

·专题研究·

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

陈建林¹, 许继峰¹, 王保弟^{1,2}, 康志强^{1,2}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素年代学和地球化学实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 青藏高原拉萨地块广泛分布有新生代超钾质岩, 岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征表明这些超钾质岩来源于与古俯冲环境有着密切联系的含金云母的富集地幔源区, 它们主要喷发于 25~10 Ma。同时在拉萨地块分布有多条南北向地堑(裂谷), 且它们的切割深度可能到达下地壳的深部甚至岩石圈地幔, 它们主要形成于 23~8 Ma。拉萨地块大多数超钾质岩沿着新生代的南北向地堑(裂谷)分布, 并且它们在形成时代和空间分布上存在着明显的耦合性, 结合沿着印度-雅鲁藏布江缝合带分布的中新世埃达克质岩, 笔者认为这些超钾质岩很可能与中新世早期北向俯冲的印度岩石圈沿着印度-雅鲁藏布江缝合带附近发生断裂, 以及由此而引起拉萨地块东西向伸展构造活动产生的南北向地堑(裂谷)系统有关。

关键词: 新生代, 超钾质岩, 南北向地堑(裂谷), 拉萨地块, 青藏高原

中图分类号: P588.14; P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)04-0341-14

The relationship between the NS-trending grabens and the ultrapotassic volcanic rocks in Lhasa block, Qinghai-Tibetan Plateau

CHEN Jian-lin¹, XU Ji-feng¹, WANG Bao-di^{1,2} and KANG Zhi-qiang^{1,2}

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

Abstract: Cenozoic ultrapotassic volcanic rocks which are widely distributed in Lhasa block of southern Qinghai-Tibetan Plateau were mainly erupted between 25 Ma and 10 Ma. These ultrapotassic volcanic rocks have typical lamproite characteristics such as high SiO₂, MgO, K₂O and TiO₂, low Al₂O₃ and Na₂O, and high K₂O/Na₂O ratios. Their high abundances of incompatible trace elements like large ion lithophile elements (LILE) and light rare earth elements (LREE) also reach the extreme levels typical of lamproites. The lamproites show high radiogenic ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and low unradiogenic ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd, low ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, and elevated radiogenic ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb and ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb ratios. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of these ultrapotassic volcanic rocks in Lhasa block suggest that they were probably derived from a phlogopite-bearing enriched mantle source related closely to metasomatism during earlier subduction events. The ultrapotassic rocks in southern Tibet may imply the uplift and extension of Tibetan plateau after the collision of Indian plate and Eurasian plate. Meanwhile, there

收稿日期: 2009-10-15; 修订日期: 2010-02-20

基金项目: 973 资助项目(2009CB421004, 2002CB412602); 国家自然科学基金资助项目(40872055, 40930316); 中科院知识创新工程重要方向性资助项目(KZCX2-YW-Q04-02)

作者简介: 陈建林(1971-), 男, 博士, 地球化学专业, E-mail: lzdxcchen@gig.ac.cn.

are a number of N-S grabens (rifts) mostly formed in 23~8 Ma in Lhasa block, which might have cut the lower crust or lithosphere into the depth, suggesting the extension of southern Tibet in Miocene. Furthermore, these ultrapotassic volcanic rocks are coincident with N-S grabens (rifts) in space and time. In addition, the tectonic activities in western Lhasa block (such as Karakorum fault) in 17 Ma and in eastern Lhasa block (such as Jiali fault and Red River-Ailao Mountain fault zone) in 23~17 Ma imply that at about 20 ± 3 Ma the tectonic stress field in southern and southern-eastern parts of Qinghai-Tibetan Plateau underwent a considerable change from the NS-trending compression to the EW-trending extension. Combined with contemporary adakitic rocks along the Yarlung Zangbo suture, the authors hold that the northward subducted Indian lithospheric mantle might have experienced break-off beneath the Lhasa block along the Yarlung Zangbo suture in early Miocene, which caused the upward and lateral migration of the asthenosphere material under the Indian lithospheric mantle along the slab window. The upward and lateral migration of the asthenosphere material led to the rapid uplift of southern Qinghai-Tibetan Plateau as well as the eastward movement of the thickened crust, which further resulted in the EW-trending extensional deformation (23~8 Ma) of the widely distributed N-S grabens (rifts) and the eruption of the ultrapotassic magma (25~10 Ma).

Key words: Cenozoic; ultrapotassic volcanic rocks; NS-trending graben; Lhasa block; Qinghai-Tibetan Plateau

青藏高原是地球的“第三极”,被誉为研究大陆动力学的天然实验室,而作为印度板块与欧亚大陆碰撞前缘的拉萨地块,更是研究青藏高原形成和演化的重要部位。当前青藏高原研究的热点和难点之一是高原抬升的机制及其与高原上广泛分布的南北向地堑(裂谷)之间的关系。青藏高原南北向地堑主要分布在高原南部的拉萨地块,并且沿着这些南北向地堑广泛分布有新生代超钾质岩,而超钾质岩因其具有高的 MgO 含量($>3\%$,质量分数)而认为其源区主要为地幔源区。因此详细研究这些超钾质岩与南北向地堑之间的关系对于理解青藏高原隆升过程和成因模式有着重要的启示。

虽然前人对青藏高原南部的超钾质岩做过一些研究,但这些研究主要集中在拉萨地块的西南部和南部,而对于拉萨地块中西部沿着南北向地堑分布的超钾质岩并没有进行过系统地研究。为了全面理解高原南部乃至整个高原的抬升和构造演化过程,有必要对拉萨地块广泛分布的南北向地堑和分布在其两侧的超钾质岩进行系统而深入地研究。本文是在结合前人的成果和笔者近年来新资料的基础上,从整体上探讨高原南部超钾质岩与南北向地堑之间的关系。

1 拉萨地块地质概况

青藏高原是地球上抬升最高的构造单元,北部由阿尔金断裂将其与塔里木地块相分离,南部以雅

江缝合带与喜马拉雅相邻。自早古生代之后,由于受印度板块向亚欧大陆板块的移动和碰撞的影响,在亚欧板块的南部边缘由北向南逐渐积累形成了一系列东西向延伸的地块,它们分别为松潘-甘孜地块、羌塘地块、拉萨地块,共同组成现在的青藏高原。它们之间被班公错-怒江缝合带和金沙江缝合带所衔接,这两条缝合带分别形成于 J_2 - J_3 (Dewey, 1988), T_3 - J_1 (Pearce and Mei, 1988; Yin and Harrison, 2000)。在拉萨地块南部雅江缝合带则形成于晚白垩—早第三纪新特提斯洋闭合之后 (Dewey, 1988)。

在约 65~45 Ma,印度-亚欧大陆板块开始碰撞 (莫宣学等, 2003; 周肃等, 2004; Mo *et al.*, 2005), 印度板块在持续北移的过程中导致青藏高原整体抬升和高原东西向发生伸展变形,特别是在中新世时期高原深部发生了重要的地质构造事件,在拉萨地块产生了许多近南北向的地堑,并且在其两侧广泛分布有体积小数量众多的钾质、超钾质火山岩 (图 1)。

2 拉萨地块超钾质岩分布概况

自上世纪 70 年代以来,人们掀起了研究青藏高原的热潮,取得了许多重要的研究成果。但对拉萨地块而言,研究主要集中在西南部和南部,对于拉萨地块中西部沿着南北向地堑分布的钾质、超钾质岩尚缺乏深入而仔细的研究。因而在整体上理解拉萨

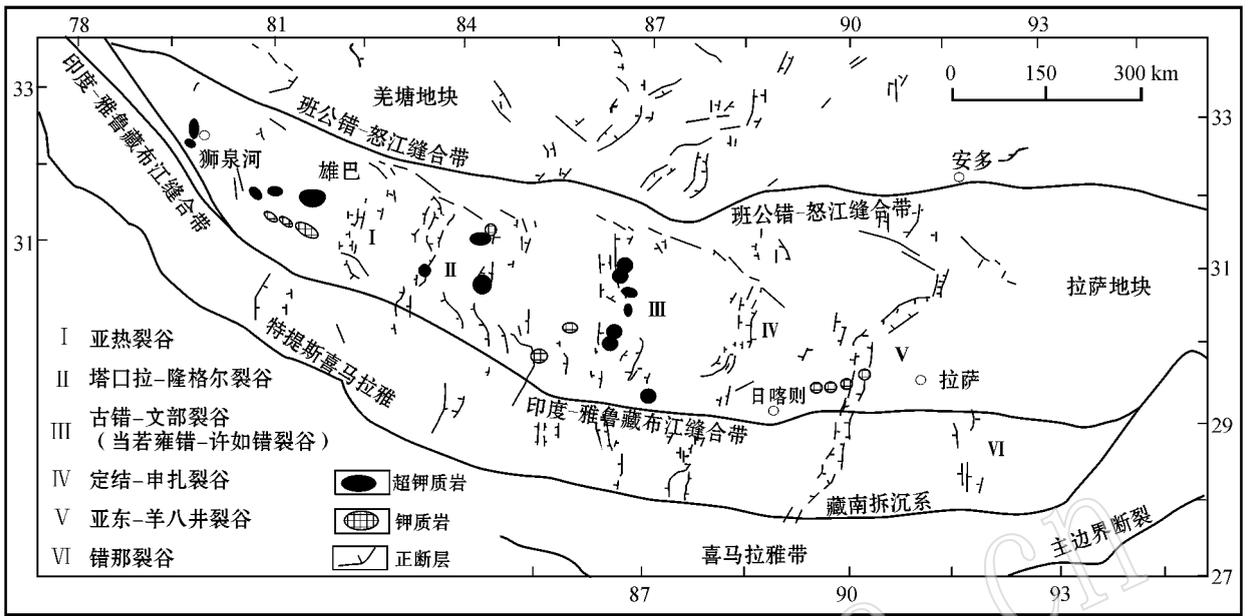


图1 拉萨地块南北(N-S)向地堑和钾质、超钾质岩分布简图

Fig. 1 Simplified map showing the distribution of Cenozoic potassic, ultrapotassic volcanic rocks and NS-trending grabens (rifts) in Lhasa block

南北向裂谷据 Blisniuk 等 (2001); 数据来源: Turner 等 (1996), Miller 等 (1999), Williams 等 (2001, 2004), Chung 等 (2003), Ding 等 (2003), Hou 等 (2004), Nomade 等 (2004), 丁林等 (2006), 陈建林等 (2006), 赵志丹等 (2006), 孙晨光等 (2007, 2008), Zhao 等 (2009)
NS-trending grabens after Blisniuk *et al.* (2001); Data sources: Turner *et al.* (1996), Miller *et al.* (1999), Williams *et al.* (2001, 2004), Chung *et al.* (2003), Ding *et al.* (2003, 2006), Hou *et al.* (2004), Nomade *et al.* (2004), Chen *et al.* (2006), Zhao *et al.* (2006, 2009), Sun *et al.* (2007, 2008)

地块乃至青藏高原的形成机制有一定的局限性。根据笔者近几年对拉萨地块中西部钾质、超钾质岩的部分研究结果,并结合前人的研究资料后初步认为,拉萨地块超钾质岩在西南部主要分布在雄巴、邦巴、狮泉河和塞利普等地 (Turner *et al.*, 1996; Miller *et al.*, 1999; Williams *et al.*, 2001, 2004; 孙晨光等 2007, 2008; 王保弟等, 2008; 赵志丹等, 2008); 南部主要分布在南木林、帕嘎村、昂仁打加错等地 (Williams *et al.*, 2001, 2004); 中西部主要分布在当若雍错-许如错地堑两侧的文部、米巴勒、仪仟、查孜和措勤县布嘎寺以及仲巴县贡木淌、麦嘎乡等地 (廖思平等, 2002; 马润则等, 2002; Ding *et al.*, 2003; 江元生等, 2003; Nomade *et al.*, 2004; 丁林等, 2006; 赵志丹等, 2006; 陈建林等, 2006)。拉萨地块西南部超钾质岩主要形成于 25~18 Ma, 南部超钾质岩主要形成于 16~10 Ma; 中西部的超钾质岩主要形成于 23~12 Ma, 而拉萨地块的这些超钾质岩集中形成于 17~12 Ma, 且相当部分集中在拉萨地块中西部。岩浆作用时代似乎具有由西向东逐渐变年轻的特点 (Nomade *et al.*, 2004; Hou *et al.*,

2004; 赵志丹等, 2006)。从拉萨地块超钾质岩的分布特征来看, 超钾质岩主要分布在大致东经 87° 线以西的区域 (赵志丹等 2006, 2008); 与拉萨地块南部靠近印度-雅鲁藏布江缝合带的埃达克岩明显受到缝合带的控制、大致平行于缝合带东西向分布明显不同, 超钾质岩不显示东西向分带性, 具体表现为既有产出在拉萨地块南部的, 也有产出于拉萨地块北部靠近班公错-怒江缝合带的。从野外产状看, 超钾质岩明显与高原南北向地堑 (裂谷) 或与南北向延长的湖泊 (如扎不耶查卡、当若雍错和许如错地区) 关系极为密切。从时间上看, 超钾质岩的形成时代与拉萨地块伸展构造的发育时间是有重叠的, 表明它们可能具有成因关系 (赵志丹等 2006)。

3 拉萨地块超钾质岩地球化学特征及其物质源区

3.1 主量元素特征

在 TAS 图 (图 2) 中拉萨地块中西部超钾质岩主要为碱性岩, 部分为过碱性岩, 岩石类型主要以粗面

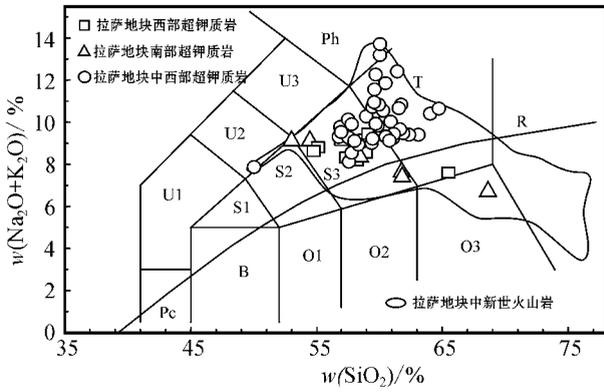


图 2 拉萨地块超钾质岩 TAS图(底图据 Le Bas 等, 1986 图中的数据来源同图 1)

Fig. 2 TAS classification of the ultrapotassic rocks in Lhasa block (Base map after Le Bas *et al.*, 1986; Data sources as for Fig. 1)

Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; T—粗面岩和粗面英安岩; U1—碧玄岩和碱玄岩; U2—响岩质碱玄岩; U3—碱玄质响岩; Ph—响岩; O1—玄武安山岩; O2—安山岩; O3—英安岩; S1—粗面玄武岩; S2—玄武粗安岩; S3—粗安岩; R—流纹岩
Pc—microbasalt; B—basalt; T—trachyte; U1—basanite; U2—phonotephrite; U3—tephriphonolite; Ph—phonolite; O1—basaltic andesite; O2—andesite; O3—dacite; S1—trachybasalt; S2—basaltic trachyandesite; S3—trachyandesite; R—rhyolite

安山岩和粗面岩为主,部分为响岩质碱玄岩和白榴岩。西南部和南部超钾质岩大部分为碱性岩,少数位于钙碱性系列范围之内,岩石类型以粗面安山岩、安山岩和英安岩为主,且显示出与 SiO₂ 负相关关系。总体上拉萨地块超钾质岩 SiO₂ 含量绝大部分大于 57%~58%。K₂O-SiO₂ 图(图 3a)中主要位于橄榄玄岩范围之中,且中西部的超钾质岩 SiO₂ 和 K₂O 之间没有明显的相关性,而西部和南部则显示

出一定的负相关关系。K₂O-Na₂O 图中主要位于超钾质岩范围之中(图 3b)。在超钾质岩分类图 K₂O/Al₂O₃-SiO₂ 图和 CaO-MgO 图(Foley *et al.*, 1987)(图 4)中主要位于钾镁煌斑岩的范围之中。

在主要相关图(图 5)中中西部 SiO₂ 与 TiO₂、Al₂O₃ 相关性不明显,而西部和南部的 SiO₂ 和 TiO₂ 有一定的负相关,与 Al₂O₃ 关系不明显;总体上 SiO₂ 与 Na₂O 无明显的相关性,而与 MgO 有一定的负相关。

3.2 微量元素特征

拉萨地块超钾质岩稀土(REE)球粒陨石标准化配分图(图 6a)主要有以下特征:①总体上稀土配分曲线为右倾,LREE 和 HREE 分异明显;②LREE 分布相对较缓,Eu 表现出相对弱负异常或无异常;③HREE 分布比较平缓且含量较高;④拉萨地块超钾质岩稀土配分形式变化的一致性可能说明它们有着相似的源区或形成机制。

拉萨地块超钾质岩微量元素初始地幔标准化蛛网图(图 6b)主要有以下特征:Rb、Th 等 LILE 不相容元素强烈富集,Ba、P 和 Nb、Ta、Ti 等 HFSE 元素相对亏损,Sr 具有弱负异常和无异常;中西部超钾质岩 Zr、Hf 无明显负异常;这里的 Sr 和 Eu 弱负异常可能与斜长石结晶没有一定联系。

在微量元素与 SiO₂ 的相关图(图 7)中,Ba、Sr 等 LILE 总体上与 SiO₂ 表现为负相关性,其含量远远高于上、下地壳的含量,说明拉萨地块超钾质岩的 LILE 等不相容元素可能不是因简单同化地壳物质所致。Cr、Ni 等相容元素与 SiO₂ 的相关性不明显。

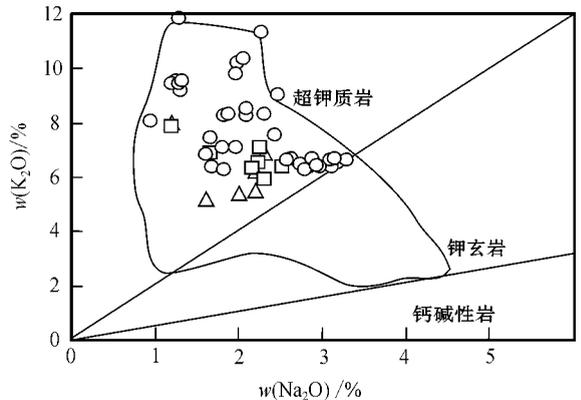
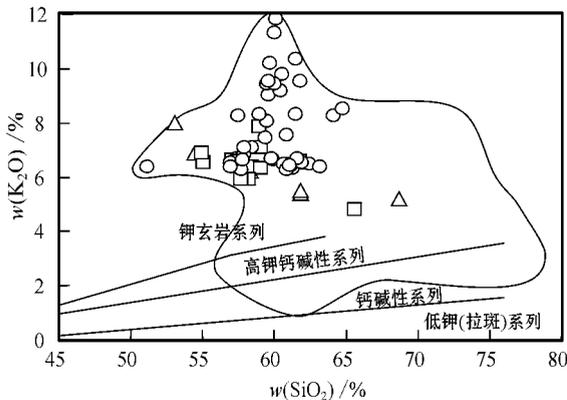


图 3 K₂O-SiO₂ (a) 和 K₂O-Na₂O (b) 图解(数据来源和图例同图 2)

Fig. 3 K₂O versus SiO₂ (a) and K₂O versus Na₂O (b) diagrams (data sources and symbols as for Fig. 2)

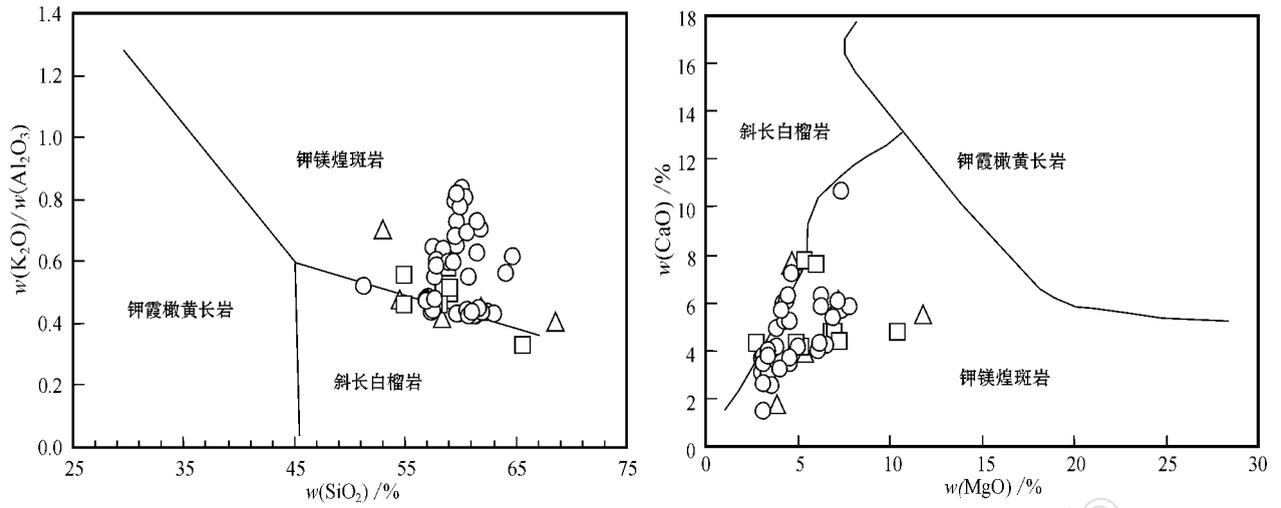


图 4 超钾质岩分类图(底图据 Foley 等, 1987; Foley, 1992a, 数据来源和图例同图 2)

Fig. 4 The classification of ultrapotassic rocks(after Foley *et al.*, 1987; Foley, 1992a; data sources and symbols as for Fig. 2)

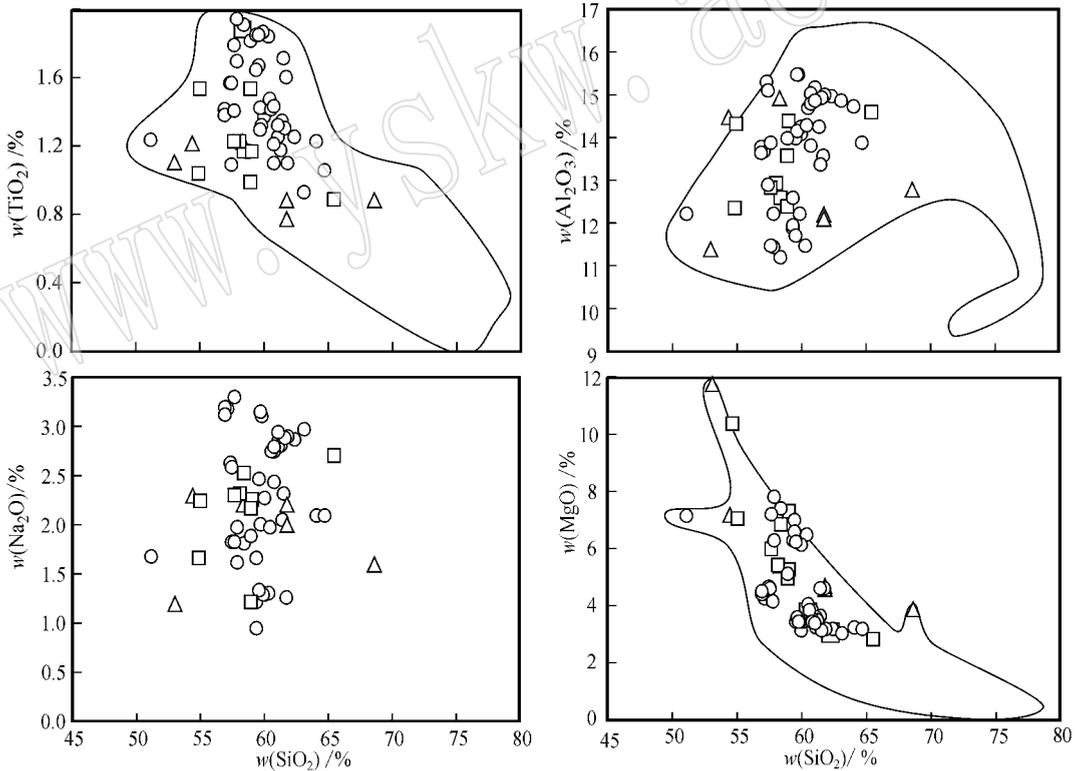


图 5 主量相关图(数据来源和图例同图 2)

Fig. 5 Relationship of major elements(data sources and symbols as for Fig. 2)

3.3 同位素特征

Sr-Nd 同位素特征图(图 8a)中高原北部和南部的超钾质岩有着明显不同的分布区域,同时研究区 Sr-Nd 同位素特征也与沿印度-雅鲁藏布江缝合带北

部分布的埃达克质斑岩、林子宗火山岩有着明显的不同。较高的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比值和较低的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 同位素比值说明源区可能有着壳源物质的存在,同时查孜、文部、仪迁和麦嘎以及西南部超钾质

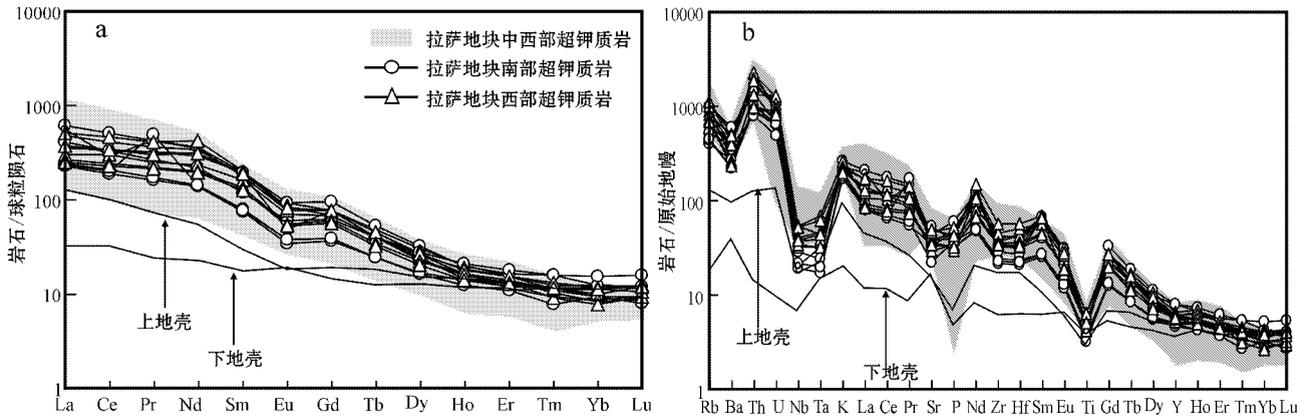


图 6 稀土元素球粒陨石标准化 (a) 和微量元素原始地幔标准化图 (b) 标准化数据据 Sun 和 McDonough, 1989, (数据来源同图 2)

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element patterns (a) and primary mantle normalized trace element patterns (b) (normalized data after Sun and McDonough, 1989, data sources as for Fig. 2)

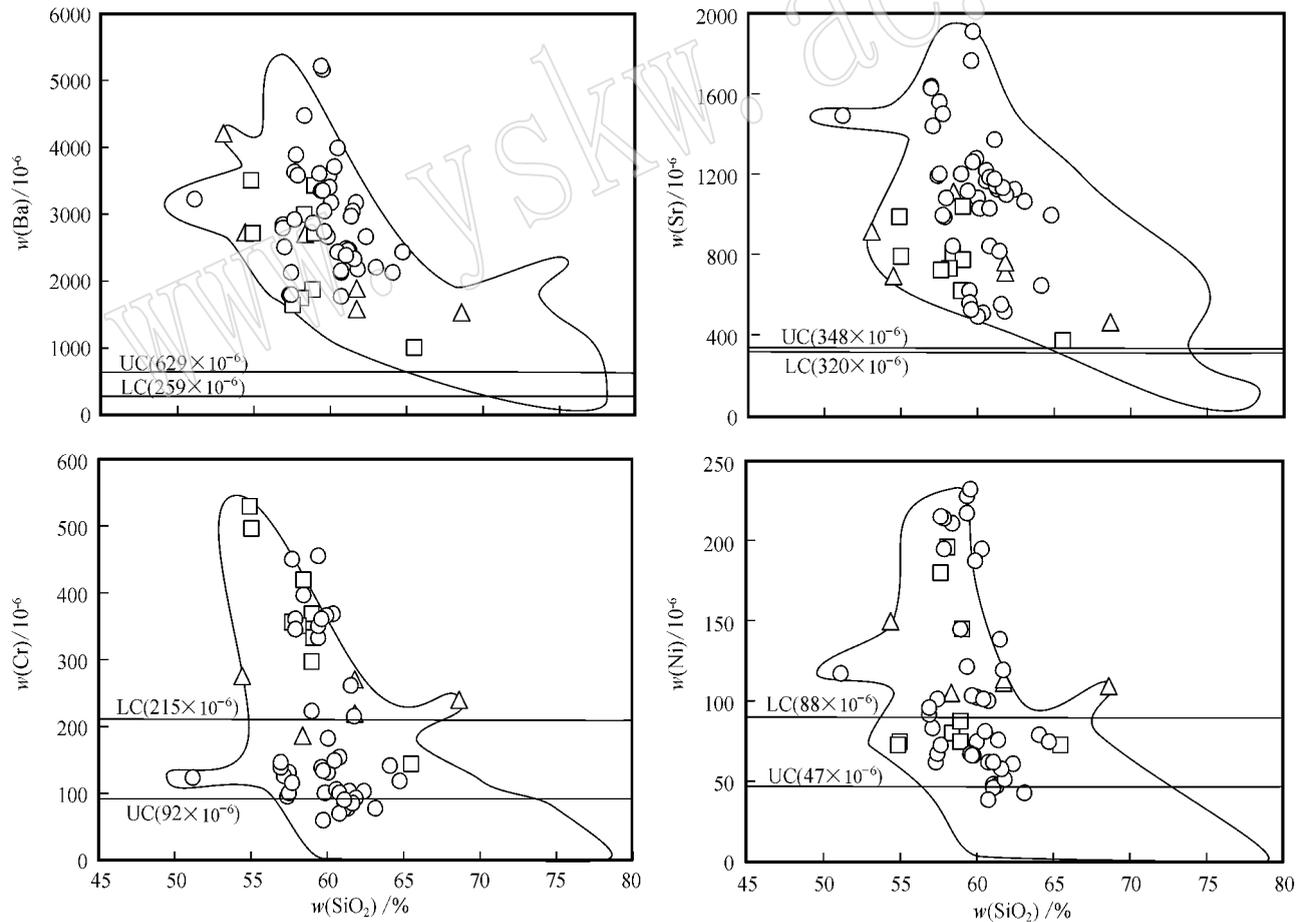


图 7 SiO₂ 和微量元素相关图(数据来源和图例同图 2)

Fig. 7 Relationship of SiO₂ to trace elements (data sources and symbols as for Fig. 2)

LC—下地壳 ; UC—上地壳

LC—lower crust ; UC—upper crust

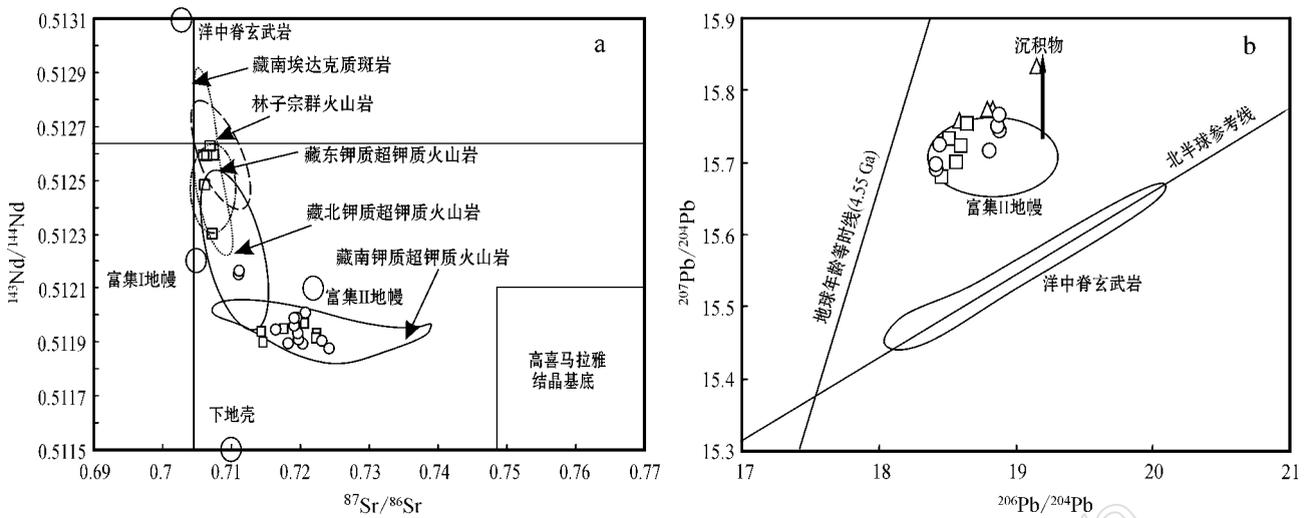


图 8 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图 (a) 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图 (b)

Fig. 8 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (a) and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagrams

数据来源：林子宗群火山岩(张双全, 1996; 董国臣, 2002); 藏东钾质超钾质岩(张玉泉等, 2000; Xu *et al.*, 2001; 李献华等, 2002; 夏萍等, 2004; 张会化等, 2004); 藏北钾质超钾质岩(Arnaud *et al.*, 1992; Turner *et al.*, 1996; Ding *et al.*, 2003; Lai *et al.*, 2003; Williams *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2006) 高喜马拉雅结晶基底(Harris *et al.*, 1988); 其他数据来源和图例同图 2

Data sources: the group of Linzi group volcanic rocks (Zhang, 1996; Dong, 2002); the potassic and ultrapotassic rocks of eastern Tibet (Zhang *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2002; Xia and Xu, 2004; Zhang *et al.*, 2004); the potassic and ultrapotassic rocks of northern Tibet (Arnaud *et al.*, 1992; Turner *et al.*, 1996; Ding *et al.*, 2003; Lai *et al.*, 2003; Williams *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2006); High Himalayan basement (Harris *et al.*, 1988); other data source and symbols as for Fig. 2

岩相对于亏损地幔的 Nd 同位素模式年龄均大于 1.3 Ga (Miller *et al.*, 1999; Ding *et al.*, 2003; 丁林等 2006) 说明源区物质可能含有古老的循环地壳物质。

在 Pb-Pb 同位素图(图 8b)中, 文部和查孜以及拉萨地块西南部的超钾质岩各个岩体中相对于 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 而言, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围大, 从而使 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化看起来近于直立, 说明这些铅同位素值由封闭性 U 形成是不太可能的 (Nelson *et al.*, 1986), 而是有外来 Pb 的加入, 这些外来物质很可能为古老的壳源物质。 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的相关图(图未附)中也有着类似的特征。

3.4 拉萨地块超钾质岩物质源区讨论

Foley 等(1987, 1992a), Bergman (1987) 认为钾镁煌斑岩源于一个先期亏损而后再富集的源区, 挥发分以 H、O 为主。同世界上其他地区典型钾镁煌斑岩相比较, 研究区超钾质岩虽然有着较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 含量、相对较低的 TiO_2 含量、较低的 Sr、Ba、Zr 等不相容元素含量, 但拉萨地块超钾质岩中明显高的 MgO (3%~12%) 和 Cr、Ni 等相容元素的含量说明它们源于地幔。

拉萨地块超钾质岩具有明显的富钾特征, 且 K_2O 和 MgO 、 SiO_2 等的不相关性说明源区存在有富钾的矿物, 常见的富钾矿物有金云母和角闪石, 在 $\text{Rb}/\text{Sr} - \text{Ba}/\text{Rb}$ 图(图 9a)中可知拉萨地块超钾质岩源区的富钾矿物是以金云母为主 (Furman and Graham, 1999)。Foley (1992a) 也认为钾镁煌斑岩最有可能的源区物质是含金云母的方辉橄榄岩。而研究区 HREE 分布比较平缓且含量较高可能说明源区不含石榴子石, 因此其源区很可能为以尖晶石为主的地幔源区。

在微量元素蛛网图中 Nb、Ta、Ti 等 HFSE 元素的负异常说明拉萨地块超钾质岩源区可能与古俯冲作用有着十分密切的关系, 而 Nd 同位素模式年龄均大于 1.3 Ga 以及 Sr-Nd 和 Pb-Pb 同位素分布特征(图 8)均说明源区可能有着古老的壳源物质存在。

综合上述特征说明, 拉萨地块超钾质岩的源区很可能是与古俯冲环境相联系的富含金云母的富集地幔源区。

3.5 拉萨地块超钾质岩成因讨论

目前有关超钾质岩的成因主要有下列模式: ① 高压条件下镁铁质岩浆的结晶分异 (Meen, 1990);

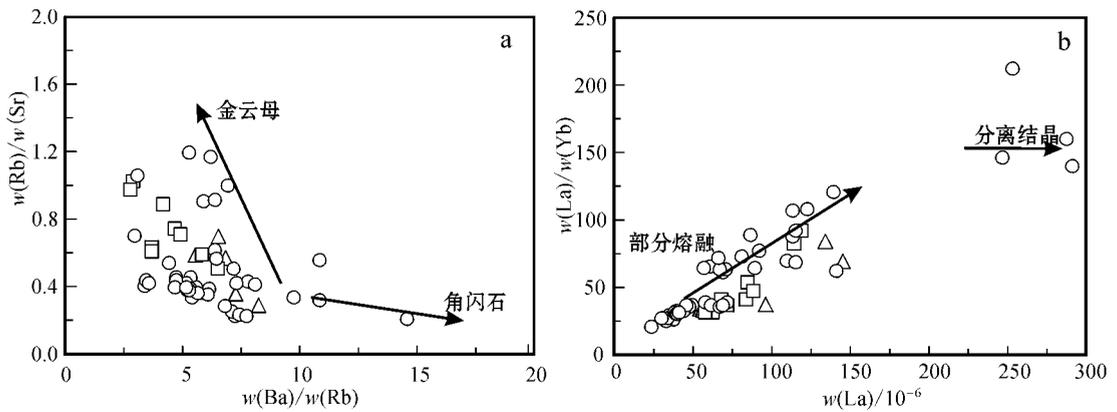


图 9 Rb/Sr - Ba/Rb (a, 底图据 Furman and Graham, 1999) 和 La/Yb - La 图 (b, 数据来源和图例同图 2)

Fig. 9 Rb/Sr versus Ba/Rb (a, base map after Furman and Graham, 1999) and La/Yb versus La (b, data sources and symbols as for Fig. 2)

② 源于软流圈上部壳幔边界层低度部分熔融而成的富含挥发分的岩脉与围岩反应从而形成富钾源区 (Foley, 1992b); ③ 俯冲作用使沉积物或上地壳物质在较深的部位进入岩石圈地幔形成富钾物质, 因后期俯冲环境结束而使岩石圈地热梯度回复从而导致前期的富钾源区发生部分熔融形成超钾质岩的母岩浆 (Massonne, 1992; Nelson, 1992)。

拉萨地块超钾质岩中 SiO_2 和主量元素之间相关性不明显 (如 SiO_2 和 Na_2O 、 K_2O 、 Al_2O_3 之间的相关性不明显)、 SiO_2 和 Ba、Sr 等 LILE 元素的负相关性、 SiO_2 与 Cr、Ni 等相容元素之间相关性不明显、以及 La 和 La/Yb 相关性 (图 9b) 等特征说明除文部火山岩之外拉萨地块超钾质岩主要是以部分熔融的方式形成的。

拉萨地块超钾质岩中明显高的 SiO_2 含量 (绝大部分质量分数 $> 57\% \sim 58\%$)、蛛网图中 Nb、Ta、Ti 的负异常、较高的 HREE 含量、高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素比值说明拉萨地块超钾质岩可能并非位于软流圈上部的壳幔边界层低度部分熔融的产物。

研究区超钾质岩有着 Nb、Ta、Ti 等负异常说明其源区与俯冲环境有着密切的关系, 而 Nd 同位素模式年龄说明它们可能是古老的俯冲作用所致。在高原南部与超钾质岩同时代的埃达克质岩沿着印度-雅鲁藏布江缝合带分布长达一千余公里, 而 Hou 等 (2004) 认为它们的形成是北向俯冲的岩石圈断离所致。因此, 本文认为拉萨地块中新世超钾质岩的形成可能与北向俯冲的印度岩石圈在印度-雅鲁藏布江缝合带附近发生断离有关是较合理的解释。

4 拉萨地块南向北地堑分布特征和形成时代

青藏高原南北向地堑是青藏高原最显著的地貌特征之一, 特别是青藏高原南部的拉萨地块。在高原南部的拉萨地块分布有 6 条近南北向的地堑系 (图 1), 从西向东依次是亚热地堑、塔口拉-隆格尔地堑、古错-文部地堑 (当若雍错-许如错地堑)、定结-申扎地堑、亚东-羊八井地堑、错那地堑。在上述 6 个地堑中, 最西侧的亚热地堑主要位于拉萨地块内, 最东端的错那地堑主要发育在喜马拉雅地块内, 而中部 4 个地堑则穿过了雅鲁藏布江缝合带, 同时切割了藏南拆离系, 达到高喜马拉雅。这些地堑的北端于班公错-怒江缝合带附近被喀喇昆仑-嘉黎走滑断裂系所截 (丁林等, 2006)。

南北向地堑的形成时代一直是人们关注的焦点, 因为它可约束高原南北向挤压向东向西伸展转变的初始时间。对于青藏高原近南北向的地堑, 地质学家首先通过卫星图像, 结合地震机制 (Cogan *et al.*, 1998) 认识了青藏高原近南北向构造的正断层性质, 认为是高原上正在活动的新构造。随后对高原中部几个裂谷的地表地质调查和地质对比研究后认为这些南北向裂谷伸展时期可能在 $5 \sim 2 \text{ Ma}$ (Armijo *et al.*, 1986; Mercier *et al.*, 1987; Yin and Harrison, 2000)。然而 Coleman 和 Hodges (1995) 利用高原南部 Thakkloa 裂谷中新生的矿物认为东西向伸展变形发生在 14 Ma 之前; 同时 Garzzone 等 (2000) 利用覆盖在该裂谷之上最古老的沉积物确定出该裂谷形成于 11 Ma 之前。而 Harri-

son 等(1995)认为羊八井裂谷形成于 8 Ma;在拉萨地块南部帕嘎村等地存在于南北向裂谷中的岩脉形成于 18~13 Ma(Yin *et al.*, 2000; Williams *et al.*, 2001),由此拉萨地块南北向裂谷形成的年龄可达 18 Ma;一个目前最老的在文部切割形成于 23 Ma 的超钾质岩的当若雍错-许如错裂谷将东西向伸展变形时间提至 23 Ma(Ding *et al.*, 2003; 丁林等, 2006)。假如上述有关与地堑相关的沉积物、新生矿物和被切割的火山岩年龄可以代表地堑形成的时间,那么高原南部拉萨地块东西向伸展变形时期为 23~8 Ma(图 10)。

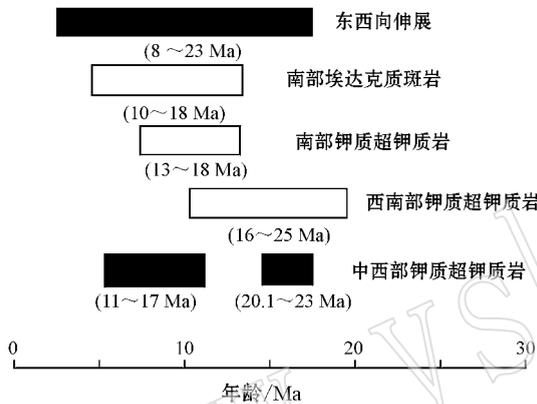


图 10 拉萨地块东西向伸展和中新生代火成岩时代分布特征

Fig. 10 Ages of Miocene volcanic rocks and WE-trending extension

数据来源: Coulon 等(1986)、Turner 等(1996)、Miller 等(1999)、Williams 等(2001)、马润则等(2002)、周肃(2002)、廖思平等(2002)、Spicer 等(2003)、Ding 等(2003)、Nomade 等(2004)、Hou 等(2004)、周肃等(2004)、陈建林等(2006)、丁林等(2006)、赵志丹等(2006, 2008)、孙晨光等(2007, 2008)、Zhao 等(2009)

Data sources: Coulon *et al.* (1986), Turner *et al.* (1996), Miller *et al.* (1999), Williams *et al.* (2001), Ma *et al.* (2002), Zhou (2002), Zhou *et al.* (2004), Liao *et al.* (2002), Spicer *et al.* (2003), Ding *et al.* (2003, 2006), Nomade *et al.* (2004), Hou *et al.* (2004), Chen *et al.* (2006); Zhao *et al.* (2006, 2008, 2009), Sun *et al.* (2007, 2008)

5 拉萨地块南北向地堑和超钾质岩的关系

拉萨地块如此众多的超钾质岩出露地点,为深入研究超钾质岩的岩石学、地球化学和成因,进而揭示拉萨地块在大陆碰撞之后的深部作用过程、深部结构以及印度板块沿着雅江缝合带向北的俯冲规模提供了可能(赵志丹等, 2003, 2006; 丁林等, 2006)。而青藏高原近南北向地堑系,不仅仅涉及青藏高原

隆升、变形问题,还与青藏高原所发生的一系列地质事件有关。因此,通过对青藏高原沿着南北向地堑分布的超钾质岩的研究,不仅有助于更好地去认识青藏高原隆升、地壳变形过程,而且也有助于理解在这些过程中发生的一系列地质、浅部和深部构造事件的响应。

拉萨地块广泛分布的南北向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最高高度之后发生重力塌陷,进而出现东西向伸展构造的主要标志(Molnar & Tapponnier, 1978),或者代表了岩石圈地幔减薄之后高原快速隆升的结果(Houseman *et al.*, 1981; England & Houseman, 1988; Blisniuk *et al.*, 2001)。尤其在后者的模型中,钾质-超钾质岩被作为是岩石圈减薄的标志,因此也成为探讨高原何时开始达到最高高度,并形成亚洲季风进而影响全球气候变化的一个主要指标(Chung *et al.*, 1998; Miller *et al.*, 1999; Williams *et al.*, 2001, 2004; 丁林等, 2006)。然而有些学者认为这些东西向伸展变形或是因印度板块岩石圈地幔向北大规模俯冲到拉萨地块底部,拖拉导致地壳上部产生的(McCaffrey and Nabelek, 1998)或者是喀喇昆仑-嘉黎走滑断裂所致(Armoji *et al.*, 1989)或是与整个东亚地区大面积的区域性应力状态有关(Yin and Harrison, 2000),而与高原的隆升并没有一定的相关性。

如果说拉萨地块南北向伸展仅仅与上地壳的变形或走滑断裂相关,而与岩石圈地幔没有一定的相关性,那么很难解释在拉萨地块西南部、南部和中西部沿着南北向地堑分布的超钾质岩,因为这些超钾质岩是与富集地幔紧密相联系的(Turner *et al.*, 1996; 丁林等, 2006),并且这些超钾质火山岩喷发集中的时期是 18~13 Ma(图 10),这与拉萨地块南北向地堑形成的时间存在着明显的耦合关系。

丁林等(2006)通过研究拉萨地块查孜、麦嘎和仪仁等地的超钾质岩之后认为,和这些超钾质岩共生的南北向地堑系的切割深度可能到达岩石圈地幔,贺日政(2003)认为在拉萨地块的地堑系中只有谷露-尼木地堑可能穿越过地幔。而且 Chen 和 Kao (1996)等也认为岩石圈地幔与在青藏高原和喜马拉雅下面的东西向扩张有关。结合其他地区超钾质岩的资料笔者认为这些地堑的切割深度至少达到中下地壳或岩石圈地幔。

最近的一些研究表明,塔口拉和乌郁盆地在 15

~14 Ma 以前就达到了目前的高度(Carmala *et al.*, 2000; Widdowson *et al.*, 2003), 而伦坡拉和尼玛盆地的结果指示, 拉萨地块北部在 35 Ma 或 26 Ma 以前就与现在的高度一致(Rowley and Courie, 2006), 因而在地堑活动之前拉萨地块可能已经到达了目前的高度。据此丁林等(2006)认为在地堑系出现之前(大于 23 Ma), 青藏高原在周边印度板块、塔里木板块和华南板块的夹持下, 仅靠重力势能还不至于使岩石圈发生广泛伸展作用。虽然青藏高原抬升和伸展变形之间的关系存在着争论, 但在 Thakkhola 地堑之中的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据却和这个假说是一致的, 它们显示出在伸展变形开始之前已经达到了一定的高度(Garzione *et al.*, 2000)。同时拉萨地块西部喀喇崑仑断层开始活动于 17 Ma(Lee *et al.*, 2003), 东部的嘉黎断层带在 23~21 Ma 从左旋转变为右旋走滑以及藏东南的红河哀牢山断裂带在 20~17 Ma 从左旋剪切转变为右旋剪切(Leloup *et al.*, 1993), 表明在 20 ± 3 Ma 左右青藏高原的构造应力场发生了重大的转变, 即南北向挤压被东西向伸展所替代。因此本文认为可能在中新世初期北向俯冲的印度岩石圈地幔在拉萨地块底部沿着印度-雅鲁藏布江缝合带附近发生断离, 使其下部的软流圈物质通过板片窗上升和侧向迁移从而引起拉萨地块的快速抬升以及加厚地壳的东向迁移, 进而导致拉萨地块发生东西向伸展变形(23~8 Ma)和超钾质岩浆的爆发(25~10 Ma)。藏南南北向地堑系一直往南延伸到高喜马拉雅带, 并切穿藏南拆离系也可能是青藏高原深部构造应力场转变的表现(李亚林等, 2005), 同时深部热动力学机制的转变也可能促进了藏南中新世花岗岩的形成。而在雅鲁藏布江缝合带以南的渐新世花岗岩可能与藏南拆离系的早期活动有关(Zhang *et al.*, 2004; 曾令森等, 2009; 高丽娥等, 2009)。

6 成因讨论

在印度-欧亚大陆板块碰撞并拼合之间及之后, 青藏高原大约在中新世初期进入伸展变形阶段(Coleman and Hodges, 1995; Blisniuk *et al.*, 2001; Hou *et al.*, 2004)。在这种构造背景下, 高原南部拉萨地块形成了许多近南北向地堑(或裂谷)(Coleman and Hodges, 1995; Blisniuk *et al.*, 2001; Williams *et al.*, 2001), 同时沿着这些南北向地堑两侧广泛分布有 25~10 Ma 的超钾质、钾质、钙碱性埃达克质岩浆活动(Coulon *et al.*, 1986; Turner *et al.*, 1993; Miller *et al.*, 1999; Williams *et al.*, 2001; Ding *et al.*, 2003; Chung *et al.*, 2003, 2005; Hou *et al.*, 2004; 丁林等, 2006)。这两者之间在形成时间和空间上的耦合很可能与高原深部构造的突然改变有关。

地球物理研究表明印度大陆板块已经俯冲到班公错-怒江缝合带附近(Zhao *et al.*, 2001; Tilmann *et al.*, 2003), 在印度大陆板块持续北移的过程中导致了青藏高原的整体抬升和高原发生东西向伸展变形, 从而在高原南部产生了许多南北向地堑。研究区超钾质岩和南北向地堑在分布空间和形成时代上有着明显耦合性, 结合形成于 18~10 Ma 沿着印度-雅鲁藏布江缝合带分布的长达 1 500 km 埃达克质斑岩, 笔者提出在中新世初期北向俯冲的印度岩石圈可能在印度-雅鲁藏布江缝合带附近发生断离, 引起印度板块下部软流圈物质通过板片窗上升直接与拉萨地块腹地和北部的岩石圈根部相接触(Peter *et al.*, 2002)。深部软流圈的上涌和底侵作用导致拉萨地块快速抬升和加厚, 这样在软流圈的底侵和侧向迁移以及因地壳加厚而产生的重力流等因素的作用下使拉萨地块在中新世发生区域性伸展活动, 形成高原南部广泛分布的南北向地堑(裂谷)。软流圈的上升因其所携带的大量的热和南北向地堑(裂谷)的切割深度可能到达岩石圈地幔或下地壳深部, 从而发生减压作用使得因古俯冲作用而形成的富含金云母的脉状富集地幔源区发生部分熔融, 形成研究区超钾质岩的母岩浆(超钾质岩浆可能在源区或上升过程中发生过结晶分异), 它们沿着构造薄弱带(南北向地堑或裂谷)上升形成拉萨地块超钾质岩。

7 结论

7 结论

(1) 拉萨地块超钾质岩属于钾镁煌斑岩类, 它们可能起源于与古俯冲作用相联系的富含金云母的富集地幔源区。

(2) 拉萨地块超钾质火山岩和南北向地堑(裂谷)在空间上和形成时代上均有着明显的耦合性, 两者的产生可能与中新世早期北向俯冲的印度岩石圈地幔发生断离和由此而引发的东西向构造伸展体制有关。

References

- Armijo R, Tapponnier P, Mercier J L, *et al.* 1986. Quaternary extension in Southern Tibet: field observations and tectonic implications [J]. *Journal of Geophysical Research*, 91(B14): 13 803~13 872.
- Armijo R, Tapponnier P and Tonglin H. 1989. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research*, 94: 2 787~2 838.
- Arnaud N O, Vidal P, Tapponnier P, *et al.* 1992. The high K₂O volcanism of northwestern Tibet: geochemistry and tectonic implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 111: 351~367.
- Bergman S C. 1987. Lamproites and other Potassium Rich Igneous Rocks: a Review of their Occurrence, Mineralogy and Geochemistry, Alkaline Igneous Rocks [M]. London: The Geological Society by Blackwell Scientific Publications, 103~190.
- Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, *et al.* 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago [J]. *Nature*, 412: 628~632.
- Carmala N G, Dettman D L, Quade J, *et al.* 2000. High times on the Tibetan Plateau: Paleoelevation of the Thakkhola graben, Nepal [J]. *Geology*, 28: 339~342.
- Chen Jianlin, Xu Jifeng, Kang Zhiqiang, *et al.* 2006. Magmatic source and origin of the late Miocene Bugasi Group volcanic rocks in the north-central of Gangdese, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 585~594 (in Chinese with English abstract).
- Chen W P and Kao H. 1996. Seismotectonics of Asia: some recent progress [A]. A Yin and T M Harrison. *The Tectonic Evolution of Asia* [C]. Cambridge University Press, 37~52.
- Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, *et al.* 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth Science Reviews*, 68: 173~196.
- Chung S L, Liu D, Ji J, *et al.* 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet [J]. *Geology*, 31(11): 1 021~1 024.
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, *et al.* 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago [J]. *Nature*, 394: 769~773.
- Cogan M J, Nelson K D, Kidd W S F, *et al.* 1998. Shallow structure of the Yadong-Gulu rift, southern Tibet, from refraction analysis of Project INDEPTH common midpoint data [J]. *Tectonics*, 17: 46~61.
- Coleman M and Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Ma ago from a new minimum age for east-west extension [J]. *Nature*, 374: 49~52.
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C, *et al.* 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ³⁹Ar/⁴⁰Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 79: 281~302.
- Dewey J F. 1988. Extensional collapse of orogens [J]. *Tectonics*, 6: 1 123~1 139.
- Ding L, Kapp P, Zhong D L, *et al.* 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction [J]. *Journal of Petrology*, 44: 1 833~1 865.
- Ding Lin, Yue Yahui, Cai Fulong, *et al.* 2006. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of the high-Mg ultrapotassic rocks in the Lhasa Block of Tibet: Implications for the onset time and depth of a NS-striking rift system [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1 252~1 261 (in Chinese with English abstract).
- Dong Guochen. 2002. Linzizong Volcanic Rocks in Linzhou Volcanic Basin, Tibet: Implications for India-Eurasia Collision Process [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese).
- England P & Houseman G. 1988. The mechanics of the Tibetan plateau [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 326: 301~320.
- Foley S. 1992a. Petrological characterization of the source components of potassic magmas: geochemical and experimental constraints [J]. *Lithos*, 28(3~6): 187~204.
- Foley S. 1992b. Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas [J]. *Lithos*, 28(3~6): 435~453.
- Foley S F, Venturelli G, Green D H, *et al.* 1987. The ultrapotassic rocks: Characteristics, classification, and constraints for petrogenetic model [J]. *Earth Science Reviews*, 24(2): 81~134.
- Furman T and Graham D. 1999. Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: Geochemical evidence from the Kivu volcanic province [J]. *Lithos*, 48: 237~262.
- Gao Li'e, Zeng Lingsen, Liu Jing, *et al.* 2009. Early Oligocene Na-rich peraluminous leucogranites in the Yardoi gneiss dome southern Tibet: Formation mechanism and tectonic implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2 289~2 302 (in Chinese with English abstract).
- Garzzone C N, Dettman D L, Quade J, *et al.* 2000. High times on the Tibetan Plateau: Paleoelevation of the Thakkhola graben, Nepal [J]. *Geology*, 28: 339~342.
- Guo Z, Wilson M, Liu J, *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 [J]. *Journal of Petrology*, 47(6): 1 177~1 220.
- Harris N B W, Xu ronghua, Lewis C L, *et al.* 1988. Isotope geochemistry of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud [M]. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, 327: 263~286.
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, *et al.* 1995. Activation of the Nyainqentanghla Shear Zone: Implications for uplift of the southern Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 14: 658~676.
- He Rizheng. 2003. Lithospheric structure of near NS striking rifts in Tibetan Plateau and Its geodynamical process [D]. Beijing, Chinese Beijing: Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, *et al.* 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet

- [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220 : 139~155.
- Houseman G A, McKenzie D P & Molnar P. 1981. Convective instability of a thickened boundary layer and its relevance for the thermal evolution of continental convergent belts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 86(B7): 6 115~6 132.
- Jiang Yuansheng, Zhou Youyun, Wang Guangming, et al. 2003. Characteristics and geological significance of Quaternary volcanic rocks in the central segment of the Gangdise area[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(1): 16~20 (in Chinese with English abstract).
- Lai S C, Liu C H and Yi H S. 2003. Geochemistry and Petrogenesis of Cenozoic Andesite-Dacite Association from the Hoh Xil Region, Tibetan Plateau[J]. *International Geology Review*, 45 : 998~1 019.
- LeBas M J, Maitre R W L, Streckeisen A, et al. 1986. IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 27 : 745~750.
- Lee H Y, Chung S L, Wang J R, et al. 2003. Miocene Jiali faulting and its implications for Tibetan tectonic evolution[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 205 : 185~194.
- Leloup P H, Harrison T M, Ryerson F J, et al. 1993. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike slip shearzone, Diancangshan, Yunnan[J]. *J. Geophys. Res.*, 98 (B4): 6 715~6 743.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Wei Gangjian, et al. 2002. Geochemistry and Sr-Nd isotopes of Cenozoic ultrapotassic lamprophyres in western Yunnan: constraints on the composition of sub-continental lithospheric mantle[J]. *Geochimica*, 3(1): 26~34 (in Chinese with English abstract).
- Li Yalin, Wang Chengshan, Yi Haisheng, et al. 2005. A discussion on several problems regarding to the Cenozoic grabens in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Review*, 51(5): 493~501 (in Chinese with English abstract).
- Liao Siping, Chen Zhenhua, Luo Xiaochuan, et al. 2002. Discovery of leucite phonolite in the Tangra Yumco area Tibet and its geological significance[J]. *Geol. Bull. China*, 21 : 735~738 (in Chinese with English abstract).
- Ma Runze, Liu Dengzhong, Tao Xiaofeng, et al. 2002. Discovery of Tertiary potassium-rich magmatic rocks in the Coqen area, Tibet[J]. *Geol. Bull. China*, 21 : 728~731 (in Chinese with English abstract).
- Massonne H J. 1992. Evidence for lower temperature ultrapotassic siliceous fluids in subduction zone environment from experiments in the system $K_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ KMASH[J]. *Lithos*, 28 : 421~434.
- McCaffrey R and Nabelek J. 1998. Role of oblique convergence in the active deformation of the Himalayas and southern Tibet plateau[J]. *Geology*, 26(8): 691~694.
- Meen J K. 1990. Elevation of potassium content of basaltic magma by fractional crystallization: The effect of pressure[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104 : 309~331.
- Mercier J L, Armijo R, Tapponnier P, et al. 1987. Change from Tertiary compression to Quaternary extension in southern Tibet during the India-Asia collision[J]. *Tectonics*, 6 : 275~304.
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, et al. 1999. Post-collisional potassic and ultra-potassic magmatism in SW Tibet: geochemical, Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 83 : 5 361~5 375.
- Mo X, Dong G, Zhao Z, et al. 2005. Timing of magma mixing in the Gangdise magmatic belt during the India-Asia collision: Zircon SHRIMP U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 66~76.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, et al. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10 : 135~148 (in Chinese with English abstract).
- Molnar P & Tapponnier P. 1978. Active tectonics of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 83(B11): 5 361~5 375.
- Nelson D R. 1992. Isotopic characteristics of potassic rocks: evidence for the involvement of subducted sediments in magma genesis[J]. *Lithos*, 28 : 403~420.
- Nelson D R, McCulloch M T and Sun S S. 1986. The origins of ultra-potassic rocks as inferred from Sr, Nd and Pb isotopes[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 50 : 231~235.
- Nomade S, Renne P R, Mo X X, et al. 2004. Miocene volcanism in the Lhasa block, Tibet: spatial trends and geodynamic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 221 : 227~243.
- Pearce J A and Mei H. 1988. Volcanic rocks of the 1985 Tibet Geotransverse: Lhasa to Golmud. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*[J]. Series A, 327 : 169~201.
- Peter D G, Delores R M and George Z. 2002. Implications of shortening in the Himalaya fold-thrust belt for uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 21(6): 1~25.
- Rowley D B and Courie B S. 2006. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet[J]. *Nature*, 439 : 677~381.
- Spicer R A, Harris N B W, Widdowson M, et al. 2003. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years[J]. *Nature*, 421 : 622~624.
- Sun Chenguang, Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, et al. 2007. Geochemistry and origin of the Miocene Sailipu ultrapotassic rocks on western Lhasa block, Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 : 2 715~2 726 (in Chinese with English abstract).
- Sun Chenguang, Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, et al. 2008. Enriched mantle source and petrogenesis of Sailipu ultrapotassic rocks in southwestern Tibetan Plateau: constraints from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24 : 249~264 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for the mantle composition and processes, *Magmatism in Ocean Basins*[J]. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 313~345.
- Tilmann F, Ni J and Team I I S. 2003. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet[J]. *Science*, 300 : 1 424~1 427.

- Turner S, Arnaud N O, Liu J, *et al.* 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau, implications for convective thinning of the lithosphere and source of ocean island basalts[J]. *Journal of Petrology*, 37: 45~71.
- Turner S, Hawkesworth C, Liu J, *et al.* 1993. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks[J]. *Nature*, 364: 50~53.
- Wang Baodi, Xu Jifeng, Zhang Xingguo, *et al.* 2008. Petrogenesis of Miocene volcanic rocks in the Sailipu area, western Tibetan Plateau: Geochemical and Sr-Nd isotopic constrains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 265~278(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, McDeermott F, Xu J F, *et al.* 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting[J]. *Geology*, 33: 465~468.
- Widdowson N B, Herman A B, Guo S, *et al.* 2003. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years[J]. *Nature*, 421(6 923): 622~624.
- Williams H M, Turner S P, Pearce J A, *et al.* 2004. Nature of the Source Regions for Post-collisional, Potassic Magmatism in Southern and Northern Tibet from Geochemical Variations and Inverse Trace Element Modelling[J]. *Journal of Petrology*, 45: 555~607.
- Williams H, Turner S, Kelley S, *et al.* 2001. Age and composition of dikes in southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to post-collisional volcanism[J]. *Geology*, 29: 339~342.
- Xia Ping and Xu Yigang. 2005. Domains and enrichment mechanism of the lithospheric mantle in western Yunnan: a comparative study on two types of Cenozoic ultrapotassic rocks[J]. *Sci. China D*, 48: 326~337.
- Xu Y G, Menzies M A, Thirlwall M F, *et al.* 2001. Exotic lithosphere mantle beneath the western Yangtze craton: Petrogenetic links to Tibet using highly magnesian ultrapotassic rock[J]. *Geology*, 29: 863~866.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211~280.
- Zeng Lingsen, Liu Jing, Gao Li'e, *et al.* 2009. Early Oligocene anatexis in the Yardois gneiss dome, southern Tibet and geological implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 104~112(in Chinese with English abstract).
- Zhang Huihua, He Huaiyu, Wang Jianghai, *et al.* 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology and geochemistry of high-K volcanic rocks in the Mangkang Basin, Tibet[J]. *Science in China(D)*, 48(1): 1~12(in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Harris N, Parrish R, *et al.* 2004. Causes and consequences of protracted melting of the mid-crust exposed in the North Himalayan antiform[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 228: 195~212.
- Zhang Shuangquan. 1996. Mesozoic and Cenozoic volcanisms in central Gangdese: Implications for lithosphere evolution of the Tibet Plateau[D]. Beijing: China University of Geoscience(in Chinese).
- Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Li Xianhua, *et al.* 2000. Isotopic characteristics of shoshonitic rocks in eastern Qinghai-Tibet Plateau: petrogenesis and its tectonic implication[J]. *Sci. China(D)*, 30: 493~498.
- Zhao W, Mechie J, Brown L D, *et al.* 2001. Crustal structure of central Tibet as derived from project INDEPTH wide-angle seismic data [J]. *Geophys. J. Int.*, 145: 486~498.
- Zhao Z, Mo X X, Dilek Y, *et al.* 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[J]. *Lithos*, doi:10.1016/j.lithos. 2009. 02.004.
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, *et al.* 2003. Subduction of India beneath Tibet: magmatism evidence[J]. *Earth Science Frontiers*, 10: 149~157(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Nomade S, *et al.* 2006. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau: Spatial and temporal distribution and its 'implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 787~794(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Sun Chenguan, *et al.* 2008. Mantle xenoliths in southern Tibet: geochemistry and constraints for the nature of the mantle[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24: 193~202(in Chinese with English abstract).
- Zhou Su. 2002. Study on the geochronology of pivotal regions of Gangdese magmatic and Yarlung Zangbo ophiolite belts, Tibet[D]. Beijing, China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, *et al.* 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin(D)*, 49: 1 970~1 979(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈建林, 许继峰, 康志强, 等. 2006. 青藏高原西部措勤县中新世布嘎组钾质火山岩成因[J]. *岩石学报*, 22(3): 585~594.
- 丁林, 岳雅慧, 蔡福龙, 等. 2006. 西藏拉萨地块高镁超钾质火山岩及对南北向裂谷形成时间和切割深度的制约[J]. *地质学报*, 80(9): 1 252~1 261.
- 董国臣. 2002. 西藏林周盆地林子宗火山岩及其反演的印度-亚欧大陆碰撞过程[D]. 北京: 中国地质大学.
- 高丽娥, 曾令森, 刘静, 等. 2009. 藏南也拉香波早渐新世富钠过铝质淡色花岗岩的成因机制及其构造意义[J]. *岩石学报*, 25(9): 2 289~2 302.
- 贺日政. 2003. 青藏高原近南北向地堑的岩石圈结构及动力学过程[D]. 中国地质科学院, 1~117.
- 江元生, 周幼云, 王光明, 等. 2003. 西藏冈底斯山中段第四纪火山岩特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 22(1): 16~20.
- 李献华, 周汉文, 韦刚建, 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[J]. *地球化学*, 31(1): 26~34.

- 李亚林,王成善,伊海生,等. 2005. 青藏高原新生代地堑构造研究中的几个问题的讨论[J]. 地质论评, 51(5):493~501.
- 廖思平,陈振华,罗小川,等. 2002. 西藏当若雍错地区白榴石响岩的发现及地质意义[J]. 地质通报, 21(11):735~738.
- 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[J]. 地质通报, 21(11):728~721.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3):135~148.
- 孙晨光,赵志丹,莫宣学,等. 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:铅铀 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 24(2):249~264.
- 孙晨光,赵志丹,莫宣学,等. 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[J]. 岩石学报, 11:2715~2726.
- 王保弟,许继峰,张兴国,等. 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[J]. 岩石学报, 24(2):26~278.
- 夏萍,徐义刚. 2004. 滇西岩石圈地幔分区和富集机制:新生代两类超钾质火山岩的对比和研究[J]. 科学通报(D辑), 34(12):1118~1128.
- 曾令森,刘静,高丽娥,等. 2009. 藏南也拉香波穹隆早渐新世地壳深熔作用及其地质意义[J]. 科学通报, 54(3):373~381.
- 张会化,贺怀宇,王江海,等. 2004. 西藏芒康盆地内高钾火山岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学和地球化学研究[J]. 科学通报(D辑), 34(1):24~34.
- 张双全. 1996. 西藏冈底斯中段拉萨地块中、新生代火山岩特征及反演的青藏高原岩石圈演化的深部信息[D]. 北京:中国地质大学.
- 张玉泉,谢应雯,李献华,等. 2000. 青藏高原东部碱玄岩系岩浆岩同位素特征:岩石成因及其构造意义[J]. 科学通报(D辑), 30(5):493~498.
- 赵志丹,莫宣学, Nomade S, 等. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后物质-超钾质岩石的时空分布与意义[J]. 岩石学报, 22(4):787~794.
- 赵志丹,莫宣学,孙晨光,等. 2008. 青藏高原南部地幔包体的发现及其意义[J]. 岩石学报, 24(2):193~202.
- 赵志丹,莫宣学,罗照华,等. 2003. 印度-亚洲俯冲带结构-岩浆作用证据[J]. 地学前缘, 10(3):149~157.
- 周肃. 2002. 西藏冈底斯岩浆岩带及雅鲁藏布蛇绿岩带关键地段同位素年代学研究[D]. 北京:中国地质大学, 1~69.
- 周肃,莫宣学,董国臣,等. 2004. 西藏林周盆地林子宗火山岩⁴⁰Ar-³⁹Ar年代格架[J]. 科学通报(D辑), 49(20):2095~2093.