

四川大陆槽稀土矿隐爆角砾岩中石英闪长岩的形成时代及其意义

杨伟^{1,2}, 夏小洪^{1,2}, 刘图强^{1,2}, 程龙³, 谢志远^{1,4}, 刘上荣⁴, 谭洪旗^{1,2}

(1. 四川省地质矿产(集团)有限公司, 四川 成都 610016; 2. 刘图强战略性矿产资源创新工作室, 四川 成都 610016; 3. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 4. 四川和地矿业发展有限公司, 四川 凉山 615500)

摘要: 四川德昌大陆槽稀土矿区广泛分布有隐爆角砾岩, 主要为石英闪长岩。为限制石英闪长岩的形成年龄, 本文开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究。结果显示, 石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (751.7 ± 4.6) Ma ($n=39$), 代表了其成岩年代为新元古代, 与扬子地块西缘和北缘大量的中酸性侵入体和火山岩具有相近的形成年龄。大陆槽隐爆角砾岩形成于地壳浅部, 为稀土矿床的形成提供了通道与有利的保存条件, 暗示大陆槽深部稀土找矿潜力大。

关键词: 德昌; 大陆槽; 石英闪长岩; 锆石; 地质意义

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.01.002

中图分类号: P597+.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 01-0008-08

引用格式: 杨伟, 夏小洪, 刘图强, 等. 四川大陆槽稀土矿隐爆角砾岩中石英闪长岩的形成时代及其意义[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(1): 8-15+29.

YANG Wei, XIA Xiaohong, LIU Tuqiang, et al. Formation age and its geological significance of quartz diorite from cryptoexplosive breccia in dalucao rare earth mine, sichuan province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(1): 8-15+29.

稀土是改造传统产业、发展新兴产业以及国防科技工业不可或缺的关键元素, 是具有特殊价值的国家战略资源。中国的稀土资源极为丰富, 是世界最大的稀土生产国和稀土资源国。其中, 约 98% 的中国稀土资源来自碳酸岩型稀土矿床^[1]。四川凉山州冕宁—德昌稀土成矿带是全国第二大碳酸岩型轻稀土聚集地, 南北长近 150 km, 宽约 50 km, 目前已发现冕宁牦牛坪超大型、德昌大陆槽大型稀土矿床, 以及郑家梁子、方家堡、碉楼山、里庄等中-大型稀土矿床^[2], 均分布在雅砻江近南北向断裂带、北北东向的哈哈断裂带及其次生的断裂带上。这些断裂带为稀土矿床的形

成提供了构造通道和储矿空间。本文在大陆槽稀土矿区中发现主要成分为石英闪长岩的隐爆角砾岩, 形成于地壳浅部, 在该稀土成矿带的其他矿床中尚未发现隐爆角砾岩。为深入研究该矿床的成因, 本文以石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年为基础, 研究结果对大陆槽矿区围岩的形成时代和演化具有重要意义。

1 地质背景

冕宁—德昌稀土成矿带位于青藏高原东部, 扬子克拉通西缘, 康滇地轴中南段。由于二叠纪峨眉山地幔柱活动, 扬子地块西缘形成了近南北

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 四川省科技厅项目 (2023ZDZX0005、2022ZHCG0124); 四川省自然资源厅项目 (KJ-2024-010)

作者简介: 杨伟 (1984-), 男, 高级工程师, 研究方向为地质调查与矿产勘查。

通信作者: 谭洪旗 (1984-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为地质调查与矿产勘查。

向展布的攀西古裂谷带，围绕这些断裂及其附近，分布有一系列新生代的走滑断裂，形成了碳酸岩型稀土、斑岩型 Cu-Mo 以及造山型 Au 矿床（图 1）^[2-3]。其中，碳酸岩型稀土主要与新生代碳酸岩-正长岩杂岩体有关。前人对稀土成矿带内氟碳铈矿、金云母、钠铁闪石、锆石等矿物开展了 U-Pb、Ar-Ar 定年，限制了攀西碳酸岩型稀土成矿带的成岩成矿年龄为 30~10 Ma^[4-10]。其中，大陆槽已发现两期稀土成矿作用（12~10 Ma 和 27~22 Ma），不同于牦牛坪、木洛寨和里庄仅有 26~22 Ma 的成矿作用^[4-10]。岩浆热液稀土成矿系统发育于大陆碰撞带从压扭向张扭转变过渡的构

造背景下，受新生代大规模走滑断裂的控制，这些断裂及其次生的拉张构造和张性裂隙带促进了含 REE 岩浆-热液系统的形成^[11]。

德昌县大陆槽稀土矿区位于德昌县城 225°方向 32 km 的茨达镇大陆槽村，由较厚大的矿脉与大量平行细脉带或细网脉带组成的不规则脉状体。矿脉与其围岩界线清楚，但细脉带与无矿围岩呈渐变过渡关系，无明显界线。全矿区圈定了大小矿体（脉）若干，I、III号矿体为主要矿体，其形态见图 2。I 号矿体产于正长岩与石英闪长岩的接触带，围岩为霓辉正长岩，平面形态呈不规则大透镜状。矿体总体倾向约 36°，倾角约

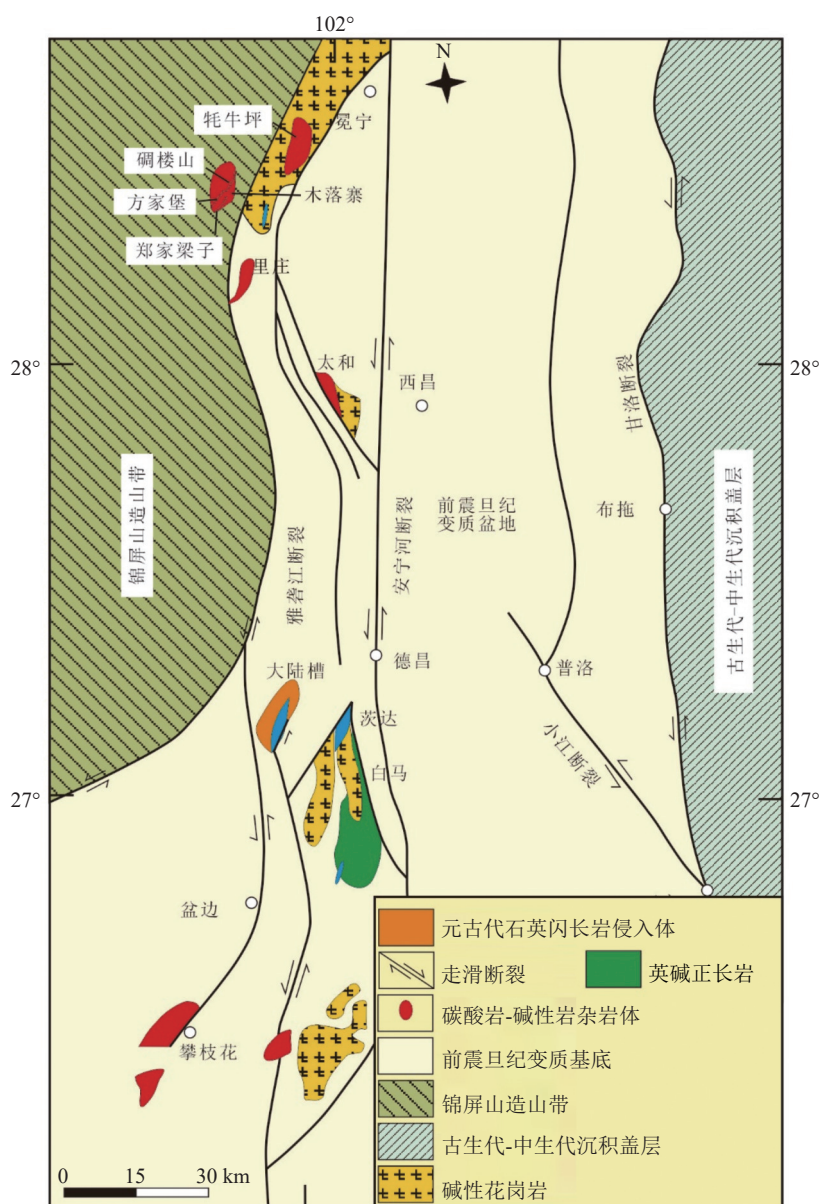


图 1 冕宁-德昌稀土成矿带地质略图^[2]

Fig.1 Geological sketch of Mianning - Dechang rare earth metallogenic belt^[2]

75°, 走向长度 450 m, 受张扭性裂隙控制, 局部产状变化较大; 出露宽度 80~180 m, 厚 55~142 m, 控制斜深 450 m; 矿体由厚大的矿脉及两侧的细网脉带组成, 碳酸盐化含霓辉石萤石锑重晶石型稀土矿石为大脉的核心, 两侧的细脉带为细网脉正长岩型稀土矿石或少量细网脉石英闪长岩型稀土矿石。III号矿体平面形态呈大的透镜状, 主要围岩为霓辉正长岩, 次为石英闪长岩; 矿体总体向南西倾, 倾角 58~63°, 平均倾角产状与矿化带

基本一致, 矿体控制长度 350 m, 东西宽 50~220 m; 矿体厚度 68.27~238.15 m, 平均厚度 129.65 m; 矿体呈隐伏、半隐伏状, 沿走向和倾向都具有复合膨大和分支尖灭的特征。

大陆槽稀土矿石中主要有氟碳铈镧矿, 伴生有铅、锑、钼、萤石等资源。矿石整体结构为土状结构, 以不等粒中细粒结构为主, 其次为自形一半自形—它形晶粒状结构、交代残余结构、隐晶质结构、鳞片变晶结构和包含结构^[12]。

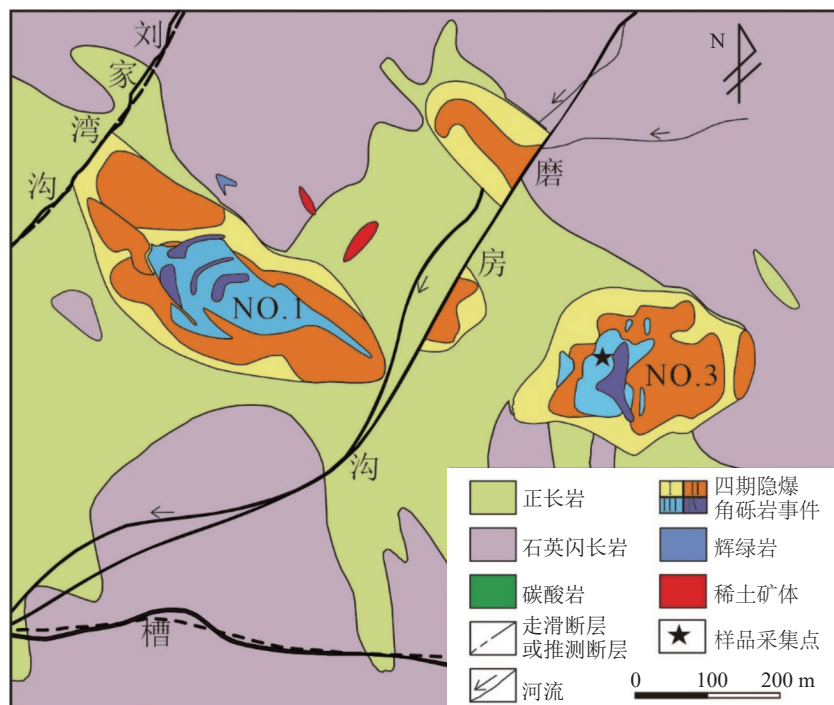


图2 德昌大陆槽稀土矿区地质图^[4]

Fig.2 Geological map of Dalucao rare earth mining area in Dechang region^[4]

2 样品采集和分析方法

2.1 样品采集及描述

DLC01 样品采于III号矿体的隐爆角砾岩 (图3), 角砾形状大小不一, 多呈棱角状—次棱角状, 砾一般为 3~10 cm, 个别达 20~30 cm 不等, 胶结物为岩屑、岩粉等。经鉴定, 样品 DLC01 的主要成分为石英闪长岩, 岩石呈浅灰绿色, 具细—中粒结构, 似层状构造; 主要矿物由中长石 (58%~60%)、普通角闪石 (19%~23%)、石英 (14%~16%)、黑云母 (2%~3%), 局部见纤闪石; 副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿、榍石、钛铁矿等。

2.2 分析方法

样品经破碎、分选, 双目镜下挑纯获得锆

石。锆石的阴极发光、显微结构照相、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年由西安拓航地质服务公司实验室完成。锆石 U-Pb 年龄测定用 RESOLUTION 193 nm 激光剥蚀系统和 7500a ICP-MS 共同完成, 仪器测试条件、参数及详细分析流程见文献^[13]。锆石测点同位素比值和元素含量计算采用 GLITTER 软件处理, 详细方法参见文献^[13]。年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 3.75 完成^[14]。

3 结果

锆石大多呈无色透明、自形-半自形、正方双锥状、柱状及半截锥状, 晶体长为 80~120 μm, 宽为 50~100 μm, 长宽比约为 4~8:5 (图4)。表1显示, 锆石稀土元素总量 (ΣREE) 为

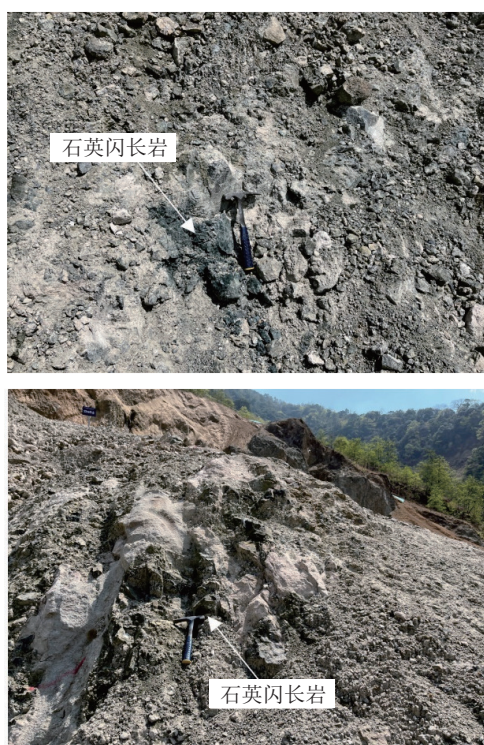


图3 隐爆角砾岩（石英闪长岩）的野外露头
Fig.3 Field outcrop of crypto explosive breccia (quartz diorite)

$134 \times 10^{-6} \sim 2\,347 \times 10^{-6}$, LREE 为 $6 \times 10^{-6} \sim 273 \times 10^{-6}$, HREE 为 $128 \times 10^{-6} \sim 2\,223 \times 10^{-6}$, Ce 强正异常 (Ce/Ce* 为 $1.20 \sim 1\,745.9$), Eu 中等负异常 (Eu/Eu* 为 $0.14 \sim 0.58$)。这些锆石的稀土元素球粒陨石标准化配分模式明显左倾, HREE 富集, 轻重稀土分馏不明显 (图4)。另外, CL 图像上表现出韵律环带, 无继承锆石核, 属典型岩浆锆石 (图4)。结合锆石的稀土元素含量、球粒陨石标准化配分模式和 CL 图像综合分析, 这些锆石均为岩浆锆石。

锆石年龄均小于 1 Ga, 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值, 分析结果见表2。另外, 谐和度低于 90% 的测年结果在成图过程中均舍弃。样品 DCL01 所分析的 40 个测点中, 除去 1 颗锆石谐和度低于 90%, 其余 39 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $(733 \pm 14 \sim 784 \pm 15)$ Ma (表2, 图5)。锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (751.0 ± 6.0) Ma ($n=39$, MSWD=0.31), Th 含量为 $39 \times 10^{-6} \sim 577 \times 10^{-6}$, U 含量为 $162 \times 10^{-6} \sim 565 \times 10^{-6}$, Th/U 为 $0.78 \sim 1.95$ 。锆石 Ti 温度计计算结果为 $636 \sim 782$ °C (平均温度 702 °C)。

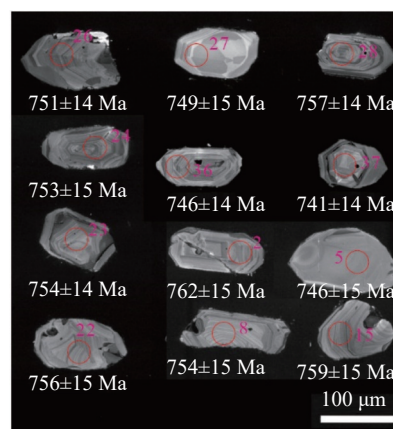
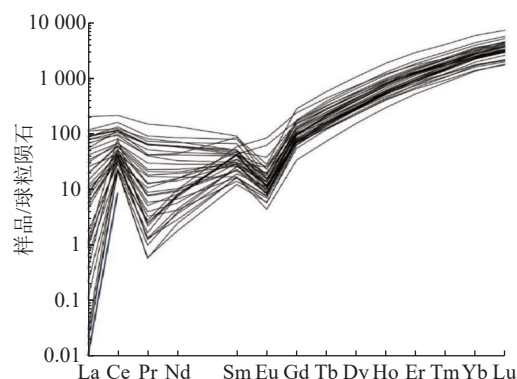


图4 大陆槽矿区 DLC01 样品的锆石稀土球粒陨石标准化配分图 (a)、CL 图像及对应锆石 U-Pb 年龄值 (b)

Fig.4 Zircon chondrite-normalized trace element diagrams (a), CL images and corresponding Zircon U-Pb ages of the DLC01 sample in the Dalucao mining (b)

4 讨论

扬子地块西缘康滇地轴已发现多处新元古代喷出和侵入岩, 被认为是了解新元古代 Rodinia 超大陆拼合和裂解的关键地区, 已发现大量与大陆槽石英闪长岩年龄相当的新元古代基性-酸性岩体, 如雪隆包杂岩体 (748 ± 7) Ma^[16]、康定杂岩 (751 Ma)^[17]、灯杆坪岩体 ($742 \sim 743$ Ma)^[18]、沙坝岩体 (752 Ma)^[19]、大渡口岩体 (746 Ma)^[20]、大田 (760 Ma)^[21]、昔街角闪二长闪长岩^[22], 明显早于同德石墨矿^[23] 的形成时代。田世洪等^[4] 报道了大陆槽石英闪长岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 764 Ma, 锆石 Hf 同位素变化范围为 $4.0 \sim 6.5$, 平均为 5.5 , 总体特征与林广春等^[19] 报道的川西新元古代基性岩墙特征一致, 认为川西大陆槽石英闪长岩岩浆起源于热流圈地幔, 可能为高温地幔柱部分熔融的产物。刘琰等^[20] 获得大陆槽石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (769.5 ± 8.7)

表 1 德昌大陆槽矿区 DLC01 样品的锆石的微量元素/ (×10 ⁻⁶)																								
Table 1 Zircon trace element data of the DLC01 sample in Dalucao mining area of the Dechang region																								
测点	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	L/H	La _N /Yb _N	δEu	δCe	
1	3.5	1.9	30.5	0.8	4.5	5.3	0.8	27.3	10.4	134.8	53.4	250	57	580	102	1 593	1 259	44	1215	0.04	0.00	0.17	6.2	
2	3.1	4.6	36.2	1.7	9.1	4.1	0.6	20.5	7.9	102.8	41.3	197	44	450	77	1 201	996	56	940	0.06	0.01	0.16	3.1	
3	4.2	1.7	25.1	0.6	3.2	2.5	0.3	12.9	5.1	68.8	28.9	147	36	404	76	905	812	33	779	0.04	0.00	0.15	6.3	
5	4.2	2.8	25.8	0.9	4.9	3.4	0.5	14.8	5.7	73.4	31.0	157	39	419	82	979	861	38	822	0.05	0.00	0.18	4.1	
6	11.6	1.3	20.4	0.4	2.7	3.5	0.6	17.5	6.2	76.3	29.8	134	30	294	53	869	670	29	641	0.05	0.00	0.18	6.9	
7	7.1	2.5	19.6	1.0	7.3	7.3	2.2	32.4	11.8	144.2	56.7	262	59	605	111	1 672	1 323	40	1 283	0.03	0.00	0.37	3.0	
8	4.4	9.9	41.4	2.9	13.4	4.4	0.5	14.5	5.3	71.4	30.4	154	37	402	82	942	868	72	796	0.09	0.02	0.17	1.9	
9	12.0	0.0	13.4	0.1	1.2	2.5	0.5	14.4	5.6	68.1	26.7	123	27	270	50	800	603	18	586	0.03	0.00	0.18	72.1	
10	2.7	6.1	26.1	1.7	7.8	2.6	0.3	7.0	2.8	39.1	16.9	87	21	229	46	528	493	45	449	0.10	0.02	0.17	2.0	
11	4.0	12.1	50.0	3.9	19.6	6.1	0.7	19.1	6.6	85.1	34.7	168	38	388	75	1 044	907	92	815	0.11	0.02	0.17	1.8	
12	13.3	1.1	23.9	0.3	2.0	2.2	0.4	13.2	5.3	73.6	31.3	157	37	401	79	973	828	30	798	0.04	0.00	0.18	10.0	
13	12.8	0.2	13.8	0.1	0.8	1.9	0.3	11.2	4.5	56.7	23.1	107	24	236	44	680	524	17	507	0.03	0.00	0.18	36.4	
14	4.0	21.0	82.2	7.0	32.8	10.2	0.9	26.9	9.2	112.3	45.2	214	48	483	92	1 350	1 185	154	1 031	0.15	0.03	0.15	1.7	
15	12.3	0.1	14.5	0.3	4.7	9.1	4.9	49.2	16.5	187.3	68.1	289	58	533	97	1 886	1 331	34	1 297	0.03	0.00	0.57	15.8	
16	7.8	1.3	24.0	0.5	3.9	4.6	1.5	25.4	9.2	113.2	44.4	204	43	427	79	1 301	981	36	946	0.04	0.00	0.34	7.3	
17	5.0	16.1	60.1	5.0	21.9	6.5	0.7	16.5	5.9	77.0	32.0	158	37	385	75	982	897	110	787	0.14	0.03	0.19	1.6	
18	11.4	0.0	13.2	0.1	1.8	4.0	0.8	20.7	7.2	85.5	32.1	144	30	297	55	944	692	20	672	0.03	0.00	0.22	42.5	
19	4.8	21.7	72.5	6.3	28.1	7.0	0.5	16.7	5.6	70.4	29.2	146	35	377	74	908	890	136	753	0.18	0.04	0.14	1.5	
20	5.5	21.6	69.1	6.1	27.3	6.5	0.6	14.1	4.7	61.0	24.9	126	31	332	66	783	791	131	660	0.20	0.05	0.20	1.4	
21	3.9	3.1	29.1	0.4	2.5	3.8	0.9	20.2	7.8	95.2	39.3	188	44	456	87	1 199	977	40	937	0.04	0.00	0.26	5.4	
22	4.7	0.0	21.9	0.1	2.1	3.9	1.2	20.8	7.5	99.3	40.5	201	48	518	104	1 278	1 068	29	1 039	0.03	0.00	0.32	52.4	
23	5.4	48.5	132.3	14.3	63.4	14.0	0.9	21.7	6.1	72.4	29.1	147	36	396	80	919	1 062	273	788	0.35	0.09	0.16	1.2	
24	4.1	7.2	42.1	2.2	10.8	4.2	0.5	15.4	5.6	75.2	31.5	156	37	400	79	969	868	67	801	0.08	0.01	0.16	2.6	
25	9.3	0.4	17.8	0.2	3.8	6.7	1.1	30.9	10.7	125.0	47.3	209	44	415	74	1 379	985	30	955	0.03	0.00	0.20	13.6	
26	4.2	4.6	37.9	1.2	6.7	4.5	0.7	20.4	7.8	102.6	43.3	214	51	542	108	1 344	1 145	56	1 089	0.05	0.01	0.18	3.8	
27	7.5	0.3	50.6	0.2	3.7	6.3	1.1	36.4	14.5	181.4	73.2	341	76	744	143	2 213	1 672	62	1 610	0.04	0.00	0.17	49.0	
28	12.6	0.0	14.2	0.2	3.6	6.6	3.6	35.2	12.0	138.2	51.1	217	44	416	75	1 417	1 017	28	989	0.03	0.00	0.58	26.0	
29	12.3	0.2	21.1	0.1	1.4	2.5	0.4	19.0	8.1	108.9	44.9	217	49	489	95	1 338	1 057	26	1 031	0.03	0.00	0.14	28.9	
30	5.8	27.9	99.0	8.7	40.0	12.3	1.3	30.8	10.3	124.6	50.2	243	56	574	116	1 547	1 394	189	1 205	0.16	0.03	0.20	1.5	
31	3.5	21.1	70.3	6.0	28.5	7.4	0.9	24.6	8.6	109.4	44.7	209	47	464	85	1 313	1 127	134	993	0.14	0.03	0.18	1.5	
32	11.5	26.6	76.3	7.8	33.7	7.8	0.7	14.6	4.7	57.2	23.7	112	27	287	55	699	734	153	581	0.26	0.07	0.19	1.3	
33	2.8	19.0	57.6	3.8	15.5	4.7	0.7	14.8	5.7	72.9	30.8	154	37	398	80	951	895	101	794	0.13	0.03	0.24	1.6	
34	6.3	3.4	32.1	1.2	7.4	5.4	1.0	22.7	8.3	109.3	46.7	230	55	572	115	1 453	1 210	51	1 159	0.04	0.00	0.24	3.8	
35	4.2	18.8	65.0	6.1	27.8	8.0	0.8	20.8	7.1	89.1	37.4	186	44	465	92	1 153	1 068	126	942	0.13	0.03	0.18	1.5	
36	14.5	0.2	24.6	0.1	1.7	2.9	0.6	15.0	5.6	75.5	33.0	169	43	483	99	1 060	954	30	923	0.03	0.00	0.24	37.2	
37	3.3	8.1	37.6	2.0	9.6	4.8	0.8	19.6	7.9	98.6	41.0	196	46	492	94	1 248	1 058	63	995	0.06	0.01	0.21	2.2	
38	295.1	12.9	70.8	4.0	20.6	13.3	1.6	58.1	21.6	268.3	105.6	481	103	1 000	185	3 008	2 347	123	2 223	0.06	0.01	0.15	2.4	
39	4.8	0.1	33.1	0.2	3.4	6.5	1.5	34.5	13.3	165.2	64.8	303	68	668	131	1 979	1 493	45	1 448	0.03	0.00	0.25	37.8	
40	3.4	2.1	28.1	0.7	4.3	3.4	0.5	15.9	6.1	80.9	34.2	169	41	425	85	1 050	895	39	856	0.05	0.00	0.17	5.5	

Ma。本文获得大陆槽稀土矿床中隐爆角砾岩中石英闪长岩的成岩年龄为 (751.7±4.6) Ma (n=39) , 与前人^[4,20] 在该区获得的石英闪长岩年龄在误差范围内基本一致, 代表了其成岩时代为新元古代。锆石 Ti 温度计计算结果为 636~782 ℃ (平均温度 702 ℃) , 代表石英闪长岩岩浆的最高温度,

表 2 德昌大陆槽矿区 DLC01 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic age data of the DLC01 sample in Dalucao mining of the Dechang region

测点	Th U		Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma						谐和率/%	T/℃
	$\times 10^{-6}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
1	234	256	0.91	0.065 56	0.001 59	1.119 47	0.026 94	0.123 86	0.002 51	792	50	763	13	753	14	99	657
2	130	213	0.61	0.065 45	0.001 67	1.131 72	0.028 53	0.125 42	0.002 56	789	53	769	14	762	15	99	646
3	149	189	0.79	0.064 68	0.001 59	1.099 78	0.026 78	0.123 33	0.002 50	764	51	753	13	750	14	100	670
4	39	117	0.33	0.063 97	0.002 21	1.082 76	0.036 72	0.122 76	0.002 62	741	71	745	18	746	15	100	570
5	156	187	0.83	0.064 98	0.001 62	1.123 19	0.027 64	0.125 36	0.002 55	774	51	765	13	761	15	100	671
6	78	107	0.73	0.064 45	0.001 78	1.097 41	0.029 95	0.123 49	0.002 54	757	57	752	15	751	15	100	760
7	130	129	1.01	0.064 02	0.001 68	1.095 68	0.028 39	0.124 13	0.002 54	742	55	751	14	754	15	100	715
8	131	165	0.79	0.064 97	0.001 64	1.157 95	0.028 85	0.129 27	0.002 63	773	52	781	14	784	15	100	675
9	49	63	0.78	0.064 49	0.002 07	1.104 73	0.034 98	0.124 24	0.002 62	758	66	756	17	755	15	100	764
10	46	82	0.56	0.065 24	0.002 41	1.109 57	0.040 31	0.123 36	0.002 68	782	76	758	19	750	15	99	636
11	124	160	0.78	0.064 29	0.001 64	1.103 83	0.027 87	0.124 53	0.002 54	751	53	755	13	757	15	100	666
12	140	189	0.74	0.065 68	0.001 72	1.104 38	0.028 58	0.121 95	0.002 49	796	54	756	14	742	14	98	774
13	48	69	0.70	0.064 94	0.002 03	1.113 19	0.034 25	0.124 32	0.002 61	773	64	760	16	755	15	99	770
14	227	241	0.94	0.065 82	0.001 63	1.134 35	0.027 82	0.124 98	0.002 54	801	51	770	13	759	15	99	667
15	102	80	1.27	0.065 91	0.001 99	1.122 23	0.033 36	0.123 49	0.002 58	803	62	764	16	751	15	98	766
16	178	173	1.03	0.067 09	0.001 72	1.146 89	0.029 10	0.123 98	0.002 53	841	53	776	14	753	15	97	723
17	172	201	0.85	0.064 21	0.001 62	1.098 08	0.027 30	0.12402	0.002 52	749	52	752	13	754	14	100	685
18	60	69	0.87	0.063 04	0.002 10	1.074 84	0.035 30	0.123 66	0.002 62	709	69	741	17	752	15	101	758
19	189	216	0.87	0.066 26	0.001 63	1.132 40	0.027 49	0.123 94	0.002 52	815	51	769	13	753	14	98	681
20	134	175	0.76	0.064 11	0.001 63	1.099 50	0.027 69	0.124 39	0.002 53	745	53	753	13	756	15	100	692
21	361	370	0.98	0.095 57	0.002 60	1.452 09	0.038 74	0.110 19	0.002 29	1 539	50	911	16	674	13	74	664
22	218	228	0.95	0.066 84	0.001 75	1.142 44	0.029 49	0.123 95	0.002 53	833	54	774	14	753	15	97	679
23	124	162	0.77	0.063 59	0.001 71	1.100 62	0.029 14	0.125 53	0.002 57	728	56	754	14	762	15	101	692
24	216	231	0.93	0.064 46	0.001 57	1.097 69	0.026 40	0.123 49	0.002 50	757	50	752	13	751	14	100	668
25	95	99	0.96	0.066 43	0.001 93	1.128 11	0.032 24	0.123 16	0.002 56	820	59	767	15	749	15	98	739
26	275	271	1.01	0.065 11	0.001 55	1.118 18	0.026 27	0.124 55	0.002 52	778	49	762	13	757	14	99	670
27	570	412	1.38	0.065 25	0.001 84	1.105 31	0.030 77	0.122 85	0.002 54	782	58	756	15	747	15	99	719
28	79	75	1.05	0.067 39	0.002 22	1.148 89	0.037 20	0.123 64	0.002 62	850	67	777	18	752	15	97	768
29	222	345	0.64	0.066 52	0.001 61	1.123 84	0.026 86	0.122 51	0.002 48	823	50	765	13	745	14	97	765
30	486	314	1.55	0.067 76	0.001 90	1.138 84	0.031 49	0.121 89	0.002 52	861	57	772	15	741	14	96	697
31	138	202	0.68	0.065 43	0.001 79	1.097 68	0.029 53	0.121 67	0.002 50	788	56	752	14	740	14	98	655
32	97	131	0.74	0.067 67	0.001 91	1.154 97	0.032 18	0.123 78	0.002 56	858	58	780	15	752	15	96	759
33	187	213	0.88	0.064 21	0.001 62	1.086 63	0.027 09	0.122 73	0.002 49	749	52	747	13	746	14	100	639
34	309	280	1.10	0.063 56	0.001 79	1.068 31	0.029 63	0.121 89	0.002 51	727	59	738	15	741	14	100	705
35	179	195	0.92	0.066 46	0.001 89	1.135 19	0.031 76	0.123 87	0.002 56	821	58	770	15	753	15	98	670
36	294	329	0.89	0.064 12	0.001 50	1.094 77	0.025 32	0.123 82	0.002 49	746	49	751	12	753	14	100	782
37	152	176	0.87	0.066 34	0.001 76	1.135 02	0.029 61	0.124 07	0.002 54	817	54	770	14	754	15	98	651
38	577	565	1.02	0.064 48	0.001 43	1.071 42	0.023 57	0.120 49	0.002 42	758	46	739	12	733	14	99	1208
39	413	275	1.50	0.064 00	0.001 92	1.082 22	0.031 89	0.122 62	0.002 55	742	62	745	16	746	15	100	681
40	206	196	1.05	0.064 40	0.001 66	1.093 29	0.027 83	0.123 10	0.002 51	755	54	750	14	748	14	100	654

注：T（℃）为锆石Ti温度计，参见文献[15]。

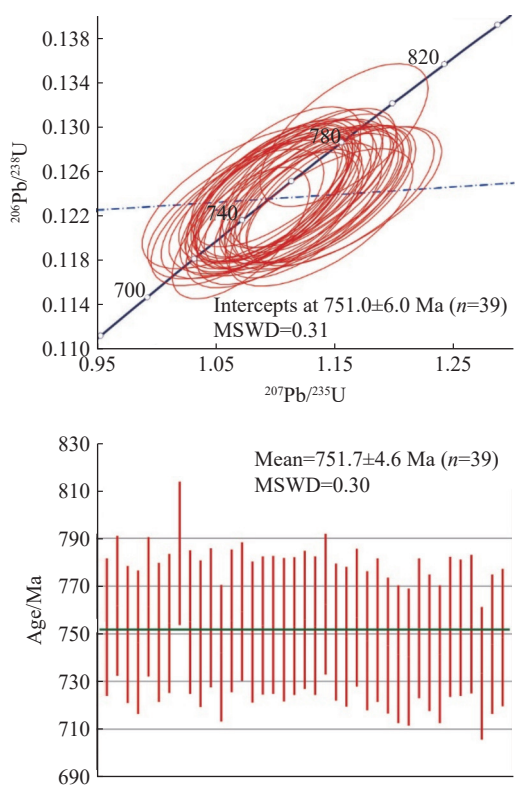


图5 德昌大陆槽矿区 DLC01 样品的锆石谐和图 (a) 和加权平均值 (b)

Fig.5 Zircon U-Pb Concordia diagram (a) and weighted average age of the sample DLC01 in Dalucao mining of Dechang region (b)

明显低于 I 和 A 型花岗岩的最高温度，反应其形成于低温岩浆作用。综上，扬子地块西缘与康滇地轴存在一期约 770~740 Ma 的新元古代岩浆活动。

结合前人获得大陆槽有两期稀土成矿作用（10~12 Ma 和 22~27 Ma），我们认为该区新元古代岩浆活动与稀土成矿没有直接联系，仅仅提供了热液通道和沉淀的场所。田世洪等^[21]对角砾岩体的形成与稀土矿床的成因机制进行了讨论，认为流体减压沸腾及古大气水的混入是形成大陆槽爆破角砾岩型稀土矿床成矿的主要原因。其中，隐爆角砾岩为稀土矿床提供了通道与保存条件，其形成是由于岩浆熔体物理化学性质的改变，如压力减小、温度降低等，顺大陆槽断裂，残余熔体在浅地表发生“二次沸腾”，产生隐爆，使熔体顶部围岩震碎、塌陷，形成角砾和通道。因此，上部以围岩角砾成分为主；中部为过渡带，出现复成分角砾岩（围岩角砾、花岗质角砾）；下部产出角砾和胶结物成分相同的角砾

岩。本文中隐爆石英闪长岩角砾属于上部围岩。除大陆槽稀土矿床外，本成矿带尚未发现类似的隐爆角砾岩。隐爆角砾岩形成深度浅，大陆槽稀土矿床可能代表了近地表以浅的稀土矿床，其他稀土矿床的隐爆角砾岩可能遭受了剥蚀破坏；另一方面，暗示了大陆槽稀土矿床深部可能存在与牦牛坪稀土矿床类似的大脉矿体，找矿潜力大。

5 结 论

(1) 四川德昌大陆槽稀土矿床中石英闪长岩角砾的成岩年龄为 (751.7±4.6) Ma (n=39, MSWD=0.31)，代表了其成岩时代为新元古代，与扬子地块西缘和北缘大量的中酸性侵入体和火山岩具有相近的形成年龄。

(2) 大陆槽稀土矿床中石英闪长岩的岩浆温度为 636~782 °C（平均温度 702 °C），锆石的稀土元素球粒陨石标准化配分模式明显左倾，HREE 富集，轻重稀土分馏不明显。

(3) 大陆槽矿区中隐爆角砾岩的发现，不仅暗示了该成矿带上大部分稀土矿体遭受了剥蚀破坏，而且暗示了大陆槽深部具有较好的找矿潜力。

参考文献:

- [1] Xie Y L, Verplanck P, Hou Z Q, et al. Rare earth element deposits in China: a review and some new understanding[J]. Soc Econ Geol Spec Publ, 2019, 22:509-552.
- [2] 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 等. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2):145-176.
- [3] 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 等. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2):145-176.
- [4] HOU Z Q, TIAN S H, XIE Y L, et al. Mianning-Dechang Himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in Eastern Indo-Asian collision zone, Southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(2):145-176.
- [5] 谭洪旗, 罗丽萍, 周家云, 等. 川西锦屏地区青纳金矿床的发现及地质意义[J]. 科学技术与工程, 2016, 21(16):12-19.
- [6] TAN H Q, LUO L P, ZHOU J Y, et al. Discovery of Qingna gold deposit in Jinping area and its geological significance, Western Sichuan[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 21(16):12-19.
- [7] 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 等. 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, 2008, 24(33):544-554.

TIAN S H, HOU Z Q, YANG Z S, et al. 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*, 2008, 24(33):544-554.

[5] 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 等. 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*, 2008, 27(2):177-187.

TIAN S H, HOU Z Q, YANG Z S, et al. Geochronology of REE deposits in Mianning-Dechang REE metallogenic belt: constraints on duration of hydrothermal activities and tectonic model for carbonatite-alkalic complexes in southwestern Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(2):177-187.

[6] Liu Y, Hou Z Q, Tian S H, et al. 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*, 2015, 64:554-568.

[7] Liu Y and Hou Z Q. A synthesis of mineralization styles with an integrated genetic model of carbonatite-syenite-hosted REE deposits in the Cenozoic Mianning-Dechang REE metallogenic belt, the eastern Tibetan Plateau, southwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 137:35-79.

[8] Ling X X, Li Q L, Liu Y, et al. 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*, 2016, 31(8):1680-1687.

[9] Liu Y, Zhu, Z M, Chen C, et al. 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*, 2015, 71:437-456.

[10] Liu Y, Chen Z Y, Yang Z S, et al. Mineralogical and geochemical studies of brecciated ores in the Dalucao REE deposit, Sichuan Province, southwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 70:613-636.

[11] Hou Z Q and Cook N J. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue[J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36(1-3):2-24.

[12] 朱志敏, 罗丽萍, 曾令熙. 四川德昌大陆槽稀土矿工艺矿物学[J]. *矿产综合利用*, 2016, 37(5):76-79.

ZHU Z M, LUO L P, ZENG L X. The process mineralogy of the Dalucao REE deposit in the Sichuan Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016, 37(5):76-79.

[13] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and

trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Geoanalytical and Geostandard Research*, 2004(28):353-370.

[14] Ludwig, K. R. User's Manual for isotoplot 3.75: a geochronological toolkit for microsoft excel[M]. *Berkeley Geochronol. Cent. Spec. Publ.*, 2012(5), 1-75.

[15] Ferry J M, Watson E B. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007(154):429-437.

[16] Zhou M F, Yan D P, Wang C L, et al. Subduction-related Origin of the 750 Ma Xuelongbao Adakitic Complex (Sichuan Province, China): implications for the tectonic setting of the giant neoproterozoic Magmatic Event in South China[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2006, 248:286-300.

[17] Zou H, Bagas L, Li X Y, et al. Origin and evolution of the Neoproterozoic Dengganping Granitic Complex in the western margin of the Yangtze Block, SW China: implications for breakup of Rodina Supercontinent[J]. *Lithos*, 2020, 105602.

[18] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. *Precambrian Res*, 2003, 122:8-109.

[19] 林广春, 李献华, 李武显. 川西新元古代基性岩墙群的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd-Hf 同位素地球化学: 岩石成因与构造意义[J]. *中国科学 (D 辑)*: 2006, 36(7): 630-645.

LIN G C, LI X H, LI W X. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd-Hf isotopic study of Neoproterozoic basic dyke swarms in western Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance[J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 50(1): 1-16.

[20] 刘琰, 陈超, 舒小超, 等. 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*, 2017, 33(7):1978-2000.

LIU Y, CHEN C, SHU X C, et al. 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*, 2017, 33(7):1978-2000.

[21] 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 等. 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*, 2010, 29(Z):285-286.

TIAN S H, HOU Z Q, YANG Z S, et al. Study on metallogenic mechanism of western Sichuan continental trough blasting breccia type rare earth deposit[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(Z):285-286.

(下转第 29 页)

Abstract: The Mengnuo Pb-Zn deposit is a large Pb-Zn one in the Pb-Zn-Cu-Fe-Hg-Sb-As-Au metallogenic belt of Baoshan (block). There are different views on the genesis of the deposit, such as sedimentary-reworked type, exhalative sedimentary type (SEDEX) and hydrothermal type deposit (MVT). In this paper, the fluid inclusions of calcite, quartz, barite and sphalerite in Mengnuo lead-zinc deposit are studied to explore the source of the ore-forming fluid and the genesis of the deposit. The results show that the homogenization temperature of the whole metallogenic period of the deposit obeys the normal distribution, and the mode is $170 \sim 280^{\circ}\text{C}$, which is medium and low temperature. The salinity of the ore-forming fluid is $4.03\% \sim 12.73\%$ NaCl, which belongs to the low salinity unsaturated ore-forming fluid. The fluid density of the whole metallogenic period is mainly $0.778 \sim 0.978 \text{ g/cm}^3$, which shows medium density characteristics. The ore-forming fluid is low-salinity and medium-density one with CO_2 and H_2O as the main components. Combined with the study of geological characteristics and isotopic geochemical characteristics of the deposit, it is considered that the Mengnuo lead-zinc deposit should be a medium-low temperature hydrothermal lead-zinc deposit related to intrusive magmatic geology.

Keywords: Fluid inclusions; Ore-forming fluids; Medium-low temperature hydrothermal type; Mengnuo lead-zinc deposit; Western Yunnan

////////////////////////////////////
(上接第 15 页)

[22] 刘治成, 郑梦天, 郭宇衡, 等. 川南攀西地区茅坪石墨矿地球化学特征及成矿时代[J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(1):73-84.

LIU Z C, ZHENG M T, GUO Y H, et al. Geochemical characteristics and metallogenic age of the Maoping graphite deposit in the Panxi Area, Southern Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(1):73-84.

[23] 陈超, 孔德才, 田小林, 等. 四川省同德石墨矿床地球化学特征及 Re-Os 同位素定年[J]. *矿产综合利用*, 2023(1):88-98.

CHEN C, KONG D C, TIAN X L, et al. Geochemical characteristics and Re-Os isotopic dating of Tongde graphite deposit, Sichuan Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(1):88-98.

Formation Age and its Geological Significance of Quartz Diorite from Cryptoexplosive Breccia in Dalucao Rare Earth Mine, Sichuan Province

YANG Wei^{1,2}, XIA Xiaohong^{1,2}, LIU Tuqiang^{1,2}, CHENG Long³, XIE Zhiyuan^{1,4},
LIU Shangrong⁴, TAN Hongqi^{1,2}

(1.Sichuan Geological and Mineral Resources Group Co., Ltd., Chengdu 610016, Sichuan, China; 2.Liu Tuqiang Strategic Mineral Resources Innovation Studio, Chengdu 610016, Sichuan, China; 3.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu 610041, Sichuan, China; 4.Sichuan Hedi Mining Development Co., Ltd., Liangshan 615500, Sichuan, China)

Abstract: To limit the diagenetic age of quartz diorite in the crypto-explosion breccia of the Dechang Dalucao in Sichuan Province, LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology was carried out. The results show that the LA-ICP-MS U-Pb age of the Dalucao quartz diorite zircon is $(751.7 \pm 4.6) \text{ Ma}$ ($n=39$), indicating that the diagenetic age is Neoproterozoic, which is similar to the formation age of a large number of medium acid intrusions and volcanic rocks in the western and northern margins of the Yangtze Block. The Dalucao crypto-explosion breccia was formed in the shallow part of the crust, which provided a channel and favorable preservation conditions for the formation of rare earth deposits, suggesting that the deep part of the Dalucao has great potential for rare earth prospecting.

Keywords: Dechang; Dalucao; Quartz diorite; Zircon; Geological significance