

# 拉萨地块麻江地区具有“超钾质”成分的钾质火山岩的识别及成因\*

王保弟<sup>1,2</sup> 陈陵康<sup>3</sup> 许继峰<sup>2</sup> 刘鸿飞<sup>4</sup> 陈建林<sup>2</sup> 康志强<sup>2</sup>

WANG BaoDi<sup>1,2</sup>, CHEN LingKang<sup>3</sup>, XU JiFeng<sup>2</sup>, LIU HongFei<sup>4</sup>, CHEN JianLin<sup>2</sup> and KANG ZhiQiang<sup>2</sup>

1. 成都地质矿产研究所, 成都 610081

2. 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

3. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

4. 西藏自治区地质调查院, 拉萨 850000

1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China

2. Key Laboratory of Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Institute of Geological Survey of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China

2010-01-04 收稿, 2010-11-06 改回.

Wang BD, Chen LK, Xu JF, Liu HF, Chen JL and Kang ZQ. 2011. Identification and petrogenesis of potassic volcanic rocks with “ultrapotassic” characteristics from Maqiang area in Lhasa block. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1662–1674

**Abstract** It is generally accepted that the post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism are erupted from western to eastern in temporal in Lhasa block of Tibetan Plateau. However, this study has identified the potassic volcanic rocks from the Maqiang area in central of Lhasa block, which formed at ~21.3Ma by <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating. These potassic rocks are geochemical similar to ultrapotassic rocks, e. g., high in MgO (>3%) and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O > 2). The high MgO contents of potassic rocks in studying area caused for late-altered dolomite and they are more similar to potassic volcanic rocks although they show some “ultrapotassic” characteristics. Geochemically and tectonically, these potassic rocks in studying area are similar to the potassic-ultrapotassic rocks occurring along N-S rifts in the western Lhasa block. The enrichment in light rare earth elements (LREE), large ion lithophile elements (LILE, e. g., Rb, Ba and Th) and depletion in HFSE (e. g., Nb, Ta and Ti), and high initial <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr and low ε<sub>Nd</sub>(t) values of the potassic rocks in studying area, indicated that they were probably generated by partial melting of a metasomatic enrichment mantle related to early subduction events. Recognition of the potassic rocks in the Maqiang area imply that post-collisional potassic-ultrapotassic magmatism did not migrate from west to east in the Lhasa block. In other words, the post-collisional potassic and ultrapotassic lava in the Lhasa block were might erupted at the same time. And we suggest that the formation of the Miocene potassic-ultrapotassic volcanic rocks and N-S rifts in the Lhasa block were probably triggered by slab break-off of the India continent lithosphere during northern intra-continent subduction in early Miocene.

**Key words** Potassic-ultrapotassic volcanic rocks; Post-collisional magmatism; Temporal distribution; Maqiang area; Lhasa block

**摘要** 一般认为青藏高原拉萨地块后碰撞钾质-超钾质岩浆活动由西向东逐渐喷发,然而本文在拉萨地块中部麻江地区识别出一套钾质火山岩,利用单矿物金云母的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar方法确定其形成于21.3Ma。这套火山岩具有高镁(>3%)和高钾(K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O > 2)等的超钾质火山岩成分特征,但其高的MgO含量是因岩石中含有后期蚀变矿物白云石所致,因此它们是具有

\* 本文受国家重点基础研究发展规划(2009CB421004、2009CB421003)、国家自然科学基金(41073033、40930316、40872055)和中科院知识创新项目(KZCX2-YW-Q04-2)联合资助。

第一作者简介:王保弟,男,1975年生,博士,主要从事青藏高原地质及地球化学研究, E-mail: baodiwang@163.com

“超钾质岩”成分特征的钾质岩。这套火山岩与拉萨地块西部地区沿着南北向地堑产出的钾质岩具有相似的构造环境,同时具有相似的地球化学特征,如富集 LREE 及 LILE、亏损 HFSE、高度富集 Rb、Ba、Th、U 等强不相容元素,并具有较高的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  比值和较低的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  指示其可能源于与古俯冲相联系的富集地幔源区。麻江地区约 21Ma 钾质岩的识别可能使人们重新认识有关拉萨地块后碰撞钾质-超钾质岩浆从西向东的演化特征,揭示拉萨地块后碰撞岩浆活动可能是近同时发生。同时本文认为麻江钾质岩的形成以及拉萨地块南北向裂谷系统的形成演化可能与中新世早期北向俯冲的印度岩石圈断离有关。

关键词 钾质-超钾质岩; 后碰撞岩浆作用; 时间分布; 麻江; 拉萨地块

中图法分类号 P588.143; P597.3

青藏高原广泛发育有新生代钾质、超钾质火山岩,它们为人们进行青藏高原的形成演化及其地球动力学研究提供了一条有效的途径。前人研究认为青藏高原南部拉萨地块的超钾质火山岩分布在大约东经  $87^\circ$  以西区域(赵志丹等, 2006; Zhao *et al.*, 2009) 如邦巴、雄巴、赛利普、当惹雍错-许如错、扎布耶茶卡东岸布嘎寺、措麦等地(Miller *et al.*, 1999; Turner *et al.*, 1996; Williams *et al.*, 2001, 2004; 王保弟等, 2008; 江元生等, 2003; 廖思平等, 2002; Ding *et al.*, 2003; 丁林等, 2006; Gao *et al.*, 2007; 孙晨光等, 2007, 2008; 陈建林等, 2006, 2007, 2008; 马润则等, 2008) 主要年龄范围是 25 ~ 12Ma; 而钾质火山岩在东到拉萨西至狮泉河的广大范围

内均有产出,年龄约为 24 ~ 10Ma,并具有从西向东逐渐变年轻的特征(周肃等, 2004; 赵志丹等, 2006)。钾质岩和超钾质岩在野外产出上明显与南北向地堑、新生代盆地、南北向延伸的湖泊等的分布密切相关(Williams *et al.*, 2004; 丁林等, 2006; 王保弟等, 2008; 赵志丹等, 2006, 2008; 陈建林等, 2008) 被认为是伸展构造背景下的产物(图 1)。本文最近在野外考察过程中,在东经  $87^\circ$  以东麻江地区发现了一套钾质火山岩,这套岩石明显不同于前人(Coulon *et al.*, 1986; 周肃等, 2004; 魏瑞华等, 2008) 在相邻地区报道过的钾质岩,其高精度  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄为 21.3Ma,这是在青藏高原东经  $87^\circ$  以东地区首次识别出的中新世早期钾质火山岩。在对该

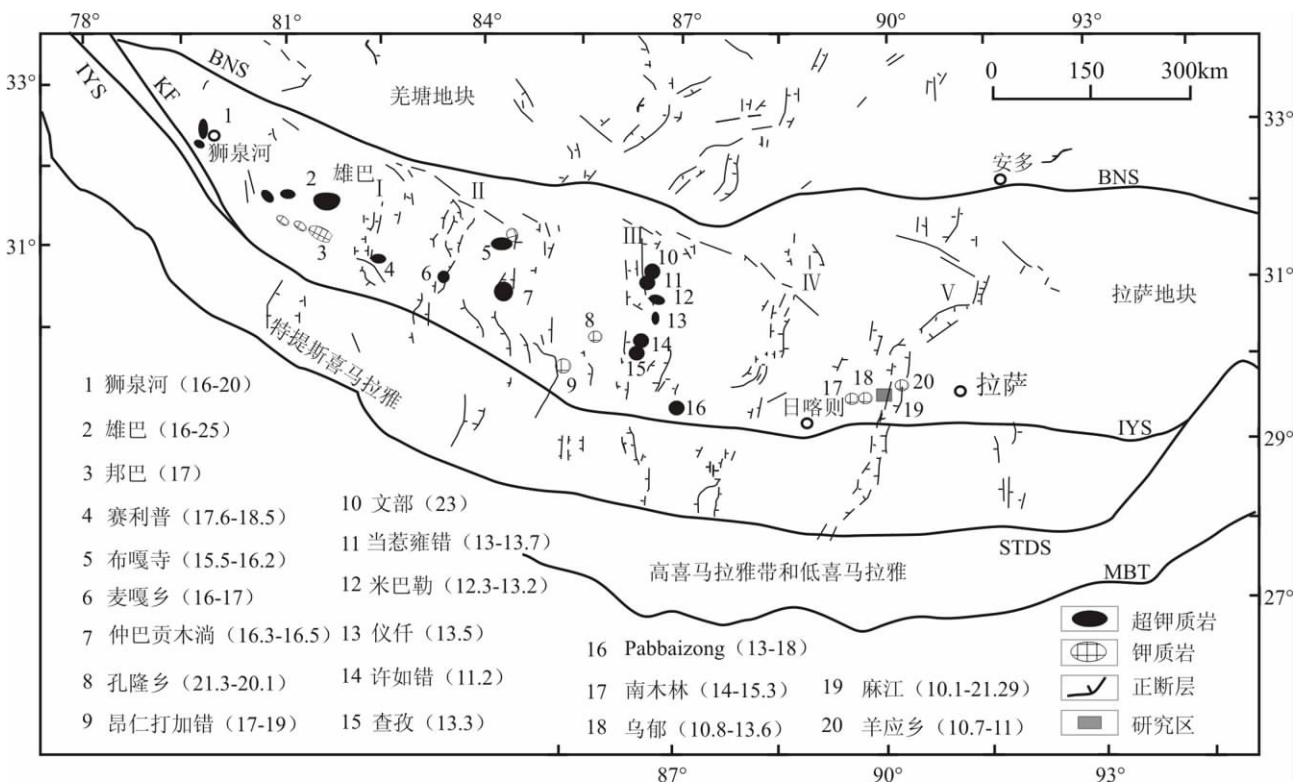


图 1 拉萨地块新生代钾质-超钾质火山岩分布简图(据赵志丹等, 2006; 陈建林等, 2008 略有修改)

数据来源: Coulon *et al.*, 1986; Gao *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2007; Miller *et al.*, 1999; Nomade *et al.*, 2004; Williams *et al.*, 2004; 丁林等, 2006; 王保弟等, 2008; 周肃等, 2004; 孙晨光等, 2007; 赵志丹等, 2006; 陈建林等, 2006, 2007. I-亚热地堑; II-塔口拉-隆格尔地堑; III-当惹雍错-许如错地堑; IV-定结-申扎地堑; V-亚东-羊八井地堑; BNS-班公湖-怒江结合带; IYS-雅鲁藏布江结合带; KF-喀喇昆仑断裂; STDS-藏南拆离系; MBT-主边界断裂

Fig. 1 Simplified map showing the distribution of Cenozoic potassic-ultrapotassic rocks in Lhasa block (after Zhao *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2008)

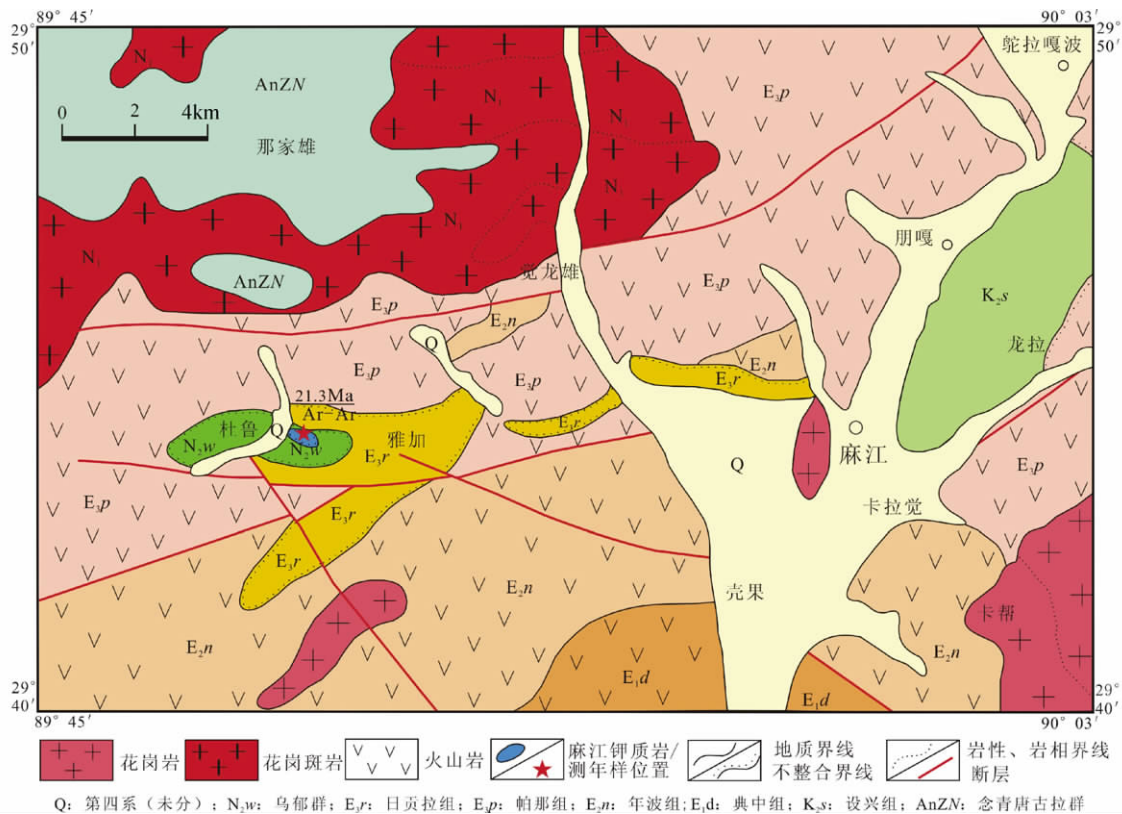


图2 拉萨地块中部麻江地区地质简图(据西藏地质调查院 2009<sup>①</sup>修改)

Fig. 2 Simplified geological map in Maqiang area in central of Lhasa block

地区火山岩的研究过程中经历了从超钾质岩到钾质岩的识别过程, 本文将重点研究该钾质火山岩的岩石学及其地球化学特征, 并进一步讨论其岩石成因, 从而为更好的理解青藏高原南部岩石圈地幔以及构造演化提供新的地质依据。

## 1 地质背景及样品特征

青藏高原是新生代印度板块与欧亚板块碰撞的产物, 是由一系列近东西向的构造地块拼贴而成, 由北往南依次是: 松潘-甘孜地块、羌塘地块、拉萨地块(冈底斯地块)与喜马拉雅地块(Yin and Harrison 2000), 中间依次为金沙江缝合带、班公湖-怒江缝合带、雅鲁藏布江缝合带所分隔。在青藏高原南部拉萨地块自中生代以来大致经历了晚侏罗世-早白垩世火山-岩浆弧阶段、中晚白垩世火山-岩浆弧阶段、白垩纪末-始新世碰撞造山阶段和随后的后碰撞阶段等多个构造演化阶段, 其中在后碰撞阶段形成了规模较小但分布广泛的钾质-超钾质岩(图1)、埃达克质(斑)岩和少量钙碱性岩石。

另外在拉萨地块还发育有多条近南北向的地堑, 从西向东分别是亚热地堑、塔口拉-隆格尔地堑、当惹雍错-许如错地堑(古错-文部地堑)、定结-申扎地堑、亚东-羊八井地堑(丁林等, 2006; 侯增谦等, 2006), 在这些地堑中及其附近已经识别出较多的钾质岩、超钾质岩(图1), 目前研究认为这些钾质、超钾质岩与地堑的形成演化有着密切关系(Williams *et al.*, 2001, 2004; 赵志丹等, 2006; 丁林等 2006; 陈建林等, 2010)。

麻江地区钾质火山岩分布在拉萨地块中部羊八井南麻江盆地内, 属于亚东-羊八井地堑系统, 盆地内主要出露有林子宗群钙碱性火山岩系(典中组、年波组、帕那组), 其次为日贡拉组( $E_{3r}$ )山间盆地沉积建造, 另外有少量分布局限的以泥质粉砂岩等为特征的一套河流相沉积乌郁群( $N_{2w}$ ) (西藏自治区地质矿产局, 1993) (图2)。本次研究的麻江火山岩不整合于乌郁群顶部, 分布面积约为  $0.04 \text{ km}^2$ , 出露宽度 167m, 岩石类型以黑云母粗面岩、粗面岩为主(图3)。Coulon *et al.* (1986) 在拉萨地块中段麻江地区报道了高钾钙碱性火山岩, 在英安岩、凝灰质熔岩中获得单矿物 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄为 10.1 ~ 15.8Ma; 同时周肃等在羊应乡识别出形成于

① 西藏地质调查院. 2009. 1: 5万冲江幅区域地质图



图3 麻江地区钾质火山岩宏观地质特征

Fig. 3 Field photograph of Miocene volcanic rocks in Maqiang area

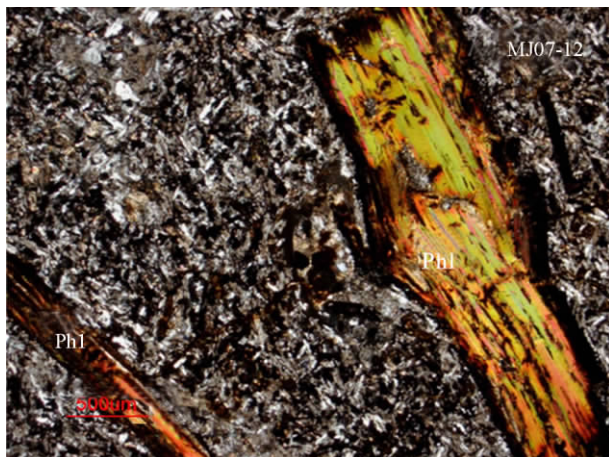


图4 麻江地区钾质岩中粗面岩镜下显微特征

Fig. 4 Micro-texture characteristics of trachyte for Miocene volcanic rocks in Maqiang area

10.7 ~ 11.4 Ma 之间的钾质岩(周肃等, 2004), 并认为它们来源于加厚下地壳, 构造环境与岩石圈地幔减薄有关; 最近魏瑞华等(2008)在羊八井地区识别出一套钾质火山岩, 并认为其岩浆源于角闪岩相的消减沉积物。本文识别出的这套钾质火山岩在时代和地球化学组成方面明显不同于上述相邻地区火山岩(见后文)。

麻江火山岩粗面岩岩相学特征为, 岩石具斑状结构, 基质具粗面结构、交织结构, 斑晶主要为金云母(20% ~ 25%) (图4), 片长一般在1 ~ 4mm 之间, 颜色一般为中褐色, 部分边缘具暗化边, 常分布许多网状金属矿物; 另外有少量辉石。基质主要为板条状正长石(50% ~ 55%)、金云母(3% ~ 5%)、普通辉石(3% ~ 5%) 以及少量的褐铁矿及金属矿物(2% ~ 3%)。岩石普遍遭受碳酸盐化, 致使岩石中的方解石、白云石可达5% ~ 10%。个别岩石具有气孔, 皆为方解石

充填, 含量约5% ~ 10%, 呈不规则状或拉长状, 气孔内壁上常见极薄的钙质或沸石矿物薄膜。岩石中见有后期微细白云石脉充填。

本文在麻江火山岩出露的粗面岩采集了有代表性的、较新鲜的样品进行地球化学分析, 并进行了 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  同位素年代学分析, 采样位置为 N29°44'05", E89°49'16"。

## 2 分析方法

麻江火山岩年龄测定在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 GV5400Ar-Ar 质谱仪上完成。首先在麻江火山岩中挑取1件新鲜岩石样品(MJ07-12), 碎样之后在双目镜下挑选金云母单矿物, 然后在 Milli-Q 中超声波清洗, 100°C 烘干后用铝箔包装用于分析, 标准样品用铜箔包装。2007年9月在北京核反应堆照射90h。标准样品为荷兰自由大学标样 DRA1 透长石(25.26Ma)。详细的分析流程以及数据处理见邱华宁(2006)。

主、微量元素及 Sr-Nd 同位素分析在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完成。主量元素分析采用碱熔玻璃 XRF 法分析完成, 分析精度优于1% ~ 5%; 微量元素采用酸溶法, 用 PE Elan6000 型 ICP-MS 仪器测定分析, 分析精度一般好于2% ~ 5%; 具体分析流程参阅刘颖和刘海臣(1996)。Sr-Nd 同位素比值测定分析是在 Micro Mass Isoprobe 型多接受电感耦合等离子质谱仪(MC-ICPMS) 上进行。Sr 同位素用国际标样 NBS987 和实验室标准 Sr-GIG 进行监控,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值用  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1194$  标准化。Nd 同位素用国际标准 Jndi-1 和实验室标准 Nd-GIG 进行监控,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值用  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  标准化。化学准备及分析流程见 Chen *et al.* (2010) 的描述。

## 3 火山岩时代

本次研究对麻江钾质火山岩 MJ07-12 样品所含金云母矿物进行了18个阶段的加热分析(表1), 受核反冲以及过剩氩的影响, 在低温阶段年龄谱线左侧始点处出现了5个高的视年龄值, 可能指示有过剩 Ar 的存在, 但其所占的比例较小, 谱线的其余部分(97.5%的 $^{39}\text{Ar}$  积累) 比较平坦(图5), 根据后面参与积分的13个点计算, 获得的有效坪年龄( $t_p$ ) 为  $21.3 \pm 0.25\text{Ma}$  (图5), 代表了火山岩的形成年龄, 因此本文认为麻江钾质火山岩形成于21Ma 左右。

## 4 麻江地区具有“超钾质”成分的火山岩识别过程

Johannsen (1939)、Nelson (1992) 等认为钾质岩是以含

表1 拉萨地块麻江钾质火山岩金云母 Ar-Ar 同位素定年结果

Table 1 Argon isotope analyzing results of phlogopite for potassic volcanic rocks in Maqiang area

加热阶段	<sup>36</sup> Ar( a)	<sup>37</sup> Ar( ca)	<sup>38</sup> Ar( cl)	<sup>39</sup> Ar( k)	<sup>40</sup> Ar( r)	Age ( Ma)	<sup>40</sup> Ar( r) ( %)	<sup>39</sup> Ar( k) ( %)		
08G2053C	2. 70W	0. 000018	0. 000079	0. 000001	0. 000647	0. 002461	67. 31	±6. 95	31. 79	0. 30
08G2053D	3. 20W	0. 000014	0. 000120	0. 000002	0. 000819	0. 002578	55. 89	±5. 39	38. 12	0. 38
08G2053E	3. 70W	0. 000011	0. 000210	0. 000002	0. 001538	0. 003371	39. 10	±2. 45	50. 64	0. 71
08G2053H	5. 00W	0. 000006	0. 000314	0. 000001	0. 001848	0. 003609	34. 89	±2. 14	67. 20	0. 86
08G2053I	5. 60W	0. 000004	0. 000271	0. 000000	0. 003543	0. 005622	28. 40	±0. 82	80. 69	1. 65
08G2053K	6. 80W	0. 000030	0. 000692	0. 000008	0. 020445	0. 024648	21. 62	±0. 20	73. 38	9. 50
08G2053L	7. 50W	0. 000007	0. 000207	0. 000005	0. 010234	0. 012872	22. 55	±0. 35	85. 35	4. 75
08G2053N	8. 50W	0. 000010	0. 000207	0. 000005	0. 011733	0. 013671	20. 90	±0. 29	81. 89	5. 45
08G2053O	9. 50W	0. 000011	0. 000280	0. 000007	0. 013566	0. 015919	21. 05	±0. 20	82. 84	6. 30
08G2053P	10. 50W	0. 000010	0. 000240	0. 000007	0. 013833	0. 016283	21. 11	±0. 21	83. 92	6. 43
08G2053Q	11. 50W	0. 000011	0. 000225	0. 000007	0. 012990	0. 015142	20. 91	±0. 18	82. 40	6. 04
08G2053R	13. 00W	0. 000018	0. 000353	0. 000012	0. 020618	0. 023695	20. 62	±0. 18	81. 40	9. 58
08G2053T	14. 50W	0. 000023	0. 000314	0. 000012	0. 021851	0. 026154	21. 47	±0. 25	78. 82	10. 15
08G2053V	16. 00W	0. 000024	0. 000331	0. 000012	0. 026441	0. 031917	21. 65	±0. 15	81. 31	12. 28
08G2053W	17. 50W	0. 000019	0. 000228	0. 000002	0. 025920	0. 030757	21. 28	±0. 16	84. 02	12. 04
08G2053X	20. 00W	0. 000010	0. 000099	0. 000000	0. 012157	0. 014641	21. 60	±0. 26	83. 39	5. 65
08G2053Y	23. 00W	0. 000008	0. 000091	0. 000001	0. 009800	0. 011853	21. 69	±0. 44	83. 88	4. 55
08G2053Z	30. 00W	0. 000007	0. 000104	0. 000000	0. 007253	0. 008991	22. 23	±0. 49	81. 53	3. 37

表2 拉萨地块麻江钾质火山岩主量元素(wt%)、微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果Table 2 major (wt%) and trace element ( $\times 10^{-6}$ ) analyzing results for potassic volcanic rocks in Maqiang area, Lhasa block

样品号	MJ07-11	MJ07-12	MJ07-13	MJ07-14	MJ07-15	MJ07-16	样品号	MJ07-11	MJ07-12	MJ07-13	MJ07-14	MJ07-15	MJ07-16
SiO <sub>2</sub>	65. 13	60. 22	58. 37	63. 39	58. 98	47. 92	Ge	1. 47	1. 77	1. 54	1. 66	1. 68	1. 38
TiO <sub>2</sub>	1. 15	1. 24	1. 18	1. 13	1. 19	1. 14	Rb	647	559	623	647	688	618
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12. 69	13. 22	12. 64	14. 47	12. 68	12. 25	Y	22. 4	19. 7	25. 1	22. 4	22. 9	26. 1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	4. 73	4. 73	5. 05	4. 31	4. 83	4. 85	Zr	643	612	652	683	653	640
MnO	0. 03	0. 05	0. 06	0. 03	0. 06	0. 09	Nb	32. 7	32. 8	31. 9	34. 0	33. 8	33. 3
MgO	2. 73	3. 24	3. 76	2. 83	3. 61	6. 20	Cs	31. 0	20. 3	23. 0	24. 6	34. 2	29. 8
CaO	1. 34	2. 89	3. 61	2. 08	3. 17	7. 26	Ba	2390	2304	2437	2487	2591	2231
Na <sub>2</sub> O	2. 19	2. 45	2. 20	1. 83	2. 31	2. 24	La	71. 6	55. 5	75. 0	67. 3	68. 1	77. 2
K <sub>2</sub> O	7. 34	8. 00	7. 69	6. 39	7. 85	7. 62	Ce	166	129	174	157	159	178
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0. 52	0. 76	0. 76	0. 62	0. 70	0. 77	Pr	24. 0	18. 9	25. 6	22. 4	23. 5	25. 5
LOI	2. 06	3. 32	4. 68	3. 34	4. 33	10. 14	Nd	102	81. 5	110	98. 0	104	110
Total	99. 91	100. 12	100. 02	100. 41	99. 70	100. 47	Sm	20. 5	16. 8	22. 1	19. 9	20. 6	21. 8
CO <sub>2</sub>	2. 79	1. 11	3. 76	2. 60	3. 57	9. 63	Eu	2. 85	2. 46	3. 08	2. 82	2. 79	2. 95
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0. 66	0. 71	0. 65	0. 57	0. 62	0. 39	Gd	12. 2	10. 3	13. 6	12. 0	12. 3	13. 4
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0. 71	0. 65	0. 29	0. 47	0. 47	0. 53	Tb	1. 32	1. 17	1. 46	1. 30	1. 37	1. 47
配对 MgO	1. 28	0. 51	1. 72	1. 19	1. 63	4. 41	Dy	5. 51	4. 83	6. 02	5. 34	5. 50	6. 05
剩余 MgO	1. 45	2. 74	2. 04	1. 64	1. 97	1. 79	Ho	0. 79	0. 71	0. 89	0. 76	0. 83	0. 89
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	3. 34	3. 27	3. 49	3. 50	3. 40	3. 40	Er	1. 80	1. 68	2. 00	1. 72	1. 81	2. 04
Sc	9. 45	8. 10	10. 2	8. 39	9. 38	10. 8	Tm	0. 22	0. 21	0. 25	0. 22	0. 22	0. 24
V	76. 4	73. 1	77. 5	77. 5	77. 4	83. 9	Yb	1. 32	1. 26	1. 49	1. 32	1. 34	1. 47
Cr	205	240	266	256	278	233	Lu	0. 20	0. 19	0. 23	0. 19	0. 20	0. 21
Co	14. 9	13. 8	16. 0	14. 0	16. 3	17. 3	Hf	19. 7	18. 7	19. 9	19. 5	20. 1	18. 0
Ni	127	125	138	186	150	140	Ta	2. 88	2. 68	2. 86	2. 83	2. 89	2. 58
Cu	26. 3	31. 6	36. 7	39. 1	38. 2	32. 3	Pb	77. 6	81. 4	86. 3	82. 5	81. 0	81. 8
Sr	710	641	727	717	701	963	Th	201	193	211	206	204	199
Ga	18. 7	17. 9	18. 5	19. 0	19. 5	19. 2	U	20. 8	21. 5	26. 5	22. 9	22. 0	14. 5

注:表中配对 MgO 含量是假设岩石中 CO<sub>2</sub> 仅赋存在蚀变矿物白云石中的条件下,用 MgO 与之进行配对的数值,剩余 MgO 含量为原始 MgO 含量减去配对 MgO 含量后的值

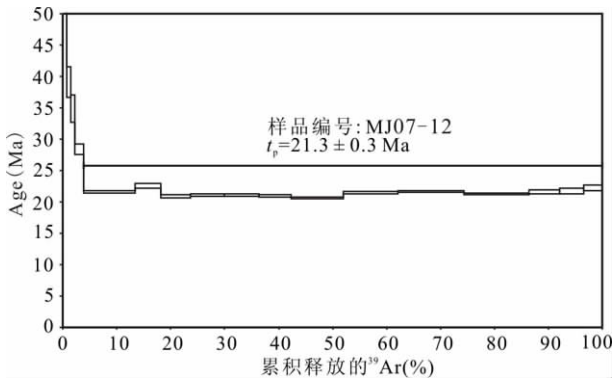


图5 麻江钾质岩金云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 坪年龄

Fig. 5 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar plateau ages for phlogopite of the potassic volcanic rocks in Maqiang area

有高的 K<sub>2</sub>O 含量, 并且 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O > 1 为特征。Foley *et al.* (1987) 把超钾质岩定义为: K<sub>2</sub>O > 3% ,MgO > 3% ,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O > 2。从地球化学数据分析(表 2) 麻江火山岩 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值为 3.27 ~ 3.50 其中 4 件样品(MJ07-12、13、15、16) MgO 含量为 3.24% ~ 6.20% 符合超钾质岩的定义, 由此可以确认麻江这套火山岩应属于超钾质岩。但同时注意到该套岩石明显受到后期白云石化(经电子探针分析确定) 蚀变影响以及烧失量较高(3.32% ~ 10.14%) 的特征, 而白云石中含有 Mg 元素, 如果白云石在样品分析前处理中没有被彻底清除, 那肯定会影响岩石全岩分析的 MgO 含量, 于是本文对这些样品进行了 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>、H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> (该分析在湖北地质实验研究所采用湿法完成) 分析, 并在假设 CO<sub>2</sub> 仅赋存在白云石矿物中的条件下, 用 MgO 与之进行配对, 若扣除这些受白云石影响的 MgO 含量, 则岩石中 MgO 含量为 1.45% ~ 2.74% (表 2), 全部 < 3%, 即麻江地区这套超钾质岩在地球化学成分全部为钾质岩。由此本文认为在超钾质岩识别过程中要特别重视后期蚀变的影响, 一定要加强镜下薄片的研究, 排除蚀变矿物白云石的影响, 否则有可能导致岩石跨系列, 从而有可能得出错误的结论。对比拉萨地块中西部的超钾质岩, 有些地区也同样受到了白云石化蚀变的影响, 同样这些样品的烧失量也比较高, 由此看来这些超钾质岩是否可信还是值得进一步工作的, 只有在地质事实确凿的前提下, 利用这些超钾质岩的资料来探讨岩石圈的演化、地球深部物质变化才是科学的。

### 5 麻江钾质火山岩地球化学特征

本次工作获得的 6 件样品中有 5 件样品(1 件样品烧失量过高 LOI 为 10.14% 在讨论微量元素特征时该样品不参与分析) 在 TAS 图解中全部属于粗面岩(图 6), 与岩相学定名一致, 与拉萨地块西部其它地堑系钾质岩相比( Miller *et al.*, 1999; Nomade *et al.*, 2004; Williams *et al.*, 2001; 王保

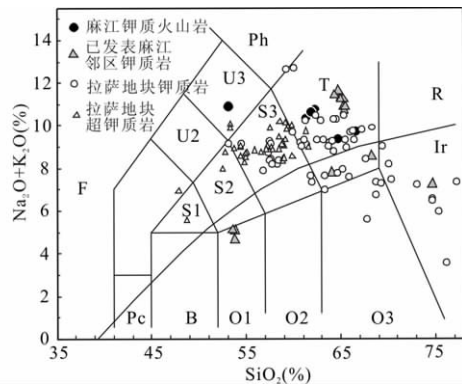


图6 拉萨地块新生代钾质岩 TAS 图

数据来源于 Coulon *et al.*, 1986; Gao *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2007; Miller *et al.*, 1999; Nomade *et al.*, 2004; Williams *et al.*, 2004; 丁林等, 2006; 王保弟等, 2008; 周肃等, 2004; 孙晨光等, 2007; 赵志丹等, 2006; 陈建林等, 2006 2007. 下同

Fig. 6 TAS diagram for Miocene volcanic rocks in Lhasa block

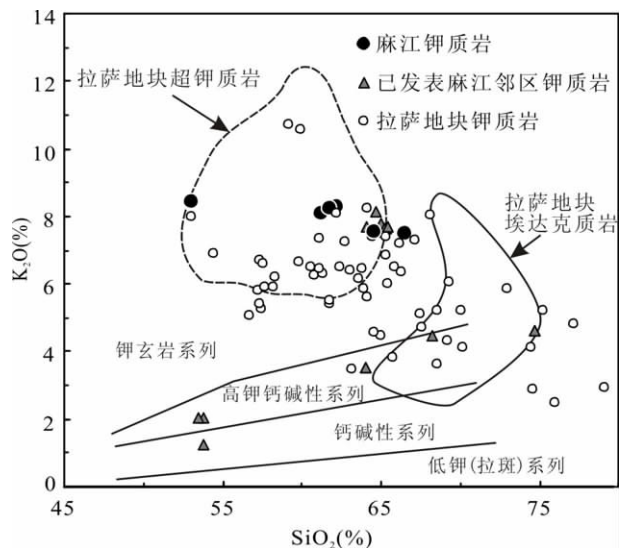


图7 拉萨地块新生代钾质岩 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图

Fig. 7 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram for Miocene volcanic rocks in Lhasa block

弟等, 2008; 孙晨光等, 2007; 陈建林等, 2006) 本区样品全碱含量稍微偏高(图 4)。在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图(图 7) 中全部样品位于钾玄岩范围, 与拉萨地块及邻区一致显示为钾质岩。麻江钾质火山岩相容元素 Cr、Ni 含量分别为 240 × 10<sup>-6</sup> ~ 278 × 10<sup>-6</sup>、125 × 10<sup>-6</sup> ~ 186 × 10<sup>-6</sup>, 明显高于拉萨地块其它地区的钾质岩以及麻江邻区的钾质岩(图 8a, b), 可能指示岩浆经历了相对较弱的橄榄石或单斜辉石等镁铁质矿物的分离结晶。

麻江钾质火山岩轻稀土明显富集, 轻/重稀土分异明显 ((La/Yb)<sub>N</sub> = 32 ~ 39) 且具有明显的 Eu 负异常(δEu = 0.53

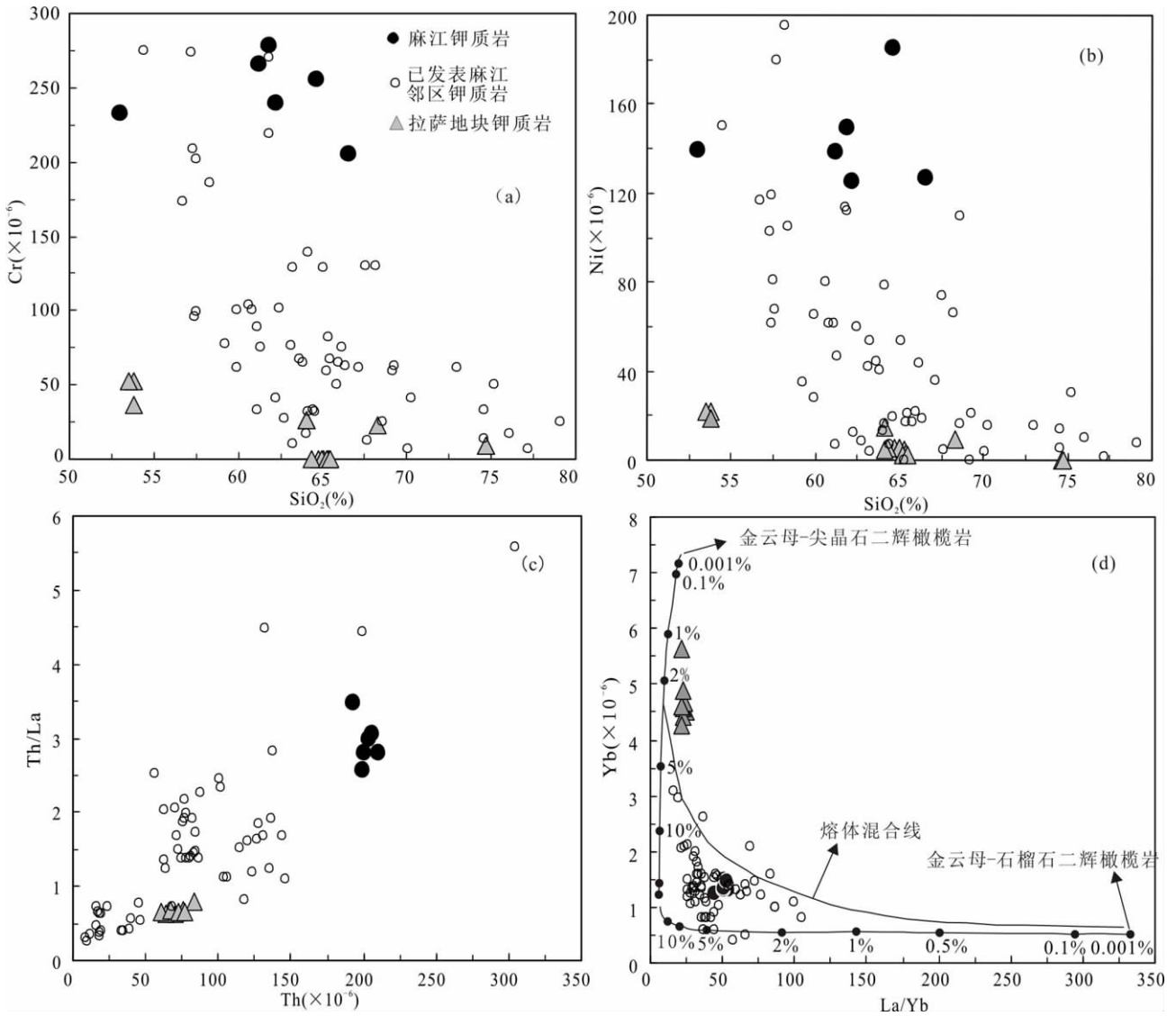


图8 SiO<sub>2</sub>-Cr ( a )、SiO<sub>2</sub>-Ni ( b )、Th-Th/La ( c )、La/Yb-Yb ( d )图解

Fig. 8 Diagrams of SiO<sub>2</sub> vs. Cr ( a ) , SiO<sub>2</sub> vs. Ni ( b ) , Th vs. Th/La ( c ) and La/Yb vs. Yb ( d )

~0.57) 等特征(图9)。研究区钾质岩 REE 配分型式与拉萨地块其它钾质岩非常相似(图9),但 Eu 负异常相对较大;与麻江邻区钾质岩相比具有更低的 La 含量以及 HREE, HREE 更亏损,可能表明岩浆来源于比邻区钾质岩浆源区更深的岩浆房,它们不应是同一岩浆源区,应该有各自独立的岩浆源区。

在原始地幔标准化蛛网图(图10)中,大离子亲石元素 Rb、Th、U 等强烈富集,高场强元素 Nb、Ta、Ti 相对亏损,Sr 具有负异常。与麻江邻区钾质岩相比,有着较高的 Rb、Ba、Th、U 等不相容元素含量(图8c、图10)。

麻江钾质岩 Sr-Nd 同位素测试分析结果见表3。从表3及 Sr-Nd 同位素图(图11)中显示,麻江钾质火山岩具有较高的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 比值(0.7174 ~ 0.7223) 和较低的 ε<sub>Nd</sub>(t) (-8.9 ~ -9.6) 接近 EMII 区域,有着与西班牙钾镁煌斑岩

类似的分布区域。同时研究区钾质岩明显不同于邻区已发表的钾质岩数据(魏瑞华等,2008),这些特点可能暗示它们有不同的物质源区。

### 6 讨论

#### 6.1 麻江钾质岩岩浆源区

钾质岩通常认为来自于富集地幔源区(Foley et al., 1987),而最近的一些研究表明青藏高原部分钾质火山岩也可能源于加厚的下地壳(陈建林等,2006,2007; Chen et al., 2010)(表4)。研究区钾质岩高的 Cr、Ni(分别为 240 × 10<sup>-6</sup> ~ 278 × 10<sup>-6</sup>、125 × 10<sup>-6</sup> ~ 186 × 10<sup>-6</sup>)(图8a, b) 等相容元素的含量远高于地壳的平均含量(Rudnick and Fountain, 1995) 暗示它们不可能直接来源于地壳,而很可能

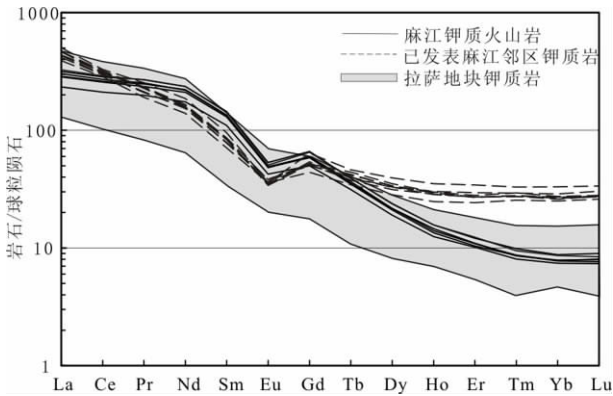


图9 麻江火山岩 REE 配分型式图( 标准化值据 Sun and McDonough , 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns for Miocene volcanic rocks in Maqiang area ( after Sun and McDonough , 1989)

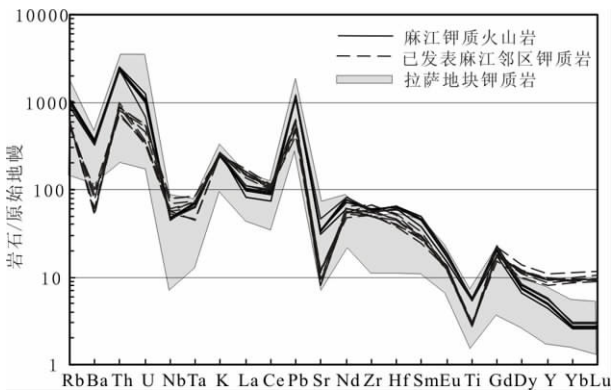


图10 麻江火山岩微量元素原始地幔蛛网图( 标准化值据 Sun and McDonough , 1989)

Fig. 10 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram for Miocene volcanic rocks in Maqiang area ( after Sun and McDonough , 1989)

源于岩石圈地幔。在主量元素的 Harker 图解中( 图未附) , 麻江研究区钾质岩  $MgO$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $TiO_2$  与  $SiO_2$  之间存在明显的负相关关系, 表明在岩浆的演化过程中, 可能有橄榄石、单斜辉石和钛铁矿等矿物的结晶分异。同时 La 与 La/Sm 的相关关系表明( 图 12) 结晶分异在研究区岩浆形成过程中起着主要的作用。麻江钾质岩明显高的 Rb、Th、U 等 LILE 含量, Nb、Ta、Ti 等 HFSE 负异常( 图 10) , 明显低于 MORB 或 OIB ( 25) 的 Ce/Pb 比值( 1.59 ~ 2.17) ( Hofmann *et al.* , 1986) , 低 Nb/La ( 0.43 ~ 0.59) 、高 Th/Ta ( 69.77 ~ 77.18) 、高 Th/La ( 2.59 ~ 3.06) 等地球化学特征, 指示它们可能源于与俯冲流体交代相关的富集地幔源区( Miller *et al.* , 1999; Turner *et al.* , 1996; Williams *et al.* , 2004) 。例如, 实验岩石学结果显示, 在俯冲区 Th 富集事件与加入的沉积物密切相关( Johnson and Plank , 1999) 。另外麻江钾质岩

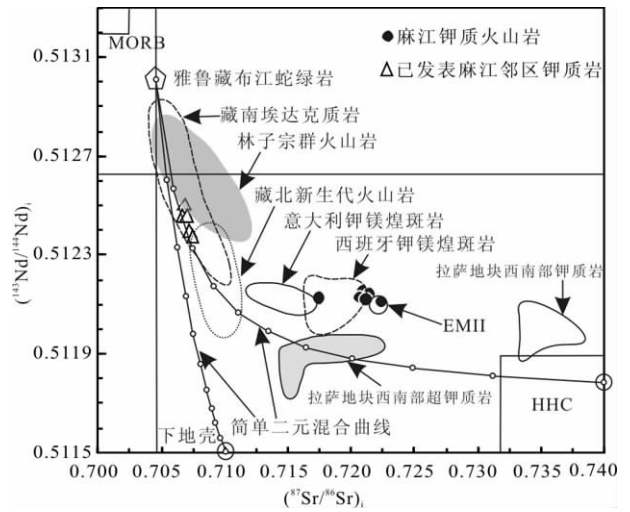


图11 拉萨地块麻江钾质岩  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - (^{143}Nd/^{144}Nd)_i$  图解

Fig. 11  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - (^{143}Nd/^{144}Nd)_i$  isotope diagram for volcanic rocks in Maqiang area

具有较高的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$  比值( 0.7174 ~ 0.7223) 和较低的  $\epsilon_{Nd}(t)$  ( -8.9 ~ -9.6) ( 图 11) 以及高的  $t_{DM}$  模式年龄( 1.63 ~ 1.70Ga) 暗示源区的富集可能与古俯冲相关。综上所述认为, 麻江钾质火山岩很可能是由受古俯冲流体交代的富集地幔源区经过部分熔融和分离结晶作用的产物。

La/Yb 比值和 Yb 含量的相关关系可有效判别地幔岩浆起源的相对深度和熔融程度( Miller *et al.* , 1999; Ding *et al.* , 2003) 本区钾质火山岩在 Yb-La/Yb 相关图( 图 8d) 上落于含金云母尖晶石相二辉橄榄岩和含金云母石榴石相二辉橄榄岩的混合线下侧, 表明单一的尖晶石相二辉橄榄岩和单一石榴石相二辉橄榄岩不同程度部分熔融都不能形成本区钾质火山岩的 REE 特征, 而大比例石榴石相二辉橄榄岩的熔体和较多尖晶石相二辉橄榄岩的熔体混合能产生本区钾质火山岩的 REE 特征, 这一点与拉萨地块其它地区钾质火山岩的特征类似( Ding *et al.* , 2003; Miller *et al.* , 1999) 。同时在 Yb-La/Yb 相关图( 图 8d) 中显示出研究区钾质岩明显不同于魏瑞华等( 2008) 在羊八井北部报道的钾质岩, 暗示它们可能有着不同的物质源区。

另外 Guo *et al.* ( 2007) 通过对青藏高原北部部分新生代火山岩研究后认为其源区为正常的 MORB 源区与 0.5% ~ 10% 俯冲沉积物相互混合并发生部分熔融的结果, Ding *et al.* ( 2003) 、Guo *et al.* ( 2007) 也认为需要 17% ~ 22% 的壳源物质, 而陈建林等( 2008) 认为青藏高原高镁钾质岩( 超钾质岩及高镁钾质岩) 的源区可能是与古俯冲相联系的多次富集事件相关, 并非是简单的二端元混合并发生部分熔融的产物, 其源区可能位于岩石圈地幔的尖晶石橄榄岩区域。由上面的讨论可知, 研究区钾质岩的岩浆源区可能为与古俯冲流体交代的岩石圈富集地幔, 而同拉萨地块其它地区钾质岩相



表3 拉萨地块麻江钾质火山岩 Sr-Nd 同位素数据表

Table 3 Sr-Nd isotope analyzing results for potassic volcanic rocks in Maqiang area, Lhasa block

样品号	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$	$2\sigma$	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$	$2\sigma$	$\frac{147\text{Sm}}{143\text{Nd}}$	$\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}$ (Ga)
MJ07-11	559	641	0.721674	19	2.5231	0.720911	16.8	81.5	0.512171	7	0.1256	0.512153	-8.9	1.69
MJ07-12	647	710	0.722130	14	2.6373	0.721333	20.5	102	0.512168	8	0.1218	0.512151	-9.0	1.63
MJ07-13	623	727	0.721479	14	2.4787	0.720730	22.1	110	0.512155	7	0.1224	0.512138	-9.2	1.66
MJ07-14	647	717	0.721928	14	2.6083	0.721139	19.9	98.0	0.512145	7	0.1234	0.512128	-9.4	1.70
MJ07-15	688	701	0.723175	17	2.8379	0.722317	20.6	104	0.512137	9	0.1211	0.512120	-9.6	1.67
MJ07-16	618	963	0.717944	14	1.8557	0.717383	21.8	110	0.512154	7	0.1207	0.512137	-9.2	1.63

表4 拉萨地块钾质岩-超钾质岩主要特征一览表

Table 4 Primary characteristic of ultrapotassic and potassic rocks in Lhasa block

位置	岩石类型	时代范围 (Ma)	岩浆源区	成因解释	资料来源
阿里 狮泉河	粗面岩、流纹岩	20 ~ 16	含石榴石金云母橄榄岩源区	岩石圈地幔对流减薄	Turner <i>et al.</i> , 1996
	粗安岩	24 ~ 21.2	次大陆岩石圈地幔, 金云母和角闪石地幔 橄榄岩部分熔融	板片断离模式	Williams <i>et al.</i> , 2004
雄巴- 邦巴地区	钾质、超钾质	25 ~ 18	起源于富 Rb、低 Sm/Nd 比的富集岩石圈 地幔源区	板片断离模式	Miller <i>et al.</i> , 1999
	钙碱性火山岩	17 ~ 16	起源于地幔的熔体致使地壳物质的部分 熔融	板片断离模式	Miller <i>et al.</i> , 1999
赛利普	粗面岩	19.2 ~ 15.8	起源于一个前期亏损并经后期俯冲作用 改造的富钾的方辉橄榄岩富集地幔源区	岩石圈板片断离	孙晨光等, 2008 王保弟等, 2008
	粗面安山岩	17.6			
扎布 耶茶卡	粗安岩	16.2 ~ 16.1	富集大陆岩石圈地幔或者榴辉岩质下地 壳部分熔融	岩石圈地幔对流减薄	Nomade <i>et al.</i> , 2004
措勤县 布嘎寺	粗面岩、粗安岩	15.5 ~ 15.9	中酸性岩为富钾的镁铁质物质部分熔融; 中基性岩可能起源于一个含金云母的地 幔源区	与南北向地堑系统有关	马润则等, 2002; 陈建林等, 2006
仲巴县 麦嘎乡	超钾质、粗安岩	17.4	加入大量俯冲印度陆壳的富集地幔	与南北向地堑系统有关	丁林等, 2006
查孜	粗面安山岩、 粗面岩	21.3	中酸性岩为富钾的镁铁质物质部分熔融; 中基性岩可能起源于一个含金云母的地 幔源区	与南北向地堑系统有关	陈建林等, 2007
文部	粗面岩、响岩	23	富集岩石圈地幔	特提斯大洋岩石圈拆沉	Ding <i>et al.</i> , 2003
当惹 雍错	粗面岩	13.7 ~ 13.0	富集岩石圈地幔	岩石圈地幔减薄	赵志丹等, 2006
	超钾质、白榴响岩	12.6	EMII 型地幔	碰撞造山后板内变形	廖思平等, 2002
仪仟	超钾质岩	13.5	加入大量俯冲印度陆壳的富集地幔	与南北向地堑系统有关	丁林等, 2006
孔隆乡	粗面岩	21.3	镁铁质下地壳的部分熔融	与南北向地堑系统有关	Chen <i>et al.</i> , 2010
许如错	粗面岩	11.2	富集岩石圈地幔	岩石圈地幔减薄	赵志丹等, 2006
Pabbai Zong	响岩质 碱玄岩	18 ~ 13	次大陆岩石圈地幔, 金云母和角闪石地幔 橄榄岩部分熔融	板片断离模式	Williams <i>et al.</i> , 2001
尼木麻江	粗面岩、流纹岩	15.8 ~ 10.1	下地壳的部分熔融	区域伸展有关	Coulon <i>et al.</i> , 1986
当雄容尼多	粗面岩		角闪岩相的消减沉积物熔融	特提斯消减有关	魏瑞华等, 2008
当雄 羊应乡	流纹岩	10.9 ~ 10.65	富集大陆岩石圈地幔或者榴辉岩质下地 壳部分熔融	岩石圈地幔对流减薄	Nomade <i>et al.</i> , 2004
	粗面岩、流纹岩	10.8 ~ 9.1	加厚下地壳部分熔融	岩石圈地幔减薄	周肃等, 2004
麻江	粗面岩	21.3	与古俯冲相联系的富集地幔源区	岩石圈板片断离	本文

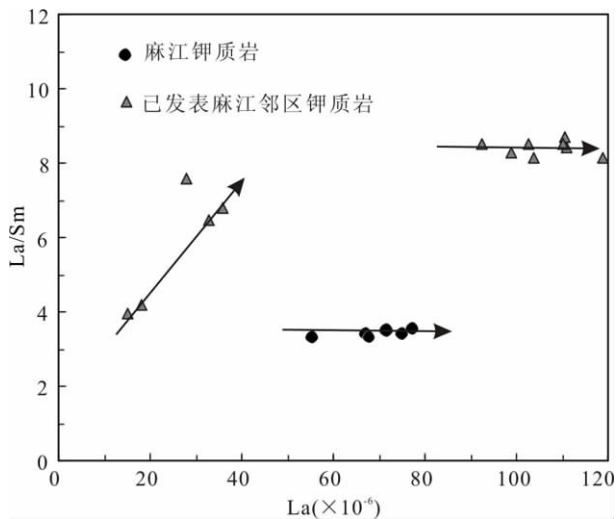


图 12 拉萨地块麻江钾质岩 La-La/Sm 图解

Fig. 12 La vs. La/Sm diagram for volcanic rocks in Maqiang area

比麻江钾质岩有着更高的 Th 含量以及高的 Th/La, 可能说明研究区钾质岩的物质源区有着更多的壳源物质, 或是由岩浆分离结晶程度高的原因所致。

## 6.2 拉萨地块钾质岩的时间分布

已有研究表明, 在中新世拉萨地块产出有大量的后碰撞钾质-超钾质岩, 这些钾质-超钾质岩大多沿着南北向地堑分布(图 1、表 4), 不仅沿着主要的地堑两侧分布, 同时也沿着小型的南北向正断层分布。最西侧狮泉河地区、雄巴、邦巴等地区的钾质-超钾质岩形成于 25 ~ 16Ma (Miller *et al.*, 1999); 亚热地堑中赛利普钾质-超钾质火山岩形成于 17Ma (王保弟等, 2008; 孙晨光等, 2008); 扎布耶茶卡东侧分布的布嘎寺钾质-超钾质火山岩则主要形成于 16Ma (Nomade *et al.*, 2004; 陈建林等, 2006; Zhao *et al.*, 2009); 塔口拉-隆格尔地堑中麦嘎超钾质岩形成于 17 ~ 16Ma (丁林等, 2006); 当惹雍错-许如错地堑分布的后碰撞钾质-超钾质岩主要分布在米巴勒、仪仟、查孜、文部、孔隆乡、当惹雍错、许如错等地, 形成于 23 ~ 12Ma, 高峰期在 14 ~ 12Ma (Ding *et al.*, 2003; 丁林等, 2006; 陈建林等, 2007; 赵志丹等, 2006; Gao *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2009); 由此前人研究认为钾质岩浆作用时代具有由西向东逐渐变年轻的特点(丁林等, 2006; 周肃等, 2004; 侯增谦等, 2006; 赵志丹等, 2006, 2008; 陈建林等, 2007)。本次工作运用精确的 Ar-Ar 定年获得位于拉萨地块中部麻江钾质岩的形成时代为  $21.3 \pm 0.3$  Ma, 这个时代与狮泉河、邦巴、雄巴等地区中新世早期的火山岩时代是一致的, 由此看来拉萨地块后碰撞岩浆作用是同时进行的, 而不是由西向东逐渐喷发。麻江钾质火山岩虽然出露面积很小, 但这一新发现, 可能会使人们重新认识青藏高原南部拉萨地块后碰撞钾质岩浆作用演化的时间分布特征。

## 6.3 地球动力学作用过程

麻江地区 ~ 21.3 Ma 钾质火山岩的识别, 不仅丰富了拉萨地块钾质岩的空间分布, 填补了羊八井南北向地堑中新世早期钾质岩研究的空白, 而且为人们提供了一个羊八井钾质火山岩的研究窗口, 有可能把探讨青藏高原隆升机制和大陆动力学模式引向更深层次。

当前对于青藏高原的抬升和动力学演化机制以及高原上广泛分布的新生代火山岩的解释有着很多的模式, 其中主要的有陆内俯冲模式 (Tapponnier *et al.*, 2001; 丁林等, 1999; Ding *et al.*, 2003, 2007)、地幔对流减薄模式 (Chung *et al.*, 2005; Turner *et al.*, 1996; Williams *et al.*, 2001)、板片断离模式 (Miller *et al.*, 1999; Williams *et al.*, 2004)、俯冲板片前缘撕裂与分段俯冲模式 (侯增谦等, 2006) 以及岩石圈拆沉模式 (Zhao *et al.*, 2009; Chung *et al.*, 2009)。麻江地区这些钾质岩 REE 配分型式 (图 9) 以及微量元素原始地幔蛛网特征 (图 10) 与麻江一带报道的高钾钙碱性熔岩 (Coulon *et al.*, 1986)、邻区羊应乡 (周肃等, 2004) 以及羊八井北侧 (魏瑞华等, 2008) 的钾质火山岩明显不同, 也反映出它们具有不同的岩浆源区, 其岩浆可能源于与古俯冲相联系的富集地幔源区。

青藏高原拉萨地块目前发现报道的后碰撞钾质-超钾质岩石大都位于南北向地堑中, 其产出与南北向地堑有密切的联系, 地堑被认为是大陆碰撞之后地壳加厚、高原大规模隆升并达到相当高度之后发生重力垮塌进而出现东西向伸展构造的主要标志 (Molnar and Tapponnier, 1978), 或者代表了岩石圈地幔减薄之后快速隆升的结果 (England and Houseman, 1989)。本文获得的麻江钾质火山岩年龄 (21.3 Ma) 与拉萨地块地堑伸展的时间 (23 ~ 13 Ma) (丁林等, 2006) 是一致的, 因此, 本文更倾向于认为麻江钾质火山岩的形成与高原地堑系统的形成演化密切相关。

青藏高原东南部高黎贡带 42 ~ 40 Ma 基性岩脉 (蓝江波等, 2007)、拉萨地块达孜-甲马地区 ~ 42 ~ 38 Ma 苦橄质-高 MgO 玄武岩质基性次火山岩 (Gao *et al.*, 2008) 与林周地区 ~ 53 Ma 的钾玄质基性岩脉 (岳雅慧和丁林, 2006) 三者均代表了软流圈上涌熔融的直接产物, 软流圈上涌是俯冲的印度板块在板片断离过程中通过“板片窗”发生的, 由此我们认为特提斯洋壳的板片断离大约发生在 ~ 53 ~ 40 Ma。随着印度板块继续向北俯冲消减, 印度大陆北部边缘的喜马拉雅地块开始俯冲到青藏高原南部的拉萨地块之下, 由于重力作用, 可能导致俯冲消减的印度岩石圈地幔以及拉萨岩石圈地幔发生拆沉, 致使软流圈热流沿着板片窗上涌, 地热梯度增高, 深部软流圈物质的上涌、底侵和侧向迁移以及因此使地壳快速隆升和加厚而引起重力不稳, 从而产生重力流等因素使拉萨地块在中新世发生区域性的东西向伸展活动, 导致在 23 ~ 13 Ma 左右形成南北向地堑; 软流圈的上升因其所携带大量的热以及南北向地堑的切割深度可能到达岩石圈地幔深部

而发生减压作用,导致与古俯冲作用相联系的富集地幔源区发生部分熔融并经历一定程度的分离结晶作用,从而形成钾质岩浆。这些钾质岩浆沿着快速扩张的地堑喷发形成钾质火山岩。

## 7 结论

(1) 拉萨地块麻江地区识别出一套钾质岩,其金云母单矿物 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $21.3 \pm 0.3\text{Ma}$ 。这套火山岩具有高镁(3%)和高钾( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 2$ )的超钾质岩的成分特征,但其高MgO含量是岩石中含有后期蚀变矿物白云石所致,因此它们是具有“超钾质岩”成分特征的钾质岩;它们可能源于与古俯冲相联系的富集地幔源区。

(2) 麻江~21Ma钾质岩的识别可能使人们重新认识有关青藏高原南部拉萨地块后碰撞钾质岩浆作用从西向东迁移规律的认识,指示拉萨地块后碰撞岩浆活动可能近同时发生。

(3) 麻江钾质岩的形成以及拉萨地块南北向地堑系统的形成演化可能与中新世早期北向俯冲的印度岩石圈断离有关。

致谢 朱弟成教授等在审稿中提出了许多宝贵的建设性的意见和建议,在此表示衷心的感谢!

## References

Bureau of Geology and Minerals Resources of Tibet. 1993. Regional Geology of Tibet. Beijing: Geological publishing House, 235 - 238 (in Chinese)

Chen JL, Xu JF, Kang ZQ and Wang BD. 2006. Origin of the Miocene Bugasi Group volcanic rocks in the Cuoqin County, western Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 585 - 594 (in Chinese with English abstract)

Chen JL, Xu JF, Kang ZQ and Wang BD. 2007. Geochemistry and origin of Miocene volcanic rocks in Caze area, southwestern Qinghai-Xizang Plateau. *Geochimica*, 36(5): 437 - 447 (in Chinese with English abstract)

Chen JL, Xu JF, Kang ZQ and Wang BD. 2008. Geochemical comparison of the Cenozoic high-MgO-potassic volcanic rocks between northern and southern of Tibetan Plateau: Difference of the both mantle sources. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 211 - 224 (in Chinese with English abstract)

Chen JL, Xu JF, Wang BD, Kang ZQ and Li J. 2010. Origin of Cenozoic alkaline potassic volcanic rocks at Konglongxiang, Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Products of partial melting of a mafic lower-crustal source? *Chemical Geology*, 273: 286 - 299

Chen JL, Xu JF, Wang BD and Kang ZQ. 2010. The relationship between the NS-trending grabens and the ultrapotassic volcanic rocks in Lhasa block, Qinghai-Tibetan plateau. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 29(4): 341 - 354 (in Chinese with English abstract)

Chung SL, Chu MF, Zhang Y, Xie Y, Lo CH, Lee TY, Lan CY, Li X, Zhang Q and Wang Y. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth Science Reviews*, 68(3-4): 173 - 196

Chung SL, Chu MF, Ji Q, Suzanne YO, Pearson NJ, Liu DY, Lee TY and Lo CH. 2009. The nature and timing of crustal thickening in Southern Tibet: Geochemical and zircon Hf isotopic constraints from postcollisional adakites. *Tectonophysics*, 477: 36 - 48

Coulon C, Maluski H, Bollinger C and Wang S. 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(3-4): 281 - 302

Ding L, Zhang JJ, Zhou Y, Deng WM, Xu RH and Zhong DL. 1999. Tectonic implication on the lithosphere evolution of the Tibetan Plateau: Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in Northern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 408 - 421 (in Chinese with English abstract)

Ding L, Kapp P, Zhong D and Deng W. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 44(10): 1833 - 1865

Ding L, Yue YH, Cai FL, Xu XX, Zhang QH and Lai QZ. 2006.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology, geochemical and Sr-Nd-O isotopic characteristics of the high-Mg ultrapotassic rocks in Lhasa block of Tibet: Implications in the onset time and depth of NS-striking rift system. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 252 - 1261 (in Chinese with English abstract)

Ding L, Kapp P, Yue YH and Lai QZ. 2007. Postcollisional calc-alkaline lavas and xenoliths from the southern Qiangtang terrane, Central Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(1-2): 28 - 38

England P and Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research*, 94(B12): 17561 - 17579

Foley SF, Venturelli G, Green DH and Toscani L. 1987. The ultrapotassic rocks: Characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models. *Earth Science Reviews*, 24: 81 - 134

Gao Y, Hou Z, Kamber BS, Wei R, Meng X and Zhao R. 2007. Adakite-like porphyries from the southern Tibetan continental collision zones: Evidence for slab melt metasomatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153(1): 105 - 120

Gao Y, Wei R, Hou Z, Tian S and Zhao R. 2008. Eocene high-MgO volcanism in southern Tibet: New constraints for mantle source characteristics and deep processes. *Lithos*, 105(1-2): 63 - 72

Guo Z, Wilson M and Liu J. 2007. Post-collisional adakites in south Tibet: Products of partial melting of subduction-modified lower crust. *Lithos*, 96(1-2): 205 - 224

Hofmann AW, Jochum KP, Seufert M and White WM. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79: 33 - 45

Hou ZQ, Zhao ZD, Gao YF, Yang ZM and Jiang W. 2006. Tearing and dischronal subduction of the Indian continental slab: Evidence from Cenozoic Gangdese volcano-magmatic rocks in south Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 761 - 774 (in Chinese with English abstract)

Jiang YS, Zhou YY, Wang MG, Xie YX, Li JB and Peng B. 2003. Characteristics and geological significance of Quaternary volcanic rocks in the central segment of the Gangdise area. *Geological Bulletin of China*, 22(1): 16 - 20 (in Chinese with English abstract)

Johannes A. 1939. A Descriptive Petrography of Igneous Rocks (Vol. 4). 2<sup>nd</sup> Edition. Chicago: University of Chicago Press, 523

Johnson MC and Plank T. 1999. Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1: 1 - 29

Lan JB, Xu YG, Yang QJ and Huang XL. 2007. ~40Ma OIB-type mafic magmatism in the Gaoligong belt: Results of break-off between subducting Tethyan slab and Indian plate? *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1334 - 1346 (in Chinese with English abstract)

- Liao SP, Chen ZH, Luo XC and Zou AJ. 2002. Discovery of leucite phonolite in the Tangra Yumco area, Tibet and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 735 – 73 (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*, (6): 552 – 558 (in Chinese with English abstract)
- Ma RZ, Liu DZ, Tao XF, Shi H and Hu XW. 2002. Discovery of Tertiary potassium-rich magmatic rocks in the Coqen area. *Tibet Geological Bulletin of China*, 21(11): 728 – 731 (in Chinese with English abstract)
- Ma RZ, Liu DZ, Tao XF, Hu XW and Zhao B. 2008. Discovery of Quaternary potassic volcanic rocks and the establishment of Sailipu Formation in West Gangdes of Tibet, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 35(1): 87 – 92 (in Chinese with English abstract)
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, Frank W and Purtscheller F. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40(9): 1399 – 1424
- Molnar P and Tapponnier P. 1978. Active tectonics of Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 83(B11): 5361 – 5376
- Nelson DR. 1992. Isotopic characteristics of potassic rocks: Evidence for the involvement of subducted sediments in magma genesis. *Lithos*, 28: 403 – 420
- Nomade S, Renne PR, Mo X, Zhao Z and Zhou S. 2004. Miocene volcanism in the Lhasa block, Tibet: Spatial trends and geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1–4): 227 – 243
- Qiu HN. 2006. Construction and development of new Ar-Ar laboratories in China: Insight from GV-5400 Ar-Ar laboratory in Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. *Geochimica*, 35(2) 133 – 140 (in Chinese with English abstract)
- Rudnick RL and Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Rev. Geophysics*, 33(3): 267 – 309
- Sun CG, Zhao ZD, Mo XX, Zhu DC, Dong GC, Zhou S, Dong X and Xie GG. 2007. Geochemistry and origin of the Miocene Sailipu ultrapotassic rocks in western Lhasa block, Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2715 – 2726 (in Chinese with English abstract)
- Sun CG, Zhao ZD, Mo XX, Zhu DC, Dong GC, Zhou S, Chen HH, Xie LW, Yang YH, Sun JF and Yu F. 2008. Enriched mantle source and petrogenesis of Sailipu ultrapotassic rocks in southwestern Tibetan Plateau: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 249 – 264 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345
- Tapponnier P, Xu ZQ, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G and Yang JS. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671 – 1677
- Turner S, Arnaud N, Liu J, Rogers N, Hawkesworth C, Harris N, Kelley S, Van Calsteren P and Deng W. 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37(1): 45 – 71
- Wang BD, Xu JF, Zhang XG, Chen JL, Kang ZQ and Dong YH. 2008. Petrogenesis of Miocene volcanic rocks in the Sailipu area, western Tibetan Plateau: Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 265 – 278 (in Chinese with English abstract)
- Wei RH, Gao YF, Hou ZQ, Meng XJ and Yang ZS. 2008. The Eocene potassic volcanism in the Gangdese: Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic evidences for recycling of subducted sediments. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 359 – 367 (in Chinese with English Abstract)
- Williams HM, Turner SP, Kelley SP and Harris NBW. 2001. Age and composition of dikes in southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism. *Geology*, 29(4): 339 – 342
- Williams HM, Turner SP, Pearce JA, Kelley SP and Harris NBW. 2004. Nature of the source regions for post-collisional, potassic magmatism in southern and northern Tibet from geochemical variations and inverse trace element modeling. *Journal of Petrology*, 45(3): 555 – 607
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu. Rev. Earth and Planetary Science Letters*, 28: 211 – 280
- Yue YH and Ding L. 2006.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology, geochemical characteristics and genesis of the Linzhou basic dikes, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 855 – 866 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZD, Mo XX, Nomade S, Renne PR, Zhou S, Dong GC, Wang LL, Zhu DC and Liao ZL. 2006. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa block, Tibetan Plateau: Spatial and temporal distribution and its' implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 787 – 794 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZD, Mo XX, Sun CG, Zhu DC, Niu YL, Dong GC, Zhou S, Dong X and Liu YS. 2008. Mantle xenoliths in southern Tibet: Geochemistry and constraints for the nature of the mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 193 – 202 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZD, Mo XX, Dilek Y, Niu YL, DePaolo DJ, Robinson P, Zhu DC, Sun CG, Dong GC, Zhou S, Luo ZH and Hou ZQ. 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet. *Lithos*, 113(1–2): 190 – 212
- Zhou S, Mo XX, Zhao ZD, Qiu RZ, Zhang SQ and Guo TY. 2004.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of post-collisional volcanic rocks from the Yangying area in southern Tibet, and its geological implications. *Progress in Natural Science*, 14(12): 1411 – 1418 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 陈建林, 许继峰, 康志强, 王保弟. 2006. 青藏高原西部措勤县中新世布嘎寺组钾质火山岩成因. *岩石学报*, 22(3): 585 – 594
- 陈建林, 许继峰, 康志强, 王保弟. 2007. 青藏高原西南部查孜地区中新世钾质火山岩地球化学及其成因. *地球化学*, 36(5): 437 – 447
- 陈建林, 许继峰, 康志强, 王保弟. 2008. 青藏高原南部与北部新生代高镁钾质岩地球化学对比: 南北地幔源区差异. *岩石学报*, 24(2): 211 – 224
- 陈建林, 许继峰, 王保弟, 康志强. 2010. 青藏高原拉萨地块新生代超钾质岩与南北向地堑成因关系. *岩石矿物学杂志*, 29(4): 341 – 354
- 丁林, 张进江, 周勇, 邓万明, 许荣华, 钟大赉. 1999. 青藏高原岩石圈演化的记录: 藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化

- 学特征. 岩石学报, 15(3): 408-421
- 丁林, 岳雅慧, 蔡福龙, 徐晓霞, 张清海, 来庆洲. 2006. 西藏拉萨地块高镁超钾质火山岩及对南北向地堑形成时间和切割深度的制约. 地质学报, 80(9): 1252-1261
- 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 杨志明, 江万. 2006. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲: 来自冈底斯新生代火山-岩浆作用证据. 岩石学报, 22(4): 761-774
- 江元生, 周幼云, 王明光, 谢云喜, 李建兵, 彭波. 2003. 西藏冈底斯山中段第四纪火山岩特征及地质意义. 地质通报, 22(1): 16-20
- 蓝江波, 徐义刚, 杨启军, 黄小龙. 2007. 滇西高黎贡带~40Ma OIB型基性岩浆活动: 消减特提斯洋片与印度板块断离的产物? 岩石学报, 23(6): 1334-1346
- 廖思平, 陈振华, 罗小川, 邹爱建. 2002. 西藏当惹雍错地区白榴石响岩的发现及地质意义. 地质通报, 21(11): 735-738
- 刘颖, 刘海臣. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552-558
- 马润则, 刘登忠, 陶晓等. 2002. 西藏措勤地区发现第三纪富钾岩浆岩. 地质通报, 21(11): 728-731
- 马润则, 刘登忠, 赵兵. 2008. 冈底斯西段第四纪钾质火山岩的发现及赛利普组的建立. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(1): 87-92
- 邱华宁. 2006. 新一代 Ar-Ar 实验室建设与发展趋势: 以中国科学院广州地球化学研究所 Ar-Ar 实验室为例. 地球化学, 35(2): 133-140
- 孙晨光, 赵志丹, 莫宣学, 朱弟成, 董国臣, 周肃, 董昕, 谢国刚. 2007. 青藏高原拉萨地块西部中新世赛利普超钾质岩石的地球化学与岩石成因. 岩石学报, 23(11): 2715-2726
- 孙晨光, 赵志丹, 莫宣学, 朱弟成, 董国臣, 周肃, 陈海红, 谢烈文, 杨岳衡, 孙金凤, 于枫. 2008. 青藏高原西南部赛利普超钾质火山岩富集地幔源区和岩石成因: 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约. 岩石学报, 24(2): 249-264
- 王保弟, 许继峰, 张兴国, 陈建林, 康志强, 董彦辉. 2008. 青藏高原西部赛利普中新世火山岩源区: 地球化学及 Sr-Nd 同位素制约. 岩石学报, 24(2): 265-278
- 魏瑞华, 高永丰, 侯增谦, 孟祥金, 杨竹森. 2008. 冈底斯新近纪钾质火山作用: 消减沉积物折返的地球化学与 Sr-Nd-Pb 同位素证据. 岩石学报, 24(2): 359-367
- 西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质出版社
- 岳雅慧, 丁林. 2006. 西藏林周基性岩脉的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年代学、地球化学及其成因. 岩石学报, 22(4): 855-866
- 赵志丹, 莫宣学, Nomade S, Renne PR, 周肃, 董国臣, 王亮亮, 朱弟成, 廖忠礼. 2006. 青藏高原拉萨地块后碰撞超钾质岩石的时空分布及其意义. 岩石学报, 22(4): 787-794
- 赵志丹, 莫宣学, 孙晨光, 朱弟成, 牛耀龄, 董国臣, 周肃, 董昕, 刘勇胜. 2008. 青藏高原南部地幔包体的发现及其意义. 岩石学报, 24(2): 193-202
- 周肃, 莫宣学, 赵志丹, 邱瑞照, 张双全, 郭铁鹰. 2004. 西藏南部羊应乡后碰撞火山岩<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄及其地质意义. 自然科学进展, 14(12): 1411-1418