外围仍有较大寻找同时期稀土矿的潜力,但由于外围矿体表面被大量第四系残坡积物覆盖属于完全隐伏式,如何在后续工作中有效开展牦牛坪外围找矿勘查仍是并未较好解决的难题。

6 结论

(1) 龙家沟稀土矿与牦牛坪稀土矿床成矿母岩均为碱性岩-碳酸岩杂岩体。矿石类型为脉状矿石和角砾状矿石,按矿物共生划分出氟碳铈矿-霓辉石萤石重晶石型脉状矿石(霓辉石型)和氟碳铈矿-萤石重晶石方解石型脉状矿石(方解石型),其中后者为主要矿石类型。正长岩锆石 U-Pb 年龄为 $26.7 \pm 0.3 \text{ Ma}$ ($n = 8$, MSWD = 1.2), 氟碳铈矿 U-Pb 年龄为 $30.9 \pm 1.6 \text{ Ma}$ ($n = 23$, MSWD = 1.6)。

(2) 依据不同类型氟碳铈矿成分特征差异认为龙家沟稀土矿富集至少经历了两个过程。稀土物质最早由碱性硅酸盐岩浆自深部携带迁移,经过向上运移及复杂的岩浆演化过程后,在地壳浅部固结成岩使得稀土初步富集,稀土矿化微弱;随后稀土矿物经历了多阶段流体改造,不同阶段形成的氟碳铈矿在形态特征和成分特征上都存在差异。因此指示龙家沟稀土矿的形成与演化为多期次、多阶段的热液演化的结果,同时也表明氟碳铈矿的成分特征对稀土成矿过程研究具有一定指示性意义。

(3) 龙家沟高品位、厚大稀土矿的发现对牦牛坪矿带找矿勘查和实现我国稀土资源增储上产具有重要意义,同时指示龙家沟-普悟沟地区与牦牛坪矿区属于同一个深部碱性岩-碳酸岩杂岩体,为同一岩浆-热液系统多期次、多阶段演化的结果。

致谢 诚挚感谢责任编委和两位匿名审稿专家提出的宝贵意见和建议。

References

Chen CD and Pu GP. 1991. Geological features and genesis of the Maoniuping rare earth element deposit, Sichuan. *Geology and Exploration*, (5): 18-23 (in Chinese with English abstract)

Guo DX and Liu Y. 2019. Occurrence and geochemistry of bastnäsite in carbonatite-related REE deposits, Mianning-Dechang REE belt, Sichuan Province, SW China. *Ore Geology Reviews*, 107: 266-282

Hou ZQ, Ma HW, Zaw K, Zhang YQ, Wang MJ, Wang Z, Pan GT and Tang RL. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt:

Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. *Economic Geology*, 98(1): 125-145

Hou ZQ, Pan GT, Wang AJ, Mo XX, Tian SH, Sun XM, Ding L, Wang EQ, Gao YF, Xie YL, Zeng PS, Qin KZ, Xu JF, Qu XM, Yang ZM, Yang ZS, Fei HC, Meng XJ and Li ZQ. 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 ZQ, Tian SH, Xie YL, Yuan ZX, Yang ZS, Yin SP, Fei HC, Zou TR, Li XY and Yang ZM. 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. *Mineral Deposits*, 27(2): 145-176 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ and Cook NJ. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews*, 36: 2-24

Hou ZQ, Liu Y, Tian SH, Yang ZM and Xie YL. 2015. Formation of carbonatite-related giant rare-earth-element deposits by the recycling of marine sediments. *Scientific Reports*, 5(1): 10231

Hu WJ, Tian SH, Wang SP, Chen LJ, Su AN, Yue L and Wang YX. 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)

Jiang MQ. 1992. The geological and structural feature of the Maoniuping REE deposit and its ore controlling significance. *Mineral Deposits*, 11(4): 351-358 (in Chinese with English abstract)

Kynicky J, Smith MP and Xu C. 2012. Diversity of rare earth deposits: The key example of China. *Elements*, 8(5): 361-367

Li FZ and Zeng XL. 2003. Mao Niu Ping bastnäsite separation process. *Journal of Shanghai Second Polytechnic University*, 20(1): 10-16 (in Chinese with English abstract)

Li XY and He Q. 2000. Geological features of re mineral zone in Panzhigua-Xichang Region. *Acta Geologica Sichuan*, 20(1): 50-56 (in Chinese with English abstract)

Ling XX, Li QL, Liu Y, Yang YH, Liu Y, Tang GQ and Li XH. 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

Liu Y, Hou ZQ, Tian SH, Zhang QC, Zhu ZM and Liu JH. 2015. 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

Liu Y and Hou ZQ. 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

Liu Y, Chakhmouradian AR, Hou ZQ, Song WL and Kynicky J. 2019. Development of REE mineralization in the giant Maoniuping deposit (Sichuan, China): Insights from mineralogy, fluid inclusions, and trace-element geochemistry. *Mineralium Deposita*, 54(5): 701-718

Luo YN and Yu RL. 2001. The Main Characteristics and Dynamic Significance of the Himalayan Tectonic-Magmatic Activities in the Longmenshan-Jinping Mountain Intracontinental Orogenic Belt. Beijing: Seismological Press, 88-96 (in Chinese with English abstract)

Niu HC and Lin CX. 1994. The genesis of the Mianing REE deposit, Sichuan Province. *Mineral Deposits*, 13(4): 345-353 (in Chinese with English abstract)

Paton C, Hellstrom J, Paul B, Woodhead J and Hergt J. 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(12): 2508-2518

Pu GP. 1988. Discovery of an alkali pegmatite-carbonatite complex zone

- in Maoniuping, southwestern Sichuan Province. Geological Review, 34(1): 88-92 (in Chinese with English abstract)
- Qin CJ, Qiu YZ, Wen HJ and Xu C. 2008. Genesis of Maoniuping REE deposit, Sichuan: Evidence from inclusions. Acta Petrologica Sinica, 24(9): 2155-2162 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Sanders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Ocean Basins. Geological Society of London Special Publications, 42(1): 313-345
- Tian SH, Hou ZQ, Yuan ZX, Xie YL, Fei HC, Yin SP, Yi SL and Yang ZM. 2006a. Mantle source characteristics of magmatic carbonatites from the Himalayan collision zone in western Sichuan, SW China: Evidence of Pb-Sr-Nd isotopes. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 669-677 (in Chinese with English abstract)
- Tian SH, Ding TP and Yuan ZX. 2006b. Mantle fluids in the Maoniuping LREE deposit, Sichuan Province: Evidence of Pb-Sr-Nd, He-Ar isotopes and REE. Acta Geologica Sinica, 80(7): 1035-1044 (in Chinese with English abstract)
- Tian SH, Hou ZQ, Yang ZS, Chen W, Yang ZM, Yuan ZX, Xie YL, Fei HC, Yin SP, Liu YC, Li Z and Li XY. 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. Mineral Deposits, 27(2): 177-187 (in Chinese with English abstract)
- USGS. 2023. Mineral Commodity Summaries. Reston: US Geological Survey, 132-133
- Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. Geoscience Frontiers, 9(5): 1479-1493
- Wang DH, Yang JM, Yan SH, Xu J, Chen YC, Pu GP and Luo YN. 2001. A special orogenic-type rare earth element deposit in Maoniuping, Sichuan, China: Geology and geochemistry. Resource Geology, 51(3): 177-188
- Wang DH, Yang JM, Yan SH, Chen YC and Xu J. 2002. Dynamics of the REE mineralization in Maoniuping area, Sichuan Province: Isotopic geochemistry of carbonatites. Journal of Chengdu University of Technology, 29(5): 539-544 (in Chinese with English abstract)
- Weng Q, Yang WB, Niu HC, Li NB, Mitchell RH, Zurevinski S and Wu D. 2022. Formation of the Maoniuping giant REE deposit: Constraints from mineralogy and in situ bastnaesite U-Pb geochronology. American Mineralogist, 107(2): 282-293
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1589-1604 (in Chinese)
- Xie YL, Hou ZQ, Yin SP, Dominy SC, Xu JH, Tian SH and Xu WY. 2009. Continuous carbonatitic melt-fluid evolution of a REE mineralization system: Evidence from inclusions in the Maoniuping REE Deposit, Western Sichuan, China. Ore Geology Reviews, 36(1-3): 90-105
- Xu C, Huang ZL, Liu CQ, Qi L, Li WB and Guan T. 2003. Indicator of fluorite Sr and Nd isotope to mantle-derived ore-forming fluids in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 28(1): 41-46 (in Chinese with English abstract)
- Yang YH, Wu FY, Li Y, Yang JH, Xie LW, Liu Y, Zhang YB and Chao H. 2014. In situ U-Pb dating of bastnaesite by LA-ICP-MS. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 29(6): 1017-1023
- Yang ZX, Williams-Jones AE and Pu GP. 2000. Geological features of Maoniuping REE deposit, Sichuan, China. Journal of Mineralogy and Petrology, 20(2): 28-34 (in Chinese with English abstract)
- Yu Y, Wang W, Wang DH, Liu SB, Yu F, Zhao Z, Ji DB, Jin YN, Kan L and Fan WH. 2023. First stage prospecting breakthrough and revelation of Longjiagou REE orebody in periphery of Maoniuping, Sichuan Province, China. Mineral Deposits, 42(5): 1074-1080 (in Chinese with English abstract)
- Yuan XY, Yang ZM, Mayanovic RA and Hou ZQ. 2024. Experimental evidence reveals the mobilization and mineralization processes of rare earth elements in carbonatites. Science Advances, 10(27): eadm9118
- Yuan ZX, Bai G, Ding XS, Shi ZM and Li XY. 1993. U-Pb isotopic age of zircon from the Maoniuping alkali granite, Sichuan Province and its geological significance. Mineral Deposits, 12(2): 189-192 (in Chinese with English abstract)
- Yuan ZX, Shi ZM, Bai G, Wu CY, Chi RA and Li XY. 1995. Maoniuping REE Deposits, Mianning, Sichuan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-150 (in Chinese with English abstract)
- Zhang PS. 1989. A study on the genetic classification of rare earth mineral deposits of China. Scientia Geologica Sinica, (1): 26-32 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Z, Wang DH, Liu SB, Wang W, Yu Y, Ji DB, He B, Yu F, Miao H, Ban XY and Jin YN. 2023. Discovery of the bastnaesite-fluorite-barite-calcite type REE ore in the periphery of Maoniuping deposit in Sichuan Province and its significance. Geological Survey of China, 10(5): 9-16 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈从德, 蒲广平. 1991. 牦牛坪稀土矿床地质特征及其成因初探. 地质与勘探, (5): 18-23
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 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
- 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. 矿床地质, 27(2): 145-176
- 胡文洁, 田世洪, 王素平, 陈林杰, 苏媛娜, 岳量, 王银喜. 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
- 蒋明全. 1992. 牦牛坪稀土矿床地质构造特征及其控矿意义. 矿床地质, 11(4): 351-358
- 李芳积, 曾兴兰. 2003. 牦牛坪氟碳铈矿选矿工艺. 上海第二工业大学学报, 20(1): 10-16
- 李小渝, 何庆. 2000. 攀西地区稀土成矿带成矿地质特征. 四川地质学报, 20(1): 50-56
- 骆耀南, 俞如龙. 2001. 龙门山-锦屏山陆内造山带喜马拉雅期构造-岩浆作用主要特征及动力学意义. 北京: 地震出版社, 88-96
- 牛贺才, 林传仙. 1994. 论四川冕宁稀土矿床的成因. 矿床地质, 13(4): 345-353
- 蒲广平. 1988. 四川西南牦牛坪碱性伟晶岩-火成碳酸盐岩杂岩体的发现. 地质论评, 34(1): 88-92
- 秦朝建, 裴榆卓, 温汉捷, 徐成. 2008. 四川牦牛坪稀土矿床成因研究——来自包裹体的证据. 岩石学报, 24(9): 2155-2162
- 田世洪, 侯增谦, 袁忠信, 谢玉玲, 费红彩, 尹淑苹, 衣龙升, 杨志明. 2006a. 川西喜马拉雅期碰撞造山带岩浆碳酸岩的地幔源区特征——Pb-Sr-Nd 同位素证据. 岩石学报, 22(3): 669-677
- 田世洪, 丁梯平, 袁忠信. 2006b. 四川牦牛坪轻稀土矿床地幔流体特征——铅铋钨和氦氩同位素及稀土元素证据. 地质学报, 80(7): 1035-1044
- 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. 矿床地质, 27(2): 177-187

王登红, 杨建民, 闫升好, 陈毓川, 徐珏. 2002. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学. 成都理工学院学报, 29(5): 539-544

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589-1604

许成, 黄智龙, 刘丛强, 漆亮, 李文博, 管涛. 2003. 四川牦牛坪稀土矿床萤石 Sr、Nd 同位素对地幔成矿流体的指示意义. 地球科学(中国地质大学学报), 28(1): 41-46

阳正熙, Williams-Jones AE, 蒲广平. 2000. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床地质特征. 矿物岩石, 20(2): 28-34

于扬, 王伟, 王登红, 刘善宝, 于泓, 赵芝, 纪德宝, 金雅楠, 阚磊, 范文辉. 2023. 四川牦牛坪外围龙家沟稀土矿体第一阶段找矿突破及启示. 矿床地质. 42(5): 1074-1080

袁忠信, 白鸽, 丁孝石, 施泽民, 李小喻. 1993. 四川冕宁牦牛坪碱性花岗岩锆石铀-铅同位素年龄及其地质意义. 矿床地质, 12(2): 189-192

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. 北京: 地震出版社, 1-150

张培善. 1989. 中国稀土矿床成因类型. 地质科学, (1): 26-32

赵芝, 王登红, 刘善宝, 王伟, 于扬, 纪德宝, 何斌, 于泓, 苗浩, 班西雨, 金雅楠. 2023. 四川省牦牛坪矿床外围氟碳铈矿-萤石-重晶石-方解石脉型稀土矿石的发现及其意义. 中国地质调查, 10(5): 9-16