

文章编号:1009-3850(2019)02-0001-13

西藏八宿吉利地区新发现寒武纪变质花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义

康朝龙¹, 代克刚¹, 李海波^{1,2}, 梁成³, 陈晓深¹,
扎西¹, 王天泽¹, 李静¹

(1. 西藏地质矿产勘查开发局第五地质大队, 西藏 拉萨 850000; 2. 陕西区域地质矿产研究院, 陕西 咸阳 712000; 3. 山东第七地质矿产勘查院, 山东 临沂 276000)

摘要:八宿吉利地区寒武纪变质花岗岩位于曲扎湖-提卡一带,主要由变质二长花岗岩和变质花岗闪长岩组成。这一新发现对于认识和恢复原特提斯构造历史演化具有重要意义。锆石 CL 图像显示变质花岗岩锆石为岩浆成因。锆石 LA-ICP-MS 测年得出片理化变质二长花岗岩年龄为 503.7 ± 4.7 Ma、变质花岗闪长岩年龄为 494.7 ± 3.4 Ma,表明该岩体形成时代属于寒武纪。通过岩石地球化学分析,变质二长花岗岩 SiO_2 含量介于 69.87% ~ 79.89% 之间;变质花岗闪长岩 SiO_2 含量介于 66.63% ~ 70.15% 之间。前者 Al_2O_3 含量变化于 12.36% ~ 14.82%, Na_2O 含量为 2.54% ~ 7.16%, K_2O 含量为 0.15% ~ 5.95%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.02 \sim 2.34$; 后者 Al_2O_3 含量变化于 14.66% ~ 15.41%, Na_2O 含量为 3.60% ~ 5.63%, K_2O 含量为 0.77% ~ 2.78%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.14 \sim 0.77$, 属于钙碱性-碱性过铝质花岗岩。在侵入岩构造环境 $\text{Rb} - (\text{Y} + \text{Nb})$ 判别图解、 $\text{Rb} - (\text{Yb} + \text{Ta})$ 判别图解中,样品均落入“火山弧花岗岩”区域中,表明其形成于大陆边缘火山弧环境。结合锆石测年结果及区域地质背景分析,认为吉利地区变质花岗岩形成于冈瓦纳大陆裂离卡穷微陆块阶段,同时表明原特提斯洋形成最早时限可追溯至寒武纪。

关键词:吉利地区;变质花岗岩;锆石 LA-ICP-MS 测年;原特提斯洋;寒武纪;西藏

中图分类号:P581

文献标识码:A

引言

西南三江地区地处青藏高原东南缘特提斯喜马拉雅构造域东部,是冈瓦纳大陆与欧亚大陆的结合地带、特提斯造山带与环太平洋造山带的汇合部^[1-2]。早期学者根据该地区的沉积记录和岩浆活动,认为其为怒江侵入岩带中生代侏罗纪时期的中

酸性花岗岩^[3]。近年来地质调查发现,该带及邻区存在早古生代岩浆活动记录,如八宿县同卡地区 $507\text{Ma} \pm 10\text{Ma}$ 的花岗片麻岩^[4]、八宿县同卡乡北卡穷岩群中 $549\text{Ma} \pm 18\text{Ma}$ 的片麻状二长花岗岩^[5],表明班公湖-怒江结合带在该地区也存在早古生代岩浆活动记录。

本文对吉利地区寒武纪变质花岗岩的岩石地

收稿日期:2019-01-06; 改回日期:2019-03-20

作者简介:康朝龙(1990-),男,助理工程师,从事区调工作。E-mail:741275946@qq.com

通讯作者:陈晓深(1971-),男,高级工程师,从事矿产及区调工作。E-mail:695830450@qq.com

资助项目:中国地质调查局成都地质调查中心项目《西藏吉利地区 1:5 万区域地质调查》(编号:WT[2016]-026、WT[2017]-105 和 WT[2018]-044)

球化学特征等进行了初步研究,利用锆石 U-Pb 测年方法进行了定年,探讨其侵位时代、物质来源及大地构造环境,为青藏高原-原特提斯大洋形成、演化提供了重要地质信息。

1 区域地质特征

吉利地区寒武纪变质花岗岩地处藏东“三江”地区,位于印度板块、藏滇板块和华南板块的结合部位,处于板块的多次开、拼合形成的复杂拼合地带,是著名的特提斯构造域的重要组成部分,东侧为怒江蛇绿混杂岩带、嘉玉桥增生弧(图 1a)^[6-9]。研究区历经陆壳基底形成阶段、原特提斯演化阶段、新特提斯俯冲闭合阶段、陆内造山阶段等漫长而复杂的大地构造演化过程。曲扎湖-提卡寒武纪岩浆弧形成于原特提斯演化阶段,属火山弧构造环境。这一时期泛大陆(超级大陆)解体,特提斯洋

萌生,卡穷岩群从冈瓦纳大陆群北边缘裂离出来^[10],导致岩浆顺位上侵,形成曲扎湖-提卡岩浆弧。研究区内地层总体呈北西向-北北西向展布,与区域构造线方向基本一致。

研究区出露地层有古-中元古代卡穷岩群(Pt₁₋₂K.);早石炭世错绒沟口岩组(C_{1c.})、邦达岩组(C_{1b.});晚三叠世波里拉组(T_{3b.})、阿堵拉组(T_{3a.});古近纪贡觉组(Eg)以及第四纪地层(Q)(图 1b)。寒武纪侵入岩位于班公湖-怒江结合带的怒江侵入岩带中,主要出露于研究区西部及北部(图 1b),与卡穷岩群(Pt₁₋₂K.)呈侵入接触,与邦达岩组(C_{1b.})、错绒沟口岩(C_{1c.})组呈断层接触。主要岩石类型有浅肉红色中细粒花岗岩、肉红色中细粒二长花岗岩、浅肉红色弱片理化细粒二长花岗岩、浅肉红色中细粒黑云母斜长花岗岩和浅肉红色中细粒花岗岩闪长岩。

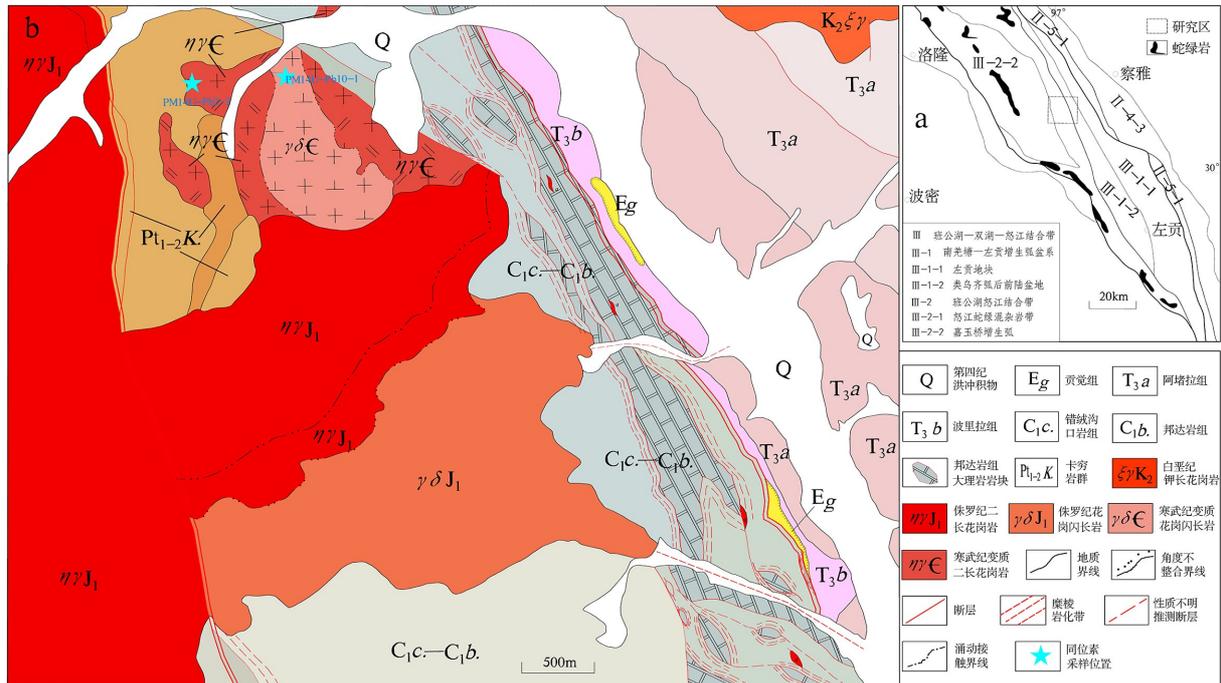


图 1 研究区大地构造位置图(a)和吉利地区寒武纪变质花岗岩岩体地质图(b)

Fig. 1 Tectonic setting (a) and geological map (b) of the Cambrian metamorphic granites in the Jili area, Baxoi, Xizang

2 样品采集及测试

2.1 岩体地质特征

寒武纪侵入岩主要出露于研究区西北部,由 6 个岩体组成。其中,北面 4 个岩体出露面积较大,面积约为 21.95 km²,同卡穷岩群呈侵入接触,与早石

炭世邦达岩组呈断层接触(图 3);南面两个岩体呈椭球状,出露规模较小,面积约 0.5 km²。主要岩石类型有浅肉红色弱片麻状中细粒花岗岩、肉红色中细粒变质二长花岗岩、浅肉红色中细粒蚀变花岗闪长岩。岩石野外地质特征及镜下特征见图 2。



图2 变质二长花岗岩手标本(a)、镜下特征(b)和变质花岗闪长岩手标本(c)、镜下特征(d)

Fig. 2 Hand specimens of metamorphic monzogranites (a) and metamorphic granodiorites (c) and photomicrographs of metamorphic monzogranites (b) and metamorphic granodiorites (d) in the Jili area

2.1.1 肉红色中细粒变质二长花岗岩

岩石风化面呈灰黄色,新鲜面呈肉红色,中细粒花岗结构,弱片麻状构造、块状构造。岩石由细粒斜长石、石英、钾长石和少数黑云母组成,矿物均匀分布,显花岗结构。斜长石含量约40%,呈半自形板粒状,粒径0.74~2.6mm,显聚片双晶,内部普遍泥化、绢云母化强烈。钾长石含量约25%,粒径1~3.8mm,半自形粒状,可见卡氏双晶,条纹构造发育,高岭土化中度,均匀分布。长石间分布30%石英,粒径0.6~2.4mm,它形粒状,部分常富集成条带状,分布不均匀。黑云母(5%)呈褐-黄色,局部蚀变为绿泥石,片径约为(0.1~2)×0.9mm,呈片状,断续定向分布。微量粒状磁铁矿零星分布,粒径为0.32~0.06mm。微量粒状褐帘石、锆石、磷灰石,粒径为0.4~0.02mm。偶见锆石、褐铁矿,粒状粒径为0.17mm。

2.1.2 灰白-浅肉红色变质花岗闪长岩

岩石呈灰白-浅肉红色,中细粒-中粗粒花岗结构、块状构造。由斜长石(58%)、石英(25%)、钾

长石(15%)等组成,轻度变质重结晶。矿物平行定向,多数重结晶为中细粒-中粗粒变晶集合体,粒径为0.15~0.7mm。部分长石还残留不完整的原粒径轮廓,较粗,粒径为1~2.8mm。长石以斜长石为主,普遍泥化、绿帘石化蚀变强烈。少数钾长石,双晶不发育,黑云母含量约2%,已绿泥石化蚀变,稀疏平行分布,片径为0.8~0.1mm。微量磁铁矿呈粒状、浸染状分布,粒径为0.27~0.06mm。

2.2 分析方法

用于研究的3件样品均采集于吉利地区曲扎湖-提卡岩浆弧内,采样位置见图1b。岩性分别为片理化二长花岗岩、变质花岗闪长岩,采集的岩石风化程度弱。用于主量元素和微量元素测定的样品,新鲜无污染并粉碎至200目以下。常量、微量、稀土元素分析测试在山东省第四地质矿产勘查院实验测试中心完成。常量元素分析采用Axios荧光光谱仪测定,分析误差小于3%。微量、稀土元素采用Thermo iCAP Q电感耦合等离子体质谱仪完成,分析精度优于5%。

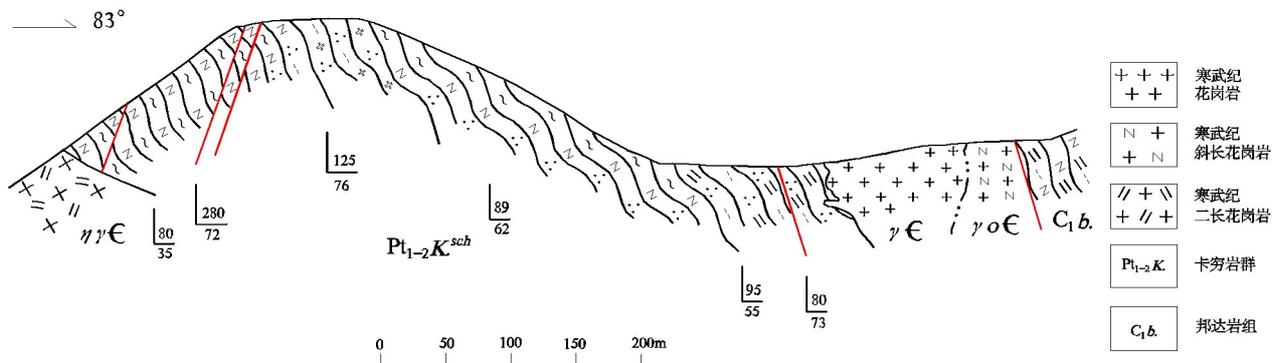


图3 吉利地区变质花岗岩岩体与卡穷岩群(Pt₁₋₂K)呈断层接触关系

Fig. 3 Fault contact between the metamorphic granites and the Kaqiong Group Complex (Pt₁₋₂K) in the Jili area

微量元素含量、锆石 U-Pb 同位素定年和显微照相在西安兆年矿物测试技术有限公司兆年测试 LA-ICP-MS 实验室完成。原岩样品经人工粉碎, 淘选后去除轻矿物部分, 将得到的重砂部分经电磁选后得到含有少量杂质的锆石样品, 最后在双目镜下挑选出锆石晶体。选择晶形较好、无裂隙的锆石颗粒黏贴在环氧树脂表面制成锆石样品靶。对锆石进行反射光、透射光和阴极发光 (CL) 图像分析, 选择代表性的锆石颗粒和区域进行 U-Pb 测年。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, 二者在进入 ICP^[11-12] 之前通过一个 T 型接头混合。每个时间分辨分析数据包括大约 10s 的空白信号和 40s 的样品信号。对分析数据的离线处理采用软件 Glitter 4.4 完成。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移, 利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3^[13] 完成。采用年龄为²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄的加权平均值。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

本次选择 8 件代表性样品, 其中 6 件变质二长花岗岩, 2 件变质花岗闪长岩。其主量元素和微量元素分析结果及相关参数列于表 1。在 Middlemost (1994) 提出的花岗岩 TAS 图解^[14]中, 样品均落入花岗岩、花岗闪长岩区域 (图 4), 与室内鉴定结果基本一致。

变质二长花岗岩 SiO₂ 含量介于 69.87 ~ 79.89% 之间, 为中酸性侵入岩; Al₂O₃ 含量变化于 12.36 ~ 14.82%, 铝饱和指数 A/CNK 整体变化不大, 介于 1.47 ~ 1.87 间, 为过铝质花岗岩; Na₂O 含量为 2.54 ~ 7.16%, K₂O 含量为 0.15 ~ 5.95%, K₂O/Na₂O = 0.02 ~ 2.34, 里特曼指数 σ = 1.16 ~ 2.34 < 3.3; 说明岩石具钙碱性系列岩石特征。

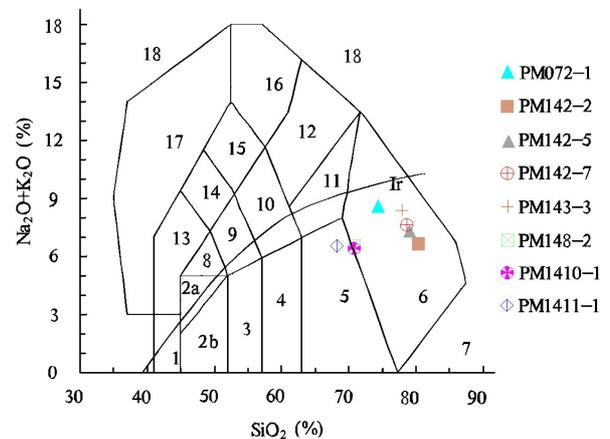


图4 吉利地区中酸性侵入岩 (Na₂O + K₂O) - SiO₂ 图解 (底图据文献^[14])

Ir-Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性。【深成岩】: 1. 橄榄辉长岩; 2a. 碱性辉长岩; 2b. 亚碱性辉长岩; 3. 辉长闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 花岗闪长岩; 6. 花岗岩; 7. 石英英岩; 8. 二长辉长岩; 9. 二长闪长岩; 10. 二长岩; 11. 石英二长岩; 12. 正长岩; 13. 副长石辉长岩; 14. 副长石二长闪长岩; 15. 副长石二长正长岩; 16. 副长正长岩; 17. 副长深成岩; 18. 霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

Fig. 4 (Na₂O + K₂O) vs. SiO₂ diagram of the intermediate to acidic intrusive rocks in the Jili area (after Middlemost et al., 1994)

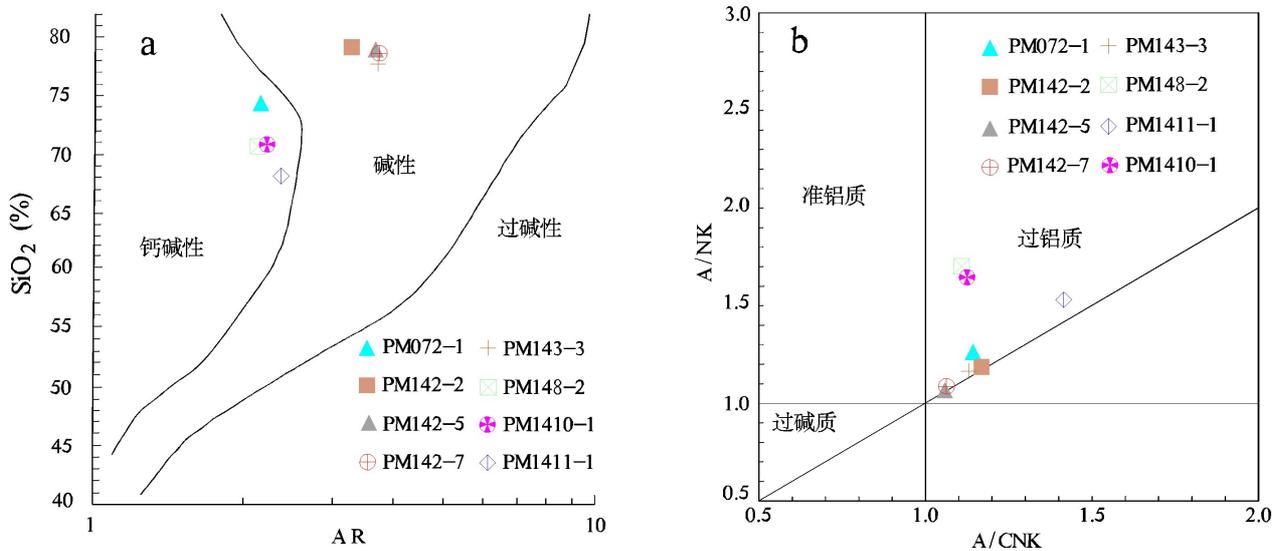


图5 吉利地区变质花岗岩岩体 SiO_2 -AR 图解(a)和 A/NK-A/CNK 图解(b) (SiO_2 -AR, A/NK-A/CNK 底图据文献^[15])

Fig. 5 SiO_2 vs. AR diagram (a) and A/NK vs. A/CNK diagram (b) of the metamorphic granites in the Jili area (after Maniar et al., 1989)

3.2 稀土和微量元素特征

变质花岗闪长岩 SiO_2 含量介于 66.63% ~ 70.15% 之间,为中酸性侵入岩。 Al_2O_3 含量变化于 14.66% ~ 15.41%,铝饱和指数 A/CNK 介于 1.70 ~ 2.26 间,为过铝质花岗岩; Na_2O 含量为 3.60% ~ 5.63%, K_2O 含量为 0.77% ~ 2.78%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.14 \sim 0.77$,里特曼指数 $\sigma = 1.50 \sim 1.73 (< 3.3)$,表明研究区变质二长花岗岩同样具钙碱性系列岩石特征。

SiO_2 -AR 图解^[15]上,4 件样品落入钙碱性系列区域内,另外 4 件样品落入碱性系列区域(图 5a)。A/NK-A/CNK 图解^[15]中,8 件样品落在过铝质区域内(图 5b)。

寒武纪中酸性侵入岩的稀土元素含量、微量元素含量见表 1,通过数据和稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图 6a)可见,稀土元素总量总体变化较大, $\Sigma \text{REE} = (55.80 \sim 298.09) \times 10^{-6}$,LREE = $(45.80 \sim 277.80) \times 10^{-6}$,HREE = $(10.00 \sim 22.16) \times 10^{-6}$, $\delta\text{Eu} = 0.26 \sim 1.03$,总体上显示为较强负异常^[16],显示了斜长石在分馏结晶作用中从长英质岩石中分离出来或者在部分熔融作用中残留在源区。仅 1 件样品 La_N/Yb_N 大于 10,其余样品 $\text{La}_N/\text{Yb}_N < 10$,具有较明显右倾。轻稀土元素相对重稀土元素富集,轻稀土分馏较强,重稀土分馏较差。研究表明,吉利花岗岩岩体稀土元素配分曲线具有与典型

岛弧环境下的钙碱性中酸性火成岩相似的特征。

从微量元素丰度(表 1)来看,吉利地区寒武纪花岗岩岩体的大离子亲石元素如 Sr 和 Ba 等含量较低,与大陆边缘火成岩微量特征具有明显不同。与岛弧火成岩相比^[17],两者在 Sr、Ba、Nb、Y、Ni、Cr、Th、U 等元素含量上相近。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b),岩体富集 Rb、K、Th、U、La、Ce、Nd、Zr、Hf 和 Sm 等元素,亏损 Ba、Nb、Sr、Ce、Sr、P、Ti 等,说明可能发生过壳幔混染作用,与义敦岛弧稻城微量元素蛛网图相比^[18],两者在许多方面相近,表明其形成于岛弧环境相关的构造环境。

4 讨论

4.1 岩石形成时代

本次工作用于 U-Pb 年龄测试的样品采集位置见图 1,样品分析数据见表 2。本次工作在寒武纪中酸性侵入岩中采集了多组年龄样品,进行粉碎并挑选出用于测年的锆石,并选择具有代表性的锆石进行 LA-ICP-MS 测年分析,样品年龄集中在 $494.7 \pm 3.4 \text{ Ma} \sim 503.7 \pm 4.7 \text{ Ma}$,其时代为寒武纪,应为加里东期岩浆活动产物。

变质花岗闪长岩年龄样品 (PM14U-Pb10-1) 阴极发光图像(图 8a)中可见,锆石颗粒普遍为自形晶,包裹体及裂隙较少,锆石大小不均匀,长轴介于

表 1 吉利地区变质花岗岩岩体主量元素 (wt%)、微量元素和稀土元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果Table 1 Major element (wt%), trace element and REE ($\times 10^{-6}$) contents in the metamorphic granites from the Jili area

样品名称	变质二长花岗岩						变质花岗闪长岩	
	PM07 2-1	PM14 2-2	PM14 2-5	PM14 2-7	PM14 3-3	PM14 8-2	PM14 10-1	PM14 11-1
SiO ₂	73.72	79.89	78.8	78.21	77.37	69.87	70.15	66.63
Fe ₂ O ₃	0.66	0.16	0.08	0.06	0.37	1.67	2.08	1.73
FeO	1.22	0.25	0.3	0.22	0.25	1.9	1.69	3.1
Al ₂ O ₃	13.39	12.36	12.79	13.25	12.87	14.82	14.66	15.41
TiO ₂	0.31	0.07	0.06	0.08	0.07	0.44	0.44	0.64
CaO	0.61	0.06	0.09	0.12	0.15	2.54	2.26	0.43
MgO	0.67	0.09	0.19	0.05	0.08	1.01	1.3	3.4
K ₂ O	5.95	0.58	0.15	0.56	4.61	3.35	2.78	0.77
Na ₂ O	2.54	5.98	7.16	7.07	3.71	3.11	3.6	5.63
MnO	0.04	0.01	0.02	0.02	0.03	0.09	0.06	0.07
P ₂ O ₅	0.11	0.01	0.02	0.01	0.02	0.1	0.09	0.12
LOI	0.77	0.54	0.34	0.35	0.47	1.1	0.91	2.07
Σ	100	100	100	100	100	100	100	100
Y	30.11	33.86	31.17	29.09	32.93	23.97	20.15	16.31
La	71.57	9.92	11.09	9.38	12.19	30.01	28.48	8.17
Ce	136.64	21.03	29.42	30.66	33.54	61.41	52.62	27.51
Pr	14	2.52	2.94	2.68	3.26	6.57	5.68	1.74
Nd	47.24	10.01	11.57	10.72	12.98	24.67	21.19	6.65
Sm	7.65	2.8	3.01	3.03	3.54	4.88	4.08	1.43
Eu	0.7	0.33	0.29	0.26	0.36	1.16	0.97	0.3
Gd	5.6	3.54	3.43	3.2	3.76	4.31	3.67	1.56
Tb	0.95	0.8	0.76	0.72	0.83	0.74	0.63	0.38
Dy	5.25	5.39	5.09	4.89	5.49	4.32	3.61	2.76
Ho	1.03	1.2	1.1	1.04	1.2	0.88	0.73	0.62
Er	3.1	3.63	3.44	3.22	3.76	2.52	2.12	1.95
Tm	0.5	0.6	0.57	0.54	0.63	0.4	0.33	0.32
Yb	3.36	3.98	3.89	3.51	4.31	2.6	2.19	2.1
Lu	0.49	0.62	0.61	0.53	0.67	0.39	0.34	0.32
ΣREE	298.09	66.38	77.22	74.38	86.53	144.87	126.62	55.8
LREE	277.8	46.61	58.32	56.73	65.88	128.7	113.01	45.8
HREE	20.29	19.77	18.89	17.65	20.65	16.17	13.61	10
LREE/HREE	13.69	2.36	3.09	3.21	3.19	7.96	8.31	4.58
La _N /Yb _N	15.28	1.79	2.04	1.91	2.03	8.28	9.32	2.79
δEu	0.33	0.32	0.28	0.26	0.3	0.77	0.76	0.61
δCe	1.06	1.03	1.26	1.5	1.3	1.07	1.01	1.79
Sn	23.8	3.5	9.1	8.2	3.7	3	3.5	18.7
Zr	190.37	94.42	95.83	190.91	110.42	118.68	74.66	74.64
Nb	34.51	13.62	13.21	8.32	20.85	15.65	11.4	3.03
Ba	382.58	34.89	18.59	161.62	207.82	713.9	668.99	96.72
Hf	8.2	4.93	5.13	7.45	5.72	4.57	2.87	3.08
Ta	5.03	1.35	1.42	0.99	2.55	1.57	1.21	0.39

(续表 1)

样品名称	变质二长花岗岩						变质花岗闪长岩	
样品编号	PM07 2-1	PM14 2-2	PM14 2-5	PM14 2-7	PM14 3-3	PM14 8-2	PM14 10-1	PM14 11-1
W	10.47	1.71	0.82	0.73	1.33	0.55	1.54	16.45
Th	62.7	21.63	22.82	25.12	22.84	16.42	15.43	8.11
U	10.69	3.05	2.2	2.77	3.07	2.36	2.36	0.84
V	25.51	3.47	2.6	2.86	3.35	50.11	66.43	101.26
Cr	16.59	5.98	4.36	4.45	4.67	10.39	13.83	24.46
Co	3.71	0.57	0.39	0.31	0.53	5.75	6.5	6.74
Ni	7.82	1.81	2.18	2.11	2.06	4.64	5.46	9.8
Cu	9.55	4.84	6.1	8.2	4.45	6.87	6.65	9.57
Rb	477.34	46.42	11.15	36.62	219.63	126.56	120.73	29.14
Sr	92.09	29.6	38.92	39.14	41.57	218.77	190.29	40.42
Au	1.35	1.4	0.81	0.81	0.85	0.8	0.8	0.79
Ag	43.2	61.8	27.3	25.3	27.9	25.3	30	44

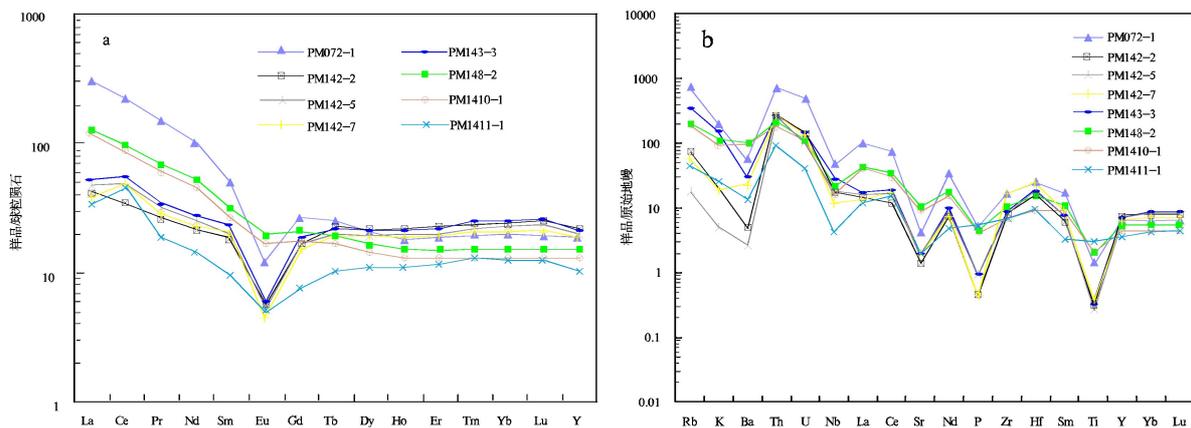


图 6 吉利地区变质花岗岩岩体稀土元素球粒陨石标准化分布型式图 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b) (球粒陨石和原始地幔标准化值据文献 [19])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergram (b) of the metamorphic granites in the Jili area (after Sun and McDonough, 1989)

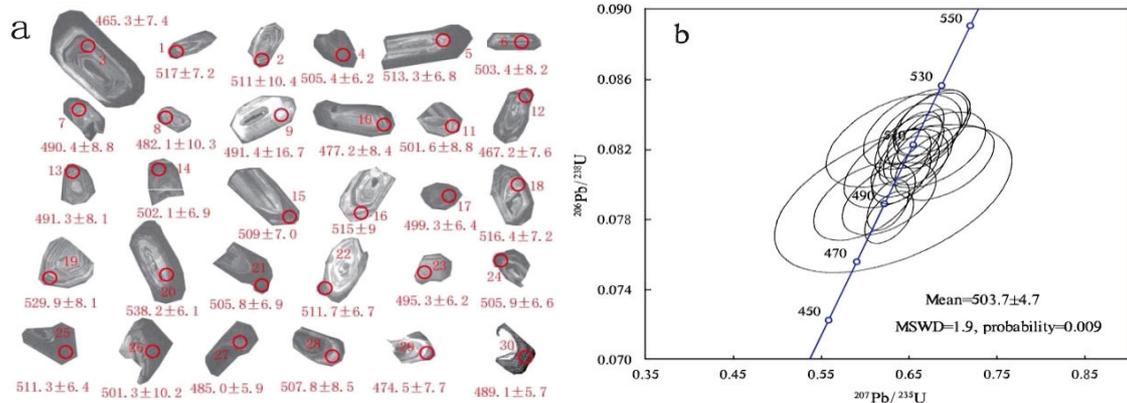


图 7 变质二长花岗岩 (PM14U-Pb2-2) 锆石阴极发光图像 (a) 和锆石 U-Pb 年龄谱和图 (b)

Fig. 7 CL images of the zircons (a) and concordia diagram of the zircon U-Pb age data (b) for the metamorphic monzogranites (the sample PM14U-Pb2-2) in the Jili area

100~200 μm 之间。本次选择具有代表性的锆石进行了 LA-ICP-MS 测年分析,获得有效测点 30 个(表 2)。其 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值为约 $494.7 \pm 3.4\text{Ma}$ (图 8b),被解释为该样品的岩浆结晶年龄。其中片理化变质二长花岗岩年龄样品(PM14U-Pb2-2)阴极发光图像(图 7a)中可见,锆石颗粒普遍为自

形晶,包裹体及裂隙较少,锆石大小不均匀,长轴介于 100~200 μm 之间。本次选择具有代表性的锆石进行了 LA-ICP-MS 测年分析,获得有效测点 30 个(表 2)。其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $503.7 \pm 4.7\text{Ma}$ (图 7b),为该样品的岩浆结晶年龄。

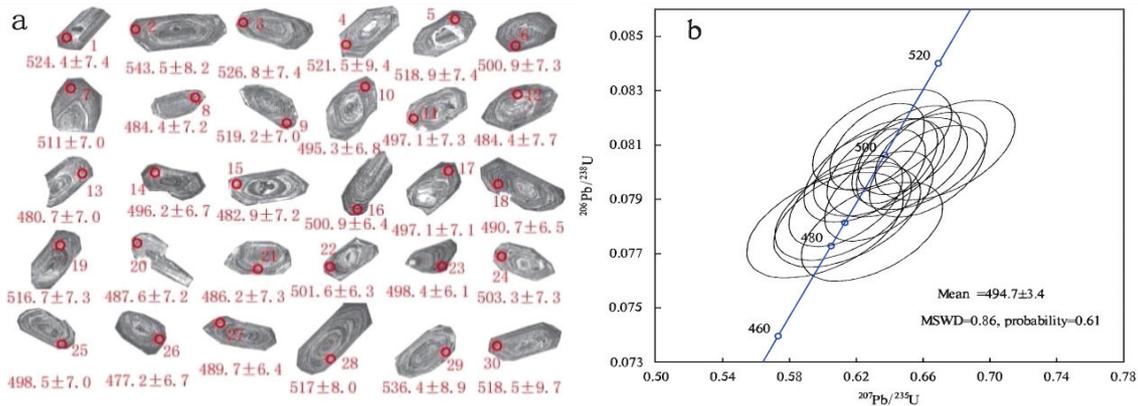


图 8 变质花岗岩长岩(PM14U-Pb10-1)锆石阴极发光图像(a)和锆石 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig. 8 CL images of the zircons (a) and concordia diagram of the zircon U-Pb age data (b) for the metamorphic granodiorites (the sample PM14U-Pb10-1) in the Jili area

4.2 成因类型及构造环境探讨

研究认为 Al_2O_3 可以作为中酸性岩体压力大小的标志之一。当熔体中的 Al_2O_3 含量低于 15% 时,其成岩压力小于 1600kPa,源区残留相以角闪石、斜长石和斜方辉石为主;当熔体中的 Al_2O_3 含量高于 15% 时,其成岩压力大于 1600kPa,源区残留相以单斜辉石、角闪石、斜长石和石榴子石为主^[20-21]。研究区寒武纪花岗岩 Al_2O_3 含量为 12.36%~15.46%,7 个样品均低于 15%,1 个样品高于 15%,总体指示源区残留相可能以角闪石、斜长石和斜方辉石为主。

根据寒武纪中酸性侵入岩岩石学特征以及岩石、地球化学特征,岩石内 SiO_2 含量变化于 66.63%~79.89%,平均含量为 71.92%,为中酸性岩;里特曼指数 $\sigma = 1.16 \sim 2.34 (< 3.3)$,显示为钙碱性系列岩石特征。在其 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解^[22](图 9a)中,6 件样品落入 I-型区域内,2 件样品落入 A-型区域内;在其 $\text{Ce}-\text{SiO}_2$ 图解^[23](图 9b)中,8 件样品全部落入 I-型区域内。可见,寒武纪中酸性侵入岩应为 I-型花岗岩。地壳的 La/Nb 值 2.2,明显高于原始地幔值 0.98~1,常用于判断地幔物质是否受到陆壳的混染^[24],因此可以作为陆壳混染和陆壳物质在地幔循

环的标志。文中寒武纪花岗岩岩体的 La/Nb 均值为 1.56,证明了陆壳、地幔物质参与了岩浆的形成。综上,说明了该岩体为壳源岩浆与幔源岩浆混合作用的产物。

Pearce 等^[25] 提出 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 和 $\text{Rb}-(\text{Yb}+\text{Ta})$ 图解用于区分同碰撞花岗岩、板内花岗岩、火山弧花岗岩、洋中脊花岗岩等构造环境。在寒武纪中酸性侵入岩构造环境 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 判别图解(图 10a)中,8 个样品均落入火山弧花岗岩区域中;在其构造环境 $\text{Rb}-(\text{Yb}+\text{Ta})$ 判别图解(图 10b)中,8 个样品均落入火山弧花岗岩区域中,但是部分样品与板内花岗岩区域有重叠,指示寒武纪变质花岗岩大地构造环境为大陆边缘岛弧环境。

与冈瓦纳大陆的聂拉木群、拉轨岗日群相比,卡穷岩群同属于冈瓦纳大陆北缘裂离出的微陆块,这已是被广泛认可的事实。本次研究在吉利地区获得变质花岗岩 U-Pb 锆石同位素年龄为 $494.7 \pm 3.4\text{Ma} \sim 503.7 \pm 4.7\text{Ma}$,与邻区同卡获得的同位素年龄相一致,晚于卡穷岩群形成时间($1082 \pm 18\text{Ma}$),通过对比同卡岩体岩石特征,其应同样视为构造-岩浆事件的古侵入体。

表 2 变质二长花岗岩 (PM14U-Pb2-2)、变质花岗岩闪长岩 (PM14U-Pb10-1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄
 Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb age determinations of the metamorphic monzogranites (the sample PM14U-Pb2-2) and metamorphic granodiorites (the sample PM14U-Pb10-1) in the Jili area

测点号	同位素比值				年龄值 (Ma)						
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ			
变质二长花岗岩 (PM14U-Pb2-2)											
1	0.05886	0.00245	0.02761	0.08351	0.00121	562.0	88.2	525.0	16.7	517.0	7.2
2	0.0557	0.00456	0.05072	0.0825	0.00174	440.2	172.7	497.9	31.5	511.0	10.3
4	0.05745	0.00175	0.01941	0.08155	0.00104	508.4	66.2	505.6	11.9	505.4	6.2
5	0.05712	0.00220	0.02462	0.08289	0.00115	495.7	83.1	509.8	15.1	513.3	6.8
6	0.06168	0.00343	0.03752	0.08121	0.00138	663.0	114.9	532.8	22.5	503.4	8.2
7	0.05503	0.00361	0.03846	0.07904	0.00147	413.3	140.5	476.6	24.4	490.4	8.8
9	0.05790	0.00840	0.08947	0.07921	0.00279	525.6	290.0	497.1	55.7	491.4	16.6
11	0.05700	0.00359	0.03905	0.08091	0.00148	491.1	133.6	499.4	24.2	501.6	8.8
13	0.05752	0.00330	0.03515	0.07919	0.00136	511.2	121.6	494.4	21.9	491.3	8.1
14	0.05787	0.00232	0.02535	0.08101	0.00115	524.7	85.7	505.8	15.6	502.1	6.8
15	0.05750	0.00234	0.02596	0.08215	0.00118	510.5	87.4	508.8	15.9	509.0	7.0
16	0.05757	0.00359	0.04021	0.08316	0.00151	512.9	131.8	514.2	24.6	515.0	9.0
17	0.05786	0.00202	0.02200	0.08054	0.00108	524.2	75.0	503.4	13.6	499.3	6.4
18	0.05870	0.00247	0.02783	0.08341	0.00121	556.0	89.3	523.3	16.9	516.4	7.2
22	0.05913	0.00211	0.0236	0.08261	0.00112	572.0	75.9	522.4	14.3	511.7	6.6
24	0.05912	0.00211	0.02325	0.08163	0.00111	571.6	75.7	517.4	14.2	505.9	6.6
25	0.05775	0.00184	0.02055	0.08254	0.00107	520.2	68.6	512.4	12.6	511.3	6.4
27	0.05832	0.00173	0.01833	0.07813	0.00099	541.1	64.3	494.5	11.4	485.0	5.9
28	0.06015	0.00349	0.03846	0.08196	0.00142	609.0	120.6	526.1	23.2	507.8	8.4
30	0.05770	0.00147	0.01579	0.07882	0.00096	518.2	55.4	493.8	9.8	489.1	5.7

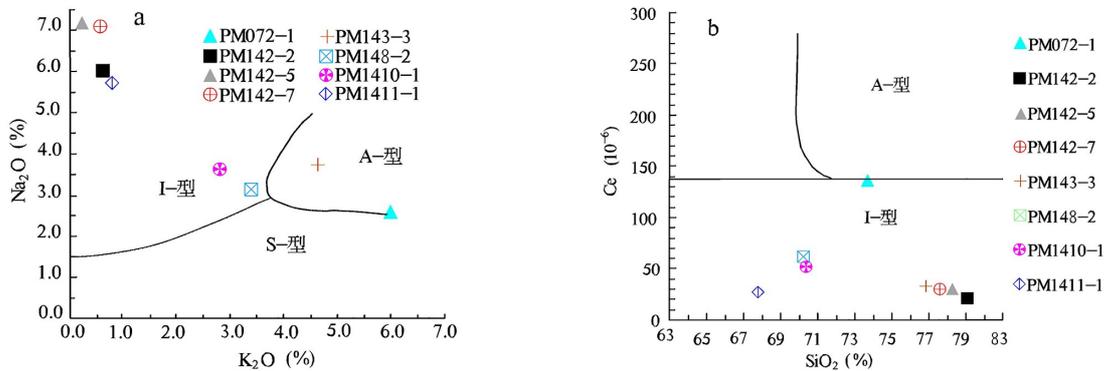


图9 吉利地区变质花岗岩岩体 K_2O-Na_2O 图解(底图据文献^[22]) (a) 和 $Ce-SiO_2$ 图解(底图据文献^[23]) (b)

Fig. 9 K_2O vs. Na_2O diagram (a) (after Rollinson et al., 1995) and Ce vs. SiO_2 diagram (b) (after Collins et al., 1982) of the metamorphic granites in the Jili area

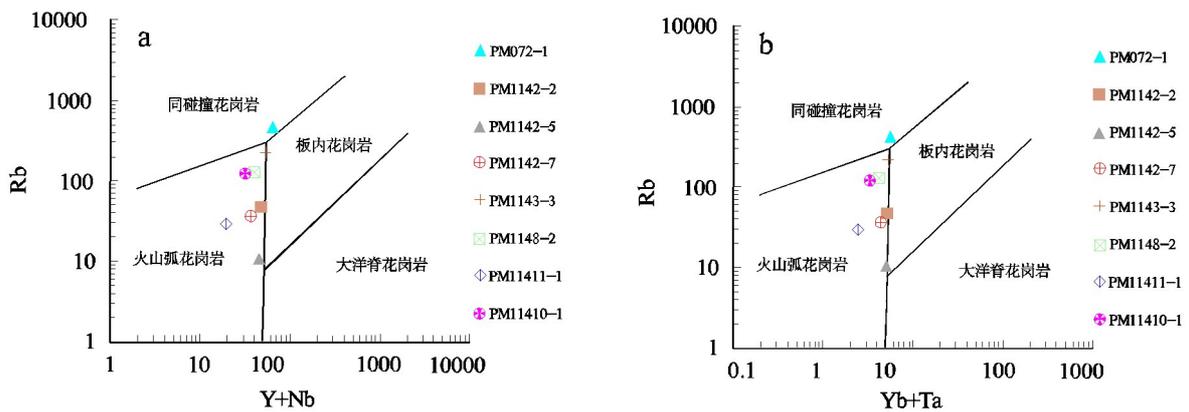


图10 吉利地区变质花岗岩岩体 $Rb-(Y+Nb)$ 判别图解(a) 和 $Rb-(Yb+Ta)$ 判别图解(b) (底图据文献^[25])

Fig. 10 Rb vs. $(Y+Nb)$ diagram (a) and Rb vs. $(Yb+Ta)$ diagram (b) for the tectonic interpretation of the metamorphic granites in the Jili area (after Pearce, 1996)

5 结论

(1) 西藏吉利地区曲扎湖-提卡岩浆弧属过铝质钙碱性花岗岩岩石系列。岩体富集 Th、U、La、Ce、Nd 等, 亏损 K、Ba、Nb、Sr、P、Ti 等, 而 Sr 与 Ba 的亏损反映了分异的分离结晶作用存在。

(2) 岩体内锆石 CL 图像显示其为岩浆成因, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年值为 $494.7 \pm 3.4 Ma-503.7 \pm 4.7 Ma$, 表明其岩石成岩年龄为寒武纪, 从侧面印证了研究区内存在泛非时期结晶基底。

(3) 吉利地区寒武纪中酸性侵入岩岩体为壳源岩浆与幔源岩浆混合作用的产物, 其形成于大陆边缘岩浆弧环境。根据其岩浆岩侵位时代及区域构造背景, 认为吉利地区变质花岗岩形成于冈瓦纳大

陆裂离卡穷微陆块阶段, 同时表明原特提斯洋形成最早时限可追溯至寒武纪。

致谢 论文的数据及成果来源于西藏吉利地区 1:5 万两幅区域地质调查项目, 项目实施过程中得到了成都地质调查中心王保弟老师、三江带王立全首席、西藏地勘局曾庆高总工的指导与帮助, 以及项目组成员的倾力相助; 论文修改过程中, 审稿专家给予了宝贵的意见, 在此一并表示感谢!

参考文献:

[1] 孔会磊, 董国臣, 莫宣, 等. 滇西三江地区临沧花岗岩的岩石成因、地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素的约束[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1438-1452.

- [2] 尹福光,王东兵,王保弟,等. 西南三江造山带地层区划[J]. 沉积与特提斯地质,2017,37(4):1-6.
- [3] 谢尧武,彭兴阶,陈德泉,等. 八宿县幅 1:25 万区调区域地质调查报告[R]. 拉萨:西藏自治区地质调查院,2007. 289-299.
- [4] 李才,谢尧武,沙绍礼,等. 藏东八宿地区泛非期花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 基础地质,2008,27(1):64-67.
- [5] 何世平,李荣社,王超,等. 青藏高原冈底斯北缘卡穷岩群形成时代的确定[J]. 地球化学,2012,41(3):217-223.
- [6] 任飞,潘桂荣,尹福光,等. 西南三江地区洋板块地层特征及构造演化[J]. 沉积与特提斯地质,2017,37(4):9-15.
- [7] 李光明,冯孝良,黄志英,等. 西藏冈底斯构造带中段多岛弧-盆系及其演化[J]. 沉积与特提斯地质,2000,20(4):37-45.
- [8] 王铠元. 西南三江构造带及扬子西缘前寒武纪基底岩群与构造演化[J]. 云南地质,1996,(2):138-148.
- [9] 黄汲清,陈国铭,陈炳蔚. 特提斯-喜马拉雅构造域初步分析[J]. 地质学报,1984,(1):1-17.
- [10] 沙绍礼,谢尧武,陈应明,等. 藏东同卡石榴辉石岩和拉萨地体松多蓝片岩[J]. 中国地质,2009,36(6):1302-1311.
- [11] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling - induced melt - peridotite interactions in the Trans - North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51: 537-571.
- [12] Liu Y S, Hu Z C, Zong, K Q, et al. reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15):1535-1546.
- [13] Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley, California: Berkeley Geochronological Center, 2003.
- [14] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth - Science Reviews*, 1994, 37:215-224.
- [15] Maniar P D and Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- [16] Martin H. Adakitic magmas; modern analogues of Archean granitoids [J]. *Lithos*, 1999, 46: 411-429.
- [17] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 1993, 362: 144-146.
- [18] 王楠,吴才来,秦海鹏,等. 川西义敦岛弧稻城花岗岩体和海子山花岗岩体锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及地质意义[J]. 地质学报,2016,90(11):3227-3245.
- [19] Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes [J]. 1989:313-345.
- [20] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust - mantle recycling [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 891-931.
- [21] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite / eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities [J]. *Precambrian Research*, 1991, 51(1-4):1-25.
- [22] Rollinson H R. Using geochemical data: Evaluation, Presentation, Interpretation [J]. *Computers & Geosciences*, 1995, 21(3):439.
- [23] Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. Nature and origin of A type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1982, 80: 189-200.
- [24] Dungan M A, Lindstrom M M, McMillan N J, et al. Open system magmatic evolution of the Taos Plateau volcanic field, northern New Mexico, the petrology and geochemistry of the Servilletts basalt [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91: 5999-6028.
- [25] Pearce J A. Source and setting of granitic rocks [J]. *Episodes*, 1996, 19:120-125.

The Cambrian metamorphic granites in the Jili area, Baxoi, Xizang: U-Pb dating, geochemical signatures and geological significance

KANG Chaolong¹, DAI Kegang¹, LI Haibo^{1,2}, LIANG Cheng³, CHEN Xiaoshen¹, ZHA Xi¹, WANG Tianze¹, LI Jing¹

(1. No. 5 Geological Prospecting Party, Xizang Bureau of Geology and Mineral Resources, Lhasa 850000, Xizang, China; 2. Research Institute of Geology and Mineral Resources, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 3. No. 7 Research Institute of Geology and Mineral Resources, Linyi 276000, Shandong, China)

Abstract: The Cambrian metamorphic granites in the Jili area, Baxoi, Xizang consist dominantly of metamorphic monzogranites and metamorphic granodiorites. The new findings of the metamorphic granites in this study will be of significance in the understanding and reconstruction of the tectonic evolution of the proto-Tethys. The cathodoluminescence images of the zircons indicate the magmatic origin of the metamorphic granites in this area. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data gives the ages of 503.7 ± 4.7 Ma for the schistositized metamorphic monzogranites, and 494.7 ± 3.4 Ma for the metamorphic granodiorites, implying that the metamorphic granites were initiated during the Cambrian. Geochemically, the metamorphic monzogranites have the SiO_2 contents of 69.87% to 79.89%, Al_2O_3 contents of 12.36% to 14.82%, Na_2O contents of 2.54% to 7.16%, K_2O contents of 0.15% to 5.95%, and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios of 0.02 to 2.34, whereas the metamorphic granodiorites have the SiO_2 contents of 66.63% to 70.15%, Al_2O_3 contents of 14.66% to 15.41%, Na_2O contents of 3.60% to 5.63%, K_2O contents of 0.77% to 2.78%, and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios of 0.14 to 0.77, indicating that the above-mentioned metamorphic granites belong to the calc-alkaline to alkaline peraluminous granites. In the Rb vs. (Y + Nb) and Rb vs. (Yb + Ta) discrimination diagrams for the tectonic interpretation, all the granites samples are projected into the volcanic arc granite field, suggesting the continental-margin volcanic arc environments. It follows that the metamorphic granites in the Jili area were initiated in the stages of the Kaqiong micro-continent during the breakup of the Gondwana land, and the timing of the proto-Tethys may be traced back to the Cambrian.

Key words: Jili; metamorphic granite; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; proto-Tethys; Cambrian; Xizang