

扬子陆块西缘云南黎溪地区约 1.5 Ga 变辉长岩与 Columbia 超大陆裂解

宁括步¹, 任光明¹, 邓奇¹, 林仕良¹, 罗钢鏞²

NING Kuobu¹, REN Guangming¹, DENG Qi¹, LIN Shiliang¹, LUO Gangbeng²

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

2. 成都理工大学, 四川 成都 610059

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要: 扬子陆块西缘黎溪—菜子园—通安地区前寒武纪地质体分布广泛, 是探讨扬子陆块前寒武纪地质演化的重要载体。对会理黎溪地区变辉长岩开展岩石学、全岩地球化学及锆石 U-Pb 定年研究。结果显示, 黎溪变辉长岩形成于 1508 ± 21 Ma; 在岩石地球化学组成上, 它们属于亚碱性拉斑岩石系列, 总体上略微富集轻稀土元素, 高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 等无明显亏损, 大离子亲石元素 Ba、Sr 等不同程度富集。通过岩石成因分析认为, 岩浆在上升过程中经历了一定程度的分离结晶作用, 但并未受到明显的地壳混染, 母岩浆可能来自软流圈地幔。地球化学和区域地质特征综合分析表明, 黎溪变辉长岩与富集洋中脊型玄武岩的地球化学特征相似, 可能形成于洋中脊及附近的海山环境, 是 Columbia 超大陆裂解在扬子陆块的响应。

关键词: 扬子陆块; 辉长岩; 中元古代; Columbia 超大陆; 地质年代学; 地球化学

中图分类号: P534.3; P588.12⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)11-1933-10

Ning K B, Ren G M, Deng Q, Lin S L, Luo G B. The 1.5 Ga metamorphic gabbro at the Lixi area, Yunnan Province in the western margin of the Yangtze Block: Implications for the breakup of the Columbia supercontinent. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1933-1942

Abstract: Precambrian strata are widely distributed in the Lixi-Caiziyan-Tong'an area, which is an important window to study Precambrian geological evolution of the western margin of the Yangtze Block. Petrology, whole-rock geochemistry and zircon U-Pb chronology of metamorphic gabbro in the Lixi area of Huili were studied. The results show that Lixi metamorphic gabbro was formed at 1508 ± 21 Ma. In terms of petrogeochemical composition, it belongs to the subalkaline tholeiitic series, and is slightly enriched in light rare earth elements (LREE) on the whole, with no obvious depletion of high field strength elements such as Nb, Ta, Zr and Hf. Under the influence of later weathering, large ionic lithophile elements such as Ba, Sr incompatible elements are enriched in varying degrees. According to the petrogenesis analysis, the magma experienced a certain degree of separation and crystallization during the ascent, but was not obviously contaminated by the crust, and the mother magma might have come from the depleted asthenosphere mantle. The comprehensive analysis of geochemical and regional geological characteristics shows that the geochemical characteristics of Lixi metamorphic gabbro are similar to the E-MORB basalt, which might be formed in mid-ocean ridges or nearby seamount environment as a response to the breakup of Columbia supercontinent in the Yangtze Block.

Key words: Yangtze Block; gabbro; Mesoproterozoic; geochemistry; Columbia supercontinent

收稿日期: 2021-05-23; **修订日期:** 2021-09-12

资助项目: 中国地质调查局项目《扬子陆块攀枝花—玉溪地区与罗平生物群区域地质调查》(编号: DD20190054)、四川省科技计划项目《四川会理地区中元古代镁铁-超镁铁质岩成因及其构造意义》(编号: 2019YJ0270)、国家自然科学基金项目《扬子北缘中元古代神农架群和打鼓石群的沉积序列、构造属性及对比研究》(批准号: 41772115)

作者简介: 宁括步(1987-), 男, 硕士, 工程师, 从事前寒武纪地质学研究。E-mail: kuobuning@163.com

图1 扬子陆块西缘元古宙地层分布图(a,b)及研究区地质简图(c)(a,b图据参考文献[17]修改;年龄数据据参考文献[1-16],绿色字体为基性岩年龄,红色字体代表花岗岩质岩石年龄,蓝色字体为碎屑锆石年龄)

Fig. 1 Distribution of Proterozoic strata in the western Yangtze Block(a,b) and simplified geological map of the study area (c)

时,部分学者根据岩浆岩年龄,对通安组、河口群、东川群等相关地层时限进行了约束^[12-13],但是,区内有关约 1.5 Ga 岩浆活动记录的报道较少,仅报道有工区东侧竹箐乡辉长岩^[11,14]、通安组四段及东川群黑山组内凝灰质岩石碎屑锆石年龄^[12-13]。

本文基于详实的野外地质调查,以黎溪镇东侧河口群出露的变质辉长岩为研究对象,对其开展了岩石学、年代学及地球化学研究,探讨岩石成因及构造意义,为扬子陆块西缘中元古代构造演化研究提供新的年代学、地球化学依据。

1 区域地质概况及样品特征

研究区位于扬子陆块西缘会理县黎溪镇,大地构造位置上处于扬子陆块西缘“康滇古陆”(康滇基底断隆带)中部。区内地质构造错综复杂,前南华系基底岩系及岩浆岩广泛分布,岩浆岩类型多样且时间跨度大,从超铁镁质—酸性岩,元古宙—古生代均有不同程度发育,尤以辉长—辉绿质岩石分布最广泛。

据 1:20 万会理幅区域地质调查成果^①,研究

区出露的前寒武纪地质单元主要包括河口群、通安组(群)和会理群力马河组。其中,河口群主要岩性为云母石英片岩、石榴子石云母片岩,炭质千枚岩;通安组(群)岩性主要为具复理石沉积的砂泥质板岩、大理岩,局部夹火山岩;会理群力马河组以砂泥质板岩夹厚层状石英岩为主(图 1-c)。

样品采自会理县黎溪镇北东方向约 3 km 处,地理坐标为东经 102° 00′31″、北纬 26° 21′33″(图 1-c),选择样品 19HQ01-TW3 进行锆石 U-Pb 同位素定年,同时对采集的 5 件岩石样品进行全岩主量、微量元素测试。样品围岩为河口群长冲组炭质千枚岩夹石榴子石片岩。野外调查发现,变辉长岩岩体在空间上呈构造透镜体状分布,与围岩界面处构造剪切特征明显,劈理、揉皱、片理化等构造变形特征明显强于其内部,界面处围岩无烘烤及岩体侵入形成的蚀变矿化特征,且多见断层泥及擦痕(图 2),因而判定其与围岩应为断层接触关系。该变辉长岩风化色为黄褐色,新鲜色呈灰绿色,岩石风化较严重,片理化特征明显,中—粗粒结构,片状

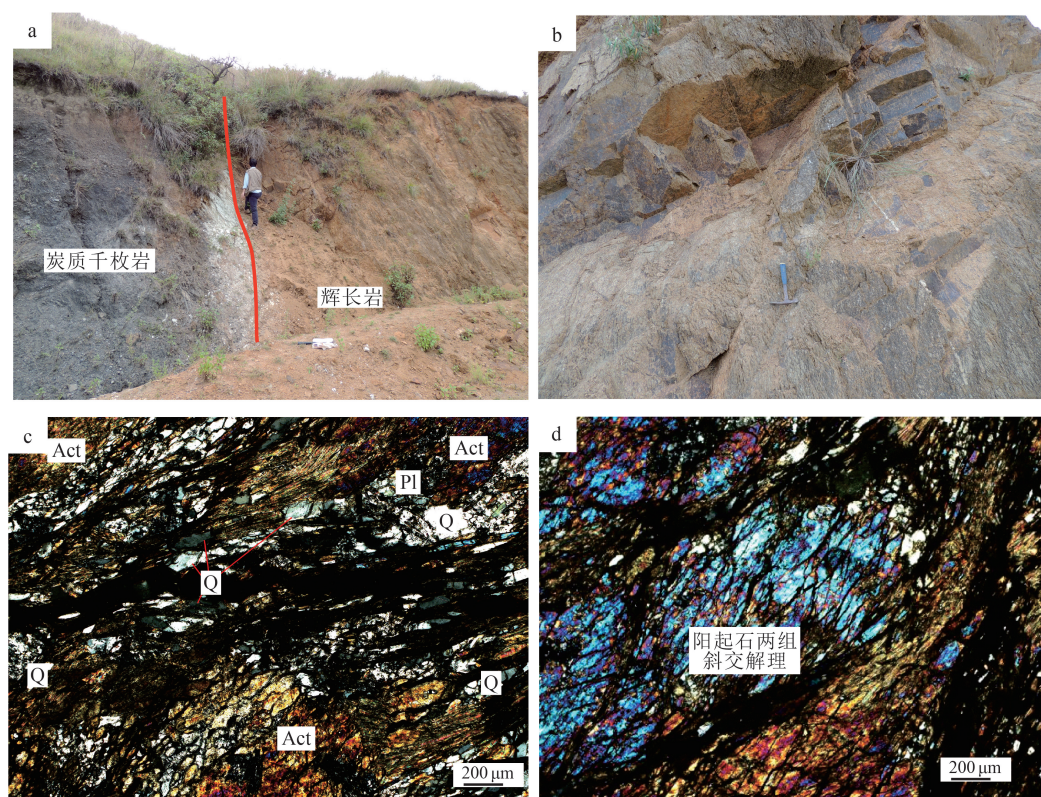


图 2 黎溪变辉长岩样品野外露头(a,b)及显微镜下特征(c,d)

Fig. 2 Field outcrops (a,b) and microscopic photographs (c,d) of metamorphic gabbro in the Lixi area

Q—石英;Pl—斜长石;Act—阳起石

构造,主要由阳起石(50%)+绢云母(15%)+石英(15%)+斜长石(10%)组成。从变质岩原岩恢复分析,这种矿物共生组合由于富含阳起石,原岩应为富含铁镁质的基性岩。另外,锆石形态特征也进一步印证了其原岩应为基性岩浆岩的判断。镜下鉴定时样品中的石英局部表现出明显重结晶三联点,且地球化学分析数据显示,所有样品的 SiO_2 含量均在45%左右,说明样品中的石英主体应为变质作用过程中原岩中的硅质析出后重新结晶而成。因此,结合样品野外宏观特征、镜下特征、岩石地球化学分析数据、锆石形态特征等因素综合判断,样品原岩应为辉长岩。阳起石:正中突起,浅绿-黄绿多色性,以片状为主,少量柱状,部分纵切面见 56° 闪石式节理,干涉色为一级橙-二级蓝绿;绢云母:毛发状、束状,干涉色较鲜艳,多为二级-三级干涉色;石英:他形粒状和片状,局部可见明显的变质重结晶三联点;斜长石:干涉色一级灰白,可见一组完全解理和聚片双晶。

2 测试方法

样品 19HQ01-TW3 全岩主量、微量元素均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。主量元素

利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成;微量元素含量采用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成;详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度见参考文献[18]。

样品锆石 U-Pb 同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司分析完成。岩石样品处理流程主要包括破碎、淘洗、重液分离及电磁分离,后在双目镜下挑选晶形完好、具有一定代表性的锆石颗粒。将所挑选锆石粘在树脂台上,进行打磨抛光并制成样靶,然后对锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)图像分析(图3),确定锆石的内部结构和成因,以选取最佳的待测锆石部位。利用 LA-ICP-MS 进行测定,GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPEX-Pro102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent7700e,分析的激光束斑直径为 32 μm ,每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号,详细的仪器参数和分析流程见参考文献[19]。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学

选择 5 件变辉长岩样品进行主量和微量元素分

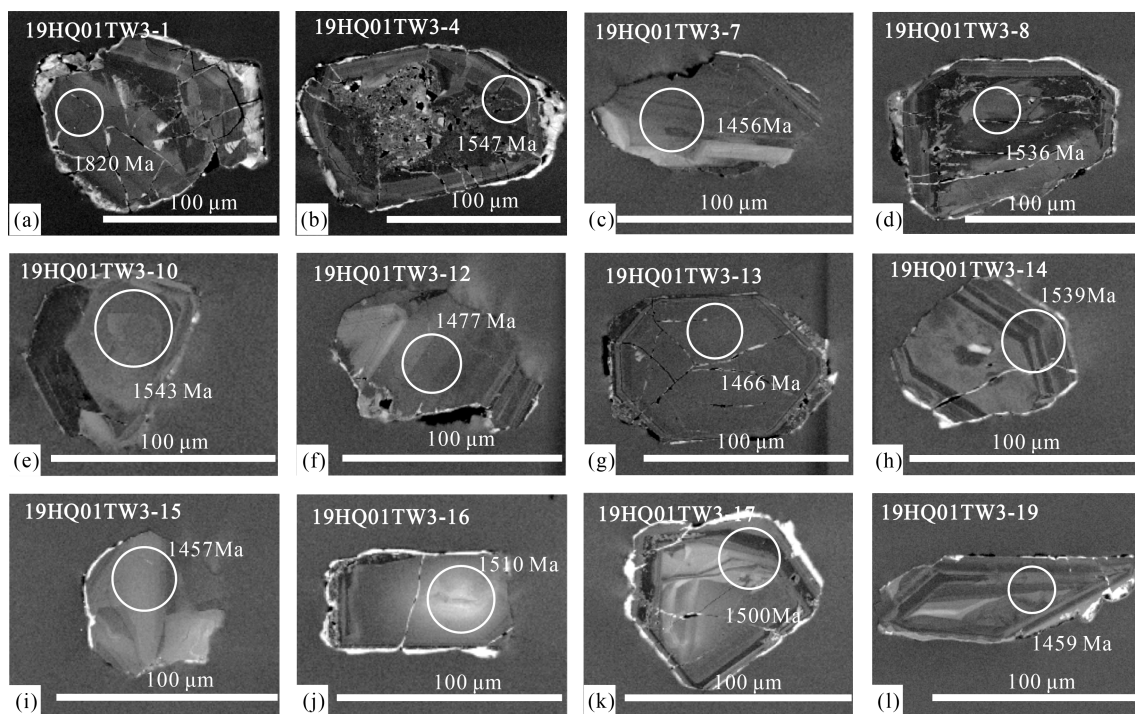


图3 黎溪变辉长岩锆石阴极发光(CL)图像和锆石 U-Pb 年龄
Fig. 3 CL images and zircon U-Pb ages of the Lixi metamorphic gabbro

析,分析结果见表 1。从表 1 可以看出, SiO₂ 含量变化于 46.01% ~ 47.38% 之间, 所有样品的 TiO₂ (1.24% ~ 1.35%) 和 P₂O₅ (0.14% ~ 0.16%) 含量较低, MgO (6.27% ~ 6.72%)、Al₂O₃ (16.75% ~ 16.89%) 和 TFeO (16.53% ~ 17.64%) 含量较高; LOI (烧失量) 偏高 (3.63% ~ 4.42%), 表明岩石受到变质作用的影响, 因此大离子亲石元素 (K、Na、Rb、Sr、Cs 等) 在蚀变过程中可能发生了迁移, 所以本文主要依据高场强元素和稀土元素 (REE) 等不活泼元素对样品进行岩石学分类和成因讨论, 同时在使用地球化学判别图解时, 首先去除烧失量对主量元素重新进行了计算。在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 岩石分类图上, 所有样品点落入亚碱性玄武岩范围 (图 4-a); 用 SiO₂-TFeO/MgO 图解进一步区分钙碱性和拉斑玄武岩, 所有的样品点皆投于拉斑玄武岩区 (图 4-b)。

黎溪变辉长岩 5 件样品地球化学分析结果显示, ΣREE 含量 65.47 × 10⁻⁶ ~ 70.58 × 10⁻⁶, LREE 含量 54.68 × 10⁻⁶ ~ 59.00 × 10⁻⁶, HREE 含量 10.63 × 10⁻⁶ ~ 11.58 × 10⁻⁶, LREE/HREE 值为 4.98 ~ 5.27, 在岩石

地球化学组成上, 其属于亚碱性拉斑岩石系列, 在原始地幔标准化微量元素蛛网图中, 高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 等无明显的亏损, 大离子亲石元素 Ba、Sr 等富集, 与 E-MORB (富集型洋脊玄武岩) 型玄武岩曲线表现出较明显的相似性 (图 5-a)。球粒陨石标准化配分图中, Eu 显示弱的正异常, 总体上略微富集轻稀土元素, 为右倾稀土元素配分模式, 同样与 E-MORB 型玄武岩曲线表现出较明显的相似性, 明显不同于 OIB (洋岛玄武岩) 型及 N-MORB (正常洋脊玄武岩) 玄武岩曲线 (图 5-b)。

3.2 锆石 U-Pb 定年结果

黎溪变辉长岩锆石阴极发光 (CL) 图像显示, 单颗锆石长轴直径为 80 ~ 120 μm, 长宽比为 1 : 1 ~ 2 : 1, 无磨圆, 自形, 主体为板状 (短柱状), 锆石边部多具有较窄的变质增生边, 内部结构均一, 无继承性核, 部分锆石具弱振荡环带, 呈现典型的基性岩岩浆锆石形态特征 (图 3)。所有测点对应的 Th/U 值为 0.71 ~ 4.89, 均大于 0.4, 且绝大多数处于 1.5 ~ 4.89 之间 (表 2), 因此本次所测锆石均形成于基性

表 1 黎溪变辉长岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Analytical results of the major, trace and rare earth elements of the Lixi metamorphic gabbro

元素	19HQ01- YQ1	19HQ01- YQ2	19HQ01- YQ3	19HQ01- YQ4	19HQ01- YQ5	元素	19HQ01- YQ1	19HQ01- YQ2	19HQ01- YQ3	19HQ01- YQ4	19HQ01- YQ5
SiO ₂	46.01	46.79	46.93	47.48	46.37	Zr	81.0	65.9	69.2	71.8	74.0
TiO ₂	1.24	1.26	1.28	1.31	1.35	Nb	9.30	9.22	9.58	9.82	10.0
Al ₂ O ₃	16.75	16.89	16.85	16.82	16.77	Sn	0.63	0.74	0.75	0.72	0.73
TFeO	17.64	16.67	17.09	16.53	17.23	Cs	0.55	0.65	0.45	0.47	0.51
MnO	0.20	0.18	0.18	0.18	0.18	Ba	153	125	107	111	111
MgO	6.72	6.27	6.53	6.29	6.65	La	11.4	11.1	11.5	11.9	12.1
CaO	7.85	8.11	8.46	8.33	8.30	Ce	23.1	22.9	24.2	24.5	24.1
Na ₂ O	2.38	2.72	2.72	2.85	2.54	Pr	3.09	3.08	3.23	3.40	3.25
K ₂ O	0.33	0.35	0.32	0.29	0.31	Nd	13.3	13.5	14.6	14.9	14.2
P ₂ O ₅	0.15	0.14	0.15	0.16	0.16	Sm	2.88	2.94	3.19	3.02	3.09
烧失量	4.42	3.97	3.85	3.63	4.11	Eu	1.09	1.16	1.20	1.25	1.20
总计	100.21	99.85	100.43	100.15	100.24	Gd	3.01	3.11	2.99	3.27	3.14
FeO	4.90	4.80	5.25	5.00	5.08	Tb	0.52	0.51	0.52	0.55	0.55
Li	23.1	18.8	16.6	17.5	18.7	Dy	3.00	3.15	3.25	3.35	3.26
Be	0.58	0.58	0.47	0.52	0.52	Ho	0.58	0.64	0.64	0.67	0.65
Sc	27.9	28.0	27.4	26.2	26.8	Er	1.59	1.64	1.68	1.67	1.71
V	190	182	186	184	184	Tm	0.24	0.22	0.22	0.24	0.23
Cr	108	97.6	93.0	91.1	94.0	Yb	1.47	1.49	1.50	1.61	1.57
Co	63.6	48.2	48.1	48.2	50.5	Lu	0.22	0.21	0.20	0.21	0.21
Ni	122	97.5	99.0	95.4	106	Hf	1.82	1.80	1.83	1.90	1.89
Cu	22.5	15.8	16.3	14.5	18.9	Ta	0.51	0.49	0.57	0.57	0.57
Zn	242	203	200	196	210	Tl	0.082	0.091	0.054	0.064	0.077
Ga	18.3	17.8	17.6	17.5	18.2	Pb	4.56	3.46	3.53	3.60	3.74
Rb	8.12	11.6	7.69	7.32	7.68	Th	0.96	0.89	0.90	0.94	0.91
Sr	374	407	394	405	399	U	0.32	0.27	0.28	0.31	0.38
Y	15.6	15.4	15.8	16.1	16.0						

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

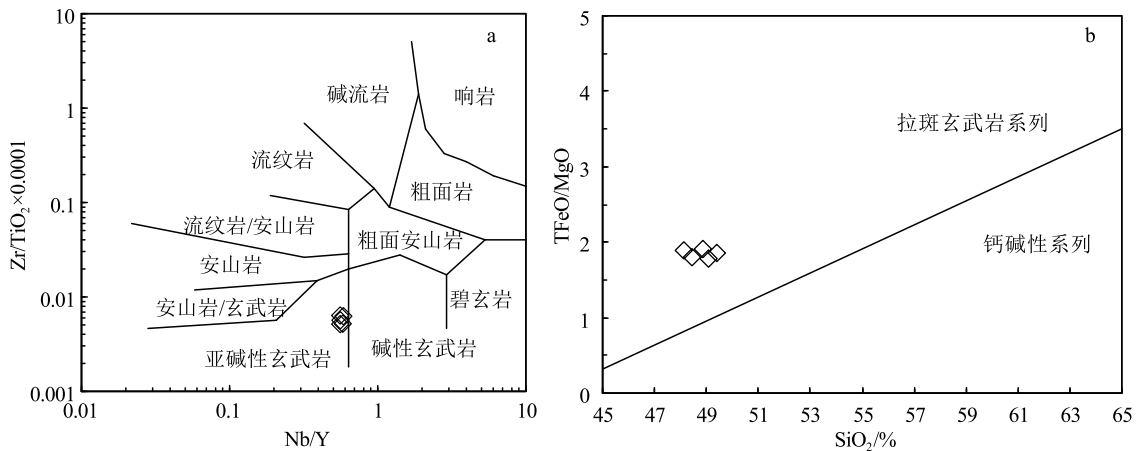


图 4 扬子陆块西缘黎溪变辉长岩 Nb/Y-Zr/TiO₂×0.0001(a,底图据参考文献[20])和 SiO₂-TFeO/MgO(b,底图据参考文献[21])分类图解

Fig. 4 Nb/Y-Zr/TiO₂×0.0001 (a) and SiO₂-TFeO/MgO (b) classification diagrams of metamorphic gabbro in Lixi, the western of Yangtze Block

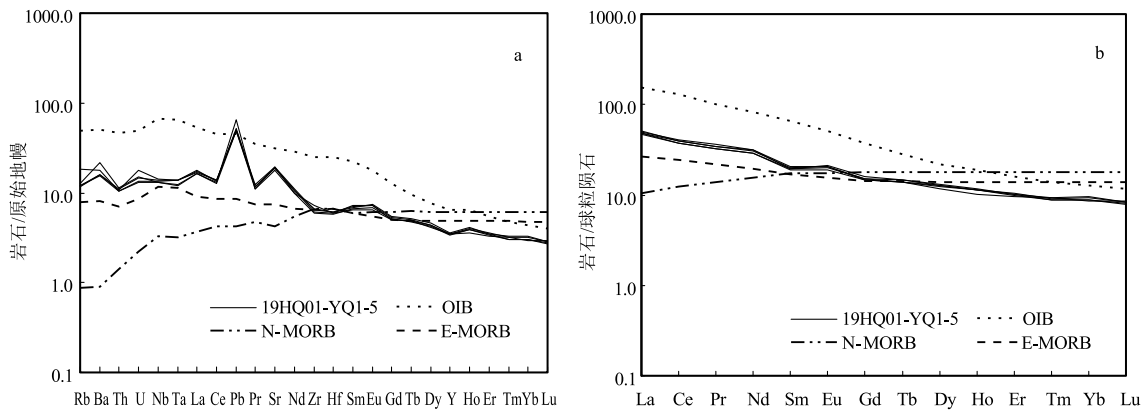


图 5 黎溪变辉长岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分图(b)(原始地幔标准化数据、球粒陨石标准化数据据参考文献[22])

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams (a) and chondrite-normalized REE distribution patterns (b) of the Lixi metamorphic gabbro
OIB—洋岛玄武岩;N-MORB—正常洋脊玄武岩;E-MORB—富集型洋脊玄武岩

岩岩浆结晶作用,锆石 U-Pb 同位素年龄能够较好地反映出黎溪变辉长岩侵位年龄^[23]。

对该样品的 20 颗锆石的 20 个分析点进行了 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年,分析结果列于表 2。分析点 1 和 5 位于谐和线下方,可能是放射成因铅丢失的结果;其余 18 个分析点产生的不一致线上交点年龄为 1499±18 Ma(MSWD=0.65),落在谐和线上及附近的 18 个分析点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄加权平均值为 1508±21 Ma(MSWD=0.69)(图 6),与

上交点年龄在误差范围内一致,笔者选取年龄加权平均值 1508±21 Ma 作为黎溪变辉长岩的侵位年龄。

4 讨论

4.1 岩石成因

本次研究的变辉长岩样品镜下鉴定及主量元素烧失量(3.63%~4.42%)都表现出一定的蚀变特征,因而本次主要利用不活动元素探讨其成因。

表 2 黎溪变辉长岩 (19HQ01-TW3) 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 2 Results of zircon U-Th-Pb dating of the metamorphic gabbro in the Lixi area

测 点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值 1σ						同位素年龄/Ma						谐和度
	Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$				
19HQ01-TW3-1	836	1730.48	446.07	3.88	0.1112	0.0033	2.2491	0.0716	0.1464	0.0029	1820	54	1196	22.4	881	16.4	69%
19HQ01-TW3-2	1657	2761.53	564.59	4.89	0.0967	0.0021	2.4359	0.0534	0.1830	0.0026	1561	41.2	1253	15.8	1083	14.1	85%
19HQ01-TW3-3	322	310.82	182.17	1.71	0.0944	0.0023	3.6668	0.0947	0.2815	0.0042	1517	44.6	1564	20.6	1599	21.0	97%
19HQ01-TW3-4	798	1144.22	629.85	1.82	0.0960	0.0021	2.6126	0.0596	0.1970	0.0023	1547	41.2	1304	16.8	1159	12.4	88%
19HQ01-TW3-5	1448	3054.24	788.11	3.88	0.1137	0.0028	2.3153	0.0710	0.1465	0.0022	1859	44.4	1217	21.8	881	12.3	68%
19HQ01-TW3-6	479	421.88	335.51	1.26	0.0933	0.0021	3.5466	0.0817	0.2758	0.0037	1494	47.2	1538	18.3	1570	18.9	97%
19HQ01-TW3-7	1259	1308.32	557.37	2.35	0.0909	0.0019	3.5114	0.0772	0.2797	0.0036	1456	39.4	1530	17.4	1590	18.3	96%
19HQ01-TW3-8	1312	1903.14	878.39	2.17	0.0954	0.0021	2.8980	0.0689	0.2197	0.0030	1536	41.2	1381	18.0	1281	16.0	92%
19HQ01-TW3-9	804	949.23	285.53	3.32	0.0961	0.0032	3.2235	0.1188	0.2424	0.0047	1550	63.0	1463	28.6	1399	24.4	95%
19HQ01-TW3-10	1294	1351.32	536.14	2.52	0.0957	0.0024	3.5294	0.0898	0.2678	0.0039	1543	48.1	1534	20.2	1529	19.9	99%
19HQ01-TW3-11	1310	1326.42	556.29	2.38	0.0922	0.0023	3.3088	0.0784	0.2609	0.0046	1472	49.2	1483	18.5	1494	23.7	99%
19HQ01-TW3-12	1521	1673.09	651.29	2.57	0.0925	0.0025	3.3878	0.0908	0.2650	0.0043	1477	51.9	1502	21.0	1515	21.8	99%
19HQ01-TW3-13	687	1031.30	366.32	2.82	0.0920	0.0022	2.7955	0.0766	0.2191	0.0033	1466	44.4	1354	20.5	1277	17.6	94%
19HQ01-TW3-14	1679	2055.85	643.76	3.19	0.0955	0.0020	3.1003	0.0664	0.2351	0.0029	1539	39.7	1433	16.5	1361	15.1	94%
19HQ01-TW3-15	500	470.35	330.54	1.42	0.0914	0.0020	3.5399	0.0879	0.2791	0.0036	1457	40.7	1536	19.7	1587	18.1	96%
19HQ01-TW3-16	515	529.36	255.18	2.07	0.0941	0.0030	3.4657	0.1090	0.2677	0.0049	1510	60.8	1519	24.8	1529	24.9	99%
19HQ01-TW3-17	985	1067.38	540.71	1.97	0.0931	0.0020	3.4677	0.0825	0.2691	0.0039	1500	40.6	1520	18.8	1536	19.7	98%
19HQ01-TW3-18	979	1084.37	330.57	3.28	0.0954	0.0022	3.6112	0.0889	0.2743	0.0040	1536	48.6	1552	19.6	1562	20.2	99%
19HQ01-TW3-19	1065	1141.42	597.66	1.91	0.0916	0.0022	3.3787	0.0844	0.2665	0.0036	1459	44.8	1499	19.6	1523	18.3	98%
19HQ01-TW3-20	190	154.66	217.08	0.71	0.0953	0.0028	3.5223	0.1123	0.2675	0.0048	1544	55.6	1532	25.2	1528	24.4	99%

地壳混染和分离结晶对幔源岩浆在上升过程中的组分改变起重要作用。在岩石地球化学组成上,黎溪变辉长岩属于亚碱性拉斑岩石系列(图 4-b),总体上略微富集轻稀土元素;在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 5-a)中,高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 等无明显亏损,表明岩浆在上涌过程中基本未受地壳物质混染。变辉长岩具有非常低的 Th/Nb 值(0.09~0.1),远低于大陆地壳平均值(0.44),而非常接近原始地幔平均值(0.117)^[24-25],说明地壳混染对其岩浆演化的影响微乎其微。这些样品具有非常一致的 Nb/Ta 值(16.84~18.69,平均值为 17.68),与 OIB 岩浆相当(Nb/Ta = 15.9±0.6),基本可排除强烈地壳混染的可能性。

变辉长岩 Mg[#]值为 49~50,低于原始地幔来源的岩浆(约 70)^[26]。此外,还具有相对较低的 Cr(小于 108×10⁻⁶)和 Ni(小于 122×10⁻⁶)含量,表明其岩浆经历了一定程度的镁铁矿物分离结晶。在

球粒陨石标准化图(图 5-b)中,具弱的正 Eu 异常,表明岩石未经历过以斜长石为主的分离结晶。

玄武质岩浆主要存在大陆岩石圈地幔和软流圈地幔 2 种源区^[27]。Fitton 等^[27]通过对美国西部地区玄武岩的研究表明,来自岩石圈地幔的玄武质岩浆通常具有大于 1.5 的 La/Nb 值,而软流圈地幔来源的岩浆通常具有小于 1.5 的 La/Nb 值。本次变辉长岩的 La/Nb 值为 1.20~1.22,与软流圈地幔来源岩浆类似。此外,La/Ta 值(大于 30)也是判断玄武质岩浆的微量元素指标^[27],变辉长岩样品 La/Ta 值在 20.16~22.53 之间,平均值为 21.39,也显示可能来源于软流圈地幔。通过岩石成因分析认为,岩浆在上升过程中经历了一定程度的分离结晶作用,但未受到地壳的明显混染,母岩浆可能来自软流圈地幔。

4.2 构造背景

越来越多的与 Columbia 超大陆聚散相关的地

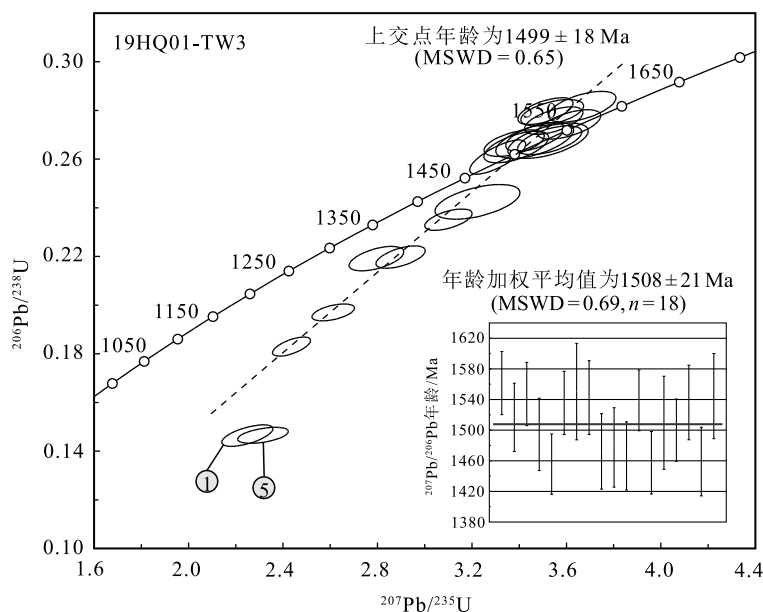


图6 黎溪变辉长岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagram of the Lixi metamorphic gabbro

质事件在扬子陆块被报道,表明扬子陆块曾参与 Columbia 超大陆的聚合、碰撞和裂解作用的整个过程^[28]。近年,在扬子西缘会理县通安—菜子园—黎溪一带相继识别出较多与 Columbia 超大陆裂解作用相关的中元古代岩浆记录^[3-9, 29],根据其时限大致可分为 1.76~1.70 Ga、1.69~1.66 Ga、约 1.5 Ga 及约 1.4 Ga 四个阶段^[1]。受 Columbia 超大陆裂解作用影响,通安—黎溪片区自约 1.76 Ga 开始发生裂解,形成一系列具有拉张性质的岩浆岩,早期在云南武定、会东菜子园等地表现为双峰式岩浆活动^[6-9];其后,约 1.7 Ga 岩浆热液持续活动形成具有裂谷性质的岩浆岩,与此同时伴随形成区域以拉拉铜矿为代表的铁氧化物铜金矿床^[10-11];1.5~1.4 Ga 的岩浆岩仅在通安地区零星存在,为通安—黎溪地区中元古带最新一期具拉张性质的岩浆事件记录。本次报道的会理黎溪地区 E-MORB 型变辉长岩锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 $1508 \pm 21 \text{ Ma}$,进一步补充了与 Columbia 超大陆的裂解作用相关的最新一期 (1.5~1.4 Ga) 岩浆活动记录。

会理黎溪变辉长岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线具 E-MORB 型玄武岩特征,明显不同于 OIB 及 N-MORB 型玄武岩曲线(图 4-b);以较低的 Nb/Yb 值(6.09~6.40)和 Th/Yb 值(0.58~0.66)区别于 OIB 型玄武岩;而轻稀土元素富集、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值

明显大于 $1^{[30]}$ 、 $\text{Rb}/\text{Nd} > 0.15$ ($0.49 \sim 0.86$)^[31]、 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2 > 0.09$ ($0.22 \sim 0.28$)^[32] 又与 N-MORB 型玄武岩不同,符合 E-MORB 型玄武岩特征。在 $\text{Zr}/117\text{-Th-Nb}/16$ 和 $\text{Ti}/1000\text{-V}$ 图解(图 7)中,黎溪变辉长岩分别位于 E-MORB 和 MORB 区域内^[33-34]。现有研究资料表明, E-MORB 型玄武岩形成的构造环境较复杂,其产出环境主要包括大洋中脊及附近的海山、大洋弧后盆地及汇聚大陆边缘^[35-38]。因此,在判别 E-MORB 型玄武岩的构造环境时,应结合区域地质特征进行综合分析。首先,研究区目前尚无中元古代早—中期岛弧火山岩的相关报道,因此可以排除黎溪变辉长岩形成于大洋弧后盆地的可能性。自 20 世纪 80 年代,有学者提出通安—菜子园一带为一缝合带^[39],随着地质调查及研究工作的不断推进,任光明等^[15]通过系统总结野外及室内最新研究成果,提出通安—菜子园蛇绿混杂岩带,而关于该蛇绿岩的缝合就位时间主要存在 2 种认识,一是根据通安—菜子园蛇绿岩北侧天宝山弧的时限将其约束在 1032~960 Ma,另一种则是按照研究区广泛发育的深成岩带的时限(860~815 Ma)将其限定在 860 Ma^[15]。因此,通安—菜子园蛇绿岩缝合的就位时间(小于 1032 Ma)要晚于黎溪地区约 1.5 Ga 变辉长岩的侵位时间,从而进一步排除黎溪变辉长岩形成于汇聚大陆边缘构造环境。区内形成于同时期的通安组三段、黑山组、鹅头厂组等实为一套以黑色板岩、泥质板岩及硅质岩为主的岩石组合^[12-13, 15],其沉积相应为浅海—深海盆地相^[13];在野外地质调查过程中,于通安—黎溪地区发现多处洋岛—海山的岩性组合;此外,前人曾对扬子陆块西缘的中元古代岩浆岩锆石 Hf 同位素开展了统计研究,结果证实约 1.6 Ga 之前的锆石,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要为负值,于约 1.5 Ga $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值出现快速的升高,主体转变为正值^[40-41],表明该时期的锆石主体来源由古老地壳的熔融已转变为幔源岩浆,进而说明此时通安—菜子园洋^[15]可能已经形成。因此,结合上述因素综合判断,黎溪地区 E-MORB 型变辉长岩的构造环境最可能为大洋中脊及附近的海山。

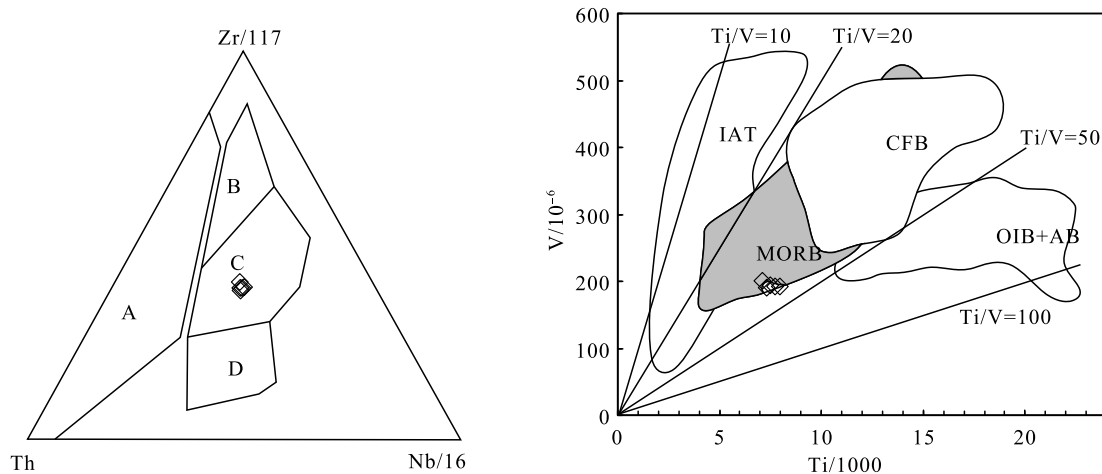


图 7 黎溪变辉长岩 Zr/117-Th-Nb/16(a) 和 Ti/1000-V(b) 构造环境判别图

Fig. 7 Zr/117-Th-Nb/16(a) and Ti/1000-V(b) classification diagrams of the Lixi metamorphic gabbro
a: Zr/117-Th-Nb/16 图解, A—破坏板块边缘玄武岩; B—正常洋脊玄武岩; C—富集型洋脊玄武岩; D—板内玄武岩;
b: Ti/1000-V 图解, IAT—岛弧拉斑玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; CFB—大陆溢流玄武岩; OIB+AB—洋岛及碱性玄武岩

5 结 论

(1) 扬子陆块西缘会理地区黎溪变辉长岩的锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 1508 ± 21 Ma。

(2) 在岩石地球化学组成上, 黎溪变辉长岩主体具 E-MORB 型玄武岩特征。

(3) 地球化学和区域地质特征综合分析表明, 约 1.5 Ga 的黎溪 E-MORB 型变辉长岩可能形成于大洋中脊及附近的海山环境, 为 Columbia 超大陆裂解在扬子陆块的响应。

致谢: 潘桂棠先生是中国著名的构造地质学家。本文完成之际适逢潘先生 80 华诞及从事地质事业 60 周年, 谨以此文向他致以崇高的敬意和诚挚的祝福。衷心感谢潘桂棠先生长期以来对笔者的教导和培养, 引领我们进入地球科学殿堂。在相识的十余年里潘先生始终亦师亦友, 以长者、老师、好友的姿态引导年轻一辈继续将青藏精神发扬光大, 教导我们在地球科学研究中坚持批判性思维、不怕吃苦、勇于创新。祝愿潘先生健康长寿, 幸福安康。另外, 对于本文成文过程中审稿专家所给出的建设性意见深表感谢!

参考文献

- [1] 耿元生, 旷红伟, 柳永清, 等. 扬子地块西、北缘中元古代地层的划分与对比[J]. 地质通报, 2017, 91(10): 2151-2174.
- [2] 耿元生, 柳永清, 高林志, 等. 扬子克拉通西南缘中元古代通安组的形成时代——锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1479-1491.
- [3] 郭阳, 王生伟, 孙晓明, 等. 扬子地台西南缘古元古代末的裂解事件——来自武定地区辉绿岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学证据[J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1651-1665.
- [4] 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 等. 华北、华南、塔里木三大陆块中—新元古代岩浆岩的特征及其地质对比意义[J]. 岩石学报, 2020, 36(8): 2276-2312.
- [5] 关俊雷, 郑来林, 刘建辉, 等. 四川省会理县河口地区辉绿岩体的锆石 SHRIMP-U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 482-490.
- [6] 王冬兵, 尹福光, 孙志明, 等. 扬子陆块西缘古元古代基性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义[J]. 地质通报, 2013, 32(4): 617-630.
- [7] 王子正, 郭阳, 杨斌, 等. 扬子克拉通西缘 1.73Ga 非造山型花岗斑岩的发现及其地质意义[J]. 地质学报, 2013, 83(7): 931-942.
- [8] Geng Y S, Du L L, Kuang H W, et al. Ca. 1.7 Ga Magmatism on Southwestern Margin of the Yangtze Block: Response to the Breakup of Columbia[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(6): 2031-2052.
- [9] 杨斌, 王伟清, 董国臣, 等. 扬子地台西南缘康滇断隆带海孜双峰式侵入岩体年代学、地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(5): 1361-1373.
- [10] 于文佳, 罗照华, 刘永顺, 等. 拉拉铁铜矿床成因: 来自隐爆角砾岩结构定量化和锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 岩石学报, 2017, 31(5): 925-942.
- [11] 周家云, 毛景文, 刘飞燕, 等. 扬子地台西缘河口群钠长岩锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2011, 31(3): 66-73.
- [12] 孙志明, 尹福光, 关俊雷, 等. 云南东川地区昆阳群黑山组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义[J]. 地质通报, 2009, 28(7): 876-900.
- [13] 庞维华, 任光明, 孙志明, 等. 扬子地块西缘古—中元古代地层划分对比研究: 来自通安组火山岩锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 921-936.

- [14] Fan H P, Zhu W G, Li Z X, et al. Ca. 1.5 Ga mafic magmatism in South China during the break-up of the supercontinent Nuna/Columbia: The Zhuqing Fe-Ti-V oxide ore-bearing mafic intrusions in western Yangtze Block[J]. *Lithos*, 2013, 168/169: 85-98.
- [15] 任光明, 庞维华, 潘桂棠, 等. 扬子陆块西缘中元古代菜子园蛇绿混杂岩的厘定及其地质意义[J]. *地质通报*, 2017, 36(11): 2061-2075.
- [16] 王生伟, 蒋小芳, 杨波, 等. 康滇地区元古宙构造运动 I: 昆阳陆内裂谷、地幔柱及其成矿作用[J]. *地质论评*, 2016, 62(6): 1353-1377.
- [17] 尹福光, 王冬兵, 孙志明, 等. 哥伦比亚超大陆在扬子陆块西缘的探秘[J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32(3): 31-40.
- [18] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In Situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1): 34-43.
- [19] Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, et al. The As-sembly of Rodinia: the correlation of Early Neoproterozoic (Ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Precambrian Research*, 2017, 290: 32-48.
- [20] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.
- [21] Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins[J]. *American Journal of Science*, 1974, 274: 321-355.
- [22] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and process [C]// Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [23] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1859-1604.
- [24] Condie K C. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: tracking deep mantle sources and continental growth rates with time[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(1): 1-28.
- [25] Thompson R N, Morrison M A. Asthenospheric and lower-lithospheric mantle contributions to continental extensional magmatism: an example from the British Tertiary Province [J]. *Chemical Geology*, 1988, 68: 1-15.
- [26] Frey F, Green D, Roy S, et al. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data[J]. *Journal of Petrology*, 1978, 19: 463-513.
- [27] Fitton J G, James D, Kempton P D, et al. The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States[J]. *Journal of Petrology*, 1988, 1: 331-349.
- [28] 王伟, 卢桂梅, 黄思访, 等. 扬子陆块古—中元古代地质演化与 Columbia 超大陆重建[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2019, 38(1): 30-52.
- [29] 王生伟, 廖震文, 孙晓明, 等. 云南东川铜矿区元古代辉绿岩地球化学——Columbia 超级大陆裂解在扬子陆块西缘的响应[J]. *地质学报*, 2013, 87(12): 1834-1852.
- [30] 王金荣, 张旗, 焦守涛, 等. N-MORB 和 E-MORB 数据挖掘玄武岩判别图及洋中脊源区性质的讨论[J]. *岩石学报*, 2017, 33(3): 993-1005.
- [31] Mahoney J J, Sinton J M, Kurz M D, et al. Isotope and trace element characteristics of a super-fast spreading ridge: East Pacific Rise at 13~23°S[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 121(1/2): 173-193.
- [32] Davis A S, Clague D A, Cousens B L, et al. Geochemical of basalt from the North Gorda segment of the Gorda Ridge: Evolution toward ultraslow spreading ridge lavas due to decreasing magma supply [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1977, 9(4): Q04004.
- [33] Wood D A, Joron J L, Treuil M, et al. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1979, 45(2): 326-336.
- [34] Shervais J W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1982, 59: 101-118.
- [35] Niu Y L, Collerson K D, Batiza R, et al. Origin of enriched-type mid-ocean ridge basalt at ridges far from mantle plumes: The East Pacific Rise at 11° 20' N [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (B4): 7067-7087.
- [36] Hemond C, Hofmann A W, Vlast L I, et al. Origin of MORB enrichment and relative trace element compatibilities along the Mid-Atlantic Ridge between 10° and 24° N [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2006, 12(7): 1-22.
- [37] Hawkins J W. Geology of supra-subduction zones: Implications for the origin of ophiolites [C]// Dilek Y, Newcomb S. *Ophiolite concept and the evolution of geological thought*. Geological Society of America Special Paper, 2003, 373: 227-268.
- [38] Cole R B, Nelson S W, Layer P W, et al. Eocene volcanism above a depleted mantle slab window in southern Alaska [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(1/2): 140-158.
- [39] 李继亮, 张绍宗. 通安—小关河元古代碰撞缝合线的发现及其地质意义[J]. *地质科学*, 1987, 1: 81-85.
- [40] 李怀坤, 张传林, 姚春彦, 等. 扬子西缘中元古代沉积地层锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(8): 1287-1298.
- [41] Wang X C, Li X H, Li Z X, et al. Episodic Precambrian crust growth: Evidence from U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircon in the Nanhua Basin, central South China [J]. *Precambrian Res.*, 2011, 222/223: 386-403.
- ①四川省地质局第一区域地质测量队. 1: 20 万会理幅区域地质测量报告. 1970.
- ②四川省地质局攀西地质大队区调二队. 1: 5 万关河幅区域地质测量报告. 1994.