

拉萨地块北部白垩纪多尼组火山岩的地球化学:形成的构造环境

康志强^{1,2}, 许继峰^{1*}, 王保弟^{1,2}, 董彦辉^{1,2}, 王树庆^{1,2}, 陈建林^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学实验室, 广东广州 510640
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 拉萨地块上广泛分布有中生代的岩浆活动, 研究它们对于认识特提斯构造域的演化和理解整个青藏高原的形成过程有着重要的启示. 对出露于拉萨地块北部的白垩纪多尼组火山岩进行了系统的年代学以及元素地球化学研究, 达过和马跃乡地区的多尼组火山岩主体为酸性岩, 包括少量的玄武岩和玄武安山岩(中基性岩). 火山岩的地球化学组成表明多尼组中基性岩具有高的 Cr(平均为 184×10^{-6})和 Ni(平均为 43×10^{-6}), 富集强不相容性元素 Rb、Th、U, 而亏损 Nb、Ta、Ti 的特点, 显示明显的弧火山岩成分特征, 可能来源于具有较厚陆壳背景下的大陆边缘地幔楔的部分熔融; 而酸性岩具有相对高的 SiO_2 、 K_2O 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 以及低的 $\text{Mg}^\#$ (最大值为 32.4), 富集大离子亲石元素 Rb、Ba 以及 Th、U、LREE 等, 具有很高的 Rb/Sr(1.06~4.47, 平均为 2.73), 并且与拉萨地块南部林子宗群酸性火山岩具有非常相似的蛛网图曲线, 表明多尼组酸性岩与中基性岩可能来自不同的岩浆源区, 前者很可能来源于上覆地壳的部分熔融. 通过对两个酸性岩样品中锆石的 U-Pb LA-ICPMS 定年, 分别获得了 116 ± 1 Ma 和 115 ± 1 Ma 的年龄值, 显示多尼组火山岩形成于早白垩世中期. 该地区多尼组火山岩形成的构造环境仍然存在两种可能性, 其一是新特提斯班公湖—怒江洋岩石圈向南俯冲导致了该火山岩的产生; 其二可能是早白垩世该地段的构造伸展作用导致加厚地壳的广泛部分熔融形成酸性火山岩, 并伴随陆下地幔的熔融事件产生的少量中基性火山岩.

关键词: 拉萨地块; 多尼组; 早白垩世; 班公湖—怒江洋; 地球化学.

中图分类号: P591

文章编号: 1000-2383(2009)01-0089-16

收稿日期: 2008-10-21

Geochemistry of Cretaceous Volcanic Rocks of Duoni Formation in Northern Lhasa Block: Discussion of Tectonic Setting

KANG Zhi-qiang^{1,2}, XU Ji-feng^{1*}, WANG Bao-di^{1,2}, DONG Yan-hui^{1,2}, WANG Shu-qing^{1,2}, CHEN Jian-lin^{1,2}

1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: It can better understand the geological evolution of the Tethys and construction of the whole Tibet plateau through studying Mesozoic volcanic rocks widely exposed in Lhasa block. In present study, we report new major trace of elemental compositions and zircon U-Pb dating results of the Duoni Formation volcanic rocks in north Lhasa block. Duoni Formation volcanic rocks in Daguo and Mayuexiang areas mainly contain acid rocks and a few basalts, andesitic-basalts (intermediate-basic group). The intermediate-basic rocks with high Cr (184×10^{-6} in average) and Ni (43×10^{-6} in average), showing geochemical characteristics similar to the volcanic rocks that in arcs or active continental margins, such as LILE's enrichment and HFSE's depletion, which thought to be the melting products of continental marginal mantle wedge below a thickened crust due to southward subduction of the Bangongco-Nujiang ocean. The acid rocks have relatively high SiO_2 , K_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ and very low $\text{Mg}^\#$ (the maxim is 32.4), enrich in Rb, Ba, Th, U and LREE, high Rb/Sr (1.06-4.47, the average is 2.73), and have spidergram patterns similar to the acid rocks of the Linzizong Group derived from a crust source. Thus, the acid rocks in Duoni For-

基金项目: 国家重点基础研究 973 项目 (Nos. 40721063, 40425003, 9014001).

作者简介: 康志强 (1979-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石地球化学研究. * 通讯作者: 许继峰, E-mail: jifengxu@gig.ac.cn

mation were came from a magmatic source different from those of the intermediate-basic rocks. Zircons from two acid rocks in Duoni Formation were dated by LA-ICPMS, obtaining age of 116 ± 1 Ma and 115 ± 1 Ma, respectively. We suggest that there are probably two possibilities for the formation tectonic setting of Duoni Formation; the southward subduction of the Bangongco-Nujiang ocean, or the tectonic extension in Early-Cretaceous in the Lhasa terrane.

Key words: Lhasa block; Duoni Formation; Early Cretaceous; Bangongco-Nujiang Ocean; geochemistry.

0 引言

拉萨地块(冈底斯带)作为印度与亚洲大陆直接碰撞的前锋地带,一直以来受到了广泛的关注,不过相对于碰撞后构造过程和岩浆作用的研究成果,拉萨地块新生代以前的地质演化一直没有得到很好的约束。值得注意的是拉萨地块上广泛分布有中生代火山岩,这为了解中生代时期拉萨地块的地质演化,提供了良好的载体。

目前人们对于拉萨地块中生代火山岩的研究主要集中在中南部地区(Coulon *et al.*, 1986; Pearce and Mei, 1988; 李才等, 2003; 和钟铎等, 2005; 翟庆国等, 2005; 董彦辉等, 2006; 姚鹏等, 2006), 并认为分布在拉萨地块南部的桑日群和叶巴组火山岩为新特提斯洋向北俯冲消减的产物; 对于中北部地区火山岩浆活动的分布特点、性质和构造环境关注较少, 同时对该地区中生代火山—岩浆活动的地球动力学环境也存在不同认识, 一些学者将其归因于新特提斯洋壳北向俯冲(Coulon *et al.*, 1986; Ding and Lai, 2003; Ding *et al.*, 2003; Kapp *et al.*, 2003), 而部分学者认为除了与新特提斯洋的北向俯冲有关外, 还很可能与班公湖—怒江特提斯洋壳的南向俯冲作用有关(Hsü *et al.*, 1995; 潘桂棠等, 1997, 2004; 朱弟成等, 2006)。因此, 要全面分析拉萨地块中生代岩浆活动的地球动力学环境, 还需要更多地了解拉萨地块中北部岩浆活动所蕴含的信息。本文通过对出露于拉萨地块北部多尼组火山岩的地球化学以及年代学研究, 试图探讨其岩石成因以及形成环境, 从而对拉萨地块中北部中生代的构造演化加以约束。

1 地质概况

多尼组(K_1d)源于李璞(1955)在洛隆县多尼村命名的“多尼煤系”, 原义指分布于洛隆、八宿地区的一套白垩纪含煤砂页岩地层。1964年全国地层委员会将其改称为多尼组, 其主要分布在北侧的班公湖—怒江缝合带与南侧的狮泉河—永珠—纳木错—

嘉黎结合带之间(北冈底斯), 从东部纳木错北岸一直到西部革吉、色尔地区均有出露, 东西延伸约 900 km(图 1)。除东部班戈晕布恶玛一带出露有少量玄武岩外, 该带火山岩主体岩性均为中酸性岩。除火山岩外, 还出露大量石英砂岩、粉砂岩、泥质岩和生物碎屑灰岩等。

多尼组火山岩的年代学研究比较薄弱, 从区域地层上看, 多尼组下段与晚侏罗—早白垩世日拉组呈整合接触, 上段与早白垩世郎山组灰岩呈平行不整合接触; 从已有的古生物化石来看, 如在当雄幅^①、多巴区幅^②、日土幅^③、以及革吉县幅^④中产出大量的双壳类、腹足类及刺毛类化石, 以上这些古生物化石鉴定为白垩世分子, 表明多尼组火山岩的形成时代约为早白垩世。但到目前为止并没有精确的锆石 U-Pb 年龄报道。

本次研究主要选取了申扎县达过地区的达过火山岩(图 2a)和马跃乡附近的火山岩(图 2b), 在达过地区多尼组下覆与日拉组结晶灰岩整合接触, 上覆与郎山组生物碎屑灰岩呈平行不整合接触, 分为 3 段, 下段为深灰、灰、浅灰色微、薄层状粉砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩韵律层; 中段岩石为成熟度略高的灰、浅灰、灰褐、褐色中层、中薄层状的细、中、粗石英砂岩韵律层为主的一套地层, 多处见化石; 上段是一套以中性火山岩为主的岩石组合, 其岩性为灰绿、绿、灰白色斜长安山岩及少量紫色安山质火山集块岩, 总体厚度大于 2 500 m(郑春子等, 2003); 在马跃乡地区, 多尼组也分为 3 段, 岩性大致可以与达过地区对比, 总体厚度约 3 160 m。

2 分析方法

本次研究在多尼组达过火山岩和马跃乡火山岩中各挑选了一个酸性流纹岩样品作了年代学研究, 样品号分别为: 06DN04 和 06DN14, 选取锆石的 LA-ICPMS U-Pb 测年在中国地质大学(武汉)地质

①中华人民共和国区域地质调查报告, 1: 250 000, 当雄幅。

②中华人民共和国区域地质调查报告, 1: 250 000, 多巴区幅。

③中华人民共和国区域地质调查报告, 1: 250 000, 日土幅。

④中华人民共和国区域地质调查报告, 1: 250 000, 革吉县幅。

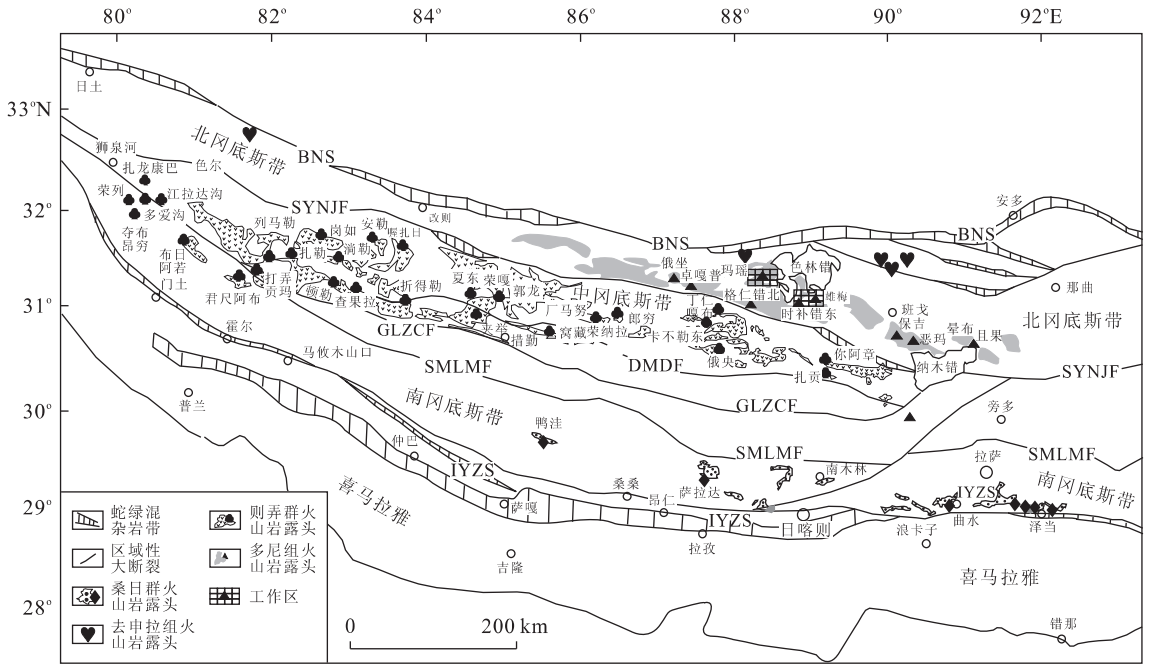


图 1 西藏南部冈底斯带晚侏罗世—早白垩世火山岩分布(据朱弟成等(2006)修改)

Fig. 1 Distribution of the Late Jurassic-Early Cretaceous volcanic rocks on Gangdese, South Tibet

SMLMF, 沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂; GLZCF, 噶尔-隆格-扎日南木错-措麦断裂带; DDMF, 达瓦错-马尔下-德庆断裂; SYNJF, 狮泉河-永珠-纳木错-嘉黎断裂; BNS, 班公湖-怒江缝合带; IYZS, 印度河-雅鲁藏布江缝合带

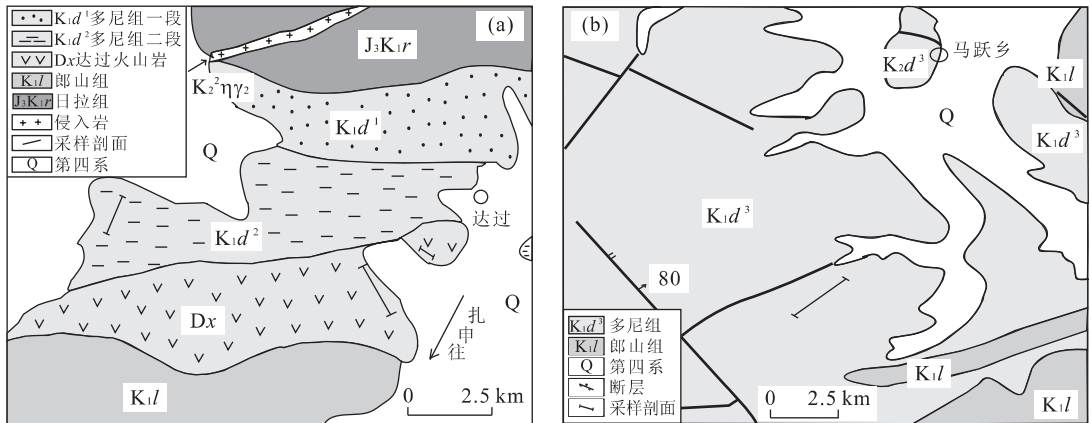


图 2 达过地区地质略图(据 1:25 万多巴区幅修改)(a)和马跃乡地区地质略图(据 1:25 万尼玛区幅修改)(b)

Fig. 2 Simplified geological map of Daguo area (a) and simplified geological map of Mayuexiang area (b)

过程与矿产资源国家重点实验室完成。

锆石在双目镜下按晶形用双面胶粘在玻璃基板上,用环氧树脂凝固成靶,然后去掉玻璃基板,在细砂纸上粗磨使锆石晶体揭露出来,之后抛光制成样品靶。在 LA-ICPMS 分析之前,通过阴极发光图像以揭示锆石内部结构。测试所用激光剥蚀系统为 GeoLas 200 m 深紫外 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统,激光束斑直径为 30 μm。测试过程中,用 Nist 610 来计算 Th、U 含量,用标准锆石 91500 做年代校正。数据处理采用 gliter 软件进行,普通 Pb 的校

正用 ComPbCorr # 3_15 by Tom Andosen. xls(Andosen, 2002)来进行。详细分析过程参见文献(Gao et al., 2002; Yuan et al., 2004; Wang et al., 2006)。最后的数据用 isoplot 2.49(Ludwing, 1991)进行计算。分析结果见表 1、2。

样品的主、微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所完成,在处理前选取新鲜样品,去除风化面,手工碎至 1~5 mm(与杏仁体粒径相当),轮流用 5% HNO₃ 和 5% HCL 在超声波清洗仪中清洗,以除去杏仁体及碳酸盐化的影响,烘干后手工选除

表 3 多尼组火山岩的主量(%)、微量元素(10^{-6})分析测试结果Table 3 Composition of major (%) and trace elements (10^{-6}) for volcanic rocks of Duoni Formation

	06DN02	06DN03	06DN04	06DN07	06DN08	06DN10	06DN14	06DN16	06DN18	06DN19	06DN21	06DN11	06DN12	06DN17
SiO ₂	65.78	69.48	66.87	73.94	73.33	75.00	72.94	70.16	71.46	70.16	76.19	48.85	52.68	50.05
TiO ₂	0.69	0.49	0.74	0.31	0.32	0.31	0.25	0.47	0.44	0.45	0.17	1.10	1.15	0.97
Al ₂ O ₃	14.39	14.43	14.75	12.57	12.85	12.78	13.43	14.84	13.77	14.19	12.64	18.01	16.69	17.10
TFe ₂ O ₃	5.90	3.99	5.79	4.31	3.84	2.87	2.95	3.00	3.83	4.57	1.89	7.41	8.42	9.22
MnO	0.05	0.04	0.06	0.03	0.02	0.01	0.03	0.13	0.02	0.01	0.02	0.09	0.09	0.20
MgO	0.99	0.81	0.81	0.22	0.19	0.13	0.61	0.07	0.06	0.10	0.01	2.96	3.97	6.12
CaO	2.02	0.51	0.96	0.25	0.35	0.12	1.98	0.80	0.31	0.51	0.34	10.62	9.66	11.04
Na ₂ O	3.44	4.40	4.60	1.85	2.46	2.01	1.00	2.70	2.28	2.94	2.70	2.74	2.54	2.59
K ₂ O	3.61	3.75	2.79	4.81	4.57	5.21	5.26	6.37	6.76	5.77	5.30	0.61	0.31	0.73
P ₂ O ₅	0.15	0.06	0.12	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.07	0.05	0.00	0.19	0.11	0.13
烧失量	2.53	1.71	2.34	1.81	1.77	1.57	1.42	1.41	1.07	0.94	0.74	7.98	4.10	1.96
总量	99.55	99.66	99.83	100.10	99.71	100.02	99.89	99.98	100.06	99.69	100.02	100.57	99.71	100.10
Mg [#]	28.1	32.1	24.6	10.8	10.4	9.8	32.4	4.9	3.4	4.8	1.5	48.2	52.3	60.7
Sc	11.9	8.65	11.8	6.40	6.37	6.15	8.98	7.59	6.68	7.74	1.90	22.0	25.7	22.1
Ti	3 702	2 577	3 871	1 538	1 619	1 592	1 243	2 543	2 377	2 558	820	6 405	6 873	5 723
V	44.6	23.7	43.6	2.87	3.26	1.46	18.9	22.8	20.3	23.4	3.78	165	171	148
Cr	15.9	11.5	15.5	29.2	1.82	5.14	25.8	6.57	17.3	18.8	6.19	182	186	186
Mn	387	261	448	198	181	96	204	989	137	111	158	652	738	1 485
Co	7.28	3.47	6.88	0.68	0.44	0.33	1.62	4.95	1.92	1.77	0.80	24.9	27.6	21.0
Ni	6.37	3.22	3.71	18.9	2.02	1.12	10.4	2.55	3.55	5.06	2.97	37.2	18.2	74.3
Cu	15.4	16.7	7.07	10.5	8.08	6.33	6.59	8.05	6.65	7.56	6.22	41.7	30.7	29.0
Zn	73.3	42.2	53.5	40.4	47.1	28.7	16.9	85.7	20.2	27.1	32.2	65.2	62.7	180.9
Ga	18.9	17.6	18.7	18.5	17.4	19.7	17.2	18.5	15.7	16.5	12.0	16.4	16.2	16.6
Ge	2.47	1.51	1.89	2.28	2.19	2.13	2.39	2.32	3.04	2.67	3.14	2.09	2.06	2.00
Rb	130	147	99	214	201	213	226	280	279	272	191	17.3	4.03	32.3
Sr	101	67.0	92.9	77.1	96.8	84.7	70.5	70.6	74.6	106	65.0	231	227	366
Y	43.6	39.8	45.5	37.0	43.8	46.9	46.1	27.9	38.3	41.4	24.9	23.0	20.6	22.0
Zr	431	379	474	482	484	476	209	311	271	307	187	162	129	148
Nb	14.2	14.0	14.1	16.9	17.1	17.3	12.5	12.4	11.6	11.7	13.6	9.10	5.31	8.37
Cs	3.81	4.11	2.84	15.5	18.8	12.2	14.9	14.0	14.1	13.6	4.87	7.66	8.05	6.30
Ba	462	382	521	492	357	382	328	471	565	469	641	125	85	262
La	33.1	21.5	30.5	39.5	28.5	33.3	58.1	37.4	41.2	41.0	38.4	18.8	9.55	22.2
Ce	70.7	44.0	64.2	77.0	59.2	63.8	115.2	73.8	83.7	79.3	74.6	40.9	22.0	45.4
Pr	8.80	5.61	7.74	9.95	7.43	8.21	14.17	8.65	9.78	9.50	8.21	5.23	2.92	5.69
Nd	32.2	20.6	29.3	35.0	26.7	28.8	48.1	30.0	34.6	32.6	27.3	19.3	11.8	21.4
Sm	7.08	4.53	6.33	6.77	5.72	5.83	9.44	6.11	7.01	6.40	5.03	4.11	3.05	4.24
Eu	1.44	0.75	1.38	1.06	1.14	1.09	0.64	1.04	0.97	1.16	0.67	1.22	1.08	1.24
Gd	7.37	4.84	6.83	6.18	6.39	6.42	8.42	5.71	6.66	6.37	4.45	4.09	3.42	4.18
Tb	1.28	0.99	1.26	1.08	1.24	1.29	1.46	0.93	1.13	1.15	0.70	0.69	0.62	0.66
Dy	8.10	6.81	8.53	6.86	8.07	8.42	8.85	5.73	6.99	7.15	4.43	4.46	3.91	3.96
Ho	1.69	1.54	1.81	1.49	1.67	1.82	1.77	1.14	1.44	1.49	0.87	0.86	0.81	0.83
Er	4.84	4.70	5.26	4.35	5.07	5.38	4.91	3.27	4.17	4.31	2.61	2.43	2.36	2.19
Tm	0.73	0.74	0.76	0.66	0.77	0.83	0.72	0.47	0.59	0.62	0.40	0.36	0.34	0.32
Yb	4.59	4.78	4.99	4.42	5.09	5.34	4.49	3.18	3.90	4.11	2.67	2.23	2.09	1.97
Lu	0.72	0.76	0.76	0.72	0.84	0.86	0.68	0.51	0.60	0.64	0.43	0.35	0.33	0.32
Hf	10.7	10.5	11.4	11.8	12.0	11.8	7.1	9.06	7.90	8.70	5.95	4.60	3.69	3.90
Ta	1.23	1.26	1.26	1.49	1.51	1.49	1.23	1.19	1.13	1.12	1.35	0.69	0.48	0.63
Pb	22.6	13.6	4.35	8.79	10.6	7.34	12.5	16.9	20.7	30.5	6.11	8.78	10.4	14.0
Th	17.9	20.4	18.1	22.6	22.1	22.4	27.9	25.9	24.6	24.7	23.7	8.26	5.00	8.16
U	4.11	4.51	4.32	3.30	3.90	3.77	5.28	5.93	5.91	4.53	3.78	1.37	1.19	1.47
AVCNK	1.09	1.18	1.20	1.44	1.33	1.39	1.23	1.16	1.18	1.18	1.17	0.74	0.76	0.68

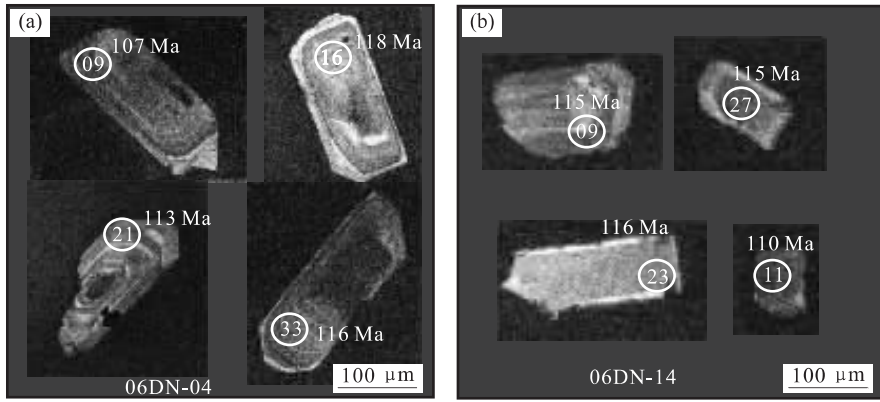


图 3 多尼组样品 06DN04 和 06DN14 的锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of analyzed zircons from sample 06DN04 and 06DN14 in Duoni Formation

石英质杏仁体,随后用不锈钢钵粉碎至 200 目用于化学分析。主量元素采用碱熔玻璃片 XRF 法分析,微量元素采用高温高压消解,用 PE Elan 6000 型 ICP-MS 分析。主量元素的分析精度好于 5%,微量元素的分析精度优于 10%。相关分析方法和程序参见刘颖等(1996)。分析测试结果列在表 3 中。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

两个样品锆石的 Th/U 均在 0.43~1.05 之间,属典型的岩浆成因锆石(Wu and Zheng, 2004),CL 图像上锆石晶形多呈长柱状,具有明显的振荡环结构(图 3),其中 06DN04 的 37 个分析点加权平均年龄为 116 ± 1 Ma(图 4a),06DN14 的 38 个分析点加权平均年龄为 115 ± 1 Ma(图 4b),几乎完全一致的两个年龄代表了多尼组火山岩的形成时代;在样品 06DN04 中有一个分析点年龄较老为 628 Ma,可能属于继承性的老锆石。

3.2 主量元素

从样品的 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)图(TAS 分类图)(图 5)中,可以看出多尼组火山岩是一套化学成分连续分布的亚碱性火山岩,岩石组合以酸性的英安岩和流纹岩为主,包括少量的玄武岩、玄武安山岩以及安山岩(包括 1:25 万区调数据)。具体到本次研究的达过地区和马跃乡地区,多尼组火山岩则主要由偏基性和酸性两个端元组成,缺少中间的岩石组合,似有“双峰式”火山岩的特征。在 SiO_2 - K_2O 图(图 6a)中,中基性岩落在低钾和中钾钙碱性岩区域,酸性岩则主体为高钾钙碱性岩,并且有部分落在了钾玄岩(SHO)系列区域;中基性岩有着较低

$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.12~0.28)比值,而酸性岩的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值则较高(0.61~3.00),在 K_2O - Na_2O 图上(图 6b),酸性岩全部落入了钾玄质和超钾质岩区域。另外,酸性岩有着高的 A/CNK 比值(1.10~1.44,平均为 1.24),全部为过铝质岩石,这些特征与林子宗群的中酸性火山岩很相似,表明地壳物质对于岩浆的贡献已相当显著,已有研究指出钾玄岩系列岩石的出现可能是拉萨地块上陆内岩浆作用的重要标志(莫宣学等,2003)。

在主量元素的 Harker 图解(图 7)中,随着 SiO_2 含量的增加, Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 的含量与其呈现一定的负相关性, K_2O 随着 SiO_2 含量的增加总体上呈现出递增的趋势,但是本次研究的多尼组酸性火山岩却发生了 K_2O 含量突变陡增的现象,暗示多尼组酸性岩可能有着与中基性岩不同的源区。

3.3 微量元素

研究区多尼组火山岩的球粒陨石标准化 REE 分配模式(图 8)表现为轻稀土富集型,酸性火山岩的轻稀土富集程度总体上大于中基性火山岩,中基性岩火山岩的 $\sum\text{REE}$ 平均为 95×10^{-6} ,酸性火山岩的 $\sum\text{REE}$ 含量较高,平均为 185×10^{-6} 。中基性岩的 Eu 表现出从无异常到轻微的负异常, Eu^* 在 0.90~1.02 之间;而酸性火山岩具有明显的 Eu 负异常, Eu^* 在 0.22~0.64 之间,通常认为 Eu 负异常的产生与斜长石分离结晶或在部分熔融过程中斜长石作为难熔残余相存在有关。多尼组火山岩喷发主体未大规模的中酸性喷发,如此酸性的岩浆由于高粘度通常很难发生广泛的分离结晶作用,虽然产生这些酸性火山岩 Eu 负异常的原因不能完全排除分离结晶的可能性,但笔者认为更可能是由于在陆壳的大规模熔融过程中留下斜长石作为难熔残余所致。

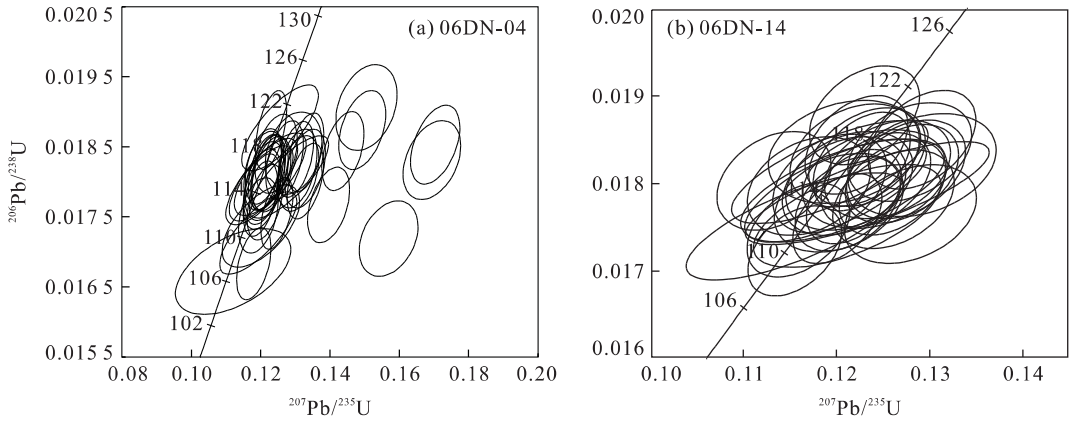


图 4 样品 06DN04(a)和 06DN14(b)的锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb Concordia diagrams for zircons separated from volcanic rock sample 06DN04 (a), 06DN14 (b) respectively

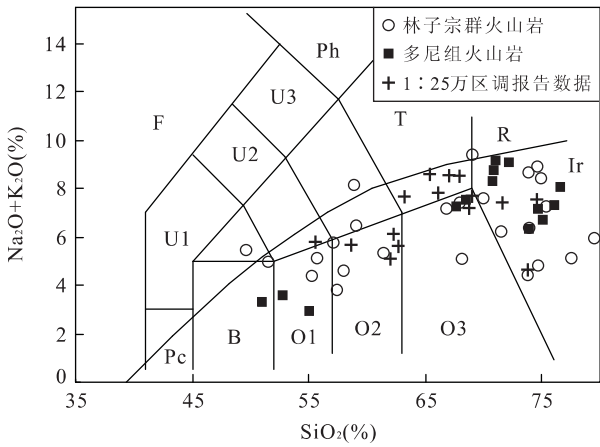


图 5 多尼组火山岩 TAS 分类图解(林子宗群火山岩数据来源 于 Mo *et al.* (2007,2008))

Fig. 5 TAS diagram of volcanic rocks in Duoni Formation

在微量元素蛛网图上(图 9),多尼组火山岩总体上具有富集强不相容性元素 Rb、Th、U,而亏损 Nb、Ta、Ti 的特点,酸性岩比基性岩具有更加明显

的 Nb、Ta、Ti 和 Ba 谷,并且具有明显的 Sr 的负异常,这与其具有明显的 Eu 负异常是一致的.微量元素蛛网图中 Nb、Ta、Ti 亏损谷通常被解释为与俯冲作用有关的火成岩的特征(Condie, 2001),但是具有这种成分特征的火山岩也能出现在大陆背景(古俯冲消减环境)之中,一种可能的解释是岩浆源区存在角闪石、金红石难熔残余,在部分熔融过程中, Nb、Ta 优先进入角闪石晶格, Ti 进入金红石,从而使岩浆中的 Nb、Ta、Ti 亏损(Rollison, 1993).

4 讨论

4.1 构造背景及岩浆源区

本次研究所采集的多尼组火山岩样品中基性岩较少,把仅有的 3 个基性岩应用 Wood(1980)提出的 Hf-Th-Ta 图解判别火山岩的构造环境,3 个样品落在了钙碱性岛弧火山岩区域(图 10a);为了进

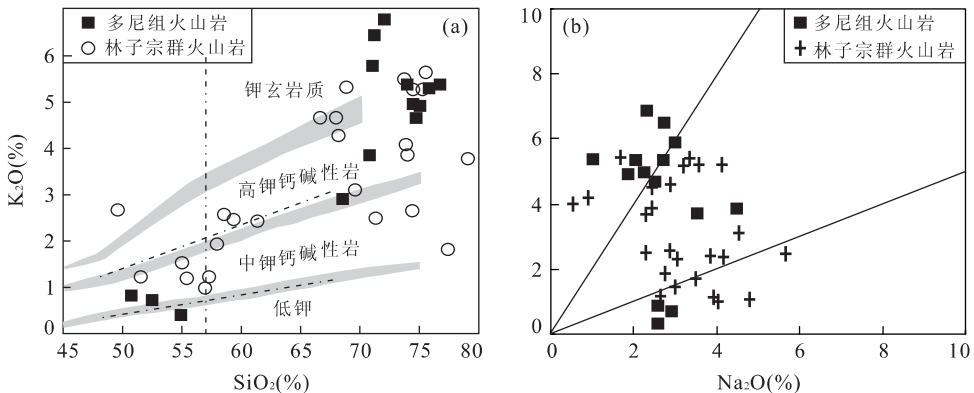


图 6 多尼组火山岩的 SiO₂-K₂O 判别图解(a)和 Na₂O-K₂O 判别图解(b)(数据来源同图 5)

Fig. 6 Diagrams of SiO₂ vs K₂O (a) and Na₂O vs K₂O (b) of volcanic rocks in Duoni Formation

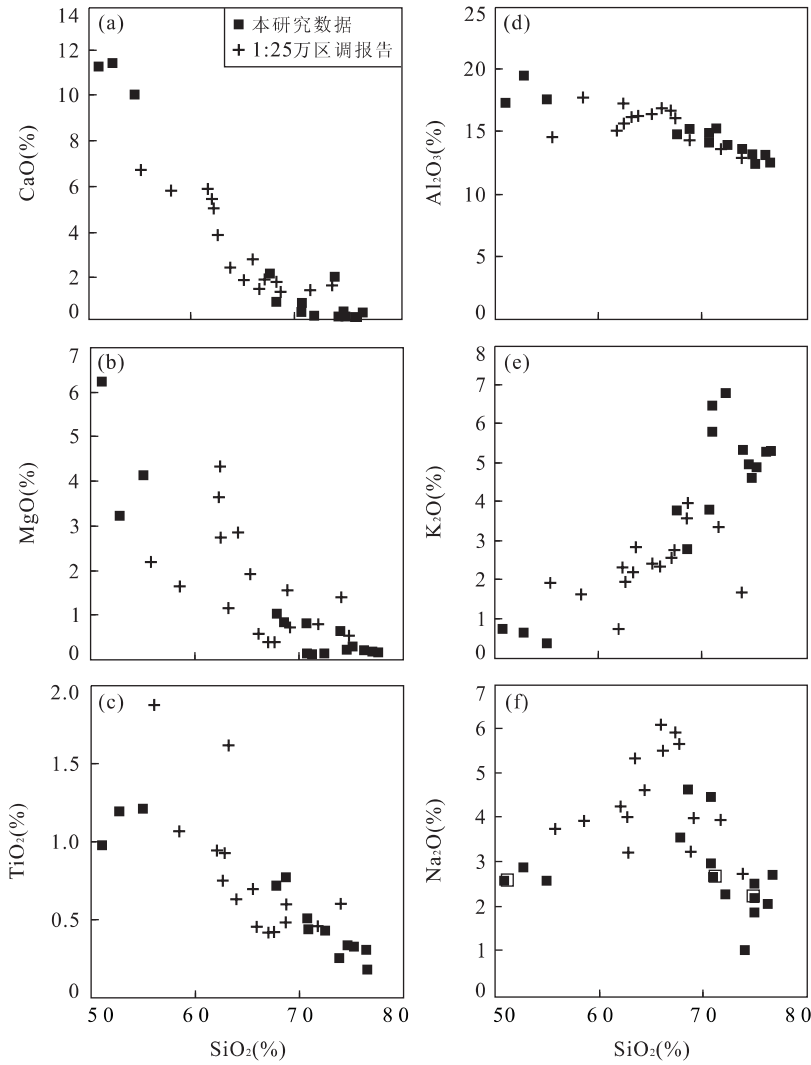


图 7 多尼组火山岩的哈克图解

Fig. 7 Harker variation diagrams for the volcanic rocks in Duoni Formation

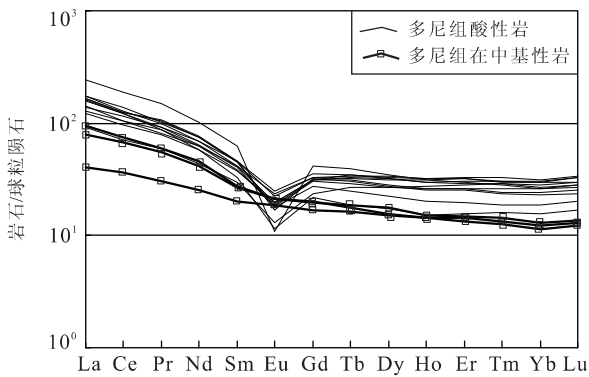


图 8 多尼组火山岩球粒陨石标准化稀土配分图

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns for volcanic rocks in Duoni Formation

相容元素,因此,在部分熔融和分离结晶作用过程中,Th/Yb 比值将保持不变,Nb/Yb 比值与此类似 (Pearce, 1983; Rollison, 1993),在该图解中 3 个样品均位于大陆岛弧范围内,表明多尼组中基性火山岩可能与岛弧或活动大陆边缘环境有关。

在中生代整个拉萨地块都处于班公湖—怒江新特提斯洋向南与雅鲁藏布新特提斯洋向北的双向俯冲阶段,这种双向俯冲消减作用导致了大量的弧火山岩和弧盆体系的产生(潘桂棠等,2001a, 2001b, 2006),同时也导致了整个拉萨地块的缩短与陆壳的增厚,England and Houseman(1986)认为拉萨地块在白垩世已经强烈隆升;Ding and Lai(2003)认为在侏罗世最晚期—早白垩世(140~130 Ma),亚洲大陆的南缘可能类似于今天南美大陆西缘的安第斯山脉,由于新特提斯洋的俯冲,引起拉萨地块的加厚及地形的隆起;Murphy *et al.* (1997) 也认为在早白垩

一步判断其可靠性和进一步约束火山岩的构造环境,笔者还采用了 Th/Yb-Nb/Yb 判别图解(图 10b),因为 Yb 为不活动元素,其行为类似于不

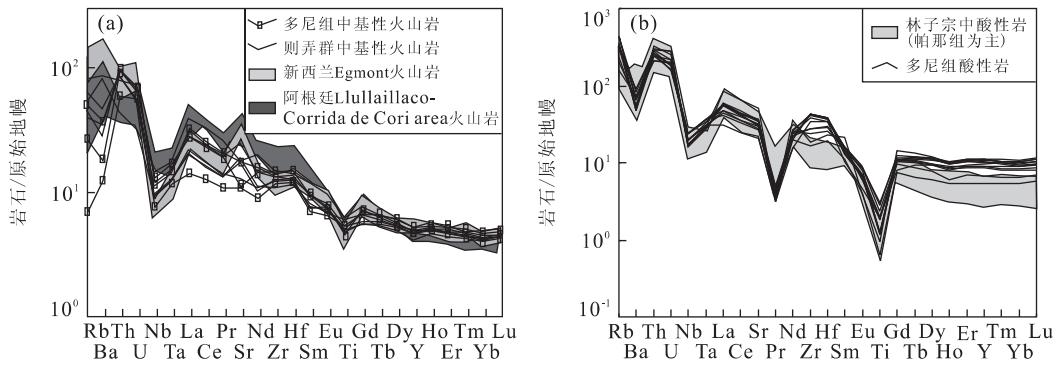


图 9 多尼组中基性(a)和酸性(b)火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 9 Primitive mantle-normalized spidergrams for intermediate-basic (a) and acid (b) volcanic rocks of Duoni Formation respectively

新西兰 Egmont 火山岩数据来源于 Price *et al.* (1999); 阿根廷 Lullailaco-Corrida de Cori area 火山岩来源于 Richards and Villeneuve(2002); 则弄群数据来源于康志强等(2008); 林子宗火山岩数据来源于 Mo *et al.* (2007, 2008)

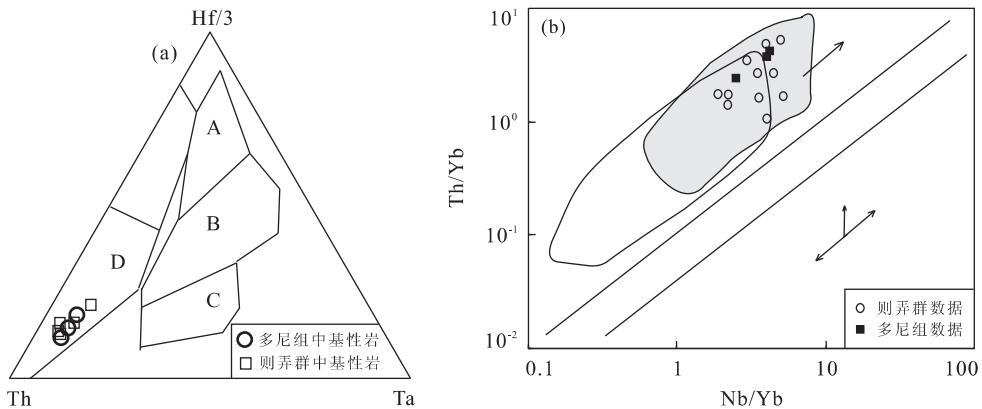


图 10 多尼组基性火山岩的 Th-Ta-Hf(a)(则弄群数据来源同图 9)和判别图解 Th/Yb-Nb/Yb(b)(据 Pearce and Peate(1995), 则弄群数据来源于朱弟成等(2006))

Fig. 10 Th-Ta-Hf (a) and Th/Yb vs Nb/Yb (b) diagrams for mafic lavas of the volcanic rocks in Duoni Formation

世拉萨地块发生了 60% 的缩短; 朱弟成等(2006)也认为拉萨地块中北部的火山岩主要形成于大陆岛弧环境, 甚至部分火山岩还显示了安第斯型(活动大陆边缘)安山岩亲缘性, 可能暗示岩浆活动晚期冈底斯中北部部分地段已演化成为安第斯型陆壳。

那么多尼组火山岩是不是在较厚陆壳背景下产生的典型弧火山岩系列呢? 从岩石组合上来看, 传统意义上的岛弧火山岩是以低钾、中钾钙碱性火山岩和安山岩为主, 而在硅碱图和硅钾图中多尼组火山岩主体为高钾钙碱性的英安岩和流纹岩, 这明显与传统岛弧火山岩特征不相符, 但却与秘鲁南部和智利中部的中安第斯火山岩(16°~26°S)具有很强的相似性(Ramos, 1999); 在微量元素蛛网图(图 9a)中, 多尼组中基性火山岩与较厚陆壳下典型岛弧成因的则弄群火山岩(康志强等, 2008)、新西兰 Egmont 火山岩(Price *et al.*, 1999)和阿根廷西北

部火山岩有着比较一致的分布特征, 显示出明显的弧火山岩特征, 并且从微量元素的对比上也可以看到(表 4), 它们具有非常一致的 Zr、Hf、Y、Yb、La/Yb 和 Mg[#], 比较接近的 Nb、Ta 含量, La/Yb 可以指示地壳的厚度并反应岩浆来源的深度(Kay *et al.*, 1991), 阿根廷西北部的 Cerro Lullailaco to Corrida de Cori 火山岩有比其他三者更大的 La/Yb, 而多尼组中基性火山岩的 La/Yb 与新西兰 Egmont 火山岩、则弄群火山岩较一致, 暗示两者可能具有类似的岩浆形成深度, 表明当时拉萨地块的北缘地壳已经加厚; 值得注意的是多尼组中基性岩有着很高的 Cr、Ni 含量, 这与安第斯 Bolivian Altiplano 新生代晚期的中基性岩很相似, 表明其源区可能受到了富集的软流圈地幔影响, 并且在岩浆演化过程中并没有发生明显的镁铁质矿物的结晶分离, 从而导致了其 Cr、Ni 含量的明显升高(Davidson and De Silva, 1995)。以上

表 4 多尼组中基性火山岩与其他地区中基性火山岩在微量元素 (10^{-6}) 的对比Table 4 Comparison between trace elements (10^{-6}) of basic volcanic rocks from Duoni Formation and from some else areas

产地	Cr	Ni	Zr	Hf	Nb	Ta	Y	Yb	La/Yb	Nb/Ta	Mg [#]
则弄群	54.3	15.7	143	4.00	7.61	0.56	21.2	2.13	8.51	13.7	50.2
新西兰 Egmont	21.2	7.89	119	3.40	4.94	0.47	22.0	2.05	8.69	10.9	51.2
阿根廷西北部			195	5.67	12.8	0.76	20.7	1.89	15.5	17.4	56.0
多尼组	184	43	146	4.06	7.59	0.60	21.9	2.10	8.08	12.6	53.8

注: 则弄群火山岩数据来源于康志强等(2008); 新西兰 Egmont 火山岩数据来源于 Price *et al.* (1999); 阿根廷西北部火山岩来源于 Richards and Villeneuve(2002).

特征表明多尼组中基性火山岩很可能来源于一个具有较厚陆壳背景下的相对富集的地幔楔源区的部分熔融, 与新特提斯班公湖—怒江洋的南向俯冲有关。

一般认为, 长英质火山岩有两种可能的成因: 一是幔源基性岩浆经历广泛结晶分异和同化混染作用的产物(Bacon and Druitt, 1988; Ingle *et al.*, 2002); 二是来自幔源基性岩浆的热量促使地壳物质脱水发生重熔的产物(Roberts and Clemens, 1993; Tepper *et al.*, 1993; Guffanti *et al.*, 1996), 其特征是富集 Al、Th、LREE。从目前已有资料来看, 笔者认为多尼组酸性岩可能不是中基性岩浆经过同化混染分离结晶形成的。因为: (1) 从整个火山岩带上来看, 多尼组火山岩中玄武岩出露很少, 而大量出露的是中酸性的英安岩和流纹岩。(2) 这些中酸性岩有着高的 SiO_2 含量 (67.80%~76.75%), 非常低的 $\text{Mg}^{\#}$ (最大值为 32.4), 因此它们不可能是由地幔岩通过部分熔融直接产出(Baker *et al.*, 1995)。(3) 由 La-La/Sm、La-La/Yb 图(图未附)可知, 研究区的酸性岩并没有表现出分离结晶的趋势, 相反具有部分熔融趋势。(4) 从主微量元素来看, 多尼组酸性岩具有很高的 SiO_2 、 K_2O 以及 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, 富集大离子亲石元素 Rb、Ba 以及 Th、U、LREE 等, 具有很高的 Rb/Sr (1.06~4.47 平均为 2.73), 并且与拉萨地块南部林子宗群中的酸性火山岩具有非常相似的蛛网图曲线(图 9b)。以上特征表明多尼组酸性火山岩最有可能来源于岛弧区上覆地壳的部分熔融。

4.2 成因讨论及其意义

拉萨地块出露有大量的中生代火山岩, 在中北部较大规模出露的有屈伸拉组、多尼组、则弄群等等, 但对于这些火山岩的成因及其对拉萨地块构造演化的指示意义还不是很明确, 特别是多尼组火山岩, 其主要出露在班—怒蛇绿岩带与狮泉河—拉果错—永珠蛇绿岩带之间, 对于新特提斯洋的演化以及整个青藏高原的构造历史都有着重要的意义。但对该火山岩的研究却显得相对薄弱, 西藏 1:25 万区域地质调查中

对该火山岩做过一些工作, 多巴区幅区调报告认为多尼组火山岩反映的构造环境为岛弧区, 为洋盆聚敛阶段的产物; 另外郑春子等(2003)对申扎县北部的多尼组达过火山岩做过一些沉积学方面的研究, 但都没有做详细的同位素定年, 只是通过古生物及地层学方面的证据给出了一定的时代限制, 认为该火山岩形成于早白垩世。本次研究在多尼组达过火山岩和玛跃乡火山岩中各挑选了一个酸性流纹岩样品作了锆石的 LA-ICPMS U-Pb 测年, 首次得到了该火山岩的精确年龄, 两个样品测试结果分别为 116 ± 1 Ma 和 115 ± 1 Ma, 证明其形成时代为早白垩世中期。

目前对于拉萨地块白垩纪火山岩的构造环境存在着不同的认识, 一些学者认为其成因与羌塘地块和拉萨地块碰撞所引起的造山带伸展垮塌有关(Xu *et al.*, 1985; Harris *et al.*, 1988, 1990); 而有些学者认为其成因与新特提斯洋的消减俯冲有关(Coulon *et al.*, 1986; Hsü *et al.*, 1995; 潘桂棠等, 1997, 2004; Ding and Lai, 2003; Ding *et al.*, 2003; Kapp *et al.*, 2003; 朱第成等, 2006), 最近对拉萨地块阿索盆地的沉积学研究表明(Zhang *et al.*, 2004), 多尼组中火山岩具有似双峰式的特征, 并认为与冈底斯弧在早白垩世中期(120~95 Ma)的弧后拉张有关。基于本研究的数据笔者倾向于认为多尼组火山岩的成因与新特提斯班—怒洋的南向俯冲有关, 但是现有数据仍不能完全排除陆内伸展作用的可能性。

一般认为新特提斯班公湖—怒江洋壳形成于晚三叠世—早侏罗世, 中侏罗世洋壳开始了俯冲消减, 在晚侏罗世—早白垩世闭合(常承法和郑锡澜, 1973; 潘桂棠等, 1983, 1997, 2004; 肖序常和李廷栋, 2000; Yin and Harrison, 2000; 邱瑞照等, 2004), 而最近潘桂棠等(2006)认为在白垩世中期该洋盆并没有关闭, 可见对于该洋盆的确切关闭时间并没有统一的认识。从沉积学上来看, 在改则附近红层沉积物被两层火山岩所夹, 在上层火山岩中得到了角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 116 ± 2 Ma, 而下层火山岩中得到了全岩的

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $107 \pm 1 \text{ Ma}$, 这表明在早白垩世中期该地区已经开始了非海相的沉积 (Kapp *et al.*, 2005); 在尼玛地区, 白垩世的非海相地层不整合于强烈变形的海相地层之上, 最年轻的海相地层为 125 Ma (侵入体锆石 U-Pb 年龄), 而非海相地层年龄约为 $118 \sim 99 \text{ Ma}$ (侵入体锆石 U-Pb 年龄), 表明在 $125 \sim 118 \text{ Ma}$ 之间该地区可能经历了从海相到非海相的转变 (DeCelles *et al.*, 2007; Kapp *et al.*, 2007); Leier *et al.* (2007) 在拉萨地块南部 Penbo 地区以及北部的 Duoba 地区做了大量沉积物碎屑锆石的年代学研究 (锆石 U-Pb), 认为从 $145 \sim 100 \text{ Ma}$, 拉萨地块的北部在沉积学上经历了 3 个演化阶段: $145 \sim 130 \text{ Ma}$, 沉积地层主要为浅海相及海岸相; $130 \sim 120 \text{ Ma}$, 主要为一种更浅的海岸平原相沉积; $120 \sim 100 \text{ Ma}$, 其沉积了一套以碳酸盐相为主的地层, 以上种种沉积学的证据表明在早白垩世中期拉萨地块的北部可能由于班公湖—怒江洋俯冲消减的结束而已经演变成了一个非海相的环境。

从多尼组火山岩的特点来看, 中基性岩具有明显的活动大陆边缘火山岩特征, 有可能是新特提斯班公湖—怒江洋南向俯冲导致上覆地幔楔部分熔融的产物, 而酸性火山岩则具壳源岩浆的特征, 这与冈底斯南部林子宗群中酸性火山岩相似, 很可能是由于当时新特提斯班公湖—怒江洋岩石圈的南向俯冲已经结束, 进而羌塘地块与拉萨地块开始碰撞, 残留的洋壳板片流体以及沉积物流体/熔体对上覆地幔楔的贡献减少, 致使其部分熔融规模变小, 从而对上部岩浆房的贡献减少, 随着陆壳的不断加厚以及岩浆房能量的减弱而不足以导致岩浆的喷发, 慢慢聚集在浅部岩浆房中的大量岩浆把已经加厚的地壳不断加热, 从而引起了上覆地壳的部分熔融, 产生了多尼组的酸性火山岩以及拉萨地块中北部大量的浅色过铝质花岗岩 (1:25 万尼玛区幅^⑤; 1:25 万热布喀幅^⑥; 1:25 万邦多区幅^⑦; 刘振声和王洁民, 1994; 莫宣学等, 2005; 和钟铨等, 2006; 廖忠礼等, 2006)。

值得注意的是多尼组火山岩在岩石组合、源区、成因上与拉萨地块南部的林子宗群火山岩有一定的相似之处, 而林子宗群火山岩被认为是南部的雅鲁藏布特提斯洋从俯冲向印度与亚洲大陆碰撞转变过程的火山活动产物 (莫宣学等, 2003), 因此多尼组是否也像林子宗群火山岩一样代表了洋壳俯冲作用的

结束和陆—陆碰撞的开始呢? 笔者初步提出多尼组火山岩可能暗示在早白垩世拉萨地块北部发生了一次重大的构造事件, 即新特提斯班公湖—怒江洋的关闭和羌塘与拉萨地块碰撞的开始, 而多尼组中基性和酸性火山岩则是这次构造事件的产物。目前本文的数据还不能确证这个认识, 尚需对拉萨地块其他中生代火山岩进行更系统的年代学及地球化学等方面的工作来证明。

5 结论

(1) 多尼组火山岩是以酸性的英安岩和流纹岩为主, 包括少量的玄武岩和玄武安山岩的火山岩岩套, 两个酸性岩样品的锆石 U-Pb 年龄分别为 $116 \pm 1 \text{ Ma}$ 和 $115 \pm 1 \text{ Ma}$, 表明多尼组火山岩喷发于早白垩世中期。

(2) 多尼组中基性火山岩具有活动大陆边缘火山岩的地球化学特征, 表明其形成于曾经经历过俯冲消减影响的古地幔楔部分熔融; 多尼组酸性火山岩具有壳源岩石的特征, 应为加厚陆壳部分熔融的产物。

(3) 多尼组火山岩形成的构造背景仍有两种可能性: 残余班—怒特提斯洋的向南俯冲或者拉萨地块北部的陆内伸展作用。笔者建议多尼组火山岩可能指示了早白垩纪中期班公湖—怒江特提斯洋的关闭以及陆—陆碰撞的开始。

致谢: 在锆石挑选过程中得到了广州地球化学研究所李卫老师的大力帮助; 在 LA-ICPMS 分析过程中, 得到了中国地质大学 (武汉) 刘勇胜教授、胡兆初老师、陈海红老师以及研究生张春来、高长贵、李明和徐娟等的大力帮助, 在此一并深表谢意。

References

- Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem. Geol.*, 192: 59—79.
- Bacon, C. R., Druitt, T. H., 1988. Compositional evolution of the zoned calcalkaline magma chamber of mount Mazama, Crater Lake, Oregon. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 98: 224—256.
- Baker, M. B., Hirschmann, M. M., Ghiorso, M. S., et al., 1995. Compositions of near-solidus predictive melts from experiments and thermodynamic calculations. *Nature*, 375: 308—311.
- Chang, C. F., Zheng, X. L., 1973. Geological structure of Qo-

⑤中华人民共和国区域地质调查报告, 1:250 000, 尼玛区幅。

⑥中华人民共和国区域地质调查报告, 1:250 000, 热布喀幅。

⑦中华人民共和国区域地质调查报告, 1:250 000, 邦多区幅。

- molangma Mountains in Tibetan Plateau. *Science in China (Ser. D)*, 2; 190—210 (in Chinese).
- Condie, K. C., 1973. Archean magmatism and crustal thickening. *Geological Society America Bulletin*, 84 (9): 2981—2991.
- Condie, K. C., 2001. Mantle plume and their record in earth history. Cambridge University Press, London.
- Coulon, C., Maluski, H., Bollinger, C., et al., 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 79: 281—302.
- Davidson, J. P., De Silva, S. L., 1995. Late Cenozoic magmatism of the Bolivian Altiplano. *Contrib. Mineral. Petrology*, 119(4): 387—408.
- DeCelles, P. G., Kapp, P., Ding, L., et al., 2007. Late Cretaceous to Middle Tertiary basin evolution in the Central Tibet Plateau: Changing environments in response to tectonic partitioning, aridification, and regional elevation gain. *GSA Bulletin*, 119(5—6): 654—680.
- Ding, L., Kapp, P., Yin, A., et al., 2003. Early Tertiary volcanism in the Qiangtang terrane of central Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 44: 1833—1865.
- Ding, L., Lai, Q. Z., 2003. New geological evidence of crustal thickening in the Gangdese block prior to the Indo-Asian collision. *Chinese Science Bulletin*, 48 (15): 1604—1610.
- Dong, Y. H., Xu, J. F., Zeng, Q. G., et al., 2006. Is there a Neo-Tethys' subduction record earlier than arc volcanic rocks in the Sangri Group? *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 661—668 (in Chinese with English abstract).
- England, P., Houseman, G., 1986. Finite strain calculations of continental deformation; 2, comparison with the Indo-Asian collision zone. *J. Geol. Res.*, 91: 3664—3676.
- Gao, S., Liu, X. M., Yuan, H. L., et al., 2002. Determination of forty-two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser-ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostand. Newsl.*, 26: 181—195.
- Guffanti, M., Clynne, M. A., Muffler, L. J. P., 1996. Thermal and mass implications of magmatic evolution in the Lassen volcanic region, California, and constraints on basalt influx to the lower crust. *Journal of Geophysical Research*, 101(B2): 3003—3013.
- Harris, N. B. W., Inger, S., Xu, R. H., 1990. Cretaceous plutonism in Central Tibet: An example of post-collision magmatism? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44: 21—32, doi: 10. 1016/0377—0273 (90) 90009—5.
- Harris, N. B. W., Xu, R. H., Lewis, C. L., et al., 1988. Isotope geochemistry of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud; Philosophical transactions of the royal society of London. *Series A; Mathematical and Physical Sciences*, 327: 263—285.
- He, Z. H., Yang, D. M., Wang, T. W., 2006. The determination of early Cretaceous post-collision granitoids in Sangba Erea of Gangdese tectonic belt and its tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 185—193 (in Chinese with English abstract).
- He, Z. H., Yang, D. M., Zheng, C. Q., et al., 2005. Geochemistry of the Indosinian granitoids in the Mamba area Gangdise belt, Tibet and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 24(4): 354—359 (in Chinese with English abstract).
- Hsü, K. J., Pan, G. T., Sengör, A. M. C., 1995. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau: A working hypothesis based on the archipelago model of orogenesis. *International Geology Review*, 37(6): 473—508.
- Ingle, S., Weis, D., Frey, F. A., 2002. Indian continental crust recovered from Elan Bank, Kerguelen Plateau (ODP Leg 183, Site 1137). *Journal of Petrology*, 43 (7): 1241—1257.
- Kang, Z. Q., Xu, J. F., Dong, Y. H., et al., 2008. Cretaceous volcanic rocks of Zenong Group in north-middle Lhasa block; Products of southward subducting of the Slainajap ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 3—14 (in Chinese with English abstract).
- Kapp, P., DeCelles, P. G., Gehrels, G. E., et al., 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and India-Asian collisions in the Nima area of Central Tibet. *The Geological Society of America Bulletin*, 119 (7—8): 917—933.
- Kapp, P., Murphy, M. A., Yin, A., et al., 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet. *Tectonics*, 22 (4): 1029, doi: 10. 1029/2001TC001332.
- Kapp, P., Yin, A., Harrison, T. M., et al., 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in Central Tibet. *GSA Bulletin*, 117(7—8): 865—878.
- Kay, S. M., Mpodozis, C., Ramos, V. A., et al., 1991. Magma source variations for Mid-Late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the Central Andes (28° to 33°S). In: Harmon, R. S., Rapela, C. W., eds., Andean magmatism and its tectonic setting. *Geol. Soc. Am. Spec.*

- Pap.*, 265:113—137.
- Leier, A. L., DeCelles, P. G., Kapp, P., et al., 2007. Lower Cretaceous strata in the Lhasa terrane, Tibet, with implications for understanding the early tectonic history of the Tibetan Plateau. *Journal of Sedimentary Research*, 77(10):809—825.
- Li, C., Wang, T. W., Li, H. M., et al., 2003. Discovery of Indosinian megaporphyritic granodiorite in the Gangdise area: Evidence for the existence of Paleo-Gangdise. *Geological Bulletin of China*, 22(5):364—366 (in Chinese with English abstract).
- Li, P., 1955. Elementary understanding of geology in the south of Tibet. *Scientific Bulletin*, 23—30 (in Chinese).
- Liao, Z. L., Mo, X. X., Pan, G. T., et al., 2006. On peraluminous granites in Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 25(7):812—821 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Liu, H. C., Li, X. H., 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6):552—558 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 1991. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data. U. S. Geological Survey Open-file Report, 39:91—445.
- Mo, X. X., Dong, G. C., Zhao, Z. D., et al., 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11(3):281—290 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Niu, Y. L., Dong, G. C., et al., 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet. *Chemical Geology*, 250(1—4):49—67.
- Mo, X. X., Hou, Z. Q., Niu, Y. L., et al., 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos*, 96(1—2):225—242.
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3):135—148 (in Chinese with English abstract).
- Murphy, M. A., Yin, A., Harrison, T. M., et al., 1997. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan Plateau? *Geology*, 25(8):719—722.
- Pan, G. T., Chen, Z. L., Li, X. Z., et al., 1997. Geological-tectonic evolution in the eastern Tethys. Geological Publishing House, Beijing, 1—218 (in Chinese).
- Pan, G. T., Mo, X. X., Hou, Z. Q., et al., 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3):521—533 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, X. Z., et al., 2001a. The tectonic framework and spatial allocation of the archipelagic arc-basin systems on the Qinghai-Xizang Plateau. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(3):1—26 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Zhu, D. C., 2004. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23(1):12—19 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Xu, Q., Wang, L. Q., 2001b. The frame mechanism of multiple island arc-basin system in Tibetan Plateau. *J. Mineral. Petrol.*, 21(3):186—189 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Zheng, H. X., Xu, Y. R., 1983. A preliminary study on Bangong Co-Nujiang suture. In: Geological memoirs of Qinghai-Xizang Plateau(12)—Geological tectonics of “Sanjiang”. Geological Publishing House, Beijing, 229—242 (in Chinese).
- Pearce, J. A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C. J., Norrmyr, M. J., eds., Continental basalts and mantle xenoliths. Shiva Nantwich, United Kingdom, 230—249.
- Pearce, J. A., Mei, H. J., 1988. Volcanic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse: Lhasa to Golmud. *Phi. Trans. Roy. Soc. Lond.*, A327:169—201.
- Pearce, J. A., Peate, D. W., 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23:251—285.
- Price, R. C., Stewart, R. B., Woodhead, J. D., et al., 1999. Petrogenesis of high-K arc magmas: Evidence from Egmont volcano, North Island, New Zealand. *J. Petrology*, 40:167—197.
- Qiu, R. Z., Zhou, S., Deng, J. F., et al., 2004. Dating of gabbro in the Shemalagou ophiolite in the western segment of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt, Tibet—With a discussion of the age of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt. *Geology in China*, 31(3):262—268 (in Chinese with English abstract).
- Ramos, V. A., 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes*, 22(3):183—190.
- Richards, J. P., Villeneuve, M., 2002. Characteristics of Late Cenozoic volcanism along the Archibarca lineament

- from Cerro Iluallaco to Corrida de Cori, Northwest Argentina. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 116:161—200.
- Roberts, M. P., Clemens, J. D., 1993. Origin of high-potassium calcalkaline I-type granitoids. *Geology*, 21 (9): 825—828.
- Rollinson, H. R., 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. Longman Group UK Ltd, New York, 352.
- Tepper, J. H., Nelson, B. K., Bergantz, G. W., et al., 1993. Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington; Generation of calc-alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 113: 333—351.
- Wang, X. L., Zhou, J., Qiu, J. S., et al., 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from northern Guangxi, South China; Implications for tectonic evolution. *Precambrian Res.*, 145: 111—130.
- Wood, D. A., 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11—30.
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554—1569.
- Xiao, X. C., Li, T. D., 2000. The tectonic evolution and uplift mechanism of the Qinghai-Tibet Plateau. Guangdong Science and Technology Press, Gangzhou, 239—268 (in Chinese).
- Xu, R. H., Scharer, U., Allègre, C. J., 1985. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): A geochronological study. *Journal of Geology*, 93: 41—57.
- Yao, P., Li, J. G., Wang, Q. H., et al., 2006. Discovery and geological significance of the adakite in Gangdise island arc belt, Xizang (Tibet). *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 612—620 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211—280.
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser-ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandants Geochem. Res.*, 28(3): 353—370.
- Zhai, Q. G., Li, C., Li, H. M., et al., 2005. U-Pb zircon age of leucogranite in the central Gangdise, Tibet, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 24: 349—353 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. J., Xia, B. D., Wang, G. M., et al., 2004. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, and tectonic setting of central Tibet, western China. *G. S. A. Bulletin*, 116 (9—10): 1202—1222.
- Zheng, C. Z., Qu, Y. G., Zhang, S. Q., et al., 2003. On the lithostratigraphy and sedimentary environment of the Lower Cretaceous Duoni Formation in the Xiongmai and Qusongbo areas, northern Xizang. *Geological Review*, 49(6): 638—645 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Mo, X. X., et al., 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdise: New insights from volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 534—546 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常承法, 郑锡澜, 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛地区地质构造特征及其青藏高原东西向诸山系形成的探讨. 中国科学(D辑), 2: 190—201.
- 董彦辉, 许继峰, 曾庆高, 等, 2006. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲记录么? 岩石学报, 22(3): 661—668.
- 和钟铎, 杨德明, 王天武, 2006. 冈底斯带桑巴区早白垩世后碰撞花岗岩类的确定及构造意义. 岩石矿物学杂志, 25(3): 185—193.
- 和钟铎, 杨德明, 郑常青, 等, 2005. 西藏冈底斯带门巴地区印支期花岗岩地球化学特征及其构造意义. 地质通报, 24(4): 354—359.
- 康志强, 许继峰, 董彦辉, 等, 2008. 拉萨地块中北部白垩纪则弄群火山岩: Slainajap 洋南向俯冲的产物? 岩石学报, 24(2): 3—14.
- 李才, 王天武, 李惠民, 等, 2003. 冈底斯地区发现印支期巨斑花岗岩闪长岩——古冈底斯造山的存在证据. 地质通报, 22(5): 364—366.
- 李璞, 1955. 西藏东部地质的初步认识. 科学通报, 23—30.
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 等, 2006. 初论西藏过铝花岗岩. 地质通报, 25(7): 812—821.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华, 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552—558.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等, 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息. 高校地质学报, 11(3): 281—290.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2003. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. 地学前缘, 10(3): 135—148.
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等, 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社, 1—218.

- 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,等,2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报,22(3): 521—533.
- 潘桂棠,王立全,李兴振,等,2001a. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置. 沉积与特提斯地质,21(3): 1—26.
- 潘桂棠,王立全,朱弟成,2004. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考. 地质通报,23(1): 12—19.
- 潘桂棠,徐强,王立全,2001b. 青藏高原多岛弧—盆系格局机制. 矿物岩石,21(3): 186—189.
- 潘桂棠,郑海祥,徐耀荣,1983. 初论班公湖—怒江结合带. 见青藏高原地质文集(12). 北京:地质出版社,229—242.
- 邱瑞照,周肃,邓晋福,等,2004. 西藏班公湖—怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定:兼论班公湖—怒江蛇绿岩带形成时代. 中国地质,31(3): 262—268.
- 肖序常,李廷栋,2000. 青藏高原的构造演化与隆升机制. 广州:广东科技出版社,239—268.
- 姚鹏,李金高,王全海,等,2006. 西藏冈底斯南缘火山——岩浆弧带中桑日群 adakite 的发现及其意义. 岩石学报,22(3): 612—620.
- 翟庆国,李才,李惠民,等,2005. 西藏冈底斯中部淡色花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报,24: 349—353.
- 郑春子,曲永贵,张树歧,等,2003. 西藏北部雄梅—曲松波地区早白垩世多尼组及沉积环境探讨. 地质论评,49(6): 638—645.
- 朱弟成,潘桂棠,莫宣学,等,2006. 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境:火山岩约束. 岩石学报,22(3): 534—546.