

青藏高原高 $Mg^\#$ 和低 $Mg^\#$ 两类钾质-超钾质火山岩及其源区性质*

迟效国¹ 董春艳¹ 刘建峰¹ 金巍¹ 李才¹ 刘森² 黎广荣¹

CHI XiaoGuo¹, DONG ChunYan¹, LIU JianFeng¹, JIN Wei¹, LI Cai¹, LIU Sen² and LI GuangRong¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 中国科学院贵阳地球化学研究所, 贵阳 550002

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2005-12-01 收稿, 2006-02-20 改回.

Chi XG, Dong CY, Liu JF, Jin W, Li C, Liu S and Li GR. 2006. High $Mg^\#$ and Low $Mg^\#$ potassic-ultrapotassic volcanic rocks and their source nature on the Tibetan plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3):595–602

Abstract Based on comparative analysis between post-collision potassic-ultrapotassic volcanic rocks on the Tibetan plateau, it was thought that there existed two pieces of high $Mg^\#$ potassic-ultrapotassic volcanic rock belts in Qiangtang-Mangkang-Dianxi (44 ~ 28Ma) and Gangdise (25 ~ 12Ma) districts respectively on the Tibetan plateau, and the Cenozoic volcanic rock belts in Hoh Xil, western and eastern Kunlun belonged to low $Mg^\#$ potassic volcanic rocks. The geochemical composition of high $Mg^\#$ potassic-ultrapotassic volcanic rocks are characterized by high Mg, low Fe and depleted Ti, and the composition of their rare elements are similar to that of island arc volcanic rocks which are characterized by the typical ratios of K/Nb, K/La, Rb/Nb, Pb/La and Ba/La, etc. And low $Mg^\#$ potassic-ultrapotassic volcanic rocks are characterized by relatively high Fe, low Mg and high Ti. The ratios of above elements are less than that of island arc volcanic rocks, larger than or similar to that of OIB, which indicates that asthenospheric fluid contributed to the enriched components in magmatic source. The high $Mg^\#$ calc-alkaline and high $Mg^\#$ shoshonitic series in Qiangtang-Mangkang area indicate some intracontinental subduction happened ever in the middle part of the plateau, then the subducted slab broke off and asthenosphere was upwelled 30Ma ago, while the lithospheric mantle was melt to form low $Mg^\#$ peralkaline potassic, ultrapotassic series. During the intensely wedging of Indian continental lithosphere since Miocene, asthenospheric substance under the plateau extruded northeastward and southeastward along the uppermost part of the subducted slab in Eurasia lithospheric mantle based on geophysical data. It made the overlying lithospheric mantle cracked and formed a series of beaded high-speed bodies and low-speed bodies which distributed alternately and extended northward time-dependent. This is also a deep power supply to cause the strike-slip faults of Altun Tagh and Dianxi. The interaction between asthenosphere and lithosphere formed Crust-Mantle-mixing characteristics which are composed of low $Mg^\#$ potassic volcanic rocks in Hoh Xil and western-eastern Kunlun, while the remarkable Crust-Mantle-mixing characteristics of ultrapotassic magma source in the south part of the Tibetan Plateau must result from the subduction of Indian continental lithosphere.

Key words high $Mg^\#$ potassic-ultrapotassic volcanic rocks, Magmatic sources, Geochemistry, Tibetan plateau

摘要 通过对青藏高原碰撞后钾质-超钾质火山岩的对比分析,提出青藏高原存在羌塘-芒康-滇西(44 ~ 28Ma)和冈底斯(25 ~ 12Ma)两条高 $Mg^\#$ 钾质-超钾质火山岩带,而可可西里-西昆仑-东昆仑的新生代火山岩则为低 $Mg^\#$ 钾质火山岩。高 $Mg^\#$ 钾质-超钾质火山岩的化学成分均相对高镁低铁和贫钛,微量元素组成以具有类似岛弧火山岩的 K/Nb、K/La、Rb/Nb、Pb/La、Ba/La 等比值为特征。低 $Mg^\#$ 钾质-超钾质火山岩相对富铁贫镁和高钛,上述元素比值小于岛弧火山岩,大于和近似于洋岛玄武岩,指示岩浆源区富集组分有软流圈流体的贡献。羌塘-芒康的高 $Mg^\#$ 高钾钙碱性和高 $Mg^\#$ 钾玄岩系列指示高原中部受到陆内俯冲作用的影响;30Ma 前俯冲板片断离,软流圈上涌,富集岩石圈地幔熔融形成羌塘低 $Mg^\#$ 过碱性钾质-超钾质系列。综

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号:2002CB412603)和国家自然科学基金(编号:40572034)、吉林大学985科技平台和吉林大学创新基金资助。

第一作者简介:迟效国,男,1956年生,博士,教授,主要从事岩石学和岩石地球化学研究工作, E-mail:chixg@jlu.edu.cn

合地球物理资料,提出青藏高原在印度大陆岩石圈的强力楔入下,高原内部软流圈物质沿欧亚岩石圈地幔俯冲板片的顶部向北东和南东挤出,使上覆岩石圈地幔发生剪切破裂,形成一系列串珠状高速体与低速体的相间分布,并随时间不断向北扩展。这也是阿尔金和滇西走滑系的深部动力源。正是软流圈与岩石圈的这种相互作用形成了可可西里和西昆仑-东昆仑低 $Mg^{\#}$ 钾玄质火山岩的软流圈-岩石圈地幔的混源特征。藏南高 $Mg^{\#}$ 超钾质岩浆源区的显著幔壳混合特征则可能来自印度大陆岩石圈俯冲作用的影响。

关键词 高 $Mg^{\#}$ 钾质-超钾质火山岩; 岩浆源区; 地球化学; 青藏高原

中图法分类号 PS88.14

1 引言

青藏高原伴随地壳缩短、增厚和隆升,先后形成了冈底斯、羌塘-芒康-滇西、中昆仑-可可西里、西昆仑-东昆仑四条碰撞后钾质-超钾质火山岩带(刘嘉麒,1999;迟效国等,1999;赖绍聪,2000)。它们是大陆碰撞造山带岩石圈构造演化的重要标志。有关青藏高原碰撞后钾质-超钾质火山岩的成因认识可概括为陆内俯冲、岩石圈拆沉和加厚陆壳熔融三类模式,就岩浆源区性质而言,三类成因模式的地球化学特征,至今缺少统一的判别标志。青藏高原碰撞后钾质-超钾质火山岩出现的高 $Mg^{\#}$ 和低 $Mg^{\#}$ 两种不同的地球化学特征对钾质-超钾质火山岩的成因机制及岩石圈的构造演化提供了重要的地球化学约束。

2 碰撞后高 $Mg^{\#}$ 和低 $Mg^{\#}$ 钾质-超钾质火山岩系的时空分布

藏南新生代高 $Mg^{\#}$ 超钾质和钾质火山活动始于冈底斯西段狮泉河-噶尔地区,时代为 25~23Ma,18Ma 前火山活动被高钾钙碱性系列(英安岩-流纹岩组合)所取代(Miller *et al.*,1999)。近年来随着地质大调查项目的进展,在冈底斯中部相继发现了一系列超钾质和白榴石响岩质火山岩,K-Ar 年龄变化于 20~12Ma(马润则等,2002;廖思平等,2002;江元生等,2003),除岩石系列演化晚期的中酸性岩石外,其化学成分总体以具有高 $Mg^{\#}$ 值为特征。在高 $Mg^{\#}$ 超钾质火山活动的同时或稍晚,区域上伴有 16~10Ma 的高钾钙碱性或钾玄岩系列中酸性火山活动,岩石化学成分变化较大,从高 $Mg^{\#}$ 到低 $Mg^{\#}$ 都有出现(Coulon *et al.*,1986;赵志丹等,2002;侯增谦等,2003)。

藏北新生代火山活动以西羌塘通天桥、邦达错和改则北拉嘎拉碱性玄武岩系列活动开始,K-Ar 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄为 60~44.0Ma(邓万明,1998;丁林等,1999)。北羌塘多格错仁一枕头崖一带于 44.66~32Ma 出现了大量高 $Mg^{\#}$ 安粗岩和低 $Mg^{\#}$ 中酸性火山岩组合,其化学特征属高钾钙碱性系列和钾玄岩系列(迟效国,1999;赖绍聪等,2000;Lai *et al.*,2003)。该期火山活动随时间不断向东南方向扩展,在横断山脉自北向南断续分布有玉树、芒康、玉龙高 $Mg^{\#}$ 钾玄岩系列火山岩,年龄主要为 40~33Ma(侯增谦等,2003;张会化

等,2004)。滇西地区则分布有时代为 40~28Ma 的高 $Mg^{\#}$ 超钾质煌斑岩(王江海等,1999;李献华等,2002),它们与北羌塘火山岩一起构成一条古近纪的巨型高 $Mg^{\#}$ 钾质-超钾质火山岩带。羌塘地区高 $Mg^{\#}$ 高钾钙碱性系列和钾玄岩系列火山活动在 30~24Ma 被鱼鳞山、火车头山碱性钾质-超钾质火山活动所取代。

中新世可可西里火山岩带大致以金沙江断裂带为界,断裂以南仅在枕头崖一带有少量分布。岩石组合以玄武安粗岩、安粗岩和粗面岩类为主,伴有少量石英粗面岩和英安质及流纹质火山岩,地球化学性质总体属钾玄岩系列。岩石主体以相对低 $Mg^{\#}$ 、高 Ti、P 和 K 与羌塘高 $Mg^{\#}$ 高钾钙碱性系列岩石相区别。在可可西里湖南和饮马湖分别有碱性钾质橄榄白榴岩和玻基白榴岩出现。在目前积累的火山岩同位素年龄中,可可西里火山岩区的 K-Ar 年龄主要变化于 19~7Ma, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄变化于 16.5~8.4Ma(邓万明,1998;刘嘉麒,1999;Wang *et al.*,2005)。沿金沙江断裂带向东,在甘肃礼县一带分布有近同时期的超基性钾质次火山岩,年龄为 22~23Ma(喻学惠等,2005)。

从约 5Ma 到第四纪,火山活动进一步向北和向西迁移,主要分布在西昆仑康西瓦、大红柳滩、泉水沟、普鲁、阿什库勒、阿塔木帕下、黑石北湖等地,东部仅在东昆仑的木孜塔格和雄鹰台-鲸鱼湖一带有少量分布。在高原东南部有腾冲钙碱性火山岩喷发。青藏高原北部的岩石组合除木孜塔格为流纹岩、流纹质凝灰岩(4.6~4.0Ma)外,其它岩区多以粗面玄武岩、钾玄岩和安粗岩类为主,少量为碱玄岩、粗面岩和流纹岩类岩石(邓万明,1998;杨经绥等,2002)。

3 高 $Mg^{\#}$ 和低 $Mg^{\#}$ 钾质-超钾质火山岩系的地球化学特征

青藏高原新生代高 $Mg^{\#}$ 钾质-超钾质火山岩以中、基性岩石具有高 $Mg^{\#}$ 值 [$Mg^{\#} = 100 \times Mg / (Mg + \text{TFe}^{+2})$] 为特征。在 SiO_2 - $Mg^{\#}$ 值变异图中(图2),青藏高原新生代钾质-超钾质火山岩具有如下三种的变异趋势。① 幔源岩浆分离结晶趋势:由羌塘 30~24Ma 的碱性钾质-超钾质系列构成,岩石的 $Mg^{\#}$ 值随 SiO_2 增高迅速降低,60~44Ma 的碱性玄武岩系列也具有此特征。② 高 $Mg^{\#}$ 变异趋势:藏北多格错仁、燕子湖和枕头崖等地区的高钾钙碱性系列和浩波湖、波涛湖、玉带山地区的钾玄岩系列均显示为高 $Mg^{\#}$ 变异趋势(图1a)。

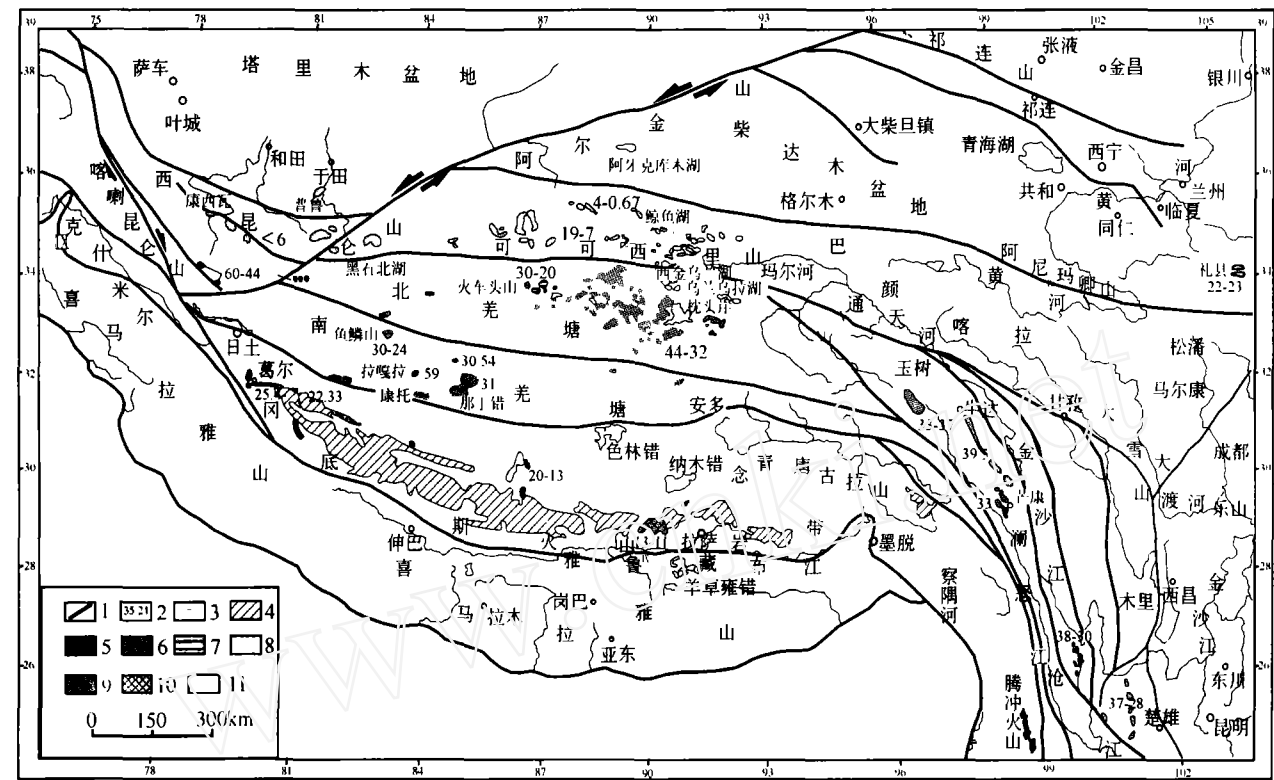


图1 青藏高原新生代火山岩分布图(据朱第成等,2002 编绘)
1-断裂;2-同位素年龄和变化范围;3-湖泊;4-林子宗群钙碱性系列;5-羌塘碱性玄武岩系列;6-羌塘-芒康-滇西高 $Mg^\#$ 钾质-超钾质系列;7-羌塘鱼鳞山和火车头山低 $Mg^\#$ 钾质-超钾质系列;8-可可西里、枕头崖和西昆仑-东昆仑低 $Mg^\#$ 钾玄岩系列;9-冈底斯高 $Mg^\#$ 钾质-超钾质系列;10-冈底斯高 $Mg^\#$ 高钾钙碱性系列;11-河流

Fig. 1 Distribution of Cenozoic volcanic rocks in northern Qinghai-Tibet plateau (modified after Zhu *et al.* , 2002)

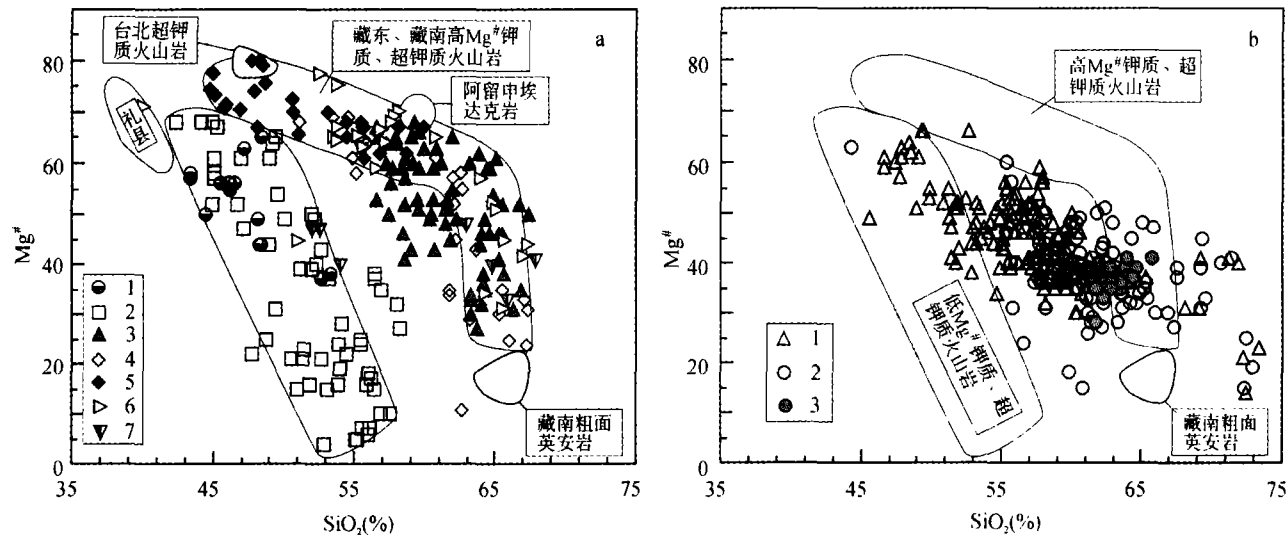


图2 青藏高原新生代火山岩 SiO_2 - $Mg^\#$ 图解
图 a 中 1-羌塘碱性钠质玄武岩系列;2-羌塘碱性钾质-超钾质系列;3-羌塘高钾钙碱性系列;4-羌塘-芒康钾玄岩系列;5-藏东超钾质煌斑岩;6-冈底斯中、西段超钾质火山岩;7-麻江地区中新世火山岩。图 b 中 1-西昆仑-东昆仑钾玄岩系列;2-可可西里钾玄岩系列;3-枕头崖中新世英安岩;(数据来源:邓万明,1998; Arnaud *et al.* , 1992; Turner *et al.* , 1996; 喻学惠等,1998; 丁林等,1999; Miller *et al.* , 1999; 谭富文等,2000; 赖绍聪等,2000; Lai *et al.* , 2003; 赵志丹等,2001; 王成善等,2001; 李献华等,2002; 廖思平等,2002; 江元生等,2003; 张会化等,2004; 迟效国等,2005; 台湾北部高镁超钾质火山岩据 Chung *et al.* , 2001; 阿留申岛弧火山岩据 Kay *et al.* , 1994)

Fig. 2 SiO_2 - $Mg^\#$ diagrams of Cenozoic volcanic rocks in northern Qinghai-Tibet plateau

其中安粗岩类岩石具有幔源岩浆的高 Cr、Ni、Co 等元素丰度 (Lai *et al.*, 2003; 迟效国等, 2005)。它们与横断山脉芒康、玉龙钾玄岩系列、滇西超钾质煌斑岩和藏南冈底斯中新世钾质-超钾质火山岩一起构成了青藏高原新生代高 Mg^* 钾质-超钾质火山岩的成分变化范围。阿留申高 Mg 埃达克岩和台北第四纪高 Mg 超钾质火山岩均落入上述高 Mg^* 火山岩的成分区内。③ 地壳 AFC 趋势: 可可西里、西昆仑-东昆仑钾玄岩系列的基性端元岩石的 Mg^* 值与羌塘 60~44Ma 的碱性玄武岩系列岩石相重叠, 并接近幔源原生岩浆的 Mg^* 值, 而中酸性端元岩石则与高 Mg^* 钾质火山岩的中酸性岩石相重合, 岩浆成分总体具有 Stern and Kilian (1996) 提出的幔源岩浆与地壳物质相互作用的 AFC 演化趋势 (图 2b)。锆石微区测年资料表明, 即使在具有典型岩浆分离结晶趋势的羌塘碱性钾质-超钾质火山岩中也含有大量元古宙的捕获锆石 (另文发表), 表明岩浆 AFC 或岩浆混合作用将更广泛的存在于②和③变异趋势中。

本文将具有高 Mg^* 变异趋势的藏北高钾钙碱性系列、钾玄岩系列和藏东、藏南分布的碱性钾质-超钾质火山岩统称为高 Mg^* 钾质-超钾质火山岩, 它们在 SiO_2 - Mg^* 值变异图中显示出相同的变化规律, 而将具有幔源岩浆分离结晶和 AFC 变异趋势的火山岩统称为低 Mg^* 钾质-超钾质火山岩。这里的高 Mg^* 和低 Mg^* 是指不同岩石系列在相同 SiO_2 含量情况下岩石 Mg^* 值的相对大小 (图 2), 而未采用固定的 Mg^* 值进行划分。不同岩石系列随着岩浆成分的变异, 岩石的 Mg^* 值具有趋同性, 高 Mg^* 高钾钙碱性和钾玄岩系列与低 Mg^* 钾玄岩系列岩浆演化晚期的中酸性火山岩 (Mg^* 值 < 40 成分区内) 在 SiO_2 - Mg^* 值判别图中投影点是重叠的, 对它们的分类归属需要借助微量元素的判别标志。

青藏高原高 Mg^* 钾质-超钾质火山岩的不相容元素比值和变化趋势明显不同于低 Mg^* 钾质-超钾质火山岩。前者以具有高 K/Nb、Rb/Nb、Pb/La、Th/Nb 低 La/Rb、Ba/Rb、La/Ba 等强不相容元素比值为特征。羌塘高 Mg^* 高钾钙碱性系列和高 Mg^* 钾玄岩系列的上述元素比值与羌塘早期碱性玄武岩系列和晚期枕头崖中新世英安岩有显著区别, 而与芒康-滇西钾质-超钾质岩石和藏南冈底斯高 Mg^* 钾质-超钾质火山岩相重合 (图 3)。尽管不同岩带高 Mg^* 钾质火山岩与超钾质火山岩碱性强度存在较大差别, 它们的 K/Nb、Rb/Ba、Pb/La、Ba/La 等比值也有不同的变化范围和重叠区间, 但都近于或大于岛弧火山岩的变化范围, 指示源区组成中存在大量的地壳组分。

羌塘鱼鳞山和火车头山低 Mg^* 碱性钾质-超钾质火山岩、枕头崖中新世英安岩和可可西里、西昆仑-东昆仑低 Mg^* 钾玄岩系列的上述元素比值都小于岛弧火山岩大于和近似于洋岛玄武岩。藏南乌郁盆地中新世粗面英安岩 (钾玄岩系列) 和麻江高钾钙碱性火山岩虽然不具有高 Mg^* 特征, 但不相容元素比值与高 Mg^* 火山岩十分相似, 显示以地壳组分为主。这些特征支持藏南低 Mg^* 长英质岩浆主要来源于深部地壳

的结论 (Miller *et al.*, 1999; 赵志丹等, 2002), 但高 Mg^* 长英质岩浆的高 Mg^* 特征难以用地壳起源来解释。除部分流纹质火山岩外, 青藏高原高 Mg^* 和低 Mg^* 钾质火山岩的地球化学差异并不随岩石基性程度的变化而改变, 显示高 Mg^* 和低 Mg^* 钾质-超钾质火山岩系的地球化学差异主要受母岩浆组成和源区性质所制约。

4 成因讨论

青藏高原高 Mg^* 和低 Mg^* 两类钾质-超钾质火山岩高度富集 P 和 K、Ba、LREE 等大离子元素, 这种地球化学属性表明岩浆源区存在广泛的流 (熔) 体交代作用。地幔流体按其地球化学性质和来源可分为两种端元类型, 一种是来自于俯冲板片脱水释放的流 (熔) 体, 它以富集 K、Rb、Ba、Th、La、Pb 等不相容元素和相对亏损 Ti、Nb、Ta 为特征。这种流 (熔) 体的地球化学性质随俯冲深度增大而趋于富钾, 总体类似于岛弧钙碱性火山岩和岛弧钾玄岩的微量元素组成特征。另一类流 (熔) 体来自于软流圈或地幔柱, 流 (熔) 体组成以 CO_2 为主, 它们与深部石榴石橄榄岩地幔呈平衡, 流 (熔) 体的地球化学性质类似于洋岛碱性玄武岩和钾镁煌斑岩的微量元素组成特征, 其最大特征是高度富集大离子元素, 但不存在 Nb、Ta、Ti 的相对亏损。因此, 不相容元素 K、Rb、Ba、Th、La、Pb 和高场强元素 Ti、Nb、Ta 的比值是示踪岛弧地幔内沉积物和俯冲板片流 (熔) 体混入的重要标志 (Kogiso, *et al.*, 1997)。由于古俯冲作用使次大陆岩石圈地幔具有俯冲地幔楔的地球化学属性, Sr、Nd、Pb 同位素比值也随时间的推移而不断增长, 这使 Sr、Nd、Pb 同位素和 Ti、Nb、Ta 亏损的标志不能有效的判别熔体是来自陆内俯冲或陆壳拆沉形成的混染地幔还是古俯冲作用形成的富集岩石圈地幔或是下地壳基性岩石的熔融, 这是青藏高原钾质-超钾质火山岩成因研究中面临的一个难题。

青藏高原高 Mg^* 和低 Mg^* 两类钾质-超钾质火山岩微量元素地球化学特征的系统差异为岩浆源区性质的判别提供了新的约束。岛弧钙碱性火山岩的微量元素组成与洋岛型碱性玄武岩相比, 除相对亏损 Nb、Ta、Ti 外, 熔体 LREE 的富集程度远小于 K、Rb、Ba、Th、Pb (图 3)。青藏高原高 Mg^* 钾质-超钾质火山岩具有与岛弧火山岩相似的高 Th/La、K/Nb、Ba/La、Pb/La、Rb/Zr 等比值和低 Ti 丰度, 指示源区受到板片流 (熔) 体的强烈混合作用。与此相反, 藏北低 Mg^* 钾质-超钾质火山岩的 K/Nb、Th/La、Ba/La、Pb/La、Rb/Zr 等大离子不相容元素比值则与洋岛型碱性玄武岩相近, 而显著小于岛弧钙碱性火山岩。这一示踪标志指示岩浆源区具有古俯冲地幔楔叠加软流圈流体的交代属性。

高 Mg^* 埃达克岩形成于消减洋壳起源的富硅熔体在通过上覆地幔楔时与地幔橄榄岩发生的混染作用已得到共识 (Stern *et al.*, 1996; Rapp *et al.*, 1999; 赵振华等, 2004)。实验表明石榴石角闪岩和榴辉岩脱水熔融生成的安山质熔体具

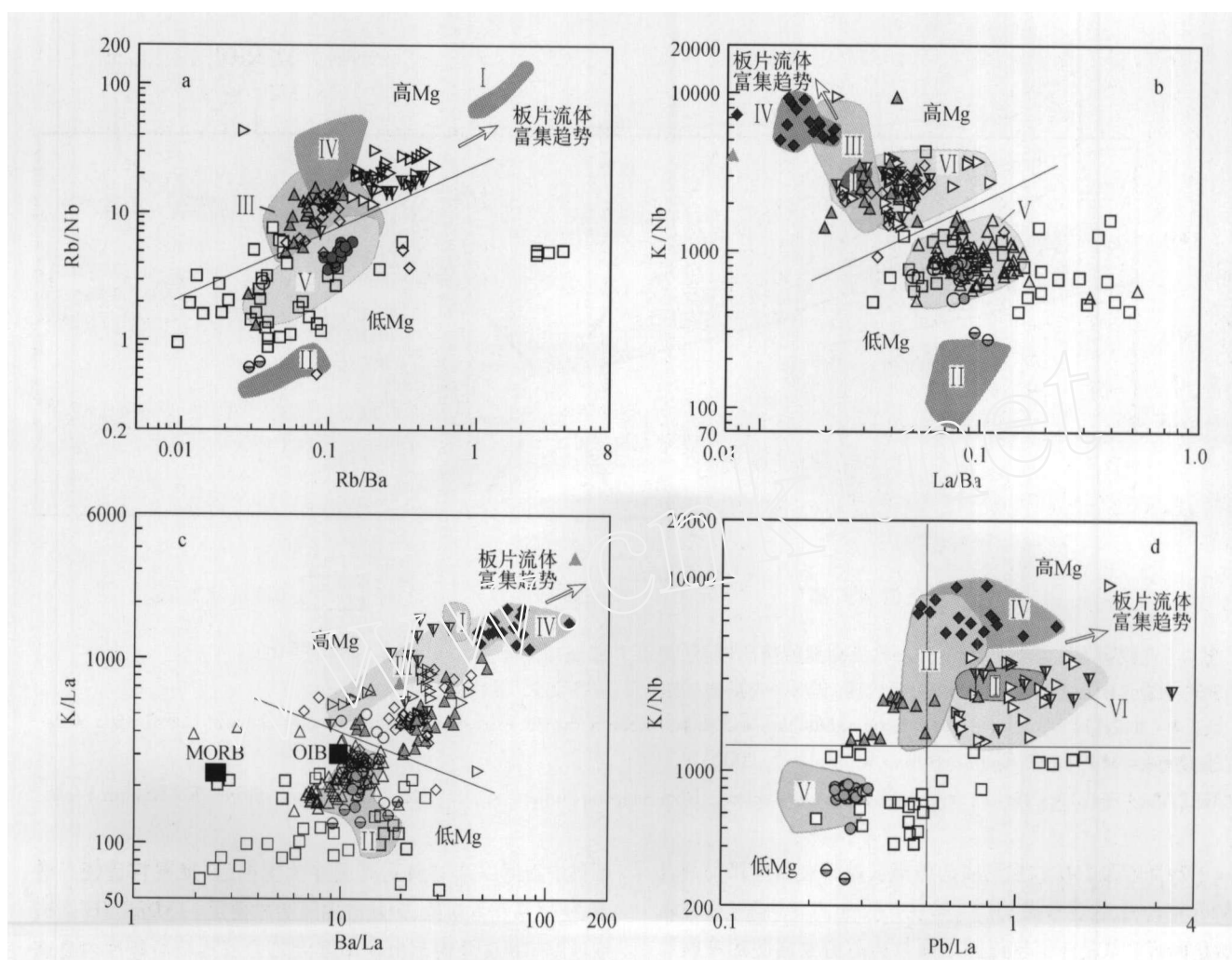


图3 青藏高原钾质-超钾质火山岩微量元素比值图解

灰色区：I-台湾北部第四纪高镁超钾质火山岩；II-甘肃礼县中新世钾质火山岩；III-阿留申岛弧火山岩；IV-藏东超钾质煌斑岩；V-西昆仑和可可西里中、基性火山岩；VI-冈底斯中新世火山岩；其它图示和数据来源同图2

Fig. 3 Trace elements ratio diagrams of potassic, ultra-potassic volcanic rocks in northern Qinghai-Tibet plateau

Gray fields: I-Quaternary High Mg^{*} ultrapotassic volcanic rock in northern Taiwan province; II-Miocene potassic volcanic rocks in Lixian area, Gansu province; III-Aleutian Islands volcanic rocks; IV-Ultra-potassic lamprophyre in eastern Qinghai-Tibet plateau; V-Basic and intermediate volcanic rocks in west Kunlun and Hol Xil areas; VI-Miocene volcanic rocks in Gangdise. Other legends and data source is the same as Fig. 2

有埃达克岩的富钠贫钾特征,但不具备高 Mg^{*}埃达克岩的高 Mg^{*}属性(Stern *et al.*, 1996)。由于富硅熔体与地幔橄榄岩的混染作用不可能发生在地壳内部,所以,羌塘-芒康的高 Mg^{*}高钾钙碱性系列和高 Mg^{*}钾玄岩系列相对高 Si、K、Mg、Cr、Ni 丰度和高 K/Nb、Th/La、Rb/Zr、Pb/La、Ba/La 等比值,指示原始岩浆的起源或与陆内俯冲作用有关或与陆壳拆沉熔融有关。但区域高 Mg^{*}钾质火山岩的高 Mg^{*}特征并不仅仅限于中性火山岩内,同时也存在于基性钾质火山岩中,并构成统一的高 Mg^{*}成分变化趋势(图2),这种演变特征同样符合高 Mg^{*}钾质基性岩浆与陆壳酸性熔体的混合模式,就目前获得的地球化学资料还难以对上述几种成因解释给出定论。但高 Mg^{*}和低 Mg^{*}两类钾质火山岩源区性质的转折对高 Mg^{*}岩石系列的成因机制将提供重要的约束。

低 Mg^{*}钾质-超钾质火山岩的低 K/Nb、Th/La、Rb/Zr、

Pb/La、Ba/La 比值指示源区存在软流圈流体的贡献,但其 Sr、Nd、Pb 同位素组成比高 Mg^{*}高钾钙碱性火山岩有不同程度的富集,表明其母岩浆主要来自富集岩石圈地幔的熔融(Turner *et al.*, 1996, 迟效国等, 1999, 李献华等, 2002)。INDPTH3 的研究结果表明,印度大陆岩石圈沿软流圈俯冲到了高原中部,欧亚岩石圈地幔向南倾斜俯冲到了羌塘地块之下,但上地幔 400km 和 600km 深处的地震不连续面并没有受到现今俯冲板片的扰动,指示早期俯冲板片已经断离沉降(Kind *et al.*, 2002)。由此提出的问题是,早期俯冲板片在什么地点、什么时间发生了断离?

美国西部科迪勒拉在法拉龙板块的俯冲作用下形成了广泛的钙碱性火山活动,板块消减作用停止于中新世末,岩浆性质也随之转变为岩石圈和软流圈来源的拉斑玄武岩和碱性玄武岩(Ormerod *et al.*, 1988)。Carmichael *et al.* (1996),

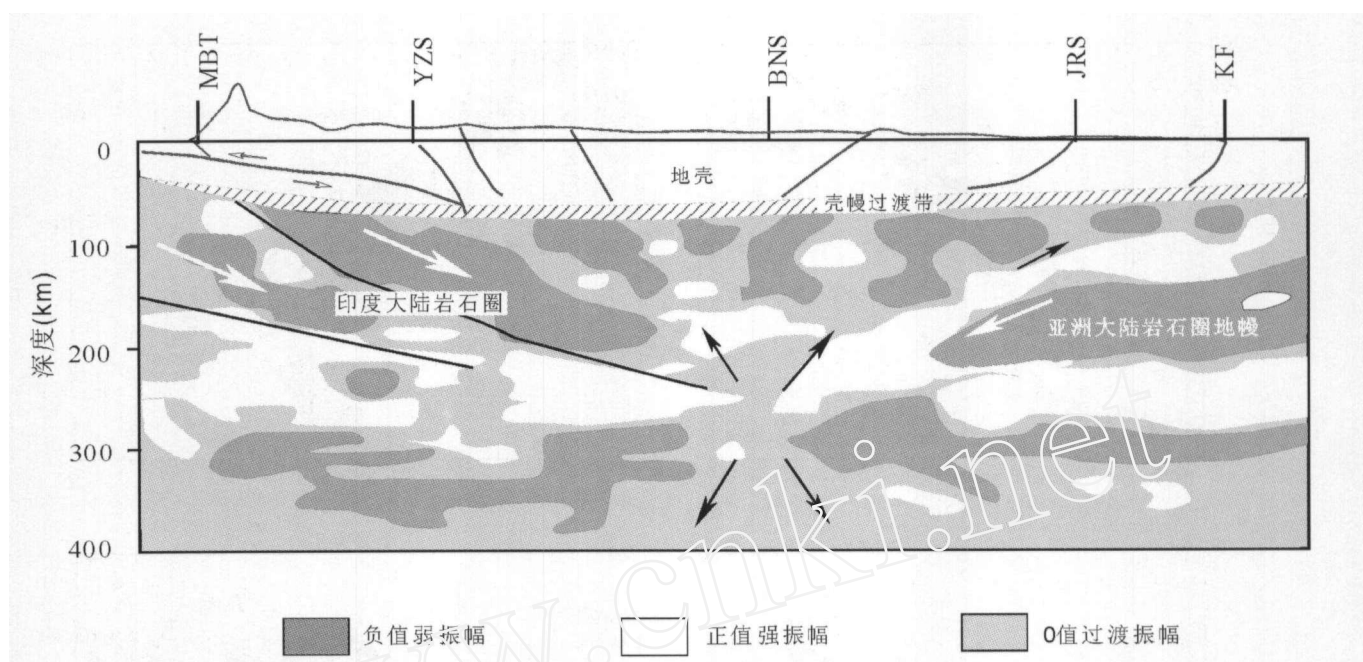


图4 青藏高原大陆岩石圈俯冲与软流圈地幔挤出模型(地震P波振幅分布据 Kind *et al.* 2002 简化)

MBT-主边界冲断层; YZS-雅鲁藏布江缝合带; BNS-班公湖-怒江缝合带; JRS-金沙江缝合带; KF-昆仑断裂。

Fig. 4 Model of continental lithospheric subduction and asthenospheric mantle extrusion of Qinghai-Tibet plateau (Distribution of the amplitudes of P-wave, simplified from Kind *et al.*, 2002)

MBT-Main Himalaya Thrust; YZS-Yarlung-Zangbo suture; BNS-Bangong-Nujiang suture; JRS-Jinsha River suture; KF-Kunlun Fault.

对墨西哥西部2Ma以来形成的橄榄云煌质火山岩和安山岩的研究表明,这种亏损Nb、Ta和具有低Sr高Nd同位素组成的超钾质岩浆是深部软流圈沿板片构造窗上涌使俯冲板片上部的地幔楔熔融的产物,区域上它们与OIB型玄武岩相伴生。这些研究表明大洋岩石圈俯冲板片断裂的重要标志是岩浆性质由板片俯冲来源(钙碱性)转变为软流圈或软流圈与岩石圈混合来源。羌塘新生代高Mg[#]高钾钙碱性和高Mg[#]钾玄岩系列火山岩在30Ma前后被低Mg[#]超钾质火山岩所取代,后者虽不具备软流圈来源属性,但具有软流圈流体参与特征。

近期研究发现,羌塘雀莫错一带古近纪橄榄辉长岩-辉绿岩群的单颗粒锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为31Ma,这些岩石显示软流圈来源的地球化学特征(李莉等,2004)。羌塘北部可可西里前陆盆地的分化萎缩也聚焦在31~30Ma这一时间窗口上(王成善等,2004)。因此,藏北古近纪高Mg[#]钾质火山岩与碱性钾质火山岩在30Ma前后发生的转折可能是岩浆作用对岩石圈俯冲-断裂事件的响应。如滇西地区16Ma以来,洋岛型碱性玄武岩取代了古近纪的高Mg[#]钾质-超钾质岩浆活动(王江海等,2002)。冈底斯新生代钾质-超钾质火山岩源区至今未发现OIB型软流圈流(熔)体叠加的标志,其岩浆的产生机制仍需进一步研究。

近年来高精度GPS重复监测结果表明印度大陆仍以40mm/a的速率向北推移,青藏高原南北向的地壳缩短仍在进行,高原内部物质被向东北和南东方向挤出(王琪等,2001)。张开均等(2002)在羌塘中部达卓玛盆地内识别出一

系列中新世以来的叠瓦式逆冲推覆构造,推覆构造使二叠系、侏罗系和古新世、中新世地层逆冲叠置。INDEPTH3高精度地震解析图象揭示出在印度大陆岩石圈俯冲板片内高速体与低速体成对倾斜展布(图4),表明印度大陆岩石圈板片已发生了破裂,现今岩石圈的俯冲作用正沿MBT带进行。

青藏高原南北双向俯冲和羌塘30Ma前后发生的俯冲板片断裂以及南部俯冲带发生的退移,可以解释为什么超钾质火山活动自羌塘开始,随时间向南北两侧迁移。南部俯冲带的退移导致喜马拉雅岩石圈的快速构造抬升-剥蚀和均衡重力正异常。与此相反,高原北部在印度大陆岩石圈的强力楔入下,高原内部软流圈物质沿欧亚岩石圈地幔俯冲板片的顶部向东北和南东挤出,使上覆岩石圈地幔发生剪切破裂,形成一系列串珠状高速体与低速体的相间分布,并随时间不断向北扩展。这也是阿尔金和滇西走滑系的深部动力源。正是这种软流圈与岩石圈地幔的相互作用形成了可可西里和西昆仑-东昆仑低Mg[#]钾质火山岩的特殊地球化学特征,羌塘高Mg[#]钾质火山岩的幔壳混合特征指示早期俯冲岩石圈地幔携带有陆壳组分,或软流圈局部上涌到了壳幔过渡带,导致幔壳物质的混合熔融。藏南高Mg[#]钾质-超钾质岩浆则可能来自于受俯冲陆壳混染的软流圈与岩石圈的相互作用。

致谢 感谢李廷栋院士、肖序常院士和莫宣学教授对作者在藏北火山岩研究工作中给予的帮助与支持,感谢审稿专家提出的修改意见和建议。

References

- Arnaud NO, Vidal Ph, Tapponnier P, *et al.* 1992. The high-K₂O volcanism of northwestern Tibet: Geochemistry and tectonic implications. *Earth Plane. Sci. Lett.*, 111(3): 351–367
- Carmichael ISE, Lange RA and Luhr JF. 1996. Quaternary minettes and associated volcanic rocks of Mascota, western Mexico: A consequence of plate extension above a subduction modified mantle wedge. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 124: 302–333
- Chi XG, Li C, Jin W, *et al.* 1999. Spatial-temporal evolution of Cenozoic volcanism and uplifting in North Tibet. *Geological Review* 45 (suppl): 978–986 (in Chinese with English abstract)
- Chi XG, Li C and Jin W. 2005. Cenozoic volcanism and lithospheric tectonic evolution in Qiangtang area, northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 48(7): 1011–1024
- Chung SL, Wang KL, Crawford AJ, *et al.* 2001. High-Mg potassic rocks from Taiwan: implications for the genesis of orogenic potassic lavas. *Lithos*, 59: 153–170
- Coulon C, Maluski H and Bollinger C. 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ³⁹Ar/⁴⁰Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 80: 281–302
- Deng WM. 1998. Cenozoic intraplate volcanic rocks in the Northern Qinghai-Xizang plateau. Beijing: Geological Publishing House, 86–150 (in Chinese with English abstract)
- Ding L, Zang JJ, Zhou Y, *et al.* 1999. Tectonic implicating on the lithosphere evolution of the Tibet Plateau: Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in Northern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 408–421 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Mo XX, Gao YF, *et al.* 2003. Adakite — a possible host rock for porphyry copper deposits: Case studies of porphyry copper belts in Tibetan Plateau and in northern Chile. *Mineral Deposits*, 22(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Jiang YS, Zhou YY, Wang MG, *et al.* 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)
- Kay SM and Kay RW. 1994. Aleutian magmas in space and time. In: Plafker G, and Berg H C (eds). *The Geology of Alaska, The Geology of North America*, G-1. Geological Society of America, 687–722
- Kind R, Yuan X, Saul J, *et al.* 2002. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian plate subduction. *Science*, 298: 1219–1221
- Kogiso T, Tatsumi Y and Nakano S. 1997. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: Experiments and implications for the origin of ocean island basalts. *Earth and Planetary Science Letters* (148): 193–205
- Lai SC, Liu CY and Yi HS. 2003. Geochemistry and petrogenesis of Cenozoic andesite-dacite associations from the Hoh Xil region, Tibetan plateau. *International Geology Review*, 45: 998–1019
- Lai SC. 2000. Three phase uplifting model of Qinghai Tibet plateau during Cenozoic: Igneous petrology constraints. *Acta Mineralogica Sinica* (in Chinese with English abstract), 20(2): 183–190
- Li L, Bai YS, Niu ZJ, *et al.* 2004. The ultrabasic and basic rocks and their tectonic settings in the Qoimaco region, Qiangtang on the Qinghai-Xizang Plateau. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(1): 27–34 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zhou HW, Wei GJ, *et al.* 2002. Geochemistry and Sr-Nd isotopes of Cenozoic ultrapotassic lamprophyres in western Yunnan: Constrains on the composition of sub-continental lithosphere mantle. *Geochimica*, 31(1): 26–34 (in Chinese with English abstract)
- Liao SP, Chen ZH, Luo XC, *et al.* 2002. Discovery of leucite phonolite in the Tangra Yumco area, Tibet and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 735–738 (in Chinese with English abstract)
- Liu JQ. 1999. Chinese volcano. Beijing: Science Press, 42–77 (in Chinese)
- Ma RZ, Liu DZ and Tao XF, *et al.* 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)
- Miller C, Schuster R, Klezli U, *et al.* 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: 1399–1424
- Ormerod DS, Hawkesworth CJ, Rogers NW, *et al.* 1988. Tectonic and magmatic transitions in the West Grest Basin, USA. *Nature*, 333: 349–353
- Rapp PR, Shimizu N, Norman MD, *et al.* 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chem. Geol.*, 160: 335–356
- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 263–281
- Tan FW, Pan GT and Xu Q. 2000. The uplift of Qinghai-Tibet plateau and geochemical characteristics of Cenozoic volcanic rocks from the center of Qiangtang, Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(2): 121–130 (in Chinese with English abstract)
- Turner S, Arnaud N, Liu JQ, *et al.* 1996. Post-collisional, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37: 45–71
- Wang CS, Zhu LD and Liu ZF. 2004. Tectonic and sedimentary evolution of basins in the north of Qinghai-Tibet plateau and northward growing process of Qinghai-Tibet plateau. *Advance in Earth Sciences*, 19(3): 373–381 (in Chinese with English abstract)
- Wang CS, Yi HS, Li Y, *et al.* 2002. The Geological evolution and prospective oil and gas assessment of the Qiangtang basin in northern Tibetan plateau. Beijing: Geological Publishing House, 129–166 (in Chinese)
- Wang JH, Yin A, Harrison TM, *et al.* 2003. Thermochronological constraints on two pulses of Cenozoic high-K magmatism in eastern Tibet. *Science in China (series D)*, 46(7): 719–729
- Wang Q, Zhang PZ, Niu ZJ, *et al.* 2002. Present-day crustal movement and tectonic deformation in China continent. *Science in China (Series D)*, 45(10): 865–874
- Wang Q, McDermott F, Xu JF, Bellon H and Zhu YT. 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanics in the Hohxil area, northern Tibet: Lower crustal melting in an intracontinental setting. *Geology*, 33: 464–468
- Yang JS, Wu CL, Shi RD, *et al.* 2002. Miocene and Pleistocene shoshonitic volcanic rocks in the Jingyuhu area. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 161–176 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH and Zhang CF. 1998. Sr, Nd isotope and trace elements geochemical features of the Cenozoic volcanic rocks from West Qingling, Gansu province. *Earth Science Frontiers* (in Chinese with English abstract), 5(4): 319–328
- Zhang HH, He HY, Wang JH, *et al.* 2005. ⁴⁰Ar/³⁹Ar chronology and geochemistry of high-K volcanic rocks in the Mangkang basin, Tibet. *Science in China (series D)*, 48(1): 1–12
- Zhang KJ, Wang QF, Xia BD, *et al.* 2002. Post-miocene imbricate thrust structures in middle Qiangtang, western China. *Journal of Nanjing University*, 38(2): 266–269 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZD, Mo XX, Zhang SQ, *et al.* 2001. Post-collisional magmatism from Oiyug basin, Central Tibet-the evidence of recycling oceanic crust from Tethyan subduction. *Science in China Series, D: Earth Sciences*, 31(suppl): 20–26
- Zhao ZH, Wang Q and Xiong XL. 2004. Complex interaction between crust and mantle in subducted zone. *Bulletin of Mineralogy*,

Petrology and Geochemistry, 23(4): 277–284 (in Chinese with English abstract)

Zhu DC, Pan GT, Mo XX, *et al.* 2003. Sr-Nd-Pb isotopic variations of the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai-Xizang plateau and its adjacent areas. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(3): 1–11 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

迟效国, 李才, 金巍. 2005. 藏北羌塘地区新生代火山作用与岩石圈构造演化. *中国科学, D 辑*, 35(5): 399–410

迟效国, 李才, 金巍等. 1999. 藏北新生代火山作用的时空演化与高原脉动隆升. *地质论评*, 45(增刊): 978–986

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: 86–50

丁林, 长进江, 周勇等. 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

侯增谦, 莫宣学, 高永峰等. 2003. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩—以西藏和智利斑岩铜矿为例. *矿床地质*, 22(1): 1–12

江元生, 周幼云, 王明光等. 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*, 2003(1): 16–20

杨经绥, 吴才来, 史仁灯等. 2002. 青藏高原北部鲸鱼湖地区中新世和更新世两期橄榄玄粗质系列火山岩. *岩石学报*, 18(2): 161–176

赖绍聪. 2000. 青藏高原新生代三阶段造山隆升模式: 火成岩岩石学约束. *矿物学报*, 20(2): 183–190

李莉, 白云山, 牛志军等. 2004. 羌塘雀莫错一带基性超基性岩群基本特征及构造环境. *沉积与特提斯地质*, 24(1): 27–34

李献华, 周汉文, 韦刚健等. 2002. 滇西新生代超钾质煌斑岩的元素和 Sr-Nd 同位素特征及其对岩石圈地幔组成的制约. *地球化学*, 31(1): 26–34

廖思平, 陈振华, 罗小川等. 2002. 西藏当惹雍错地区石榴石响岩的

发现及地质意义. *地质通报*, 21(11): 735–738

刘嘉麒. 1999. 中国火山. 北京: 科学出版社: 42–77

马润则, 刘登忠, 陶晓风等. 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

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

王成善, 伊海生, 李勇等. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价. 北京: 地质出版社: 129–158

王成善, 朱利东, 刘志飞. 2004. 青藏高原北部盆地构造沉积演化与高原向北生长过程. *地球科学进展*, 19(3): 373–381

王江海, 尹安, Harrison TM 等. 2002. 青藏东缘新生代两类高钾岩浆活动的热年代学研究. *中国科学, D 辑*, 32(7): 529–537

王琪, 张培震, 牛之俊等. 2001. 中国大陆现今地壳运动和构造变形. *中国科学, D 辑*, 31(7): 529–536

喻学惠, 赵志丹, 莫宣学等. 2005. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素定年及其地质意义. *科学通报*, 50(23): 2638–2643

喻学惠, 张春福. 1998. 甘肃西秦岭新生代碱性火山岩的 Sr, Nd 同位素及微量元素地球化学特征. *地质前缘*, 5(4): 319–328

张会化, 贺怀宇, 王江海等. 2004. 西藏芒康盆地内高钾火山岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学和地球化学研究. *中国科学, D 辑*, 34(1): 24–34

张开均, 王启飞, 夏邦栋等. 2002. 羌塘中部后中新世叠瓦式逆冲推覆构造. *南京大学学报(自然科学)*, 38(2): 266–269

赵振华, 王强, 熊小林. 2004. 俯冲带复杂的壳幔相互作用. *矿物岩石地球化学通报*, 23(4): 277–284

赵志丹, 莫宣学, 张双全等. 2001. 西藏中部乌郁盆地碰撞后岩浆作用-特提斯洋壳俯冲再循环的证据. *中国科学, D 辑*, 31(增刊): 20–26

朱第成, 潘桂棠, 莫宣学等. 2003. 青藏高原及邻区新生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征. *沉积与特提斯地质*, 23(3): 1–11