

# 中国新生代火山岩岩石学、 地球化学与年代学研究进展

张招崇, 骆文娟

中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

**摘要:** 回顾了我国近五年来在新生代火山岩的岩石学、地球化学与年代学方面所取得的主要进展。重点总结了我国东部与青藏高原的新生代火山岩的时空分布特征, 包括年代学数据成果和岩石学资料; 回顾了我国东部与青藏高原新生代火山岩的岩石成因和深部动力学过程研究, 主要介绍了目前对于长白山天池火山、我国东部新生代玄武岩、青藏高原的地球动力学过程、钾质-超钾质火山岩、高镁钾质火山岩等研究已获得的主要成果和认识; 提出了我国新生代火山岩研究中存在的问题以及进一步工作的建议。

**关键词:** 新生代火山岩; 火山岩时空分布; 火山岩成因; 深部地球动力学背景

**中图分类号:** P588.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-2802(2011)04-0353-08

## Advances in Petrology, Geochemistry and Geochronology of Cenozoic Volcanic Rocks in China

ZHANG Zhao-chong, LUO Wen-juan

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, University of Geosciences, Beijing, 100083, China

**Abstract:** This paper summarizes main advances in the recent five years in the fields of petrology, geochemistry and geochronology on the Cenozoic volcanic rocks of China. The spatial and temporal distributions of Cenozoic volcanic rocks in eastern China and Tibetan Plateau are presented, including new geochronological and petrological data. Petrogenesis of the Cenozoic volcanic rocks and geodynamic processes in Eastern China and Tibetan Plateau are reviewed, involving, especially, the studies in the Tianchi volcano, Cenozoic basalts in the eastern China, geodynamic processes in the Tibetan Plateau, potassium-ultrapotassic volcanic rock, high-Mg potassic volcanic rocks. In the end, some problems in future studies on the Cenozoic volcanic rocks are put forward and our suggestions are made.

**Key words:** Cenozoic volcanic rocks; spatial and temporal distribution; petrogenesis; geodynamic setting

火山岩是深入地球内部的“岩石探针”, 是窥视地球内部的窗口, 通过对火山岩的年代学、岩石学和地球化学的研究, 可以追踪和揭示地球内部物质组成及其演化过程。近年来, 随着测试技术水平的提高, 在前人工作基础上, 开展了大量的年代学和地球化学研究, 获得了大量的高质量的数据。与此同时, 随着石油钻探的进行, 在一些覆盖区和浅海地区也获得了很多新的资料<sup>[1~4]</sup>, 为深入研究岩石成因和深部地球动力学背景奠定了重要基础, 取得了很多新的认识。本文主要综述了近五年来我国在新生代火山岩方面取得的主要成果, 并就未来的研究方向

提出自己的一些见解。

## 1 新生代火山岩研究的进展

### 1.1 火山岩的时空分布

通过近年来的地质调查和大量专题研究, 已经初步查明我国新生代火山岩的时空分布规律。新生代火山岩主要分布在中国东部、青藏高原及其邻区, 少量分布在中亚造山带, 如阿尔泰山的哈拉乔拉<sup>[5]</sup>、乌恰县的托云盆地<sup>[6]</sup>以及塔里木盆地内部的西克尔<sup>[7]</sup>。除台湾、南海及西藏部分为海相外, 其余均为陆相火山岩。按时代可划分为古近纪、中新世-上新

收稿日期: 2011-01-23 收到, 03-25 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40925006); 教育部“成矿动力学创新引智基地”计划资助项目

第一作者简介: 张招崇(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩浆岩岩石学及相关金属矿床研究。E-mail: zczhang@cugb.edu.cn.

世和第四纪。不同地区可进一步划分为几个亚期。

近五年来的一个显著特点是锆石 U-Pb 法(如 SHRIMP 和 LA-ICP-MS)测试技术在我国的大量应用,获得了一大批高质量的年代学数据,总体上,由于新生代火山岩大多是玄武岩,锆石很难获得,所以该方法的应用还相对较少,大多还是 Ar-Ar 和 K-Ar 法<sup>[8~16]</sup>。但有少数例外:新疆乌恰县托云地区的一个橄榄玄武岩中获得了 SHRIMP U-Pb 年龄为  $48.1 \pm 1.6 \text{ Ma}$ <sup>[6]</sup>;西南天山的皮羌盆地玄武岩中也利用该方法获得的玄武岩年龄为  $46 \text{ Ma}$ <sup>[17]</sup>,这与 Ar-Ar 法年龄非常接近,但年龄跨度很大。在西昆仑康西瓦碱性玄武岩中获得了最年轻的 SHRIMP U-Pb 年龄为  $3.82 \pm 0.08 \text{ Ma}$ <sup>[18]</sup>。但是对于这些 SiO<sub>2</sub> 不饱和的基性岩浆如何能结晶出锆石的原因尚不清楚。此外,U-Th 非平衡系测年技术也开始在全新世火山岩中得到应用<sup>[19]</sup>。

中国东部新生代火山岩总体研究程度较高,在时空分布方面,主要获得了一批新的高质量的同位素年龄数据,如利用 K-Ar 方法系统测定了辽河盆地东部凹陷岩新生代火山活动具有多期的特点<sup>[12]</sup>,始于 65 Ma,并在 42~38 Ma 和 32~25 Ma 经历两个活动高峰期,表明其活动时间和高峰与中国东部区域构造活动的裂陷期、拉分伸展期和强烈走滑拉分期相互一致。张文慧等<sup>[20]</sup>对内蒙古集宁地区四个新生代玄武岩剖面进行了 K-Ar 年代学研究结果表明,集宁玄武岩的主要喷发期在晚渐新世至中新世,可分为三个喷发旋迴:大约 33 Ma、22.8~22.1 Ma 和 12.2~9.4 Ma。对于全新世火山岩,用于测年的方法主要为热释光、光释光以及 <sup>14</sup>C 等方法,不同方法的结合为查明活动火山的活动历史奠定了基础。长白山天池是我国东部经济区一个最具危险性的火山,樊祺诚等<sup>[21~23]</sup>在野外观察的基础上,通过不同方法恢复了该火山活动的历史:早更新世早期粗面玄武岩造盾(2 Ma 前)、早更新世晚期粗面岩造锥(约 1 Ma)和全新世碱流质岩浆爆破喷发。此外,新的年代学数据还表明,除我国东北地区外,北部湾周边的雷州半岛、海南岛、涠洲岛也存在一些年轻火山,如樊祺诚等<sup>[24,25]</sup>对火山岩中砂岩捕虏体的热释光、光释光年龄和射气岩浆激浪堆积中贝壳 <sup>14</sup>C 年龄测定,确定了琼北雷虎岭、马鞍岭火山喷发为距今约 10 ka 左右的全新世,涠洲岛火山最新喷发距今约 30 ka 左右。雷虎岭和马鞍岭火山岩分属橄榄拉斑玄武岩和石英拉斑玄武岩;涠洲岛早晚两期火山岩分别为碱性橄榄玄武岩和碧玄岩。

青藏高原作为大陆动力学的天然实验室一直是

国际地学研究的热点地区,但由于交通条件差,很多是无入区,极大地限制了对该地区地质特征的研究。然而,近年来随着地质大调查的全面开展,已获得了大量的第一手资料,基本查明了该地区火山岩的时空分布特征。已有研究表明,青藏高原新生代火山岩有明显的时空分布规律:冈底斯(拉萨地块)主要为林子宗群火山岩,分布面积最广,为中钾-高钾钙碱性系列,岩石组合为玄武岩-(粗面)安山岩-粗面岩-英安岩-流纹岩<sup>[26]</sup>,其中零星分布着钾质火山岩,岩石组合为石榴石响岩-粗面岩,其时代为 65~40 Ma<sup>[27]</sup>。始于冈底斯南部的同碰撞林子宗火山活动在 65 Ma 左右,标志印度-亚洲大陆碰撞的开始。羌塘火山岩区可以进一步划分为西、南和北羌塘,其中西羌塘主要为钠质基性火山岩,岩石组合为粗面玄武岩-(粗面)安山岩,属中钾、高钾钙碱性系列和橄榄粗玄岩系列,火山活动时代为大约为 60~46 Ma,是藏北新生代火山岩最早的火山活动显示;南羌塘岩石组合极为复杂,鱼鳞山主要由石榴斑岩、响岩、霓石粗面岩、霓霞粗面岩、黝方石粗面岩等组成,纳丁错岩区主要为安山岩、玄武岩、安粗岩、流纹岩、英安岩以及火山碎屑岩,拉嘎拉主要为含橄榄石斑晶的玄武岩,走构油茶沟主要为高钾钙碱性安山岩-粗面岩<sup>[9]</sup>;北羌塘火山岩岩石组合有碧玄岩-碱玄岩-响岩、安山岩-粗面岩-英安岩-流纹岩,主要属高钾钙碱性系列和橄榄粗玄岩系列。北羌塘从东向西,火山活动时代逐渐变新,且至少可以分为三期:始新世中晚期(40~35 Ma)、渐新世晚期(25 Ma 左右)、中新世中晚期(10 Ma 左右),火山峰期活动的时间间隔在 10 Ma 左右,其强度从早到晚逐渐减弱。西昆仑火山岩岩石组合为玄武质粗面安山岩-粗面安山岩-粗面岩-流纹岩,部分为碱玄岩-响岩组合,属高钾钙碱性系列和橄榄粗玄岩系列<sup>[28]</sup>,其活动时代主要为新近纪。可可西里地区火山岩岩石组合为粗面安山岩-粗面岩-流纹岩,鲸鱼湖出现了响岩质碱玄岩,主要属橄榄粗玄岩系列,研究发现该地区火山活动具有东西两端老而中部新的特点。总体上,新生代火山岩主要呈东西向展布,并且大体是沿着各个缝合带分布。从南到北,从东向西,青藏高原新生代火山活动出现由老到新的变化趋势。

## 1.2 火山岩成因和深部地球动力学过程

近年来,除了年代学测试技术的大大改善外,全岩微量元素分析技术的精度、微区分析技术以及除传统同位素外的其他同位素分析技术(如 Re-Os 同位素系、惰性气体同位素以及 U-Th 非平衡系)在火山岩成因研究中也得到广泛应用,这些新的技术方

法很大程度地提高了研究的深度,为我们更好地理解岩石成因提供了重要的技术支撑。

尽管中国东部新生代火山岩的研究程度较高,但近年来又涌现出很多新的成果。长白山天池火山是我国最年轻的火山之一,其岩石成因和喷发机制一直是大家关注的焦点。樊祺诚等<sup>[22,23]</sup>和陈晓雨等<sup>[29]</sup>通过详细的野外观察和岩相学研究,提出了分离结晶作用是产生不同成分岩浆的主要原因,并同时发现了岩浆混合作用的岩相学证据,从而提出岩浆的周期性补充、分离结晶和混合是产生双峰式火山岩的原因,同时也是触发长白山天池火山的重要机制,并认为西太平洋板块俯冲—东北亚大陆弧后引张是长白山火山活动的动力学机制。Zou等<sup>[30]</sup>在此基础上利用U-Th非平衡系估算出从低SiO<sub>2</sub>(47.5%)的玄武岩演化到高SiO<sub>2</sub>(50.4%)的玄武岩时间大约需要1万年,而从粗面岩演化到流纹岩则不到1万年。其他学者也认为长白山附近地区的新生代火山岩的构造背景也与太平洋板块的俯冲有关<sup>[29,31~33]</sup>。相比之下,对于中国东部其他地区的新生代玄武岩,目前除了少数学者认为海南岛等地可能和地幔柱有关外<sup>[34]</sup>,大都认为其构造背景与太平洋板块俯冲无关,而是形成于裂谷环境,与软流圈上涌导致的岩石圈—软流圈相互作用有关<sup>[3,35~43]</sup>,而不是过去认为的与地幔柱有关,这不仅为最新的地球物理资料所证实,同时也相对低的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He(5~7 Ra<sup>[44]</sup>)数据的确证。对于玄武岩的成因,大多数学者都认为,虽然地壳物质的混染对岩浆的成分有一定的影响,但不是主要的,岩浆的成分主要受源区的成分控制,而且软流圈—岩石圈的相互作用导致了源区的不均一性,并且一般认为碱性玄武岩起源于深部软流圈地幔的低程度熔融,而拉斑玄武岩则是岩石圈地幔或有部分软流圈地幔的加入在浅部相对高程度的熔融的结果<sup>[36,44]</sup>。然而,对于碱性岩,很多学者认为,地幔源区在熔融之前发生过交代作用<sup>[45]</sup>。但是对于一些过碱性岩浆的成因还存在着一些不同的认识,如山东无棣的大山更新世霞石岩,有学者认为地幔源区中非橄榄岩组分如辉石岩或角闪岩的存在时产生过碱性岩石的主要因素<sup>[46]</sup>,但也有人认为源区中地幔橄榄岩中碳酸岩组分的存在则是产生过碱性岩的根本原因<sup>[47]</sup>。总之,对于中国东部新生代火山岩的成因和构造背景的认识,虽然也存在着一些不同的认识,但总的观点是一致的。

尽管我国西部的新生代火山岩研究程度总体上不及东部地区,但是最近几年也积累了大量的资料,除年龄外,还获得了大量高质量的地球化学数据,这

为解释岩石成因提供了重要信息。

上世纪70年代以来,虽然对青藏高原的结构构造、变形特征和隆升机制等方面取得了新的进展,提出了多种大陆动力学模型,然而,仍有大量涉及青藏高原形成演化的重要科学问题有待深入研究,如:陆—陆碰撞的时限、详细碰撞过程与机制、NS向裂谷系统成因、地壳加厚的时间与机制等。近年来对于新生代火山岩的研究为解决这些问题提供了重要的约束。如侯增谦等<sup>[48,49]</sup>通过973项目的实施,提出了碰撞造山三阶段演化模式(主碰撞汇聚、晚碰撞转换和后碰撞伸展),深化了对大陆碰撞造山过程与机制的理解。他们的基本观点是:1)主碰撞汇聚:印度-亚洲大陆主碰撞汇聚始于65 Ma延续至41 Ma,导致地壳增厚,主碰撞岩浆作用主要集中于亚洲大陆南缘—冈底斯带,形成了大面积分布的巨厚(5000 m)的林子宗火山岩系(64~43 Ma),反映主碰撞带深部相继发生大陆板片俯冲(65~52 Ma)→板片分离(52~42 Ma)→板片低角度俯冲(<40 Ma)等重要过程。2)晚碰撞转换:发生于印度与亚洲大陆的持续汇聚和南北向挤压背景之下,以沿巨型剪切带的块体间水平相对运动为特征,晚碰撞期陆内俯冲可能诱发了地幔物质侧向流动和深部软流圈上涌,形成钾质-超钾质岩浆岩带,岩浆活动高峰集中于(35±5) Ma。3)后碰撞伸展:后碰撞构造-岩浆活动主体发育于NS向挤压的动力背景之下,早期阶段主要发生下地壳流动与上地壳缩短(>18 Ma):下地壳塑性流动并向南挤出;晚期阶段主要发生地壳伸展与裂陷(<18 Ma):垂直碰撞带的EW向伸展,形成一系列横切青藏高原的NS向正断层系统(14~10 Ma)及其围陷的裂谷系和裂陷盆地。后碰撞岩浆作用以发育与俯冲板块撕裂和岩石圈减薄有关的伸展岩浆组合为特征,主要形成钾质-超钾质火山岩和富钾埃达克质岩<sup>[50]</sup>。对于火山岩的成因也有了新的认识。对于青藏高原新生代火山岩钾质、钠质火山岩成带分布的成因问题,通常认为青藏高原钾质岩浆起源于古老富集岩石圈地幔。Ding等<sup>[51]</sup>认为羌塘北部钾质-超钾质火山岩来源于原始地幔源区,并且被含变质沉积岩的下地壳的部分熔融熔体混染。而南部同样来源于原始地幔源区,但相对于北部钾质-超钾质火山岩更为原始(即没有变质沉积岩熔体的混入)。其强调有无地壳物质的混入是形成钾质、钠质火山岩的区别所在。赖绍聪和秦江峰<sup>[52]</sup>则从火山岩中的麻粒岩包体的角度认为钾质岩浆可能与该地区存在特殊的下地壳物质有关(非典型的辉长质)。超钾质岩石是青藏高原富有特色

的岩石,对于其成因,先后提出过多种不同的模型,如地壳同化混染模型、富集地幔的部分熔融模型、含金云母地幔橄榄岩的部分熔融模型等。Zhao 等<sup>[53]</sup>认为是岩浆源区发生多次富集组分加入的结果,富集组分可能来源于冈底斯带古老地壳基底或俯冲的印度大陆岩石圈。冈底斯带超钾质岩浆源区锆石所记录的富集事件至少包括 2 个阶段,并可能有 2 种组分参与,一种是印度大陆岩石圈俯冲之前,冈底斯带古老地壳基底的再循环;二是印度大陆岩石圈俯冲过程中对富集岩石圈地幔的贡献。西昆仑地区的超钾质岩石钾质的富集程度与地幔源区混入俯冲沉积物的数量有关<sup>[28]</sup>。进一步的研究表明<sup>[54,55]</sup>,青藏高原分布有羌塘—囊谦—滇西和冈底斯两条新生代钾质-超钾质火山岩带。出现于羌塘—囊谦—滇西超钾质岩浆活动的峰值时间为 40~30 Ma,具有高 MgO 和低 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量特征;出现于羌塘中、西部的钾质-超钾质岩浆活动的峰值时间为 30~24 Ma,主体岩石以贫 SiO<sub>2</sub>、高 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和低 MgO/CaO 为特征,并且提出前一种类型的源区以富硅、富钾流(熔)体交代形成的金云母方辉橄榄岩为主;而后一种类型的源区则以斜辉橄榄岩地幔为主。至于青藏高原不同地区不同时期形成的埃达克质火山岩,多数学者都认为来自于加厚的含石榴子石的下地壳的部分熔融的结果<sup>[50,56~59]</sup>。

对青藏高原东部邻区的“三江”地区的晚始新世高镁钾质火山岩的成因也取得了一些新的认识。Huang 等<sup>[60]</sup>从地球化学角度提出这些高镁火山岩来源于受古特提斯俯冲带流体交代的尖晶石相方辉橄榄岩的部分熔融岩浆,并在深部岩浆房经历了橄榄石的结晶分异和堆晶作用,而同期的粗面岩则还是这种岩浆在相对浅部岩浆房经历了较大程度的长石与单斜辉石的分离结晶。陈建林等<sup>[61,62]</sup>通过对比“三江”地区和青藏高原内部以及高原内部的南部和北部的高镁钾质岩浆得出,也得出了类似的结论,但它们的源区的富集程度和矿物组成有所不同。

位于青藏高原东缘的西秦岭礼县一带出现一些特殊类型的火山岩——钾霞橄黄长岩,在这些火山岩中发现有大量的地幔橄榄岩包体<sup>[63]</sup>。目前对于这种特殊的火山岩尽管进行了大量的地球化学研究,但是还没有形成一致的认识。喻学惠等<sup>[14]</sup>通过对该火山岩系统的地球化学研究(主要元素、微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素),认为其源区具有 EM1、DMM 和 HIMU 混合的特征,并认为其可能和地幔柱有关;而董昕等<sup>[64]</sup>则利用相同的地球化学方法得出其源区为 EM2、DMM 和 HIMU 混合。然而,他

们都认为其原始岩浆来自于深部地幔,即岩浆形成时有一个厚的岩石圈。值得注意的是,不管何种观点,都没有提到为何在该地区会形成这种岩石?这种岩石中的黄长石又是如何形成的?而其他碱性火山岩中为什么没有形成黄长石?含黄长石的碱性火山岩需要什么特殊的源区(矿物组成)?

## 2 存在的问题和进一步工作的建议

(1)目前虽在岩石地球化学方面进行了大量工作,取得了许多进展和成果,但存在着忽视基础地质和岩相学研究与地球化学研究(包括年代学)相结合的倾向。这可能是导致原创性成果不足的重要原因之一。今后应加强野外地质、岩相学观察、岩石物理化学(相平衡、热力学和化学动力学)、实验岩石学、非平衡态热力学和元素-同位素地球化学的研究,将我国火山岩的研究推向一个新的研究水平。

(2)多块体拼合大陆的岩浆作用是中国大陆地质的特色和优势,充分发挥这种特色和优势才有可能使得我国在大陆火山作用特点和成因研究方面,形成有别于国外的某些创新性的认识。

(3)充分发挥我国地域优势的特点,即存在不同时代、不同构造背景、不同来源深度的火山岩发育齐全,将这些不同源区的火山岩作为天然超深钻,进行系统的岩石学和元素-地球化学研究,并结合深部地球物理资料,可探讨地球演化不同阶段的壳-幔结构、组成和演化的动力学机制。

(4)结合地质实际,进一步探索新的测试技术方法(如全新世火山岩的测年技术等),并加强实验岩石学的研究,为岩石成因的研究上一个新的台阶提供技术支撑。

## 参考文献 (References):

- [1] 张辉煌,徐义刚,葛文春,马金龙. 吉林伊通-大屯地区晚中生代-新生代玄武岩的地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1579-1596.  
Zhang Huihuang, Xu Yigang, Ge Wenchun, Ma Jinlong. Geochemistry of late Mesozoic-Cenozoic basalts in Yitong-Datun area, Jilin Province and its implication [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1579-1596. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张连昌,陈志广,周新华,王非,张玉涛. 辽河盆地东部凹陷早第三纪火山岩地球化学及形成环境[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(4): 368-375.  
Zhang Lianchang, Chen Zhiguang, Zhou Xinhua, Wang Fei, Zhang Yutao. Geochemistry and the tectonic setting of Early Tertiary volcanic rocks in the east depression, Liaohe Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(4):

- 368—375. (in Chinese with English abstract)
- [3] 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 喻晓冰, 彭冰霞, 徐政语. 江汉盆地早第三纪玄武质岩石 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年代学和地球化学特征及其成因意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1617—1625.  
Peng Touping, Wang Yuejun, Fan Weiming, Yu Xiaobing, Peng Bingxia, Xu Zhengyu.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  geochronology and geochemistry of the early Tertiary basaltic rocks in the Jianghan Basin, China and its petrogenesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1617—1625. (in Chinese with English abstract)
- [4] 谷团, 陈淑凤, 苑丽, 李朝阳, 刘玉平. 辽河盆地新生代火山岩地球化学特征及其与油气成藏的关系[J]. 矿物学报, 2006, 26(3): 334—325.  
Gu Tuan, Chen Shufeng, Yuan Li, Li Chaoyang, Liu Yiping. Geochemical characteristics of Cenozoic volcanic rocks and their correlations with hydrocarbon accumulation in Liaohhe basin[J]. Acta Mineralogica, 2006, 26(3): 334—325. (in Chinese with English abstract)
- [5] Huang B C, Piper J D A, He H Y, Zhang C X, Zhu R X. Palaeomagnetic and geochronological study of the Halaqiaola basalts, southern margin of the Altai Moluntains, convergent patterns north of Tibet[J]. J. Geophys. Res., 2006, 111: 1—16.
- [6] 梁涛, 罗照华, 柯珊, 魏阳, 李德东, 黄金香, 黄凡. 新疆托云火山群锆石-年代学及其动力学意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1381—1391.  
Liang Tao, Luo Zhaohua, Ke Shan, Wei Yang, Li Dedong, Huang Jinxiang, Huang Fan. SHRIMP zircon dating of the Tuoyun volcanoes group, Xinjiang, and its geodynamic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1381—1391. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈咪咪, 田伟, 潘文庆. 新疆西克尔碧玄岩中的地幔橄辉岩包体[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 681—688.  
Chen Mimi, Tian Wei, Pan Wenqing. Mantle peridotite xenoliths in basanlite from Xikeer, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 681—688. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李佑国, 莫宣学, 马润则, 伊海生, 陶晓风, 刘登忠. 藏北火车头山新生代火山岩的岩石特征与时代[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(5): 441—446.  
Li Youguo, Mo Xuanxue, Ma Runze, Yi Haisheng, Tao Xiaofeng, Liu Dengzhong. Petrology and ages of the Cenozoic volcanic rocks in the Huochetoushan, North Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2005, 32(5): 441—446. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李才, 黄小鹏, 牟世勇, 迟效国. 藏北羌塘南部走构由茶错地区火山岩定年与康托组时代的厘定[J]. 地质通报, 2006, 25(1—2): 226—228.  
Li Cai, Huang Xiaopeng, Mou Shiyong, Chi Xiaoguo. Age dating of the Zougouyouchacuo volcanic rocks and age determination of the Kangtog Formation in southern Qiangtang, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1—2): 226—228. (in Chinese with English abstract)
- [10] 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华, 孟祥金, 胡华斌. 冈底斯基性次火山岩地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素: 碰撞后火山作用亏损地幔源区的约束[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 547—557.  
Gao Yongfeng, Hou Zengqian, Wei Ruihua, Meng Xiangjin, Hu Huabin. The geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of basaltic subvolcanics from the Gangdese: Constraints on depleted mantle source for post-collisional volcanisms in the Tibetan plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(3): 547—557. (in Chinese with English abstract)
- [11] 翟庆国, 李才, 王军, 陈文. 藏北羌塘戈木错北部新生代钾质火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年[J]. 地质通报, 2009, 28(9): 1221—1228.  
Zhai Qingguo, Li Cai, Wang Jun, Chen Wen.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating for Cenozoic potassic volcanic rocks in northern Gemucuo from Qiangtang, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(9): 1221—1228. (in Chinese with English abstract)
- [12] Yang M H, Hou G T, Shi G. Ar geochronology of cenozoic volcanic rocks of east depression in Liaohhe Basin and its geological significance[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(2): 184—191.
- [13] 谢元和, 王永胜, 郑春子, 李学彬, 王忠恒, 孙忠刚. 藏北南羌塘陆块北缘毕洛错地区古近纪纳丁错组火山岩的特征及构造环境[J]. 地质通报, 2008, 27(3): 356—363.  
Xie Yuanhe, Wang Yongsheng, Zheng Chunzi, Li Xuebin, Wang Zhongheng, Sun Zhonggang. Characteristics and tectonic setting of volcanic rocks of the Paleogene Nading Co Formation in the Biluo Co area on the northern margin of the southern Qiangtang block, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(3): 356—363. (in Chinese with English abstract)
- [14] 喻学惠, 莫宣学, 赵志丹, 黄行凯, 李勇, 陈延芳, 韦玉芳. 甘肃西秦岭两类新生代钾质火山岩: 岩石地球化学与成因[J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 79—89.  
Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Huang Xingkai, Li Yong, Chen Yanfang, Wei Yufang. Two types of Cenozoic potassic volcanic rocks in West Qinling, Gansu Province: Their petrology, geochemistry and petrogenesis[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 79—89. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李再会, 郑来林, 李军敏, 夏祥标. 冈底斯中段林子宗火山岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(3): 223—227.  
Li Zhaihui, Zheng Lailin, Li Junmin, Xia Xiangbiao.  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  dating of Linzizong Volcanic Rocks in the Central Gangdise area and its geological implication[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(3): 223—227. (in Chinese with English abstract)
- [16] 单久库. 西藏扎雪地区始新世钾玄岩特征及其构造环境[J]. 世界地质, 2009, 28(2): 171—178.  
Shan Jiuku. Characteristics and tectonic setting of Eocene shoshonite in Zaxue area of Tibet[J]. Global Geology, 2009, 28(2): 171—178. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李德东, 罗照华, 黄金香, 魏阳, 梁涛. 皮羌盆地新生代基性

- 岩浆活动的年代学及其地质意义[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 270—281.
- Li Dedong, Luo Zhaohua, Huang Jinxiang, Wei Yang, Liang Tao. The chronological and geological implications of the Cenozoic basic magmatic activities in Piqiang Basin, Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(3): 270—281. (in Chinese with English abstract)
- [18] 罗照华, 莫宣学, 万渝生, 李莉, 魏阳. 青藏高原最年轻碱性玄武岩 SHRIM 年龄的地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 578—584.
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Wan Yusheng, Li Li, Wei Yang. Geological implications of the youngest SHRIMP U-Pb age of the alkaline basalt in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 578—584. (in Chinese with English abstract)
- [19] Zou H B, Fan Q C, Zhang H F. Rapid development of the great Millennium eruption of Changbaishan (Tianchi) Volcano, China/North Korea: Evidence from U-Th zircon dating [J]. *Lithos* (2010), doi:10.1016/j.lithos.2010.07.006.
- [20] 张文慧, 韩宝福. 内蒙古集宁新生代玄武岩的 K-Ar 年代学和地球化学及其深部动力学意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1597—1607.
- Zhang Wenhui, Han Baofu. K-Ar chronology and geochemistry of Jining Cenozoic basalts, Inner Mongolia and geodynamic Implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(6): 1597—1607. (in Chinese with English abstract)
- [21] 樊祺诚, 隋建立, 孙谦, 李霓, 王团华. 天池火山千年大喷发的岩浆混合作用与喷发机制初步探讨[J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1703—1708.
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Sun Qian, Li Ni, Wang Tuanhua. Preliminary research of magma mixing and explosive mechanism of the millennium eruption of Tianchi volcano [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(6): 1703—1708. (in Chinese with English abstract)
- [22] 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 李霓, 孙谦. 长白山天池火山粗面玄武岩的喷发历史与演化[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1449—1457.
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Wang Tuanhua, Li Ni, Sun Qian. Eruption history and magma evolution of the trachybasalt in the Tianchi volcano, Changbaishan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(6): 1449—1457. (in Chinese with English abstract)
- [23] 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 李霓, 孙谦. 长白山火山活动历史、岩浆演化与喷发机制探讨[J]. 高校地质学报, 2007, 13(2): 175—190.
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Wang Tuanhua, Li Ni, Sun Qian. History of volcanic activity, magma evolution and eruption mechanisms of the Changbai volcanic province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(2): 175—190. (in Chinese with English abstract)
- [24] 樊祺诚, 孙谦, 龙安明, 尹克坚, 隋建立, 李霓, 王团华. 北部湾涠洲岛及斜阳岛火山地质与喷发历史研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1529—1537.
- Fan Qicheng, Sun Qian, Long Anming, Yin Kejian, Sui Jianli, Li Ni, Wang Tuanhua. Geology and eruption history of volcanoes in Weizhou Island and Xieyang Island, Northern Bay [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(6): 1529—1537. (in Chinese with English abstract)
- [25] 樊祺诚, 孙谦, 王旭龙, 尹功明, 龙安明, 尹克坚. 北部湾涠洲岛南湾火山砂岩捕虏体光释光(OSL)测年结果[J]. 地震地质, 2006, 28(1): 139—141.
- Fan Qicheng, Sun Qian, Wang Xulong, Yin Gongming, Long Anming, Yin Kejian. OSL dating of a sandstone xenolith in the volcanic rocks of the Nanwan volcano, Weizhou island, Beibu bay [J]. *Seismology and Geology*, 2006, 28(1): 139—141. (in Chinese with English abstract)
- [26] Chung S L, Chu M F, Zhang Y, Xie Y, Lo C H, Lee T Y, Lan C Y, Li X, Zhang Q, Wang Y. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth Sci. Rev.*, 2005, 68: 173—196.
- [27] 夏林圻, 马中平, 李向民, 夏祖春, 徐学义. 青藏高原古新世-始新世早期(65—40 Ma) 火山岩—同碰撞火山作用的产物[J]. 西北地质, 2009, 42(3): 1—25.
- Xia Linqi, Ma Zhongping, Li Xiangmin, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Paleocene-Early Eocene (65-40 Ma) volcanic rocks in Tibetan Plateau: The products of syn-collisional volcanism [J]. *Northwestern Geology*, 2009, 42(3): 1—25. (in Chinese with English abstract)
- [28] Zhang Z C, Xiao X C, Wang J, Wang Y, Kusky T M. Post-collisional Plio-Pleistocene shoshonitic volcanism in the western Kunlun Mountains, NW China: Geochemical constraints on mantle source characteristics and petrogenesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 31: 379—403.
- [29] 陈晓雨, 刘嘉麒, 郭正府, 路放, 江东辉. 望天鹄火山岩石地球化学特征及其成因[J]. 岩石学报, 2008, 2(11): 2576—2584.
- Chen Xiaoyu, Liu Jiaqi, Guo Zhengfu, Lu Fang, Jiang Donghui. A study on the geochemical characteristics and origin of volcanic rocks in Wangtian'e volcano [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(11): 2576—2584. (in Chinese with English abstract)
- [30] Zou H B, Fan Q C, Yao Y P. U-Th systematics of dispersed young volcanoes in NE China: Asthenosphere upwelling caused by piling up and upward thickening of stagnant Pacific slab [J]. *Chemical Geology*, 2008, 255: 134—142.
- [31] 张建龙, 蒋少涌, 白玉英, 孙娜, 王睿. 辽河盆地欧利坨子富钾质火山岩特征与成因探讨[J]. 高校地质学报, 2006, 12(2): 271—280.
- Zhang Jianlong, Jiang Shaoyong, Bai Yuying, Sun Na, Wang Rui. The characteristics and genesis of Potassic Volcanic Rocks from the Oulituozi Area, Liaohe Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(2): 271—280. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王团华, 樊祺诚, 孙谦, 谌宏伟, 李霓. 长白山区图们江流域新生代火山岩的岩石化学研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1481—1490.

- Wang Tuanhua, Fan Qicheng, Sun Qian, Chen Hongwei, Li Ni. Petrochemistry of Cenozoic volcanic rocks in the Tumen river field, Changbai mountain region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(6): 1481—1490. (in Chinese with English abstract)
- [33] 隋建立, 樊祺诚, 刘嘉麒, 郭正府. 长白山火山地幔不均一性——微量元素及同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1512—1520.  
Sui Jianli, Fan Qicheng, Liu Jiaqi, Guo Zhengfu. Mantle heterogeneity beneath Changbaishan volcanic province: Evidence from geochemical study on trace elements and isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1512—1520. (in Chinese with English abstract)
- [34] Zou H B, Fan Q C. U-Th isotopes in Hainan basalts: Implications for sub-asthenospheric origin of EM2 mantle endmember and the dynamics of melting beneath Hainan Island[J]. *Lithos*, 2010, 116: 145—152.
- [35] 徐夕生, 谢昕. 中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 318—334.  
Xu Xisheng, Xie Xin. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(3): 318—334. (in Chinese with English abstract)
- [36] Xu Y G, Ma J L, Frey F A, Feigenson M D, Liu J F. Role of lithosphere-asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton[J]. *Chemical Geology*, 2005, 224, 247—271.
- [37] Tang T J, Zhang H F, Ying J F. Asthenosphere-lithospheric mantle interaction in an extensional regime: Implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton [J]. *Chemical Geology*, 2006, 233: 309—327.
- [38] Yan J, Zhao J X. Cenozoic alkali basalts from Jingpohu, NE China: The role of lithosphere-asthenosphere interaction[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33: 106—121.
- [39] 杜景霞, 肖龙, 周海民, 孙洋, 董月霞, 李文华, 倪平泽, 向华. 渤海湾盆地南堡凹陷新生代火山岩地球化学特征及成因[J]. *桂林工学院学报*, 2008, 28(2): 157—166.  
Du Jingxia, Xiao Long, Zhou Haimin, Sun Yang, Dong Yuexia, Li Wenhua, Ni Pingze, Xiang Hua. Petrogenesis and geochemical characteristics of volcanic rocks from Nanpu sag of Bohai Bay Basin, East China[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2008, 28(2): 157—166. (in Chinese with English abstract)
- [40] 秦秀峰, 徐义刚, 张辉煌, 于宋月, 邱华宁. 大陆亚碱性火山岩的成因多样性: 以敦化-密山和东宁火山岩带为例[J]. *岩石学报*, 2008, 24(11): 2501—2514.  
Qin Xiufeng, Xu Yigang, Zhang Huihuang, Yu Songyue, Qiu Huaning. Petrogenetic diversity of continental subalkaline volcanic rocks: An example from the Dunhua-Mishan-Dongning volcanic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(11): 2501—2514. (in Chinese with English abstract)
- [41] Zhang Z C, Mao J W, Saunders A D, Ai Y, Li Y, Zhao L. Petrogenetic modeling of three mafic-ultramafic layered intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints[J]. *Lithos*, 2009, 113(3—4): 369—392.
- [42] 付长亮, 孙德有, 魏红艳, 苟军. 伊通新生代玄武岩地球化学成分差异性研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(3): 446—460.  
Fu Changliang, Sun Deyou, Wei hongyan, Gou Jun. Research on the geochemical difference of the cenozoic basalts in Yitong area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(3): 446—460. (in Chinese with English abstract)
- [43] Dong Y X, Xiao L, Zhou H M, Du J X, Zhang N, Xiang H, Wang C Z, Zhao Z X, Huang H X. Volcanism of the Nanpu Sag in the Bohai Bay Basin, Eastern China: Geochemistry, petrogenesis, and implications for tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39: 173—191.
- [44] Chen Y, Zhang Y X, Graham D, Su S G, Deng J F. Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in north-east China[J]. *Lithos*, 2007, 96: 108—126.
- [45] 邵济安, 张文兰, 张聪. 五大连池火山岩带的地幔富集作用[J]. *岩石学报*, 2008, 24(11): 2485—2494.  
Shao Ji'an, Zhang Wenlan, Zhang Cong. Mantle enrichment of Wudalianchi volcanic rock belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(11): 2485—2494. (in Chinese with English abstract)
- [46] 罗丹, 陈立辉, 曾罡. 陆内强碱性火山岩的成因: 以山东无棣大山霞石岩为例[J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 311—319.  
Luo Dan, Chen Lihui, Zeng Gang. Genesis of intra-continental strongly alkaline volcanic rocks: A case study of Dashan nephelinites in Wudi, Shandong Province, North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(2): 311—319. (in Chinese with English abstract)
- [47] Zeng G, Chen L H, Xu X S, Jiang S Y, Hofmann A W. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China[J]. *Chemical Geology*, 2010, 273: 35—45.
- [48] 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 杨志明, 董国臣, 丁林. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型——来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. *地质学报*, 2006, 80(9): 1233—1248.  
Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Gao Yongfeng, Yang Zhiming, Dong Guochen, Ding Lin. Early processes and tectonic model for the Indian-Asian continental collision: Evidence from the Cenozoic Gangdese igneous rocks in Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*. 2006, 80(9): 1233—1248. (in Chinese with English abstract)
- [49] 侯增谦, 王二七. 印度-亚洲大陆碰撞成矿作用主要研究进展[J]. *地球学报*, 2008, 29(3): 275—292.  
Hou Zengqian, Wang Erqi. Metallogenesis of the Indo-Asian collisional orogen: New Advances[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(3): 275—292. (in Chinese with English ab-

- stract)
- [50] Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Dong Y H, Vasconcelos P M, Pearson N, Wan Y S, Dong H, Li C F, Yu Y S, Zhu T X, Feng X T, Zhang Q Y, Zi F, Chu Z Y. Eocene melting of subducting continental crust and early uplifting of central Tibet: Evidence from central-western Qiangtang high-K calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, 272: 158—171.
- [51] Ding L, Kapp P, Yue Y, Lai Q Z. Postcollisional calc-alkaline lavas and xenoliths from the southern Qiangtang terrane, central Tibet[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 254: 28—38.
- [52] 赖绍聪, 秦江锋. 藏北羌塘地块新生代火山岩中麻粒岩捕虏体的岩石学和地球化学研究对青藏高原新生代火山岩成因及下地壳性质的约束[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 325—336. Lai Shaocong, Qin Jiangfeng. Petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Cenozoic Qiangtang volcanic field: Implication for the nature of the lower crust in the northern Tibetan plateau and the genesis of Cenozoic volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 325—336. (in Chinese with English abstract)
- [53] Zhao Z D, Mo X X, Dilek Y, Niu Y L, DePaolo D J, Robinson P, Zhu D C, Sun C G, Dong G C, Zhuo S, Luo Z H, Hou Z Q. 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*, 2009, 113: 190—212.
- [54] 迟效国, 董春艳, 刘建峰, 金巍, 李才, 刘森, 黎广荣. 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[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 595—60. Chi Xiaoguo, Dong Chunyan, Liu Jianfeng, Jin Wei, Li Cai, Liu Sen, Li Guangrong. High Mg and low Mg potassic-ultrapotassic volcanic rocks and their source nature on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 595—602. (in Chinese with English abstract)
- [55] 迟效国, 刘建峰, 赵芝, 董春艳, 黎广荣, 赵院东, 赵秀羽. 青藏高原新生代两类超钾质岩石的成因——实验岩石学和地球化学约束[J]. *地学前缘*, 2009, 16(1): 88—98. Chi Xiaoguo, Liu Jianfeng, Zhao Zhi, Dong Chunyan, Li Guangrong, Zhao Yuandong, Zhao Xiuyu. Petrogenesis of two kinds of Cenozoic ultrapotassic volcanic rocks in Qinghai-Tibet Plateau: Constraints from experimental petrology and geochemistry[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 88—98. (in Chinese with English abstract)
- [56] Wei J Q, Yao H Z, Niu Z J, Wang J X. Identification of the adakitic rock association in Chibzhang Co area, northern Tibet, and its significance[J]. *Acta Miner. Petrol.*, 2005, 24(5): 173—178.
- [57] Wang Q, McDermott F, Xu J F, Bellon H, Zhu Y T. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracrustal setting[J]. *Geology*, 2005, 33: 465—468.
- [58] 赵振明, 李荣社, 计文化, 伊海生, 林金辉, 朱同兴. 青藏高原北羌塘地区古近纪火山岩中埃达克岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *地球科学*, 2007, 32(5): 651—661. Zhao Zhenming, Li Rongshe, Ji Wenhua, Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhu Tongxing. The characteristics of geochemical and its tectonic significance from the adakite of palaeogene volcanic rocks in Northern Qiangtang Area, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Earth Science*, 2007, 32(5): 651—661. (in Chinese with English abstract)
- [59] 董彦辉, 王强, 许继峰, 资锋. 羌塘地块北部东月湖始新世高 Mg 埃达克质火山岩的成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 291—302. Dong Yanhui, Wang Qiang, Xu Jifeng, Zi Feng. Dongyue Lake adakitic volcanic rocks with high Mg in north Qiangtang block: Petrogenesis and its tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 291—302. (in Chinese with English abstract)
- [60] Huang X L, Xu Y G, Yang Q J, Qiu H N. Geochemistry of the Eocene high-Mg ultrapotassic lavas from western Yunnan, China: Constraints on petrogenesis[J]. *Geochimica*, 2007, 36(2): 120—138.
- [61] 陈建林, 许继峰, 康志强, 王保弟. 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[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 211—224. Chen Jianlin, Xu Jifeng, Kang Zhiqiang, Wang Baodi. Geochemical comparison of the Cenozoic high-MgO-potassic volcanic rocks between northern and southern of Tibetan Plateau: Difference of the both mantle sources[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 211—224. (in Chinese with English abstract)
- [62] 陈建林, 许继峰, 王保弟, 康志强. 三江地区与青藏高原内部早第三纪高镁钾质岩地球化学对比: 地幔源区的差异及其意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(6): 1856—1870. Chen Jianlin, Xu Jifeng, Wang Baodi, Kang Zhiqiang. Geochemical comparison of Paleogene high-Mg potassic volcanic rocks in Sanjiang area and interior Tibetan Plateau: Compositional difference of the mantle sources[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(6): 1856—1870. (in Chinese with English abstract)
- [63] Su B X, Zhang H F, Ying J F, Xin Y X, Zhao X M. Nature and processes of the lithospheric mantle beneath the western Qinling: Evidence from deformed peridotitic xenoliths in Cenozoic kamafugite from Haoti, Gansu Province, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34: 258—274.
- [64] 董昕, 赵志丹, 莫宣学, 喻学惠, 张宏飞, 李冰, Depaolo D J. 西秦岭新生代钾霞橄黄长岩的地球化学及其岩浆源区性质[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 238—248. Dong Xin, Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Zhang Hongfei, Li Bing, Depaolo D J. Geochemistry of the cenozoic kamafugites from west Qinling and its constraint for the nature of magma source region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 238—248. (in Chinese with English abstract)