

羌塘地块北部东月湖始新世高 $Mg^{\#}$ 埃达克质火山岩的成因以及构造意义*

董彦辉^{1,2} 王强¹ 许继峰^{1**} 资锋^{1,2}

DONG YanHui^{1,2}, WANG Qiang¹, XU JiFeng^{1**} and ZI Feng^{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重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

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

2007-11-06 收稿, 2008-02-04 改回。

Dong YH, Wang Q, Xu JF and Zi F. 2008. Dongyue Lake adakitic volcanic rocks with high $Mg^{\#}$ in north Qiangtang block; Petrogenesis and its tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2):291–302

Abstract The lavas near by the Dongyue Lake area is a part of Cenozoic Duoge Coring-Zhuerken Wula Mountain volcanic province, which is the earliest post-collision magmatic activity recognized in the Tibetan plateau. SHRIMP U-Pb zircon dating obtains an age of 44.3 ± 1.8 Ma for a Dongyue Lake lava. In geochemistry, the Dongyue Lake lavas are intermediate-acid rocks, their SiO_2 range of 55%–67%, belonging to high-K calc-alkaline series. In addition, they show enrichment of LILEs and LREE, depletion of Y and HREE, as well as have gentle positive Eu anomaly, high Sr concentration and Sr/Y ratios. So they display geochemical characteristics similar to those of an adakite rock defined by Defant and Drumond (1990). Meanwhile, the Dongyue Lake lavas also have high $Mg^{\#}$ ($Mg / (Mg + Fe_{total})$) and high compatible elements such as Cr and Ni contents. We suggest that the Dongyue Lake adakitic lavas were generated by partial melting of a delaminated lower crust, similar to the petrogenesis of the high $Mg^{\#}$ adakitic rocks in east China. Thus, eruption of the Dongyue Lake adakitic rocks probably indicates that an Eocene delamination event took place beneath north Qiangtang block.

Key words Qiangtang block; Tibetan Plateau; Doge Coring; Adakitic rocks; Delamination

摘要 东月湖火山岩分布于多格错仁-祖尔肯乌拉山一带, 这里发育有青藏高原最早的后碰撞岩浆活动。东月湖火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 测年得到了 44.3 ± 1.8 Ma 的年龄。岩石地球化学的结果表明东月湖火山岩是一套高钾钙碱性的中酸性岩, 具有埃达克岩的地球化学特征, 如富集 LILEs, 亏损 HFSEs, 具有高的 Sr 含量和 Sr/Y 比值和强的 LREE/HREE 分异, 表现出弱的正 Eu 异常。同时, 这些岩石也具有相对高的 $Mg^{\#}$ 和相容元素含量。这些特点与中国东部高 $Mg^{\#}$ 的埃达克质岩类似, 很可能是下地壳折沉的产物。东月湖火山岩指示了在 44 Ma 左右青藏高原北部可能发生过一期加厚下地壳的折沉事件。

关键词 羌塘; 青藏高原; 多格错仁; 埃达克质岩; 折沉作用

中图法分类号 P588.144

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCX3-SW-143)、国家 973 项目 (2002CB412602) 和国家杰出青年基金项目 (40425003) 资助。

第一作者简介: 董彦辉, 男, 1983 年生, 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

1 引言

羌塘地块北部多格错仁-祖尔肯乌拉山一带分布的新生代火山岩是青藏高原腹地后碰撞火山岩的集中分布区,前人的年代学研究表明这套火山岩是青藏高原最早的后碰撞岩浆作用(Mo *et al.*, 2006, Guo *et al.*, 2006),对它们的研究将有助于理解青藏高原内部岩石圈对于陆-陆碰撞的响应以及高原的隆升过程。由于自然条件的限制,目前对羌塘地块北部的火山岩还缺少详细的研究。这里我们报道了位于多格错仁一带的东月湖火山岩的年代学、地球化学结果,并试图就此来探讨羌塘地块北部始新世可能发生的动力学过程。

2 地质背景

东月湖火山岩位于多格错仁南南东方向,东月湖南岸(图1),构造位置上处于羌塘地块北缘。多格错仁地区是青藏高原后碰撞火山岩分布的集中区,自西到东分布有巴毛穷宗、错尼、乱青山、半岛湖、跃进拉、东月湖、太平湖、美日切错、祖尔肯乌拉山等一系列火山岩,总体上呈面状分布,岩性除巴毛穷宗以及半岛湖为碱性超钾质岩以外,其它多为钙碱性的中酸性火山岩。前人的年代学(K-Ar法,少量⁴⁰Ar/³⁹Ar)研究表明这些岩石多形成于始新世,集中于45~40Ma之间,具体的结果可参见邓万明(1998),谭富文等

(2000),Guo *et al.* (2006)。东月湖火山岩主要是安山岩和英安岩,多为隐晶质或斑状结构,气孔和杏仁体常见。在镜下可见斑晶主要是微斜长石、斜长石,少量辉石,偶见石英,基质为隐晶质。这套火山岩不整合覆盖在广泛分布于羌塘地块中北部的中晚侏罗系的雁石坪群浅海相沉积岩之上。

3 年代学结果

我们对东月湖样品 D5144-1 进行了精确的锆石的 U-Pb 测年,年龄测定在北京 SHRIMP 中心完成。D5144-1 为一安山岩样品,斑晶主要是斜长石以及少量单斜辉石。在 SHRIMP 分析之前拍摄了锆石的 CL 图像以揭示锆石的内部结构(图2)。锆石样品靶的制作过程以及 SHRIMP 分析过程的细节可参见(宋彪等,2002)。分析结果见表1。

从年龄分析结果来看(图3),除4个分析点以外,其它11个分析点得到的年龄趋于一致,加权平均年龄为 $44.3 \pm 1.8\text{Ma}$ (MSWD = 3.0)。这些锆石大都呈现长柱状或是针状(图2)。而四个年龄较老的锆石多有磨圆的现象,长宽比较小,呈短柱状(图2)。这11个分析锆石样品除3个以外,大多 Th/U 介于 0.4~1.2 之间,应为岩浆成因锆石,指示出东月湖火山岩的喷发时间是 44.3Ma。另外有一个锆石颗粒上的三个点的 Th/U 小于 0.1 或接近 0.1,但其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄也在 44Ma 左右,可能是由于岩浆上升过程中捕获的锆石在热作用下 Pb 丢失所致。

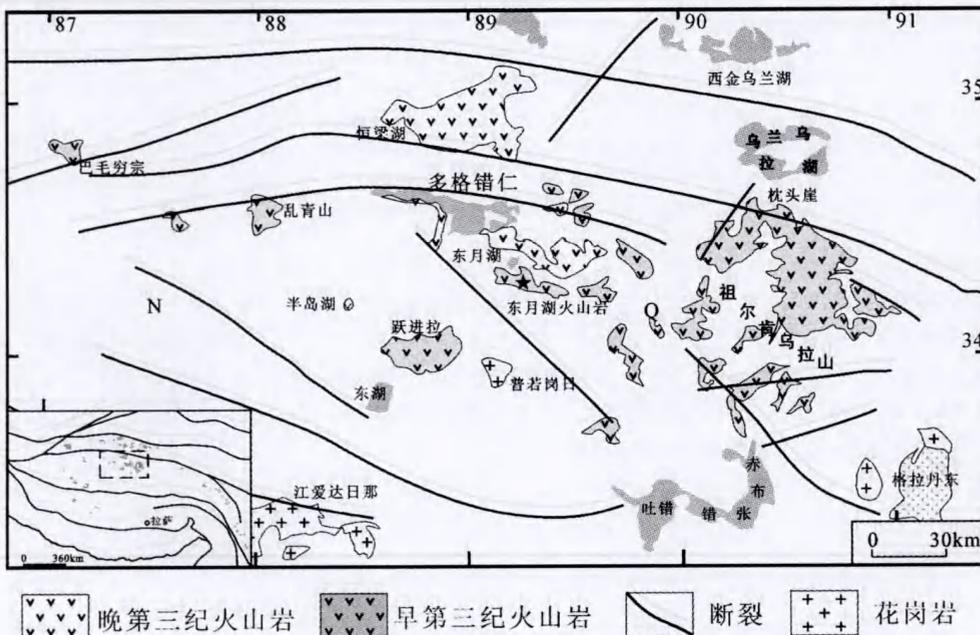


图1 多格错仁一带新生代火山岩分布(据青藏高原及其邻区地质图,1:150万(成都地质矿产研究所,2004))

本文所指东月湖火山岩是指东月湖南岸如五星所示火山岩

Fig. 1 Distribution of Cenozoic volcanic rocks around Doge Coring (Modified by geological map of Tibetan plateau of 1:1 500 000 scale). The volcanic outcrops studied is signed by pentacle on the map

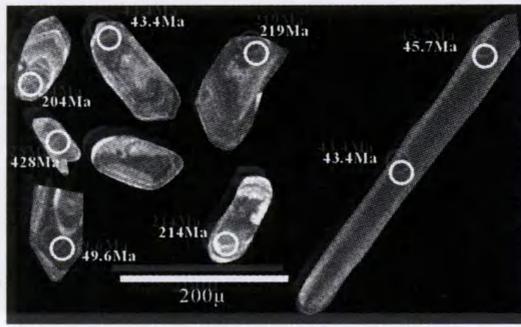


图2 样品 D5144-1 代表性锆石阴极发光图像
Fig. 2 Cathodoluminescence image of representative zircons from sample D5144-1

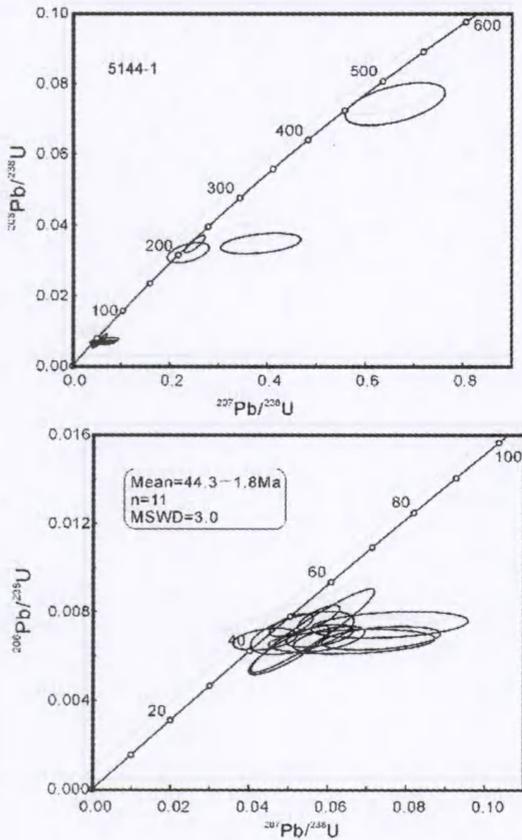


图3 样品 D5144-1 锆石 U-Pb 协合图
Fig. 3 Concordia plots of zircon U-Pb isotopic results for sample D5144-1

4 岩石地球化学特征

岩石的主、微量元素以及 Sr、Nd 同位素分析均在广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成。在分析之前,人工把岩石样品碎至 1~5mm 粒径,手工去除

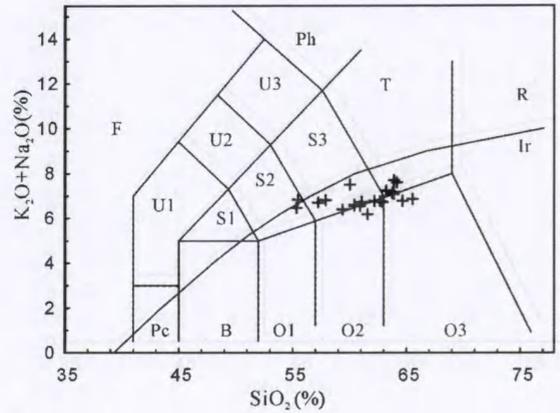


图4 东月湖火山岩的 TAS 分类图解
Fig. 4 TAS diagram for Dongyue lake volcanic rocks

杏仁体之后分别用 $\approx 5\%$ 硝酸和 $\approx 5\%$ 盐酸在超声条件下清洗半个小时,以除去后生碳酸盐对岩石成分的影响。之后在不锈钢钵中磨至 >200 目用于分析。主量元素的采用碱熔玻璃片 XRF 法测定。微量元素采用普通 PFA 溶样器溶样,加入内标后,用 PE ELAN 6000 型 ICP-MS 分析测定。分析结果列于表 2,微量元素分析流程请参考刘颖等(1996)。

Sr、Nd 同位素分析采用 HF + HNO₃ 混合酸溶解样品,全溶后用专用的阳离子交换柱进行分离。分析全流程本底 Rb 为 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ g, Sr 为 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ g, Sm、Nd 约 10^{-11} g,分离好的溶液用 Micromass IsoProbeTM MC-ICPMS 测量,测试误差 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.000017$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} < 0.000013$,测试结果列于表 3。具体分析流程参见文献(韦刚健等,2002;梁细荣等,2003)。

我们的分析结果表明,东月湖火山岩 SiO₂ 展布于 55%~67% 之间,主要是中酸性岩,有 2 个样品 SiO₂ 含量较低,为玄武质粗面安山岩(图 4)。K₂O 的含量大多在 3%~4% 之间,与 SiO₂ 没有明显的相关关系,在 SiO₂-K₂O 系列划分图中属于高钾钙碱性(图 5f)。在各种氧化物与 SiO₂ 协变关系中(图 5),Na₂O 与 SiO₂ 没有明显的相关关系,MgO、CaO、FeO^T、TiO₂ 与 SiO₂ 呈负相关(图 5c, d, b, a)。东月湖火山岩的 Mg[#] ($\text{Mg} \times 100 / (\text{Mg} + \text{Fe}^{\text{T}})$) 较高,多在 50~70 之间,MgO 的含量也相对较高,最高达近 6%。

东月湖火山岩表现出典型的埃达克岩地球化学特点: SiO₂ $> 56\%$ (除两个粗面玄武岩 SiO₂ 约 55% 以外),相对富 Al₂O₃,高 Sr 低 Y,以及 LREE/HREE 强烈分异,没有 Eu 负异常,或有 Eu 正异常(图 6)。Sr 含量在 $800 \times 10^{-6} \sim 1900 \times 10^{-6}$ 之间,Y 小于 18×10^{-6} ,多在 $6 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ 之间,有很高的 Sr/Y 比值(图 8)。La_N/Yb_N 大多高于 20,显示出强烈的 LREE/HREE 分异(图 8),同时,大部分样品 Eu^{*} > 1 ,表现出弱到明显的正 Eu 异常(图 6)。在微量元素 N-MORB 标准化图解中(图 7),Rb、Ba 等大离子亲石元素明显富集,Nb、

表1 样品 D5144-1 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 SHRIMP zircon U-Pb analytical results of sample D5144-1

点号	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ (%)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ (%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ (%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	1σ (Ma)
1.1	0.19	2099	2608	1.28	0.0571	3.8	0.0563	11	0.00715	11	45.9	5
1.2	0	2289	3196	1.44	0.0581	4.2	0.0502	8.4	0.00627	7.2	40.3	2.9
1.3	0	1842	2397	1.34	0.0647	5.1	0.0604	6.1	0.00678	3.5	43.5	1.5
1.4	1.75	1505	1849	1.27	0.0551	8.3	0.0536	10	0.00705	5.6	45.3	2.5
1.5	1.54	1229	1427	1.2	0.0741	10	0.0758	11	0.00742	3.3	47.7	1.6
2.1	0.67	165	67	0.42	0.0805	7.9	0.3870	8.7	0.03480	3.4	220	7.5
3.1	0.37	125	392	3.24	0.0646	5.4	0.6610	6.3	0.07420	3.3	461	15
4.1	0.12	8772	962	0.11	0.0498	3.4	0.0508	4.5	0.00740	2.9	47.5	1.4
4.2	1.25	1063	41	0.04	0.0785	7.7	0.0737	8.4	0.00681	3.2	43.8	1.4
4.3	0	3580	129	0.04	0.0541	2.4	0.0578	3.8	0.00775	2.9	49.8	1.4
5.1	0.6	538	330	0.63	0.0536	6.5	0.2380	7.4	0.03220	3.6	204	7.3
6.1	1.47	1710	778	0.47	0.0473	7	0.0441	7.6	0.00676	3	43.4	1.3
6.2	0.58	1763	1006	0.59	0.0609	5.2	0.0580	6	0.00691	3	44.4	1.3
6.3	1.03	705	318	0.47	0.0721	13	0.0662	13	0.00666	3.4	42.8	1.5
7.1	0.12	1483	859	0.6	0.0527	2	0.2517	3.5	0.03466	2.9	220	6.2

²⁰⁶Pb_c 代表普通铅所占百分比, 数据表中其它 Pb 均为较正后的放射性成因铅。

²⁰⁶Pb_c stand for the percent of common Pb in zircon. All of other data of Pb have been corrected by measured ²⁰⁴Pb.

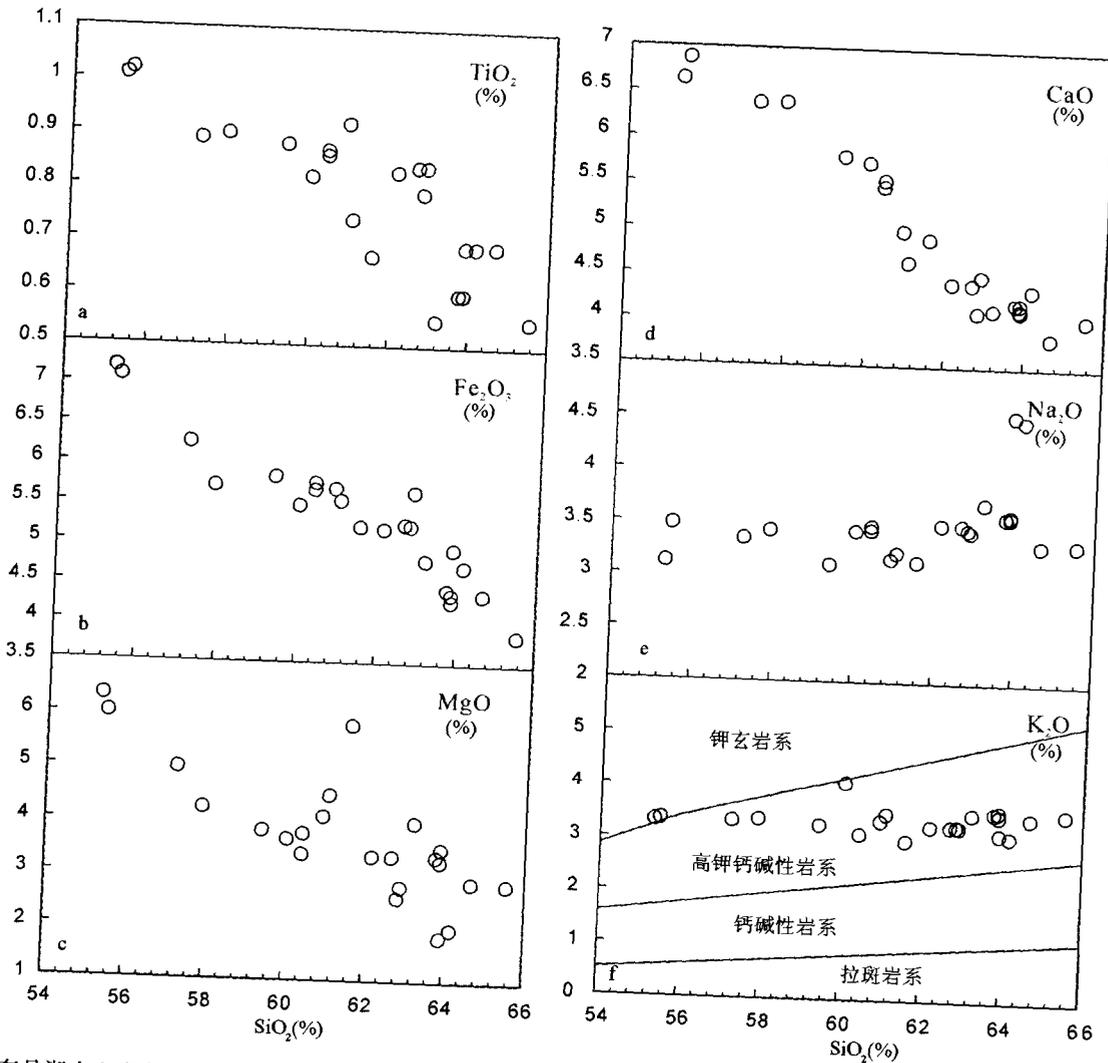


图5 东月湖火山岩主量元素哈克图解

Fig. 5 Harker diagrams of major oxides for Dongyui lake volcanic rocks

表 2 东月湖火山岩主(wt%)、微量元素(10⁻⁶)分析结果Table 2 Major (wt%) and trace (10⁻⁶) elements contents of the Dongyue lake volcanic rocks

	D5139	D5140	D5141	D5130-1	D5130-2	D5130-3	D5131-1	D5131-2	D5132-1	D5132-2	D5135-1	D5135-2
SiO ₂	62.90	65.55	61.58	55.33	55.47	61.07	62.17	62.68	64.17	63.91	60.42	62.83
TiO ₂	0.84	0.55	0.67	1.01	1.02	0.74	0.83	0.84	0.69	0.69	0.87	0.79
Al ₂ O ₃	15.89	15.27	14.55	15.11	15.27	15.53	16.06	16.06	16.03	16.15	15.90	15.96
Fe ₂ O ₃	5.67	3.86	5.22	7.20	7.09	5.55	5.20	5.26	4.73	4.95	5.68	5.24
MgO	2.78	2.85	5.82	6.34	6.01	4.49	3.36	3.35	1.99	1.83	3.38	2.57
MnO	0.09	0.04	0.06	0.17	0.10	0.08	0.08	0.07	0.03	0.03	0.21	0.05
CaO	4.51	4.04	4.91	6.64	6.87	4.66	4.43	4.42	4.36	4.13	5.48	4.11
Na ₂ O	3.44	3.33	3.15	3.12	3.48	3.23	3.50	3.50	4.49	4.54	3.44	3.46
K ₂ O	3.29	3.55	3.02	3.34	3.37	3.51	3.29	3.30	3.12	3.17	3.13	3.30
P ₂ O ₅	0.14	0.05	0.05	0.28	0.25	0.08	0.05	0.06	0.04	0.04	0.07	0.14
LOI	0.84	1.34	1.00	1.51	1.20	1.00	0.62	0.90	0.85	0.93	1.34	1.64
total	100.41	100.41	100.02	100.07	100.13	99.94	99.61	100.43	100.48	100.37	99.91	100.10
Mg [#]	50	60	69	64	63	62	56	56	46	43	54	50
Cr	235	169	383	354	362	206	116	111	121	127	224	132
Co	11.0	16.5	19.4	42.1	29.8	18.8	16.5	15.6	11.5	10.4	25.4	12.4
Ni	86.2	103	183	154	144	101	67.3	64.1	59.3	56.6	87.5	72.7
Rb	127	117	90.4	88.3	86.6	118	100	102	98.5	103	94.1	107
Sr	851	1220	1443	1616	1669	1135	1073	1051	959	1030	1188	892
Y	8.82	10.3	9.77	14.9	15.4	9.89	8.07	8.38	8.47	8.36	9.61	6.63
Zr	180	217	198	314	305	263	273	267	206	198	218	221
Nb	7.07	8.48	7.25	14.4	14.8	9.81	10.6	10.3	7.78	7.47	9.90	9.33
Ba	1300	1483	1431	1845	1786	1838	1757	1619	1968	2064	1618	1356
La	33.7	50.1	39.3	60.5	61.8	52.4	43.9	43.9	25.1	27.3	31.2	26.7
Ce	58.0	92.7	66.2	119	112	88.7	69.7	73.3	45.8	43.9	53.8	46.6
Pr	6.10	10.4	6.79	12.9	13.0	9.37	7.25	7.68	4.75	5.16	5.61	5.02
Nd	20.8	35.1	22.7	46.8	47.3	31.1	24.3	25.4	17.2	19.2	20.5	17.8
Sm	3.18	5.13	3.53	7.13	7.11	4.40	3.46	3.69	3.01	3.15	3.39	2.78
Eu	1.00	1.23	1.33	2.11	2.16	1.38	1.38	1.33	1.02	1.15	1.39	1.16
Gd	1.97	2.86	2.26	4.44	4.16	2.50	2.06	2.08	2.04	2.19	2.34	1.76
Tb	0.32	0.41	0.36	0.62	0.62	0.39	0.32	0.34	0.32	0.32	0.35	0.27
Dy	1.70	2.08	1.97	3.18	3.16	1.99	1.66	1.69	1.74	1.72	2.00	1.47
Ho	0.33	0.38	0.38	0.58	0.60	0.37	0.31	0.31	0.34	0.34	0.39	0.28
Er	0.93	1.01	1.00	1.48	1.51	0.99	0.80	0.84	0.88	0.87	0.99	0.70
Tm	0.14	0.15	0.15	0.20	0.21	0.14	0.12	0.12	0.13	0.13	0.15	0.10
Yb	0.87	0.91	0.93	1.25	1.33	0.91	0.73	0.76	0.81	0.81	0.94	0.63
Lu	0.14	0.14	0.15	0.21	0.20	0.15	0.12	0.12	0.13	0.13	0.15	0.10
Hf	4.46	5.27	4.66	7.02	6.87	5.93	5.86	5.85	5.09	4.85	5.31	5.39
Ta	0.52	0.57	0.47	0.84	0.85	0.59	0.65	0.65	0.50	0.51	0.64	0.60
Th	17.7	17.5	16.4	21.2	22.4	23.0	19.1	19.8	13.1	13.3	14.7	16.1
U	5.02	4.59	4.09	4.81	4.91	4.96	4.38	4.53	3.13	2.76	4.18	4.07
Eu*	1.22	0.98	1.44	1.15	1.22	1.28	1.59	1.47	1.26	1.34	1.51	1.60

续表 2

Continued Table 2

	D5135-3	D5136-1	D5136-3	D5137-1	D5137-2	D5144-1	D5144-2	D5144-3	D5144-4	D5144-5	D5144-7
SiO ₂	64.67	60.43	60.93	57.25	57.91	63.89	59.41	63.22	63.77	63.88	60.04
TiO ₂	0.69	0.86	0.92	0.89	0.90	0.60	0.88	0.55	0.60	0.60	0.82
Al ₂ O ₃	15.90	15.98	15.90	16.47	16.65	15.31	16.11	15.46	15.32	15.28	15.79
Fe ₂ O ₃	4.38	5.77	5.70	6.26	5.72	4.29	5.84	4.80	4.44	4.38	5.48
MgO	2.88	3.77	4.10	4.99	4.24	3.51	3.83	4.00	3.36	3.27	3.67
MnO	0.06	0.18	0.09	0.11	0.12	0.07	0.07	0.06	0.17	0.08	0.05
CaO	3.83	5.55	5.00	6.39	6.40	4.21	5.81	4.14	4.21	4.15	5.74
Na ₂ O	3.32	3.48	3.17	3.35	3.43	3.58	3.11	3.71	3.58	3.60	3.43
K ₂ O	3.47	3.13	3.38	3.35	3.39	3.51	3.29	3.53	3.56	3.59	4.08
P ₂ O ₅	0.03	0.15	0.21	0.09	0.06	0.16	0.19	0.03	0.13	0.08	0.02
LOI	1.05	1.09	1.19	1.07	1.21	0.81	1.57	0.67	0.82	0.68	0.76
total	100.28	100.38	100.57	100.22	100.03	99.93	100.10	100.19	99.97	99.59	99.88
Mg [#]	57	57	59	61	60	62	57	62	60	60	57
Cr	110	239	162	314	307	168	291	194	183	171	206
Co	13.0	25.9	20.8	25.7	20.8	16.2	17.3	15.4	23.4	17.8	17.1
Ni	56.0	111	85.8	119	97.5	114	104	124	132	121	88.1
Rb	109	99.4	113	90.3	86.3	122	109	124	127	114	105
Sr	878	1191	917	1250	1281	1495	1152	1301	1519	1481	1907
Y	6.96	10.3	11.8	8.73	7.98	9.78	12.0	7.86	10.1	9.15	8.33
Zr	222	221	228	229	231	205	217	172	212	204	207
Nb	8.85	9.81	9.17	9.06	9.11	7.53	9.53	6.71	7.57	7.72	8.90
Ba	1400	1563	1290	1403	1447	1705	1358	1554	1952	1672	2120
La	33.2	35.9	43.2	22.5	18.1	52.4	41.6	31.4	50.6	42.4	49.2
Ce	55.0	66.2	73.9	40.7	32.9	94.3	75.6	47.4	91.1	78.0	81.6
Pr	5.56	7.32	8.38	4.82	3.83	10.2	8.94	4.94	9.70	8.24	8.30
Nd	17.9	26.6	30.2	18.4	15.1	35.5	31.8	17.9	33.2	29.0	28.3
Sm	2.70	4.09	4.82	3.22	2.80	5.14	4.84	2.83	4.77	4.40	4.18
Eu	1.15	1.51	1.41	1.37	1.39	1.39	1.44	1.16	1.27	1.29	1.44
Gd	1.63	2.60	3.16	2.30	2.17	2.70	3.00	1.77	2.66	2.52	2.46
Tb	0.26	0.41	0.47	0.33	0.31	0.40	0.47	0.27	0.39	0.38	0.35
Dy	1.44	2.15	2.44	1.86	1.74	2.03	2.42	1.46	1.99	1.88	1.73
Ho	0.28	0.41	0.44	0.35	0.32	0.38	0.45	0.29	0.37	0.34	0.33
Er	0.74	1.07	1.13	0.93	0.84	0.99	1.22	0.78	0.97	0.95	0.86
Tm	0.11	0.15	0.16	0.13	0.12	0.14	0.17	0.12	0.14	0.13	0.12
Yb	0.72	0.92	1.01	0.84	0.76	0.85	1.05	0.85	0.90	0.85	0.77
Lu	0.12	0.15	0.16	0.14	0.13	0.14	0.17	0.14	0.14	0.13	0.13
Hf	5.56	5.20	5.41	5.44	5.51	4.99	5.08	4.40	5.10	5.03	4.91
Ta	0.59	0.65	0.65	0.62	0.65	0.50	0.67	0.47	0.50	0.51	0.53
Th	17.3	15.2	15.8	12.3	11.2	18.6	16.1	11.6	19.2	17.8	13.4
U	4.75	4.14	4.25	3.81	3.89	4.92	4.46	3.09	5.07	5.01	3.82
Eu *	1.68	1.41	1.10	1.54	1.73	1.14	1.16	1.58	1.09	1.18	1.37

表 3 东月湖火山岩 Sr-Nd 同位素数据表

Table 3 Sr-Nd isotope compositions of the Dongyue lake volcanic rocks

Sample	D5131-1	D5132-2	D5136-3	D5140	D5144-1	D5144-7
Rb(× 10 ⁻⁶)	100	103	113	117	122	105
Sr(× 10 ⁻⁶)	1073	1030	917	1220	1495	1907
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.2702	0.2891	0.3563	0.2780	0.2355	0.1586
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.707270	0.707023	0.707697	0.706884	0.706068	0.706525
2σ _m	13	11	16	13	13	10
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.707105	0.706847	0.707479	0.706715	0.705924	0.706428
Sm(× 10 ⁻⁶)	3.46	3.15	4.82	5.13	5.14	4.18
Nd(× 10 ⁻⁶)	24.3	19.2	30.2	35.1	35.5	28.3
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.0858	0.0988	0.0963	0.0878	0.0871	0.0889
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512386	0.512434	0.512369	0.512436	0.512478	0.512417
2σ _m	8	10	7	8	7	8
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	0.512361	0.512405	0.512342	0.512411	0.512453	0.512392
ε _{Nd} (t)	-4.3	-3.4	-4.7	-3.3	-2.5	-3.7
t _{DM} (Ga)	0.82	0.84	0.90	0.77	0.72	0.80

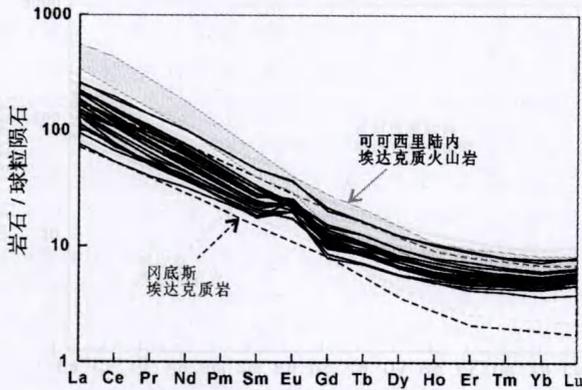


图 6 东月湖火山岩稀土元素球粒陨石标准化图解。可可西里埃达克质火山岩数据引自 Wang *et al.*, (2005), 冈底斯埃达克质岩数据引自 Qu *et al.*, (2004)

Fig. 6 REE chondrite normalized diagram for Dongyue lake volcanic rocks. Data of the volcanic rocks with adakitic characteristics in Hohxil is from Wang *et al.*, (2005), and the data of adakitic rocks in Gangdese is after Qu *et al.*, (2004)

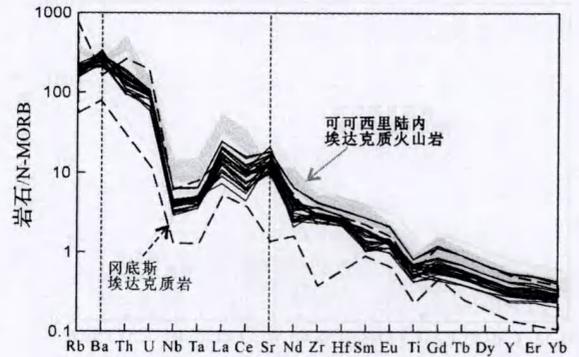


图 7 东月湖火山岩微量元素蛛网图。可可西里和冈底斯埃达克质岩的数据来源同图 6。N-MORB 数据引自 Sun and McDonough (1989)

Fig. 7 Trace elements spider diagram for Dongyue lake volcanic rocks. The data of Hohxil and Gangdese adakitic rocks in Tibet is from the same article as Fig. 6. The values of N-MORB used for normalize are cited from Sun and McDonough, (1989)

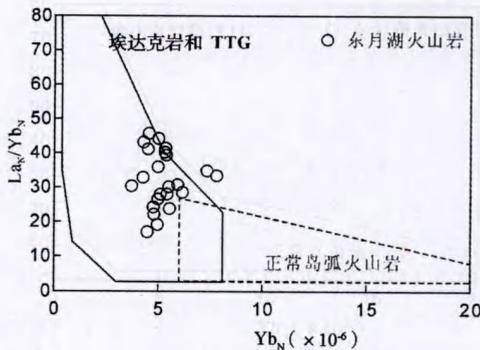
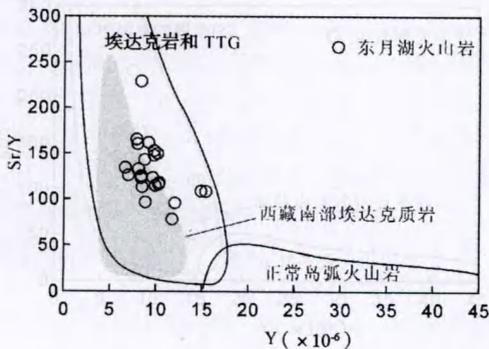


图 8 东月湖火山岩的 Sr/Y-Y 和 La_N/Yb_N-Yb 图解 (Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990)。图中可以看出东月湖火山岩具有明显的埃达克质岩的成分特征

Fig. 8 Sr/Y vs. Y and La_N/Yb_N vs. Yb diagrams (Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990) for Dongyue Lake volcanic rocks. Dongyue Lake volcanic rocks clearly show adakitic affinities

Ta、Ti 有明显的负异常, Sr 显示明显的正异常, Ba 有弱的正异常, 这些特点均与岛弧环境下的埃达克岩 (Defant and Drummond, 1990) 的地球化学特征相一致。

这套岩石具有相对一致的同位素特征: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 在 0.7055 ~ 0.7075 之间, ϵ_{Nd} 在 -4.1 ~ -2.0 之间 (表 3)。Sr、Nd 同位素比值与 SiO_2 以及 MgO 的含量并不显示出相关关系 (图未附)。东月湖火山岩的 Sr、Nd 同位素组成与西藏南部的埃达克质斑岩以及 Wang *et al.* (2005) 报道的可西里的埃达克质火山岩类似。与羌塘地块南部的后碰撞钙碱性火山岩相比, 东月湖火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 略高, ϵ_{Nd} 略低。羌塘地块的碱性钾质岩如鱼鳞山 (Ding *et al.*, 2003)、巴毛旁宗 (邓万明, 1998, Guo *et al.*, 2006) 的同位素特征与东月湖有显著的不同, 前者非常富集, 而东月湖火山岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 明显较低, ϵ_{Nd} 也较高 (图 9)。这种显著同位素特征的差别暗示了它们在成因上的不同和源区上的差异。

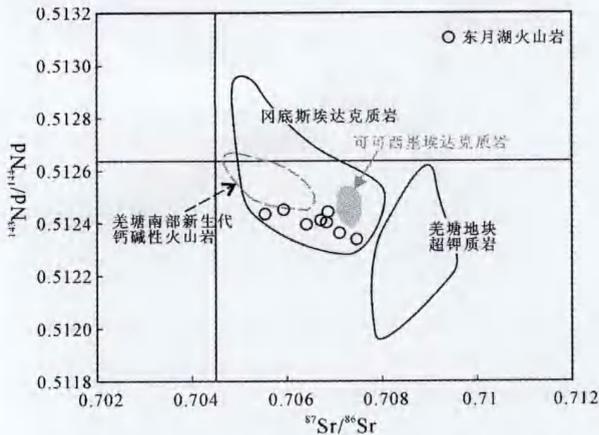


图 9 东月湖火山岩的 Sr-Nd 同位素图解。冈底斯埃达克质岩数据源于 Hou *et al.* (2004); 松潘甘孜地块可可西里地区埃达克质岩数据引自 Wang *et al.* (2005); 羌塘地块超钾质、钾质岩数据包括鱼鳞山, 邦达错 (Ding *et al.*, 2003), 巴毛旁宗 (邓万明, 1998; Guo *et al.*, 2006; 刘荣等, 2003)。羌塘地块南部新生代钙碱性火山岩引自 Ding *et al.* (2007)。图中有两个东岳湖样品引自 Wang *et al.* (待发表文献)

Fig. 9 Sr vs Nd isotope diagram for Dongyue lake volcanic rocks. Data of Gangdese adakitic rocks are from Hou *et al.* (2004); data of Hohxil belong to Songpan Ganzi block are cited from Wang *et al.* (2005); Data of ultrapotassic and potassic rocks in Qiangtang block including Yulin Shan, Bangda Co and Bamaoqiong zong is from Ding *et al.* (2003) (for YulinShan and BangdaCo), Deng, (1998), Guo *et al.* (2006) and Liu *et al.* (2003) (for Bamaoqiong zong). Data of Cenozoic calc-alkaline volcanic rocks in south Qiangtang are from Ding *et al.* (2007). Data of the two Dongyue Lake samples are from Wang *et al.* (unpublished data)

5 讨论

5.1 岩石成因及源区

Defant and Drummond (1990) 提出埃达克岩这个名词之时认为埃达克岩是年轻和热的俯冲洋壳熔融形成的。Peacock (1994) 通过对俯冲带热结构的模拟认为很年轻的俯冲洋壳可以发生熔融。之后的高温高压实验研究, 如: Rapp and Watson (1995)、Winther (1996) 都发现玄武质岩石在高压下 (榴辉岩相) 熔融的熔体具有埃达克岩和 TTG 的特征。因此, 大多数的研究者都认为埃达克 (质) 岩的源区为镁铁质/玄武质的地壳, 包括洋壳和玄武质的大陆地壳。在俯冲环境下可能是洋壳, 在陆内可能是加厚的镁铁质地壳, 如中国东部 (Wang *et al.*, 2004a, 2004b, 2006a) 以及西藏南部埃达克质岩 (Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004), 另外一些研究也认为埃达克岩可以由来源于地幔源区的岩浆经过一系列的演化形成, 如玄武岩浆经过 AFC (Castillo *et al.*, 1999) 或是高压下结晶分异 (Macpherson *et al.*, 2006)。

东月湖火山岩具有高 Sr 以及弱的正 Eu 异常要求斜长石在熔融过程中不作为主要残留相, 而低的 Y 以及 HREE 含量则普遍被解释为源区的石榴石残留。Rapp and Watson (1995) 认为玄武质岩石在 1.2GPa 以上熔融以上残留相中会出现石榴石, 熔体会具有与埃达克岩以及 TTG 类似的性质。而在较低压力下 (0.8GPa) 熔体与 TTG 以及埃达克岩特征有所不同。Xiong *et al.* (2005) 则认为要形成埃达克岩以及 TTG 所具有的与正常岛弧火山岩类似的 Nb、Ta、Ti 的负异常, 源区需要有金红石等富 Ti 矿物相残留, 这要求至少 1.5GPa (约合 50km 厚地壳) 的压力条件。在东月湖火山岩形成之时 (始新世) 羌塘地块早已不存在大洋, 北侧的金沙江蛇绿岩所代表的古特提斯在晚三叠可能就已经关闭, 始新世不可能还存在有俯冲板片的熔融。同时, 金沙江蛇绿岩中的玄武岩 ϵ_{Nd} 为 +5 ~ +6 (Xu and Castillo, 2004), 这与东月湖火山岩 ϵ_{Nd} (-4.1 ~ -2.0) 完全不同。同时板片熔融产生的熔体具有很低的 K_2O , Na_2O 相对较高, 这也与东月湖火山岩相对富钾的特点不一致, 而一般陆内加厚地壳熔融产生的埃达克岩具有相对高的 K_2O 含量。综上, 我们认为古板片的熔融应该不是这套埃达克质岩的源区, 东月湖埃达克质火山岩可能是源于加厚下地壳的部分熔融。

同时, 东月湖火山岩有着高的 MgO 含量 (最高超过 6%) 高 $\text{Mg}^\#$ 以及相对高含量的相容元素, 典型的如 Cr (最高达 382×10^{-6}) Ni (最高达 183×10^{-6})。这些特点都表明岩石具有地幔物质的成分参与的特点。玄武质岩石的高压熔融实验表明熔体 MgO 含量较低 (Sen and Dunn, 1994; Rapp and Watson, 1995)。Defant and Drummond (1990) 在最初定义埃达克岩时也认为 MgO 的含量应该不高 (< 3%), 不过后来陆续有报道相对高镁的埃达克岩, 如南美的 Cerro Pampa (Kay *et al.*, 1993) 以及 Cook 岛 (Stern and Kilian, 1996), 在岛弧环

境下这种特点很容易用熔体对地幔橄榄岩的交代过程来解释。Kepezhinskas *et al.* (1996)在富 Nb 玄武岩的地幔包体中发现有富钠(>5%)埃达克质的岩脉。他们认为包体中的一些矿物是熔体与地幔包体的反应形成的,如:角闪石(非闪石)、富钠的斜长石、富铝的普通辉石以及石榴石。包体中的部分单斜辉石的成分表现出了钠质交代的特点,同时岩脉获得了很高的 Cr 含量,达到 348×10^{-6} 。Rapp *et al.* (1999)通过高压下玄武岩熔融产生的熔体与地幔橄榄岩反应的实验表明,相对富硅的熔体与地幔橄榄岩反应,会使橄榄石被消耗,生成斜方辉石。同时,富硅熔体的 SiO₂ 含量会降低, MgO 含量会有明显的提升。这些研究说明这种熔体与地幔橄榄岩发生交代反应可以明显提高熔体的 Mg 含量以及相容元素的含量。东月湖火山岩的 SiO₂ 与 Mg[#] 的关系与板片熔融形成的埃达克岩相类似(图 10),表明东月湖火山岩原始岩浆应该与地幔橄榄岩发生过反应,导致了相对高 Mg[#] 和相容元素含量。

另外的一些研究提出埃达克岩可以由岛弧玄武质岩浆经过 AFC 过程(Castillo *et al.*, 1999)或是高压下结晶分异(Macpherson *et al.*, 2006)形成。在菲律宾,由玄武岩浆 AFC 过程形成的中酸性埃达克岩与玄武岩共生在一起(Castillo *et al.*, 1999; Castillo, 2006),而板片熔融形成的埃达克质一般与富 Nb 玄武岩共生。不过,东月湖埃达克质火山岩的特点以及岩石组合与目前有报道的所谓的“幔源”埃达克质岩石不同。在羌塘北部,缺少与东月湖火山岩同时期的基性岩,仅有的碱性火山岩巴毛穷宗(火车头山)目前的 K-Ar 法以及 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学数据表明其形成于 32 ~ 19Ma(邓万明, 1998; 刘红英等, 2003),明显比东月湖火山岩年轻,且巴毛穷宗碱性火山岩的 Sr-Nd 同位素表现出非常富集的特点, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 在 0.710 左右, ϵ_{Nd} 在 -10 左右(邓万明, 1998; Guo *et al.*, 2006),与东月湖火山岩明显不同。同时,巴毛穷宗碱性岩的不相容元素包括 REE 含量极高,如 La > 300×10^{-6} , Rb > 200×10^{-6} (Guo *et al.*, 2006, 李佑国等, 2005),如果通过结晶分异的方式来形成中酸性的东月湖火山岩,这些不相容元素的含量会远高于我们在东月湖测得的结果(La < 100×10^{-6} , Rb 最高 127×10^{-6})。这样看来,东月湖这套中酸性岩并不是幔源岩浆结晶分异演化的产物。

东月湖火山岩中的两个相对基性的粗面玄武岩虽然 SiO₂ 相对较低,但与其它样品的主量元素构成连续的成分趋势。微量元素特征上,具有相对高的 REE 含量(La 约 60×10^{-6})以及 Nb、Ta、Ti 的含量, Sr 的含量达到 1600×10^{-6} 左右,高于其它大多数样品。同时, Rb/Ba、Nb/La、La/Yb 等微量元素的比值与其它样品差别很小。Rapp *et al.* (1999)在其实验中观察到熔体与地幔橄榄岩的交代过程中,由于熔体的体积变小,微量元素的含量特别是不相容元素的含量如 REE 以及 Nb、Ta、Sr 会有提高,但是微量元素比值相对一致,在微量元素蛛网图中与富硅的初始熔体呈现平行的关系。这两个样品的地球化学特点与实验的结果吻合得非常好。基于

这些观察,我们有理由相信这两个相对基性的样品是由于初始熔体混染了较大量的地幔物质所致。

5.2 构造意义

东月湖火山岩具有明显的埃达克岩的地球化学特点,如前文所述,形成这种岩石需要源区存在有石榴石的残留,同时斜长石不成为主要的残留相,这要求熔融的深度要达到 40km (>1.2GPa)以上,这指示了青藏高原北部在 40Ma 以前地壳就已经开始显著加厚。用氧同位素估算出的高原中部伦坡拉盆地的古高度表明在 40Ma 以前伦坡拉盆地高度已经达到约 4km(Rowley and Currie, 2006)。这表明青藏高原腹地在印度-亚欧大陆碰撞开始后不久可能就已经发生了显著的抬升。羌塘地块北部出现的埃达克质岩,包括东月湖埃达克质火山岩在内,可能意味着高原早期隆升的范围相当大,到达了不仅是在西藏中部,而且达到了羌塘地块北部(许继峰和王强, 2004; 魏君奇等, 2005)。

东月湖埃达克质火山岩所具有的高镁和高相容元素含量的特点,类似于中国东部所发现的白垩纪高 Mg[#]埃达克质岩石(图 10),如宁镇地区(Xu *et al.*, 2002)、兴隆沟(Gao *et al.*, 2004)、德兴(Wang *et al.*, 2006a)、滁州地区(资锋等, 2007)等,这些地区都被认为是中国东部中生代拆沉事件的一种指示。在多格错仁一带到祖尔肯乌拉山一带,还面状分布有乱青山、枕头崖等具高 Mg[#]埃达克质特征的火山岩。它们与东月湖火山岩同期:乱青山约 44Ma(SHRIMP,作者的未发表数据; K-Ar 法,据谭富文等, 2000),枕头崖下部熔岩 K-Ar 法年龄约 44Ma(郑祥身,边千韬, 1996),跃进拉约 43Ma(王强,未发表文献)。这表明在羌塘地块北部始新世时期很可能发生过一期拆沉事件。前面提到的青藏高原中部的高海拔也表明当时青藏高原的地壳已经是显著地增厚,这为拆沉事件的发生提供了可能。周江羽等(2002)对囊谦盆地的研究表明在始新世时期,其西部发生了快速的隆升,也许就是拆沉事件的一种反映。

羌塘地块北部的这期拆沉事件或是岩石圈减薄事件的发生可能是由于南部印度大陆向北俯冲引起软流圈在羌塘地块北部上涌,使得羌塘地块岩石圈处于高热状态,如 Chung *et al.* (2005)所建议的那样,目前的地球物理资料也表明在羌塘北部软流圈相对高温(Kosarev *et al.*, 1999; Galve *et al.*, 2006)。不过,我们注意到与东月湖火山岩同一时代的岩浆作用只分布于羌塘地块,北部松潘甘孜地块的后碰撞钾质岩时代主要是渐新世到中新世,明显晚于羌塘地块北缘的这套高钾钙碱性岩石,两者并不在同一时代。如果用软流圈的上涌来解释这些埃达克质岩的出现的话,很难理解为什么金沙江缝合带成为这套火山岩分布的北界。除非在始新世时期,松潘甘孜地块与羌塘地块的岩石圈性质,如厚度、温度等,有明显的不同。这样的话, Roger *et al.* (2000)以及 Tapponnier *et al.* (2001)建议的陆内的俯冲就成为了可能的机制之一。可能北部的松潘-甘孜地块俯冲到了羌塘地块之下,在这一

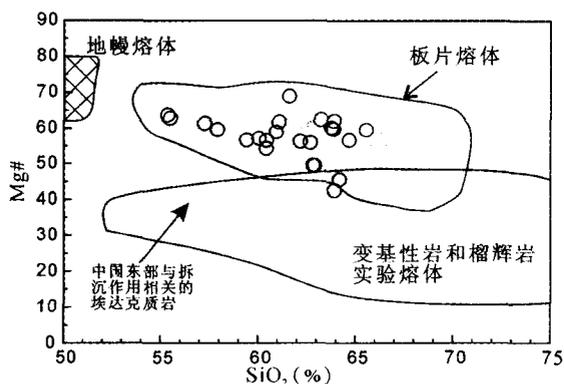


图 10 东月湖火山岩的 SiO₂-Mg[#] 图解, 样品具有有板片熔融形成的埃达克质岩类似的高 Mg[#]。板片熔体、变基性岩和榴辉岩实验熔体以及地幔熔体的成分范围引自 Wang *et al.* (2006a)。中国东部与拆沉作用相关的埃达克质岩成份范围依据 Xu *et al.* (2002), Gao *et al.* (2004), Wang *et al.* (2004a, 2004b, 2006a, 2006b) 圈定

过程中, 被卷入的陆壳在高温高压下部分熔融, 之后熔体与地幔楔发生了反应。

Wang *et al.* (2005) 报道了松藩-甘孜地块可可西里地区下地壳熔融形成的陆内埃达克质火山岩, 它们具有异常高的 REE 以及 LILE 含量, 如 Rb 含量达到约 200×10^{-6} , La 含量超过 100×10^{-6} , 在微量元素蛛网图中显示出了 Sr 的负异常, 不同于东月湖火山岩。虽然前文提到二者具有类似的 Sr, Nd 同位素特征, 但是元素地球化学特点的差异还是反映出源区性质的不同: 可可西里一带的埃达克质源区可能更加富集不相容元素。而在熔体与地幔橄榄岩的交代过程中, 除了 Na 可能由于交代过程而损失 (Xiong *et al.*, 2006) 外, 不相容元素如 REE 的含量通常是升高的 (Rapp *et al.*, 1999)。基于这种考虑, 我们认为北侧的松藩-甘孜地块的陆壳并不是东月湖火山岩的源区, 陆内的俯冲过程可能不是引发这期岩浆作用的直接原因。

另外, 在西藏南部, 印度大陆下插到拉萨地块之下认为是目前典型的陆陆俯冲的实例。在拉萨地块同样发育有一套埃达克质岩, 不过, 与东月湖火山岩相比, 它们一般更加酸性, 除少数地点以外, 大部分 SiO₂ > 65%, 一般 MgO < 1.5% (Qu *et al.*, 2004), 被认为是下地壳熔融的产物。其形成机制一般认为是与东西向的伸展 (Hou *et al.*, 2004; Guo *et al.*,

2007) 或是岩石圈的拆沉相关 (Chung *et al.*, 2003)。目前还没有学者认为西藏南部的埃达克质岩与陆内俯冲直接相关。这样看来, 陆内俯冲很难成为解释东月湖火山岩以及多格错仁一带火山岩的主要机制。

东月湖火山岩所处的构造单元与 Chung *et al.* (1998) 以及邓万明等 (2001) 报道的西藏东部羌塘地块北缘的钾质、超钾质岩相同, 那套钾质、超钾质火山岩被解释为岩石圈减薄的反映, 东月湖附近的巴毛穷宗火山岩也被认为是由于软流圈的上涌导致富集岩石圈地幔发生熔融的产物 (Guo *et al.*, 2006, 李佑国等, 2005)。我们注意到这些火山岩仅局限于羌塘地块北缘, 呈线性分布, 多分布于小的拉分盆地之中, 如囊谦盆地、芒康盆地等, 这不是大规模的软流圈上涌的特点, 应该是在古块体边界即金沙江带重新活动的背景之下局部拉分的产物, 这些小规模的超钾质岩的出现表明了金沙江断裂等走滑断裂沿古块体边界的活动。玉龙斑岩 41Ma 的形成时代 (Jiang *et al.*, 2006) 以及囊谦钾质火山岩最早形成于 39Ma (Zhou *et al.*, 2007), 而贡觉盆地中火山岩 K-Ar 法年龄平均为 44.2Ma (李忠雄等, 2004), 这些年代学结果表明至少在 40Ma 左右, 向东的挤出已经开始。Wang *et al.* (2001) 也认为哀牢山-红河断裂可能在 42Ma 之前就已经开始活动。不过羌塘地块向东的挤出似乎限于藏东, 在多格错仁一带及其往西, 目前并没有沿东西向的大型左行走滑断裂的报道。可能在始新世时期, 羌塘地块的东部主要以挤出走滑为主, 而西部还再发生进一步的碰撞加厚。多格错仁一带正处于这种构造活动的转换带中, 岩石圈的不同运动方向使这一地区处于拉张的环境之中, 进而发生拆沉作用导致了火山作用, 因此这一期岩浆活动也可能指示了羌塘地壳物质向东挤出的开始。

6 结论

东月湖火山岩喷发于 44.3Ma 的始新世, 代表了青藏高原最早的后碰撞岩浆活动, 它是一套高钾钙碱性的中酸性岩, 不同于高原上的钾质、超钾质岩。这些火山岩具有典型的埃达克岩的地球化学特征, 高 MgO 以及相容元素含量的特点指示了熔体与地幔的反应过程, 表明这些岩石可能是拆沉下地壳的熔融的产物。我们建议这期岩浆活动可能指示了后碰撞阶段在始新世羌塘地块之下发生的一次拆沉事件。

致谢 野外工作中得到成都地质矿产研究所和西藏区域地质调查大队的大力支持, 在 SHRIMP 分析过程中, 得到了万渝生研究员的大力帮助, 在此深表谢意。

References

Castillo PR, Janney RE and Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to

- the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134:33 – 51
- Castillo PR. 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257 – 268
- Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources. 2004. Geological Map of Qianghai-Xizang (Tibet) Plateau and Adjacent Areas (1:1,500,000). Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House (in Chinese)
- Chung SL, Chu MF, Zhang YQ *et al.* 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68:173 – 196
- Chung SL, Liu DY, Ji JQ *et al.* 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021 – 1024
- Chung SL, Lo CH, Lee TY *et al.* 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. *Nature*, 394: 769 – 773
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662 – 665
- Deng WM, Sun HJ and Zhang YQ. 2001. Petrogenesis of Cenozoic potassic volcanic rocks in Nangqen Basin. *Chinese Journal of Geology*. 36(3):304 – 318 (in Chinese with English abstract)
- Ding L, Kapp P, Zhong DL *et al.* 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 44(10): 1833 – 1865
- Ding L, Kapp P, Yue YH *et al.* 2007. Postcollisional calc-alkaline lavas and xenoliths from the southern Qiangtang terrane, central Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 254: 28 – 38
- Drummond MS and Defant MJ. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B13): 21503 – 21521
- Galve A, Jiang M, Him A *et al.* 2006. Explosion seismic P and S velocity and attenuation constraints on the lower crust of the North-Central Tibetan Plateau, and comparison with the Tethyan Himalayas: Implications on composition, mineralogy, temperature, and tectonic evolution. *Tectonophysics*, 412: 141 – 157
- Gao S, Rudin RL, Yuan HL *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892 – 897
- Guo ZF, Wilson M, Liu JQ *et al.* 2006. Post-collisional, potassic and ultrapotassic magmatism of the northern Tibetan Plateau: Constraints on characteristics of the mantle source, geodynamic setting and uplift mechanisms. *Journal of Petrology*, 47(6): 1177 – 1220
- Guo ZF, Wilson M and Liu JQ. 2007. Post-collisional adakites in south Tibet: Products of partial melting of subduction-modified lower crust. *Lithos*, 96: 205 – 224
- Hou ZQ, Gao YF, Qu ZM *et al.* 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220:139 – 155
- Jiang YH, Jiang SY, Ling HF *et al.* 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotope constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 241: 617 – 633
- Kepezhinskas P, Defant MJ and Drummond MS. 1996. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (7):1217 – 1229
- Kosarev G, Kind R, Sobolev SV *et al.* 1999. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet. *Science*, 283: 1306 – 1309
- Li YG, Mo XX, Yin HS *et al.* 2005. Research on the Cenozoic volcanic rocks in the Cuoli area of Qiangtang. *Journal of Mineralogy and Petrology*. 25(2):27 – 34 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Chen ZL, Li XZ *et al.* 2004. K-Ar ages of Cenozoic volcanic rocks from Gongje basin in eastern Tibet. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 29 (3): 278 – 282 (in Chinese with English abstract)
- Liang XR, Wei GJ, Li XH *et al.* 2003. Precise measurement of ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*. 32 (1): 91 – 96 (in Chinese with English abstract)
- Liu HY, Xia B, Deng WM *et al.* 2004. Study of ⁴⁰Ar-³⁹Ar and K-Ar dating on the high-K volcanic rock from Bamaoqiongzaong to Qiangbaqian in the northern Tibet. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(1):71 – 75 (in Chinese with English abstract)
- Liu S, Hu RZ, Chi XG *et al.* 2006. Geochemistry, series subdivision and petrogenetic interpretation of Cenozoic volcanic rocks in northern Tibet. *Geological Journal of China Universities*, 9(2):279 – 292 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 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)
- Macpherson CG, Dreher ST and Thirlwall MF. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 581 – 593
- Mahlburg Kay S, Ramos VA and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in Southern South America. *Journal of Geology*, 101:703 – 714
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF *et al.* 2006. Petrology and geochemistry of postcollisional volcanic rocks from the Tibetan plateau: Implications for lithosphere heterogeneity and collision-induced asthenospheric mantle flow. In: Dilek Y and Pavlides S (eds). *Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia*. Special Paper Geological Society of America: 507 – 530
- Peacock SM, Rushmer T and Thompson AB. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 227 – 244
- Qu XM, Hou ZQ and Li YG. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Ganddese copper belt, southern Tibetan plateau. *Lithos*, 74: 131 – 148
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration meltin of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891 – 931
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD *et al.* 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335 – 356
- Roger F, Tapponnier P, Arnaud N *et al.* 2000. An Eocene magmatic belt across central Tibet: Mantle subduction triggered by the Indian collision? *Terra Nova*, 12(3): 102 – 108
- Rowley DB and Currie BS. 2006. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet. *Nature*, 439: 677 – 681
- Sen C and Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117:394 – 409
- Song B, Zhang YH, Wang YS *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48 (suppl): 26 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Stern CR and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123: 263 – 281
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds). *Magmatism in the Ocean Basins*. Oxford, Geological Society London Special Publications, 42: 313 – 345
- Tan FW, Pan GT and Xu Q. 2000. The uplift of Qinghai-Xizang Plateau and geochemical characteristics of Cenozoic volcanic rocks from the center of Qiangtang, Xizang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19 (2): 121 – 130 (in Chinese with English abstract)
- Tapponnier P, Xu ZQ, Roger F *et al.* 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671 – 1677
- Wang Q, McDermott F, Xu JF *et al.* 2005. Cenozoic K-rich adakitic

- volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: lower-crustal melting in an intracontinental setting. *Geology*, 33(6): 465–468
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF *et al.* 2006b. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89: 424–446
- Wang Q, Xu JF, Jian P *et al.* 2006a. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47: 119–144
- Wang Q, Xu JF, Zhao ZH *et al.* 2004a. Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal*, 38: 417–434
- Wang Q, Zhao ZH, Bao ZW *et al.* 2004b. Geochemistry and Petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper-molybdenum mineralization in southeast Hubei, East China. *Resource Geology*, 54(2): 137–152
- Wei GJ, Liang XR, Li XH *et al.* 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP)MC-ICPMS. *Geochimica*, 31(3): 295–299 (in Chinese with English abstract)
- Wei JQ, Yao HZ, Niu ZJ *et al.* 2005. Identification of the adakitic rock association in Chibzhang Co area, northern Tibet, and its significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(3): 173–178 (in Chinese with English abstract)
- Winther KT. 1996. An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts. *Chemical Geology*, 127: 43–59
- Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218: 339–359
- Xiong XL, Xia B, Xu JF *et al.* 2006. Na depletion in modern adakites via melt/rock reaction within the sub-arc mantle. *Chemical Geology*, 229: 273–292
- Xu JF and Castillo PR. 2004. Geochemical and Nd-Pb isotopic characteristics of the Tethyan asthenosphere: Implications for the origin of the Indian Ocean mantle domain. *Tectonophysics*, 393: 9–27
- Xu JF and Wang Q. 2003. Tracing the thickening process of continental crust through studying adakitic rocks: evidence from volcanic rocks in the north Tibet. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 401–406 (In Chinese with English abstract)
- Xu JF, Shinjio R, Defant MJ *et al.* 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology* 30(12): 1111–1114
- Zheng XS and Bian QT. 1996. On the Cenozoic volcanic rocks in Hohxil district, Qinghai Province. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 530–545
- Zhou JY, Wang JH, Yin A *et al.* 2002. Depositional patterns and tectonic setting of early Tertiary basins in the NE margin of the Tibetan Plateau: A case study of the Nangqian and Xialaxiu Basins. *Acta Sedimentologica Sinica*. 20(1): 85–91 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JY, Wang JH, Brian KH *et al.* 2007. Sedimentology and chronology of Paleogene coarse clastic rocks in east-central Tibet and their relationship to early tectonic uplift. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 398–408
- Zi F, Wang Q, Dai SQ *et al.* 2007. Geochronology and geochemistry of Chuzhou and Shangyaopu adakitic intrusive rocks in the eastern area of Anhui province: Implications for petrogenesis and mineralization. *Acta Petrologica Sinica*. 23(6): 1485–1500 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 成都地质矿产研究所. 2004. 青藏高原及其邻区地质图. 成都: 成都地图出版社
- 邓万明, 孙宏娟, 张玉泉. 2001. 囊谦盆地新生代钾质火山岩成因岩石学研究. *地质科学*, 36(3): 304–318
- 邓万明. 1998. 青藏高原北部新生代板内火山岩. 北京: 地质出版社, 23–25
- 李佑国, 莫宣学, 伊海生等. 2005. 羌塘错尼地区新生代火山岩研究. *矿物岩石*, 25(2): 24–34
- 李志雄, 陈智梁, 李修忠等. 2004. 青藏高原东部贡觉盆地新生代火山岩的 K–Ar 稀释法年龄. *地球科学(中国地质大学学报)*, 29(3): 278–282
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华等. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. *地球化学*, 32(1): 91–96
- 刘红英, 夏斌, 邓万明等. 2004. 藏北巴毛穷宗-羌巴欠火山岩 K–Ar 和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学研究. *矿物岩石*, 24(1): 71–75
- 刘燊, 胡瑞忠, 迟效国等. 2003. 藏北高原新生代火山岩地球化学系列划分及成因分析. *高校地质学报*, 9(2): 279–292
- 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
- 宋彪, 张玉海, 万渝生等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质评论*, 48(增刊): 26–30
- 谭富文, 潘桂棠, 徐强. 2000. 羌塘腹地新生代火山岩的地球化学特征与青藏高原隆升. *岩石矿物学杂志*, 19(2): 121–130
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华等. 2002. (LP)MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体桐的 Sr 同位素组成. *地球化学*, 31(3): 295–299
- 魏君奇, 姚华舟, 牛志军等. 2005. 藏北赤布张错地区埃达克岩的厘定及其意义. *岩石矿物学杂志*, 24(3): 173–178
- 许继峰, 王强. 2003. Adakitic 火成岩对大陆地壳增厚过程的指示: 以藏北火山岩为例. *地学前缘*, 10(4): 401–406
- 郑祥身, 边千韬. 1996. 青海可可西里地区新生代火山岩研究. *岩石学报*, 12(4): 530–545
- 周江羽, 王江海, 伊安等. 2002. 藏北边缘早第三纪盆地充填的沉积型式及构造背景. *沉积学报*, 20(1): 85–91
- 资锋, 王强, 戴圣潜等. 2007. 皖东滁州、上腰铺埃达克质侵入岩年代学及地球化学特征: 岩石成因与成矿意义. *岩石学报*, 23(6): 1485–1500