

四川大陆槽稀土矿床粗粒氟碳铈矿的发现及对找矿的指示意义*

赵芝¹, 王登红¹, 王伟^{2,3**}, 刘善宝¹, 吕秉廷³, 何斌⁴, 班西雨⁵

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 成都理工大学, 四川成都 610059; 3 四川省地质矿产(集团)有限公司, 四川成都 610017; 4 中稀(凉山)稀土有限公司, 四川冕宁 615600; 5 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 四川德昌大陆槽矿床是中国目前唯一确认的与隐爆作用有关的稀土矿床, 具有埋藏浅、品位高、规模大等特征。氟碳铈矿是目前矿区内查明的唯一稀土工业矿物, 主要分布在角砾状矿石的细粒至微细粒胶结物中。文章在大陆槽稀土矿床角砾状矿石中发现了粗粒至伟晶状氟碳铈矿, 分布在含氟碳铈矿的萤石-重晶石-霓辉石角砾、含氟碳铈矿的萤石-重晶石-方解石角砾、含氟碳铈矿的方解石碳酸岩角砾中, 亦呈氟碳铈矿物角砾。角砾中的氟碳铈矿多呈中粗粒乃至伟晶状, 为板柱状自形-半自形晶体, 碎裂结构发育。角砾被细粒至微细粒的石英-天青石-萤石胶结。胶结物中的氟碳铈矿呈针状、细板状或放射状集合体产出, 粒度多小于 100 μm 。粗粒状氟碳铈矿的稀土元素氧化物含量(REO)在 65%~71% 之间, 富铈和镧(占稀土元素总量的 82%~95%), 镨和钕含量相对偏低(占稀土元素总量的 4%~17%); LA-ICP-MS 分析获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(14.78 \pm 0.27)\text{Ma}$ (MSWD=1.1, $n=21$)。大陆槽稀土矿床中粗粒氟碳铈矿的存在增加了矿石的稀土品位, 提升了矿床的经济价值(易于回收)。同时, 说明大陆槽稀土矿在隐爆作用发生之前已形成一定规模的稀土矿化, 暗示矿区深部可能存在一定规模的粗粒至伟晶状脉状矿体。

关键词 粗粒氟碳铈矿; 角砾状稀土矿石; U-Pb 年龄; 大陆槽稀土矿床; 四川省
中图分类号: P618.7 **文献标志码**: A

Discovery of coarse-grained bastnaesite in Dalucao rare earth element deposit, Sichuan Province, and its prospecting significance

ZHAO Zhi¹, WANG DengHong¹, WANG Wei^{2,3**}, LIU ShanBao¹, LÜ BingTing³, HE Bin⁴ and BAN XiYu⁵

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3 Sichuan Geology and Minerals Group Co., Ltd., Chengdu 610017, Sichuan, China; 4 China Rare Earth Group(Liangshan) Co., Ltd., Mianning 615600, Sichuan, China; 5 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract

The Dalucao deposit in Sichuan Province, China, is the only confirmed rare earth deposit associated with cryptoexplosion. It is characterized by shallow burial, high-grade ore and large tonnage. Bastnaesite, the primary rare earth industrial mineral identified in this deposit, is mainly found in the fine-to-micro cements of breccia ore and is not easy observable with the naked eye. In this study, we discovered coarse-grained to pegmatitic bastnae-

* 本文得到中国稀土集团有限公司科技项目“四川省牦牛坪、大陆槽稀土矿成矿规律与找矿预测”(HE2310)、中国地质调查局“战略新兴产业矿产地质调查工程”(DD20230034)、“四川康定-云南个旧稀有稀土矿产地质调查”项目(DD20230290)和中国矿产地质志续编与产品服务项目(DD20221695)共同资助

第一作者简介 赵芝, 女, 1984年生, 副研究员, 主要从事稀土成矿规律研究。Email: zhaozhi_sun@163.com

** 通讯作者 王伟, 男, 1990年生, 高级工程师, 主要从事三稀资源地质调查与矿产勘查。Email: 455635239@qq.com

收稿日期 2024-05-22; 改回日期 2024-11-07。张绮玲编辑。

site in the breccia ore of the deposit. These coarse-grained bastnaesite distribute in bastnaesite-bearing aegirine augite-fluorite-barite breccia, bastnaesite-bearing fluorite-barite-calcite breccia and bastnaesite-bearing calcite carbonate breccia, they also appear as the bastnaesite mineral breccia. The bastnaesite grains in breccia usually exhibit plate columnar and granular morphology, occur as euhedral or subhedral crystals with varying size of medium-coarse or even pegmatitic, and mostly have cataclastic texture. The breccias are cemented by fine-to-micro-grained quartz-fluorite-cerite, and the cements also contain bastnaesites in the form of acicular crystal, tabular crystal or radiate-columnar aggregate, with grain size mostly smaller than 100 μm . The content of rare earth oxides (REO) in coarse-grained bastnaesite ranges between 65% and 71%, with a higher abundance of cerium and lanthanum (accounting for 82%~95% of the total rare earth content), and relatively lower proportions of praseodymium and neodymium (accounting for 4%~17% of the total rare earth content); the $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age obtained by LA-ICP-MS is $(14.78\pm 0.27)\text{Ma}$ (MSWD=1.1, $n=21$). The occurrence of coarse-grained bastnaesite in the Dalucao deposit makes the ore having higher grade, and also enhances its economic value (higher recoverability). Furthermore, it suggests the possible occurrence of a certain scale of rare earth mineralization in the area prior to the formation of the cryptoexplosive brecciation, this indicates the possible presence of coarse grained or pegmatitic veins containing bastnaesite at depth in the deposit.

Key words: coarse-grained bastnaesites, breccia REE ore, U-Pb age, Dalucao rare earth element deposit, Sichuan Province

四川省是中国稀土资源大省,仅次于内蒙古自治区位居第二。不同于内蒙古白云鄂博稀土矿床中氟碳铈矿(一般数十微米)-独居石(微米至数十微米)混合型稀土资源,四川省稀土资源为单一的氟碳铈矿,而且氟碳铈矿颗粒大、放射性元素含量低,属于优质的轻稀土资源(李小渝等,2000)。四川省稀土资源集中分布在凉山州的冕宁县和德昌县,目前已有矿产地7处,包括大型矿床2处(牦牛坪和大陆槽)、中型矿床3处(普悟沟、里庄和木洛寨)、小型矿床2处(三岔河和牙谷台子),以及众多矿化点,形成了北起冕宁县经西昌市至德昌县的攀西冕宁—德昌稀土成矿带。该成矿带内各矿床成矿条件具有相似性,但又各具特色(蒲广平,1993;Hou et al.,2009)。其中,牦牛坪和大陆槽稀土矿床成矿规模大,加上交通条件便利,一直是主要的研究和开采对象,也是目前稀土增储上产的重要矿山。相对牦牛坪矿床中产出的伟晶状、粗粒及中细粒氟碳铈矿(一般粒度在0.1~10 mm),大陆槽矿床中的氟碳铈矿颗粒细小,一般在0.2~2 mm之间,偶见10 mm的晶体(李小渝等,2000)。为什么大陆槽矿床中产出的氟碳铈矿颗粒细小?已有的研究认为,大陆槽矿床成矿过程与隐爆作用密切相关,主要的2个工业矿体(I号和III号)受控于2个隐爆角砾岩筒,氟碳铈矿呈浸染状分布在角砾岩细粒至微粒的胶结物中(田世洪等,2008a;2010;Hou et al.,2009;Liu et al.,2015a;刘琰

等,2017)。近年,作者在大陆槽稀土矿床I号矿体的隐爆角砾岩中发现了粗粒乃至伟晶状的氟碳铈矿。为了查明粗粒氟碳铈矿的产出特征及形成年龄,探讨矿床中稀土矿物的富集过程,本文对含粗粒氟碳铈矿的角砾状矿石进行了矿相学、矿物学、年代学及矿物地球化学特征研究。

1 矿床地质

大陆槽稀土矿床发现于1994年(施泽民等,1995),行政区划位于凉山州德昌县茨达镇大陆槽乡,矿区属于高山深切割地貌,海拔在1900~2300 m之间,相对高差400 m。矿床位于攀西冕宁—德昌稀土成矿带的南端(图1),产于喜马拉雅期碳酸岩-碱性正长(斑)岩体超浅部的隐爆角砾岩筒中,杂岩体主体形成于11~14 Ma(田世洪等,2008a;Liu et al.,2015b)。围岩为晋宁期石英闪长岩,即大陆乡石英闪长岩体,其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(769.5\pm 8.7)\text{Ma}$ (刘琰等,2017)。石英闪长岩出露面积大于70 km²,呈岩基侵入前震旦系会理群中,区域上被三叠系—侏罗系覆盖。矿区内碱性正长(斑)岩呈岩株、岩脉侵入于石英闪长岩的张性裂隙中。岩株形态不规则,出露长约200~400 m,宽约180~200 m,岩性有霓辉正长岩、英碱正长岩及其斑岩。灰白色粗粒方解石碳酸岩脉、含萤石-重晶石脉-霓辉

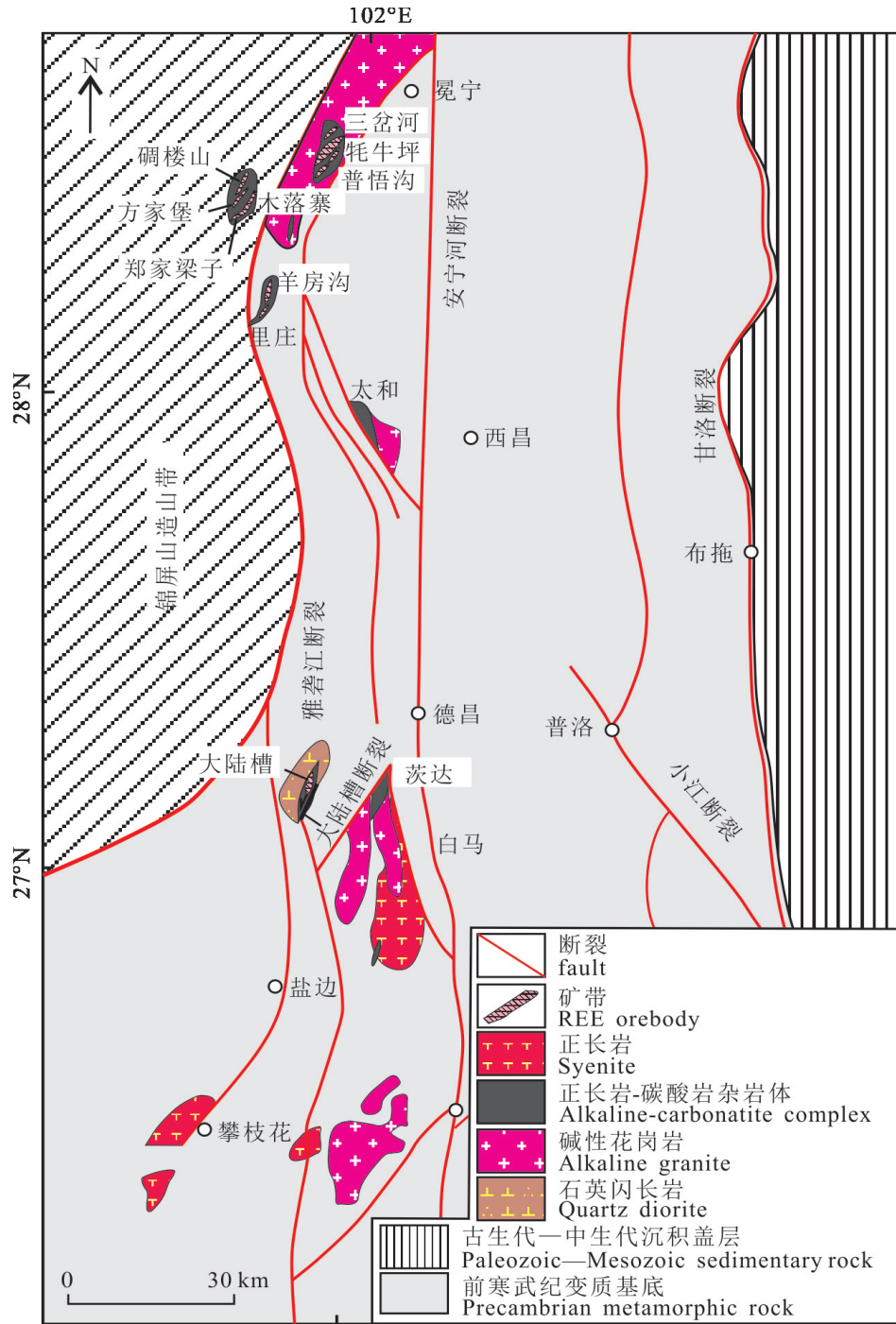


图1 四川冕宁-德昌稀土成矿带区域地质简图(据袁忠信等,1995 修编)

Fig.1 Simplified regional geological map of the Mianning-Dechang REE metallogenic belt in Sichuan(modified after Yuan et al.,1995)

石、含萤石-天青石-霓辉石大脉充填于石英闪长岩、霓辉正长(斑)岩北西向和近南北向的张扭性裂隙中,倾向北东及东,倾角 $45^{\circ}\sim 70^{\circ}$ (李小渝等,2000)。隐爆角砾岩形成晚于灰白色粗粒方解石碳酸岩脉(田世洪等,2008a)。矿区地表被坡积层、残坡积层、

洪积层覆盖,厚2~40 m。

大陆槽矿床中 I 号和 III 号为主要的工业矿体(图2)。其中, I 号矿体产于碱性正长岩与石英闪长岩的接触带,矿体走向为北西-南东向,倾向北东(整体约 39°),倾角较大(整体约 73°),局部产状变化较

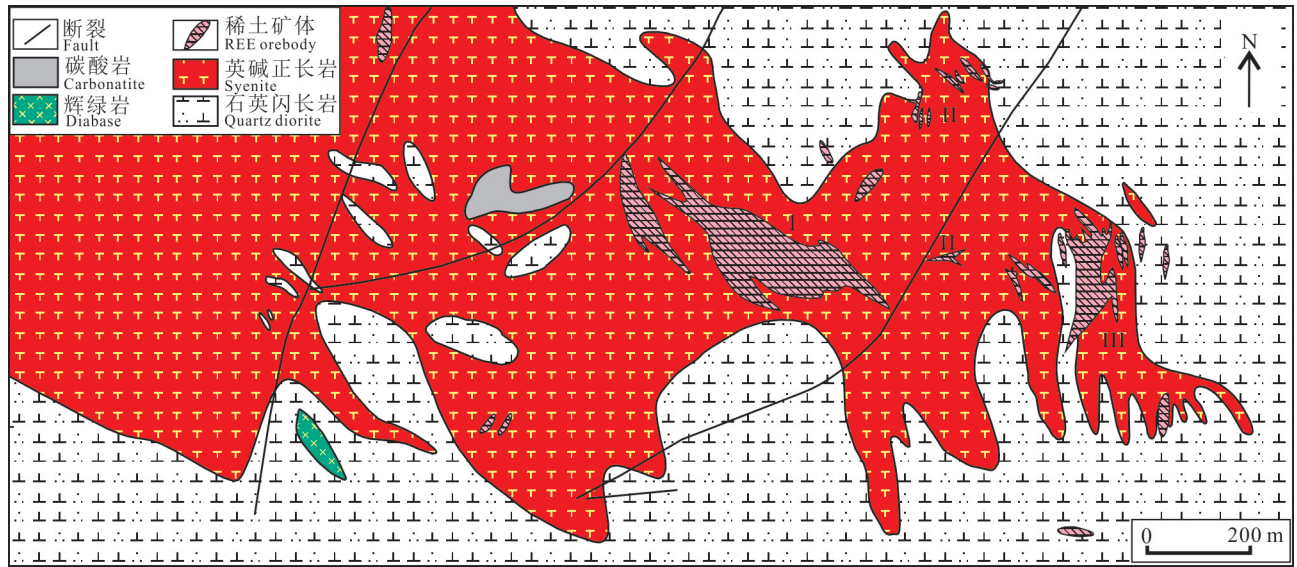


图2 四川大陆槽稀土矿床地质图(据杨光明等,1998 修编)

Fig.2 Geological map of the Dalucao REE deposit in Sichuan (modified after Yang et al.,1998)

大。矿体出露宽度在 80 m 与 180 m 之间,厚 4~228 m,沿走向延长超过 436 m,最大控制斜深 540 m。矿体平面形态呈不规则的大透镜状,由厚大的矿脉及两侧的细网脉带组成,垂向上呈厚度稳定、形态规则的柱状向下延深,且未见尖灭趋势,往深部倾角略有变陡。Ⅲ号矿体位于 I 号矿体的东侧,平面距离约 540 m。矿体大部分被第四系冲洪积和人工堆积所掩盖,掩盖深度达到 40 余米,为隐伏和半隐伏矿体。矿体平面上呈大的透镜状,沿走向和倾向都具有复合膨大和分枝尖灭的特征,总体向南西倾,倾角 58°~63°。矿体南北控制长度 350 m,东西宽 50~220 m,厚度 68~238 m,平均厚度 130 m,工程控制最大斜深 500 m。

2 测试方法

样品采自 I 号矿体采坑,样品制成岩石薄片后,在显微镜下观察隐爆角砾岩的结构及角砾特征。由于胶结物成分细小,很难用肉眼观察,故对其进行了粉末 X 射线衍射分析(X-ray diffractometry 缩写为 XRD),以获得矿物类型及含量,分析结果见表 1。多晶 X 射线衍射分析由中国地质科学院矿产资源研究所完成,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 40 mA、电压 40 kV,扫描范围 2°~70°,扫描步长 0.02°,每步扫描时间 0.25 s。样品磨碎至小于 200 目,制样采用正压

法。数据处理软件为 MID JADE 8.6(授权版),PDF 数据库为 PDF-4+2023(授权版),矿物半定量-定量分析采用全谱拟合法,误差均在要求范围之内。

对粗粒的氟碳铈矿进行了电子探针分析,以查明其元素组成特征,分析结果见表 2。电子探针分析由中国地质科学院矿产资源研究所完成,仪器型号 XA-iHP200F Hyper Probe,分析条件为加速电压 15 kV,束流 2×10^{-8} (A) (20 nA),束斑直径为 10 μm 。标准样品为全国微束分析标准化技术委员会认可的国家级标准样品。

对粗粒氟碳铈矿进行了 U-Pb 测年,同位素测年在中国地质科学院矿产资源研究所激光(多接收)电感耦合等离子质谱实验室完成。激光剥蚀系统为 RESOLUTION S-155 型 193 nm 准分子激光,ICP-MS 为 Thermo Fisher 的 Element X R,激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。每个时间分辨分析数据包括大约 15~20 s 的空白信号和 45 s 的样品信号。激光束斑大小为 30 μm ,剥蚀频率为 6 Hz,氦气流速为 0.6 L/min,激光输出能量密度为 5 J/cm²。选择氟碳铈矿标准 K-9 和标准 610 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 和 2 次 610。原始数据采用软件 ICPMS Data Cal 处理。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 K-9 的变化采用线性内插的方式进行了校正(Liu et al., 2008),通过 ²⁰⁷Pb 校正法对普通铅进行校正。氟碳铈矿的 U-Pb 年龄谱

表1 四川大陆槽稀土矿床中角砾状矿石样品矿物定量及半定量分析

Table 1 Quantitative or semi-quantitative mineral content analyses show the percentages of minerals in the breccia samples from the Dalucao REE deposit in Sichuan

样号	样品特征	分析结果/%				
		方解石	萤石	天青石	石英	氟碳铈矿
21DLC-I-3	胶结物	13	11	15	60	3
21DLC-I-15	胶结物	—	10	—	89	1
21DLC-I-18	黑色土状	—	35	—	30	35

注：“—”为低于检出限。

和图绘制和年龄计算均采用 Isoplot 完成。

3 分析结果

3.1 角砾状稀土矿石

角砾状矿石样品(21DLC-I-15和21DLC-I-3)具

有典型的角砾构造,胶结物呈显微晶质结构。胶结物呈肉红色至浅紫红色,质地坚硬,主要由石英(60%~90%)、萤石(约11%)和天青石(<15%)组成,含一定量的方解石(<13%)和少量的氟碳铈矿(1%~3%)。矿石中角砾含量变化在5%~60%不等,角砾多呈棱角至次棱角状,有时圆化,形态可为三角状、长条状、近圆形等;角砾大小悬殊,大的粒径超过5 cm,小的仅有几毫米;角砾成分复杂,有含氟碳铈矿的萤石-重晶石-霓辉石矿物团块(样品21DLC-I-15),团块中矿物呈粗粒至伟晶结构,多孔构造、蜂窝状构造(图3a)。团块中重晶石含量大于80%,呈灰白色,多风化呈窝峰状;霓辉石多风化,风化后呈黑褐色土状残留在晶体空洞中,含量约5%;萤石多呈无色至淡绿色,含量小于10%;氟碳铈矿呈薄片状集合体分布在重晶石、萤石之间,含量小于3%。对空洞中残留的黑褐色土状物质进行了XRD测试,显示其由氟碳铈矿(约35%)、萤石(约35%)和石英(约

表2 四川大陆槽稀土矿床中-粗粒氟碳铈矿的元素组成特征

Table 2 Elemental composition of coarse-grained bastnaesite in the Dalucao REE deposit from Sichuan

测试号	矿物	w(B)/%														
		CaO	F	SrO	UO ₂	ThO ₂	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	HREO	总和	REO
DLC2-K1-32-Bas1	氟碳铈矿	0.12	9.34	0.08	0	0.06	33.22	31.51	0.81	2.10	0.11	0	0.03	1.89	79.27	67.78
DLC2-K1-32-Bas2	氟碳铈矿	0.07	9.32	0.01	0	0.08	31.41	32.15	0.55	2.30	0.23	0	0	2.02	78.14	66.64
DLC2-K1-32-Bas3	氟碳铈矿	0.11	9.46	0.01	0	0.03	30.34	32.35	0.90	2.21	0.12	0.07	0	2.14	77.72	65.98
DLC2-K1-32-Bas4	氟碳铈矿	0.06	9.49	0	0	0.03	31.58	32.62	0.95	2.44	0.07	0	0.01	1.96	79.21	67.68
DLC2-K1-32-Bas5	氟碳铈矿	0.14	9.78	0.01	0.01	0	30.78	33.15	0.99	2.45	0.20	0	0	1.99	79.50	67.58
21DLC-I-15-Bas1	氟碳铈矿	0.09	9.50	0.05	0	0.06	29.82	33.35	0.78	2.54	0.28	0.16	0.04	1.95	78.60	66.96
21DLC-I-15-Bas2	氟碳铈矿	0.94	9.24	0.09	0.01	0	30.54	32.08	1.13	2.48	0.34	0	0	2.07	78.90	66.56
21DLC-I-15-Bas3	氟碳铈矿	0.12	9.42	0.08	0.02	0	29.26	33.49	0.91	2.59	0.25	0	0.05	2.27	78.46	66.56
21DLC-I-15-Bas4	氟碳铈矿	0.58	9.30	0.07	0	0.06	29.51	33.60	0.92	2.58	0.29	0	0	2.09	78.99	66.90
21DLC-I-15-Bas5	氟碳钙铈矿	8.98	6.83	0.09	0.02	0.11	23.91	29.44	0.79	6.39	0.36	0	0.03	1.91	78.86	60.92
21DLC-I-15-Bas6	氟碳钙铈矿	9.83	6.28	0.03	0	0.06	22.55	29.34	1.00	3.26	0.43	0	0.09	1.84	74.71	56.67
21DLC-I-15-Bas7	氟碳钙铈矿	10.05	6.50	0.24	0.10	0.10	22.61	29.24	0.80	3.18	0.35	0	0.02	1.94	75.13	56.20
21DLC-I-15-Bas8	氟碳钙铈矿	10.20	6.12	0.22	0	0	23.29	29.15	0.94	2.99	0.17	0	0.07	1.92	75.07	56.61
21DLC-I-3-Bas1	氟碳铈矿	0.46	9.12	0	0	0.10	27.84	31.88	1.02	5.94	0.11	0.04	0.08	2.01	78.60	66.91
21DLC-I-3-Bas2	氟碳铈矿	0.15	8.82	0.08	0	0.20	26.39	32.90	1.06	7.17	0.32	0	0.04	2.07	79.20	67.87
21DLC-I-3-Bas3	氟碳铈矿	0.18	9.55	0.08	0	0.19	25.33	32.27	1.32	7.39	0.46	0	0.01	2.14	78.92	66.77
21DLC-I-3-Bas4	氟碳铈矿	0.37	9.36	0	0	0.01	28.35	32.03	0.97	5.75	0.08	0	0.03	2.00	78.94	67.20
21DLC-I-3-Bas5	氟碳铈矿	1.59	9.26	0.13	0	0.12	25.03	31.68	1.20	7.08	0.39	0.06	0.03	2.02	78.60	65.48
21DLC-I-3-Bas6	氟碳铈矿	0.33	8.12	0.12	0.03	0.19	25.31	34.34	1.28	8.34	0.28	0.06	0.05	2.35	80.78	69.64
21DLC-I-3-Bas7	氟碳铈矿	1.90	8.32	0	0	0	23.51	33.94	1.50	9.61	0.52	0.05	0.02	2.52	81.87	69.14
21DLC-I-3-Bas8	氟碳铈矿	1.21	8.62	0	0.03	0.18	27.90	34.05	1.23	7.38	0.15	0	0	2.41	83.14	70.70
21DLC-I-3-Bas9	氟碳铈矿	1.28	8.87	0.05	0	0.02	25.19	35.03	1.63	8.20	0.51	0	0.08	2.46	83.32	70.64
21DLC-I-3-Bas10	氟碳铈矿	4.39	8.52	0.01	0	0	20.40	32.45	1.39	9.34	0.55	0	0.06	2.48	79.58	64.19

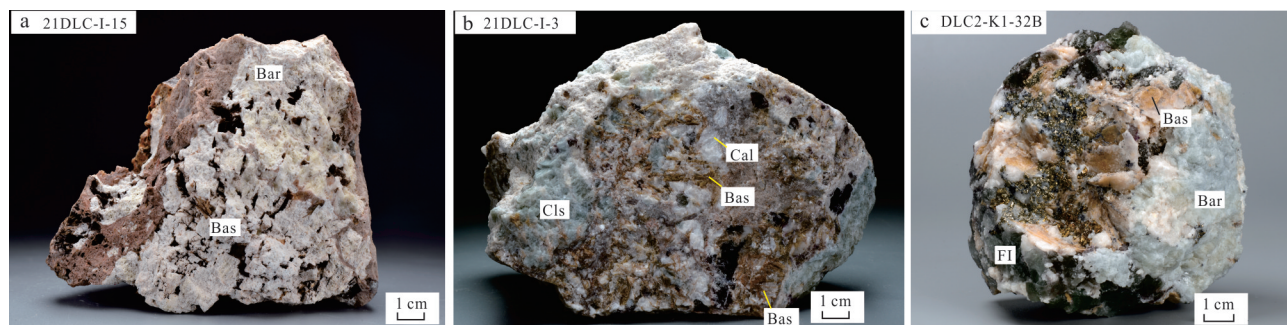


图3 四川大陆槽稀土矿床角砾状矿石中-粗粒氟碳铈矿的产出特征

a. 含氟碳铈矿的萤石-重晶石-霓辉石角砾; b. 含氟碳铈矿的方解石碳酸岩角砾及氟碳铈矿矿物角砾; c. 含氟碳铈矿的萤石-重晶石-方解石角砾
Bas—氟碳铈矿; Bar—重晶石; Fl—萤石; Cal—方解石; Cls—天青石

Fig.3 Photographs showing typical coarse-grained bastnaesite in breccia ores from the Dalucao REE deposit from Sichuan

a. The bastnaesite-bearing fluorite-barite-aegirine augite breccia; b. The bastnaesite-bearing calcite carbonate breccia and the bastnaesite mineral breccia; c. The bastnaesite-bearing fluorite-barite-calcite breccia

Bas—Bastnaesite; Bar—Barite; Fl—Fluorite; Cal—Calcite; Cls—Celestine

30%)组成。角砾成分也有含氟碳铈矿的方解石碳酸岩岩角砾以及粗粒至伟晶状方解石、萤石、重晶石、氟碳铈矿等矿物角砾(图3b)。其中,方解石碳酸岩岩角砾形态不规则,中粗粒结构,矿物碎裂结构十分发育。角砾成分还有萤石(35%~40%)-重晶石(25%~30%)-方解石(20%~25%)组成的岩石团块(图3c),具粗粒至伟晶结构,块状构造。岩石角砾中含少量的氟碳铈矿(约4%)、石英(约3%)、黄铁矿(约2%)和辉钼矿(约1%)。

3.2 氟碳铈矿

氟碳铈矿呈蜡黄色,薄板状或板条状,半自形-自形晶体,粒径多在0.5~1.0 cm之间,玻璃光泽(图3a~c)。氟碳铈矿与粗粒方解石、重晶石、天青石及萤石共生,具有压碎结构(图4)。氟碳铈矿呈半自形-自形板条状叠加在方解石之上,多沿晶体裂隙及边缘被萤石、天青石、氟碳钙铈矿等矿物交代(图5a),晶体内部发育不同方向的裂纹及裂隙(图5b、c)。石英-天青石-萤石胶结物中,氟碳铈矿呈针状、细条状、放射状集合体,粒度在50 μm左右(图5d)。

氟碳铈矿主要富集稀土元素($w(\text{REO})$ 介于64.19%~70.70%)和 $w(\text{F})$ (8.12%~9.78%),含不等量的 $w(\text{CaO})$ (0.06%~4.39%)、微量的 $w(\text{SrO})$ ($<0.13\%$)和 $w(\text{ThO}_2)$ ($<0.2\%$),总含量为77.72%~83.32%(表2)。主要富集轻稀土元素,尤其富集 $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ (介于31.51%~35.03%)和 $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ (介于20.40%~33.22%),而 $w(\text{Pr}_2\text{O}_3)$ (介于0.55%~1.63%)和 $w(\text{Nd}_2\text{O}_3)$ (介于

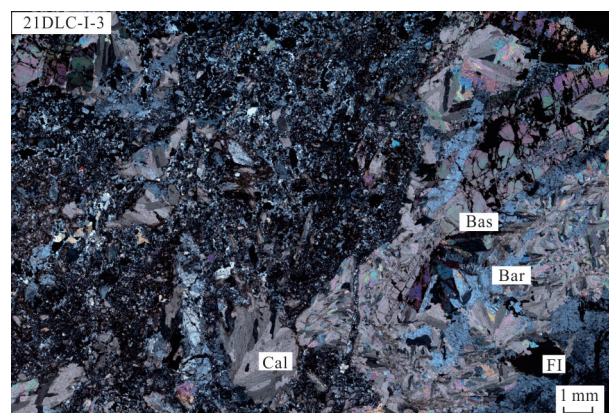


图4 四川大陆槽稀土矿床角砾状矿石中方解石碳酸岩岩石角砾特征(正交偏光)

Cal—方解石; Bas—氟碳铈矿; Bar—重晶石; Fl—萤石

Fig. 4 Microscopic characteristics of calcite carbonate breccia in the Dalucao REE deposit (cross-polarized) from Sichuan

Cal—Calcite; Bas—Bastnaesite; Bar—Barite; Fl—Fluorite

2.10%~9.61%)的含量偏低。重稀土元素总质量分数介于1.89%~2.52%之间。氟碳钙铈矿,其 $w(\text{CaO})$ 明显升高(8.98%~10.20%), $w(\text{F})$ 略低(6.12%~6.83%),稀土元素含量整体偏低, $w(\text{REO})$ 介于56.20%~60.92%。

3.3 氟碳铈矿的年龄

对角砾状矿石(样品21DLC-I-3)中颗粒粗大、自形且表面干净的氟碳铈矿(图5c)进行了测年。单颗粒的氟碳铈矿粒长度约1 cm,长宽比约10:1。共获得21个有效数据,在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 谐和

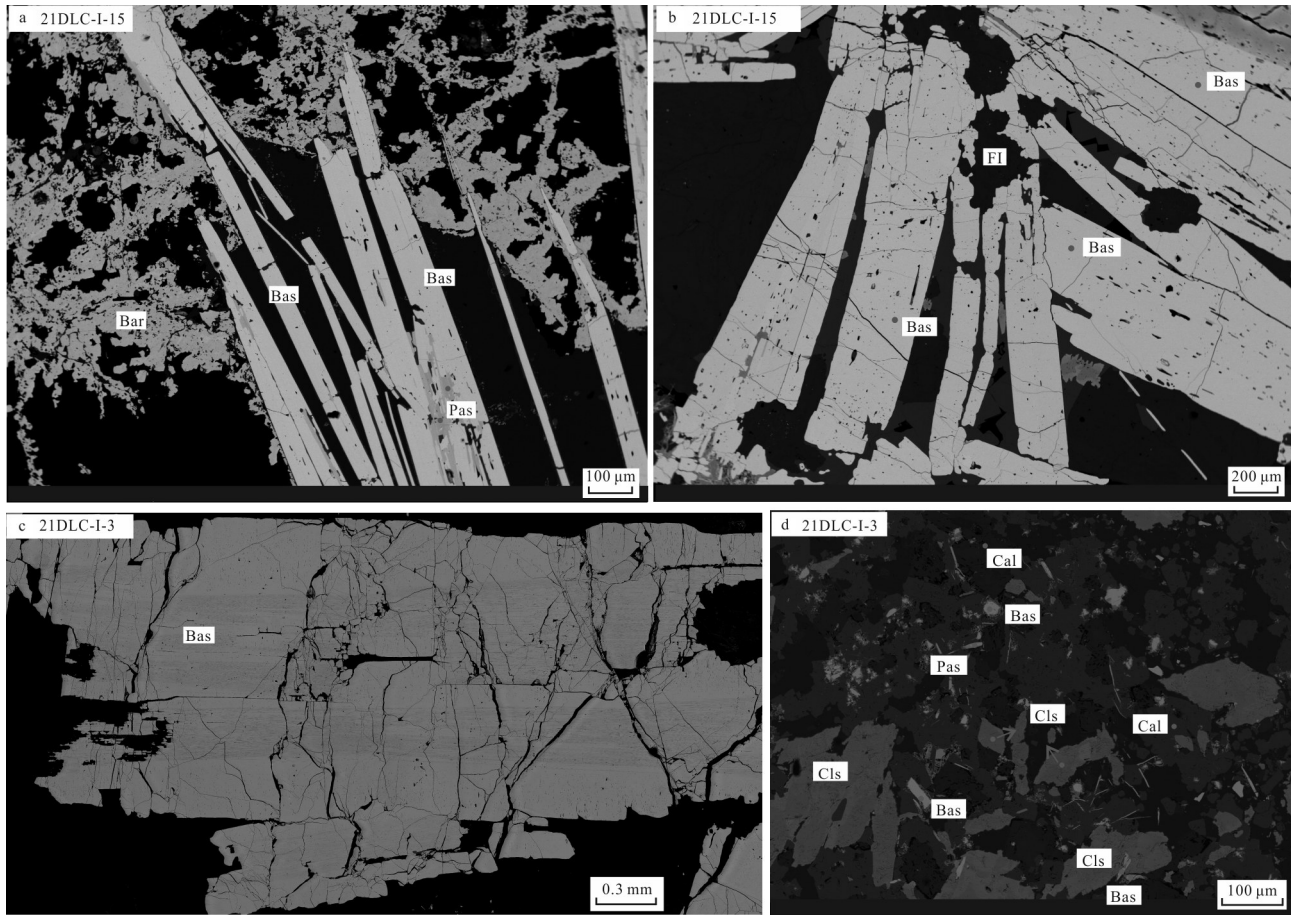


图5 四川大陆槽稀土矿床隐爆角砾岩中氟碳铈矿背散射图像

a. 角砾中板状氟碳铈矿被氟碳钙铈矿交代; b. 角砾中板状氟碳铈矿被萤石交代; c. 粗粒氟碳铈矿; d. 胶结物中针状氟碳铈矿和氟碳钙铈矿
Bar—重晶石; Bas—氟碳铈矿; Fl—萤石; Cal—方解石; Cls—天青石; Pas—氟碳钙铈矿

Fig. 5 BSE image of bastnaesite found in breccia samples from the Dalucao REE deposit in Sichuan

a. Bastnaesite partially replaced by parasite in the rock breccia; b. Bastnaesite partially replaced by fluorite in the rock breccia; c. Coarse-grained bastnaesite; d. Bastnaesite and parasite formed needle-like in the cement of breccia

Bar—Barite; Bas—Bastnaesite; Fl—Fluorite; Cal—Calcite; Cls—Celestine; Pas—Parasite

图上, (图 6a) 数据均位于谐和线及其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (14.78 ± 0.27) Ma (MSWD=1.10, $n=21$) (图 6b)。

4 讨论

4.1 粗粒氟碳铈矿的形成年龄

已有的研究表明, 大陆槽稀土矿床中喜马拉雅期岩浆岩形成的先后顺序为: 碱性正长岩→白色方解石碳酸岩→方解石碳酸角砾岩(田世洪等, 2008a)。同位素年代学资料显示: 英碱正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (11.32 ± 0.23) Ma、 (12.13 ± 0.91) Ma (Liu et al., 2015b)、 (14.53 ± 0.31) Ma (田世洪

等, 2008a) 以及 (26.49 ± 0.63) Ma (刘琰等, 2017)。方解石碳酸岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (12.99 ± 0.94) Ma (田世洪等, 2008a)。可见, 大陆槽碱性正长岩-碳酸岩杂岩体主体形成于 11~15 Ma 之间。大陆槽矿区也可能存在与冕宁—德昌稀土成矿带北部牦牛坪、木落寨和里庄同期 (26~30) Ma 的碱性正长岩。关于稀土成矿的年龄, 前人资料表明, I 号和 III 号矿体中的白云母 Ar-Ar 年龄分别为 (13.33 ± 0.41) Ma 和 (12.95 ± 0.22) Ma (田世洪等, 2008b)。氟碳铈矿的 SIMS Th-Pb 年龄为 (11.8 ± 0.2) Ma 和 (11.9 ± 0.2) Ma (Ling et al., 2016), LA-ICP-MS Th-Pb 年龄为 (13.2 ± 0.6) Ma 和 (13.4 ± 0.6) Ma (Yang et al., 2019)。

本文测年结果显示, 角砾中粗粒的氟碳铈矿

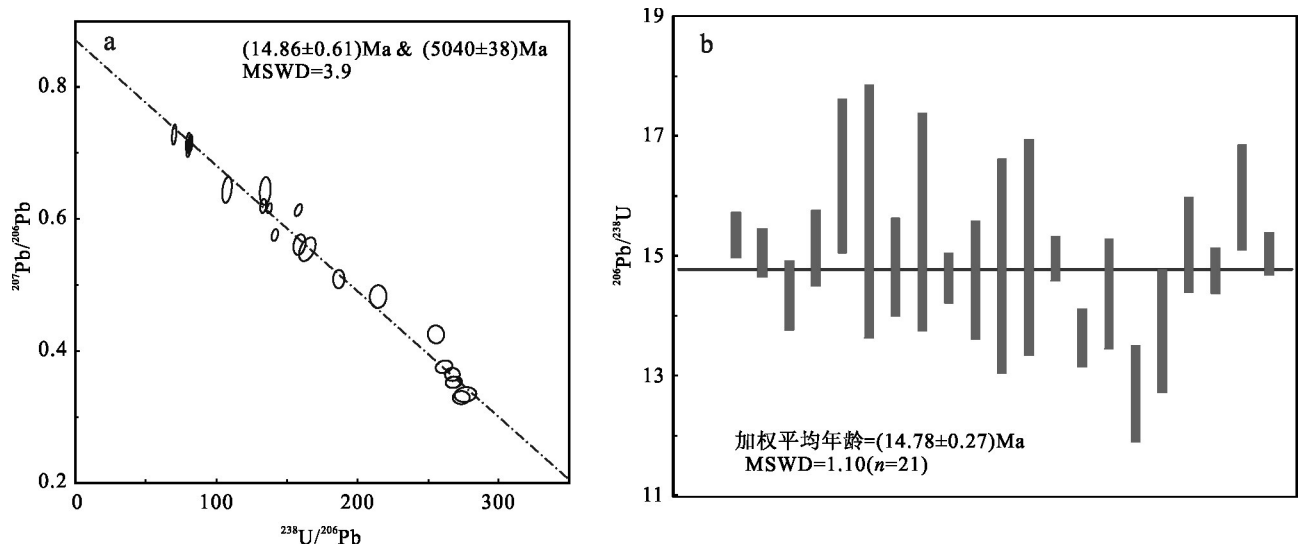


图 6 四川大陆槽稀土矿床中粗粒氟碳铈矿的 Tera-Wasserburg 图(a)和 ^{207}Pb 校正后的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄(b)
 Fig. 6 Tera-Wasserburg diagrams (a) and weighted mean ages based on common- ^{207}Pb corrected $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ratios (b) of coarse-grained bastnaesites in the Dalucao REE deposit from Sichuan

LA-ICP-MS 年龄为 $(14.78\pm 0.27)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.1$, $n=21$)。说明稀土矿化与碳酸岩-碱性正长岩杂岩体 ($11\sim 15\text{Ma}$) 密切相关,角砾中粗粒的氟碳铈矿形成略早于胶结物中细粒至微粒的氟碳铈矿,即早期的矿化角砾被晚期的矿化胶结。

4.2 粗粒氟碳铈矿对大陆槽矿区找矿的指示意义

四川冕宁—德昌稀土成矿带在空间上形成了“三层楼”式的成矿系统:深部层位形成了里庄式细脉-浸染状矿体,中部层位形成了牦牛坪式脉状矿体,上部层位则形成了大陆槽式角砾岩筒矿体(Hou et al., 2009)。大陆槽稀土矿床是目前中国唯一确认的与隐爆作用有关的稀土矿床,氟碳铈矿是唯一的稀土工业矿物,矿石中占 $84\%\sim 95\%$ 。矿区内角砾岩普遍存在,构成了稀土品位变化很大的角砾状稀土矿石。氟碳铈矿极不均匀地嵌布在石英-萤石-天青石-方解石为主的胶结物中,呈细粒至微细粒,粒度在 $0.2\sim 1\text{mm}$ 之间。据统计,约 43% 的稀土矿物粒度小于 0.074mm ,难以回收(李小渝等,2000)。角砾状稀土矿石中,角砾大小及含量悬殊、组成复杂,常见石英闪长岩、辉长岩、英碱正长岩、方解石碳酸岩等围岩角砾,亦见萤石、方解石、天青石等矿物角砾。本文在 I 号矿体采坑深部角砾状矿石中的岩石角砾中发现了粗粒乃至伟晶状的氟碳铈矿和粗粒的氟碳铈矿物角砾。含氟碳铈矿的岩石角砾类型有萤石-重晶石-霓辉石角砾、萤石-重晶石-方解石角砾和

方解石碳酸岩角砾,这些矿化角砾呈粗粒乃至伟晶状产出、大小不等、分布极不均一。粗粒氟碳铈矿易回收利用,角砾中氟碳铈矿的出现增加了矿石的品位,提高了矿床的经济价值。

大陆槽矿区内矿化角砾如何产出?前人研究显示, I 号矿体地表及深部分布萤石-重晶石-方解石型稀土矿石,呈不同规模的脉状或小透镜状,氟碳铈矿有呈半自形粗粒结构,颗粒大小在 $0.5\sim 2\text{mm}$ 之间,有呈半自形到自形的细粒结构,粒度小于 0.2mm (杨光明等,1989)。I 号矿体中也分布有萤石-锆重晶石-霓辉石型稀土矿石,呈脉状,脉宽数十米至百米,脉长百米至数百米(李小渝等,2000)。近年,在 I 号矿体外围也发现了萤石-重晶石-方解石-石英大脉,但未见氟碳铈矿(刘琰等,2017)。可见,大陆槽稀土矿区角砾状稀土矿石中矿化角砾来自早期形成的粗粒至伟晶脉状矿体,矿区在隐爆作用之前就已发生一定规模的稀土矿化。

大陆槽矿区内粗粒至伟晶状氟碳铈矿如何形成?区内脉状矿体与角砾状矿体在时间、空间及成因上有着密切的联系,反映在同一深部岩浆作用下成矿热液随着上部地质条件的变化产生了不同的矿石类型。早期,碱性正长(斑)岩-碳酸岩杂岩体受区域构造断裂的影响,岩体及围岩(石英闪长岩)裂隙发育,热液沿构造裂隙充填,形成脉状矿体。与牦牛坪矿床中伟晶状矿脉一样,其形成层位较深。晚期,

碱性正长(斑)岩体顶部及上覆围岩接触带发生隐爆作用,形成角砾状矿石,胶结物中细粒至微细粒的氟碳铈矿形成于多次隐爆作用。可见,大陆槽矿区内至少存在2个成矿阶段,即较晚期的矿液以充填或交代方式胶结或交代早期矿石角砾。矿区外围及深部可能发育一定规模的萤石-锶重晶石-霓辉石型和萤石-重晶石-方解石型稀土矿脉。

5 结 论

笔者在大陆槽稀土矿床发现了含粗粒氟碳铈矿的角砾状矿石,粗粒氟碳铈矿分布在矿化岩石角砾中。相对于胶结物中细粒至微细粒氟碳铈矿,粗粒氟碳铈矿易于回收利用,能有效提高矿床的经济价值。粗粒氟碳铈矿的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(14.78\pm 0.27)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.10, n=21$)。稀土矿化与碳酸岩-碱性正长岩杂岩体(11~15 Ma)密切相关,早期矿化角砾被晚期矿化胶结,暗示矿区在隐爆作用发生之前就已形成一定规模的稀土矿化。这一发现扩大了大陆槽外围及深部找矿潜力。

致 谢 本文撰写过程中得到了中国地质科学院矿产资源研究所杨岳清研究员的悉心指导,李以科研究员为稿件提供了建设性建议和意见,作者受益匪浅,在此深表感谢!

References

- Hou Z Q, Tian S H and Xie Y L. 2009. The Himalayan Mianning-Dechang REE belt associated with carbonatite alkaline complexes, eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 65-89.
- Li X Y and He Q. 2000. Geological features of REE mineral zone in Panzihua-Xichang region[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 20(1): 50-56(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 bastnaesite: Constraint on the mineralization time of the Himalayan Mianning-Dechang rare earth element deposits[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31(8): 1680-1687.
- Liu Y, Zhu Z, Chen C, Zhang S P, Sun X, Yang Z S and Liang W. 2015a. 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, Tian S H, Zhu Z M and Liu J H. 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 554-568.
- Liu Y, Chen C, Shu, X C, Guo D X, Li Z J, Zhao H X and Jia Y H. 2017. The formation model of the carbonatite-syenite complex REE deposits in the East of Tibetan Plateau: A case study of Dalucao REE deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 1978-2000(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ, analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1): 34-43.
- Pu G P. 1993. A discussion on metallogenetic model and prospecting targets for Maoniuping ore deposit of rare-earth elements[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 13(1): 46-57(in Chinese with English abstract).
- Shi Z M and Li X Y. 1995. The discovery and its significance of Dalucao ore deposit of REE in Dechang[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 15(3): 216-218(in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Hou Z Q, Yang Z S, Chew W, Yang Z M, Yuan Z X, Xie Y L, Fei H X, Yin S P, Liu Y C, Li Z and Li X Y. 2008a. Geochronology of REE deposits in Mianning-Dechang REE metallogenetic belt: Constraints on duration of hydrothermal activities and a tectonic model for the carbonatite-alkalic complexes in southwestern Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 177-187(in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Hou Z Q, Yang Z S, Yang Z M, Yuan Z X, Wang Y B, Xie Y L, Liu Y C and Li Z. 2008b. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic compositions and geological significance: A case study of carbonatite and nordmarkite from the Dalucao REE deposit, Sichuan province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 544-554(in Chinese with English abstract).
- Tian S H, Hou Z Q, Yang Z S, Xie Y L, Yang Z M, Wei J X and Yuan Z X. 2010. Study on the metallogenetic mechanism of the explosion breccia rare earth deposit in Dalucao, western Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 285-286(in Chinese with English abstract).
- Yang G M, Chang G, Zuo D H and Liu X L. 1998. Ore-forming conditions of the DL REE deposit in Dechang County, Sichuan Province[M]. Wuhan: China University of Geoscience. 21-22(in Chinese).
- Yang Y H, Wu F Y, Li Q L, Rojas-Agramonte, Yang J H, Li Y, Ma Q, Xie L W, Huang C, Fan H R, Zhao Z F and Xu C. 2019. In situ U-Th-Pb dating and Sr-Nd isotope analysis of bastnaesite by LA-(MC)-ICP-MS[J]. *Geostands and Geoanalytical Research*, 43: 543-565.
- Yuan Z X, Shi Z M, Bai G, Wu C Y, Chi R A and Li X Y. 1995. Rare earth element deposit in Maoniuping, Mianning, Sichuan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 2p(in Chinese).

附中文参考文献

- 李小渝, 何庆. 2000. 攀西地区稀土成矿带成矿地质特征[J]. *四川地*

- 质学报, 20(1): 50-56.
- 刘琰, 陈超, 舒小超, 郭东旭, 李自静, 赵海璇, 贾玉衡. 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[J]. 岩石学报, 33(7): 1978-2000.
- 蒲广平. 1993. 牦牛坪稀土矿床成矿模式及找矿方向探讨[J]. 四川地质学报, 13(1): 46-57.
- 施泽民, 李小渝. 1995. 德昌大陆槽稀土矿床的发现及其意义[J]. 四川地质学报, 15(3): 216-218.
- 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 陈文, 杨志明, 袁忠信, 谢玉玲, 费红霞, 尹淑苹, 刘英超, 李政, 李小渝. 2008a. 川西冕宁-德昌 REE 成矿带成矿年代学研究: 热液系统维系时限和构造控矿模型约束[J]. 矿床地质, 27(2): 177-187.
- 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 杨志明, 袁忠信, 王彦斌, 谢玉玲, 刘英超, 李政. 2008b. 四川大陆槽稀土矿床碳酸岩-英碱正长岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(3): 544-554.
- 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 谢玉玲, 杨志明, 魏家秀, 袁忠信. 2010. 川西大陆槽爆破角砾岩型稀土矿床成矿机制研究[J]. 矿床地质, 29(增刊): 285-286.
- 杨光明, 常诚, 左大华, 刘学良. 1998. 四川省德昌县 DL 稀土矿床成矿条件研究[M]. 武汉: 中国地质大学(武汉). 20-22.
- 袁忠信, 施泽民, 白鸽, 吴澄宇, 池汝安, 李小渝. 1995. 川西冕宁牦牛坪轻稀土矿床[M]. 北京: 地震出版社. 2 页.