

# 山东郯城神泉钠质火山岩的年代学与地球化学 ——对源区地幔性状与岩石成因的启示

李友连, 邱检生, 刘 亮

(南京大学 地球科学与工程学院 成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘 要:** 山东神泉钠质火山岩出露于郯城李庄东侧, 构造上位于沂沭断裂带南段, 构成一盾状火山机构, 主体岩性为粗安岩。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示, 其成岩年龄为  $96.5 \pm 1.4$  Ma, 较之区内广泛分布的钾质火山岩形成年龄晚, 指示沂沭断裂带及邻区中生代火山岩总体上具有由钾质向钠质演变的趋势。在化学组成上, 神泉火山岩具有富碱 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 10.34\% \sim 11.95\%$ ) 和明显富钠 ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.76 \sim 3.92$ ) 的特征, 按多种方法判别均可归为典型的钠质火山岩。该火山岩稀土元素总量较高 ( $\Sigma\text{REE} = 411.3 \times 10^{-6} \sim 456.3 \times 10^{-6}$ ), 富集轻稀土元素,  $\text{LREE}/\text{HREE} = 19.53 \sim 21.10$  ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> = 29.69 ~ 33.26, 缺乏明显的铈异常 ( $\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 0.82$ ), 稀土元素配分型式呈明显的右倾型。岩石富 Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素, 亏损 Ti、Nb、Ta 等高场强元素, 在微量元素蛛网图上显示一定的 Pb 负异常。神泉火山岩具有富集的 Sr-Nd 同位素特征,  $I_{\text{Sr}} = 0.7068 \sim 0.7077$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -16.66 \sim -16.82$ , 与山东中生代镁铁质岩石的 Sr-Nd 同位素组成类似, 表明其应起源于富集的岩石圈地幔。综合分析表明, 神泉火山岩源区极可能遭受了因扬子板块深俯冲和东北克拉通岩石圈拆沉等多次富集事件的影响, 至晚白垩世, 随着郯庐断裂引张的加剧, 诱发了软流圈地幔上涌, 并对先期形成的富集地幔进一步改造, 同时在断裂减压作用的影响下, 促使了这一经叠次改造的富集地幔的部分熔融, 由此产生的岩浆经进一步分异演化, 最终导致了神泉钠质火山岩的形成。

**关键词:** 钠质火山岩, 锆石 U-Pb 年龄, 元素-同位素地球化学, 源区地幔性状, 山东郯城神泉

中图分类号: P588.14; P597+.3; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)06-0783-16

## Geochronology and geochemistry of sodic volcanic rocks from Shenquan in Tancheng County, Shandong Province: Implications for unraveling the nature of mantle source and petrogenesis

LI You-lian, QIU Jian-sheng and LIU Liang

(State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The Shenquan sodic volcanic rocks, outcropped in the east of Lizhuang village in Tancheng County, Shandong Province, are tectonically located in the southern parts of the Yishu deep fault zone. The volcanic rocks comprise a shield volcano, and lithologically consist mainly of trachyandensite. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating yields an age of  $96.5 \pm 1.4$  Ma, which is younger than the ages of the widespread potassic rocks within the region, indicating an evolutionary trend from potassic to sodic for the Mesozoic volcanic rocks along the Yishu deep fault zone and its adjacent areas. Chemically, the Shenquan volcanic rocks have high alkali content

收稿日期: 2012-07-01; 修订日期: 2012-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072042)

作者简介: 李友连(1988-), 女, 硕士研究生, 岩石学专业, E-mail: kavins579@163.com; 通讯作者: 邱检生(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 岩石学专业, E-mail: jsqiu@nju.edu.cn.

( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 10.34\% \sim 11.95\%$ ) and are obviously enriched in sodium ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.76 \sim 3.92$ ); they can be assigned to typical sodic volcanic rocks on the basis of various discrimination schemes. Geochemically, the rocks contain relatively high concentrations of rare earth elements ( $\Sigma\text{REE} = 411.3 \times 10^{-6} \sim 456.3 \times 10^{-6}$ ), and are enriched in LREE [ $\text{LREE}/\text{HREE} = 19.53 \sim 21.10$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 29.69 \sim 33.26$ ] and LILE (e. g., Rb, Ba, Th), and depleted in HFSE (e. g., Ti, Nb, Ta). They show right-oblique chondrite-normalized REE patterns and display some negative Pb anomalies in the primitive mantle-normalized trace element spidergrams. These rocks have enriched Sr-Nd isotopic compositions [ $I_{\text{Sr}} = 0.7068 \sim 0.7077$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -16.66 \sim -16.82$ ], similar to that of the Mesozoic mafic rocks in Shandong, indicating that they were probably derived from an enriched lithospheric mantle. Based on a synthesis of geology and geochemistry, the authors hold that the mantle source of the Shenquan sodic volcanic rocks might have undergone multiple enrichment events induced by source contamination of continental crustal materials both from deep subduction of the Yangtze Craton and from lithospheric delamination of the North China Craton. During Late Cretaceous, the continued extension of Tanlu Fault induced the upwelling of asthenospheric melts which further modified the previously enriched mantle. Decompression partial melting of these multiply-modified mantle sources and further differentiation of the magmas finally generated the Shenquan sodic volcanic rocks.

**Key words:** sodic volcanic rocks; zircon U-Pb age; elemental-isotopic geochemistry; nature of the mantle source; Shenquan in Tancheng County, Shandong Province

偏碱性的钠质火山岩多发育于大陆裂谷或深大断裂带,如东非裂谷东支、挪威奥斯陆裂谷、德国莱茵地堑和我国的攀西裂谷都有种类繁多的钠质火山岩分布,这些火山岩的源区普遍被认为与地幔柱活动引发的软流圈地幔的上涌有关(Furman, 2007; Shellnutt and Jahn, 2011),或其源区具有 HIMU 地幔端员特性(Schiano *et al.*, 2004; Velázquez *et al.*, 2006; Corfu and Dahlgren, 2008)。

郯庐断裂是中国东部滨太平洋构造域内规模最为壮观的巨型断裂构造带,其在山东境内的部分称为沂沭断裂。该断裂纵贯山东中部,由一系列 NNE 向断裂组成,其中主干断裂主要有 4 条,自西向东依次为郯郗-葛沟断裂、沂水-汤头断裂、安丘-莒县断裂和昌邑-大店断裂。除主干断裂外,其西侧和东侧尚有一系列分支断裂,西侧(鲁西)断裂呈 NW 向展布,东侧(鲁东)断裂呈 NE 向展布。因此,整个沂沭断裂实际上为一断裂系,或称裂谷系(图 1a,许志琴等,1982)。断裂系广泛发育晚中生代(尤其是早白垩世)火山作用,形成的火山岩充填在沿这些断裂展布的断陷盆地内。这些火山岩普遍具有偏碱富钾特征,总体可归为钾玄岩系(或橄榄安粗岩系, Wang *et al.*, 1996),但在部分地区,特别是在断裂带内部,尚有一定数量的钠质火山岩分布(金隆裕,1994),且断裂带内部火山岩的钠质含量也明显高于两侧火山岩(许志琴等,1982)。

前人对区内火山岩的研究多集中在钾质火山岩,专门针对区内中生代钠质火山岩的研究甚少,尤其对下述问题缺乏深入探讨,如钠质与钾质火山岩在时序演化上存在何种关系?钠质火山岩为何在空间上更多分布在断裂带内部?钠质与钾质火山岩是具有类似的地幔源区还是具有各自独立的岩浆起源?为此,本文以沂沭断裂带南段郯城李庄神泉典型钠质火山岩为对象,进行了锆石 U-Pb 年代学、矿物化学及元素与 Sr-Nd 同位素地球化学的系统研究,旨在查明其源区地幔性状,并探讨区内钠质火山岩的成因。

## 1 地质概况与岩石学特征

沂沭断裂带及其两侧的中生代火山岩在空间上具有明显的沿断裂带呈线型分布特征,它们主要发育于中生代断陷型陆相火山盆地中。主体火山岩可归为白垩系青山群(图 1a),此期火山岩分布广、厚度大、岩性复杂,为一套火山熔岩和火山碎屑岩类,自下而上可进一步分为 4 个旋回,分别对应 4 个地层组,即后乔组、八亩地组、石前庄组和方戈庄组(张增奇等,1996;刘明渭等,2003),其中后乔组和石前庄组主要为长英质岩石,而八亩地组和方戈庄组主要为粗安质和粗面玄武质或玄武粗安质岩石。4 个火山岩地层组中以八亩地组分布最为广泛,在鲁东、鲁

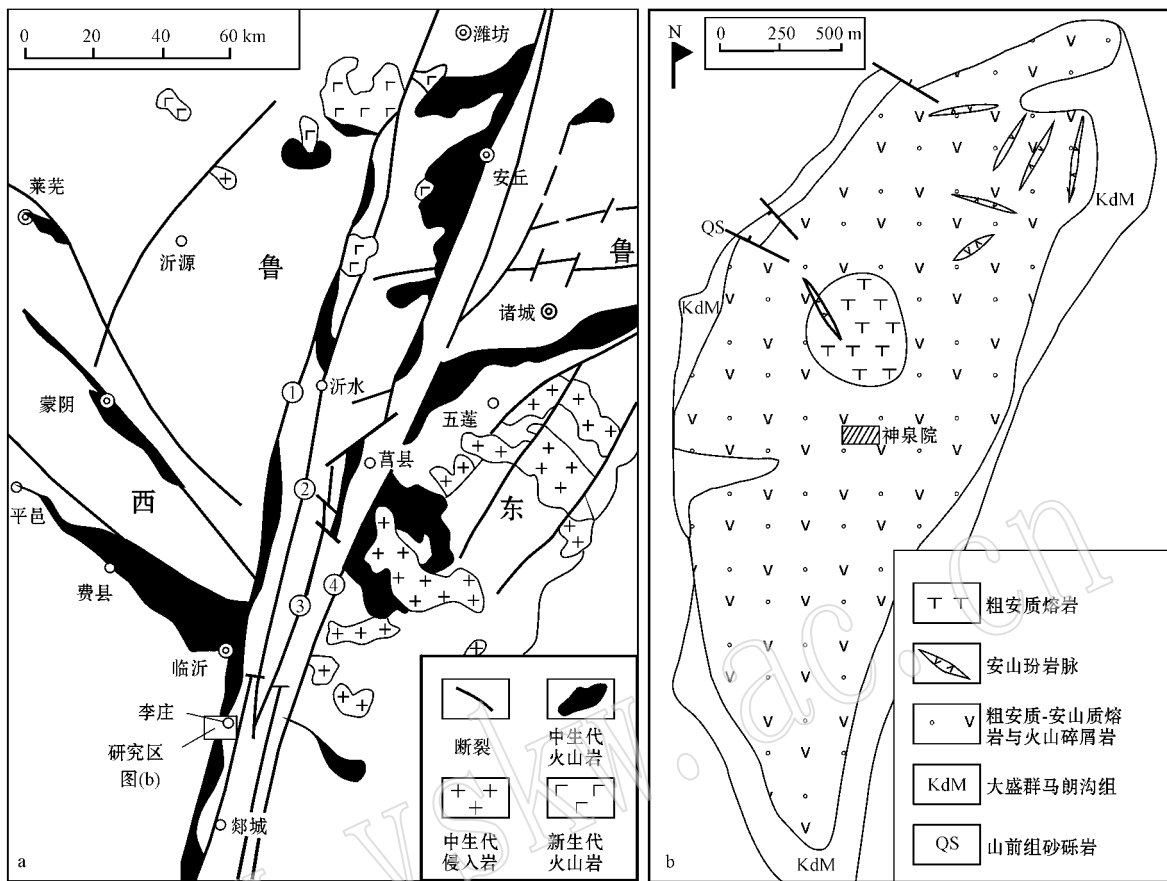


图 1 沂沭断裂带地质略图 (a, 修改自许志琴等(1982)) 和神泉盾状火山地质略图 (b, 修改自山东省第七地质矿产勘查院, 1997<sup>①</sup>)

Fig. 1 Geological sketch map of Yishu deep fault zone (a, modified after Xu Zhiqin *et al.*, 1982) and geological sketch map of Shenquan shield volcano (b, modified after No. 7 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, 1997<sup>①</sup>)

①—郯部-葛沟断裂；②—沂水-汤头断裂；③—安丘-莒县断裂；④—昌邑-大店断裂

①—Tangwu-Gegou fault；②—Yishui-Tangtou fault；③—Anqiu-Juxian fault；④—Changyi-Dadian fault

西和断裂带内部均有发育,其余 3 组地层主要发育于鲁东的胶莱盆地。在岩石组合上,鲁西主要发育中基性火山岩,断裂带内南部多为中基性,北部出现中基性-酸性火山岩,而鲁东火山岩则具双峰式特征(张增奇等,1996;Fan *et al.*, 2001)。

神泉火山岩位于沂沭断裂带南段郯城李庄东侧,为一由中心式喷发所形成的盾状火山机构。火山岩呈 NNE 向展布,平面上呈椭圆形,南北长约 3 km,东西宽 0.7~0.8 km(图 1b)。该区火山岩在地质层序上属于青山群八亩地组,主体岩性为粗安质熔岩及潜火山岩。火山口呈椭圆形,位于神泉院北侧,主要为晚期喷发的粗安质火山熔岩所占据,自火山口向外依次为粗安质、安山质火山熔岩与火山碎屑岩,在火山口边缘及盾状火山的北部还发育晚期

侵入的安山玢岩脉。由出露岩石的岩性及分布状态可推测,该火山至少经历了 3 次岩浆活动:第 1 次为强烈的岩浆喷溢-喷发,形成构成盾状火山主体的粗安质-安山质火山熔岩与火山碎屑岩;第 2 次以岩浆侵出为特征,充填于火山通道内,形成出露于火山口附近的粗安质火山熔岩;第 3 次以安山玢岩侵入为特征,形成不同方位的潜火山岩岩脉。火山机构东西两侧为大盛群马朗沟组灰紫色砂砾岩所超覆。

本次研究所采样品主要为火山熔岩,岩石呈灰紫、暗紫色,块状构造或气孔构造(图 2a),斑状结构。斑晶含量少(1%~3%),成分主要为斜长石(图 2a、2b),不含或含少量钾长石斑晶,暗色矿物少或因蚀变仅呈假像残留(图 2b)。斜长石斑晶粒径约为 0.5~2.5 mm,多呈板条状,有时呈聚斑结构,普遍发育钠

① 山东省第七地质矿产勘查院. 1997. 李庄幅 1:50 000 地质图.

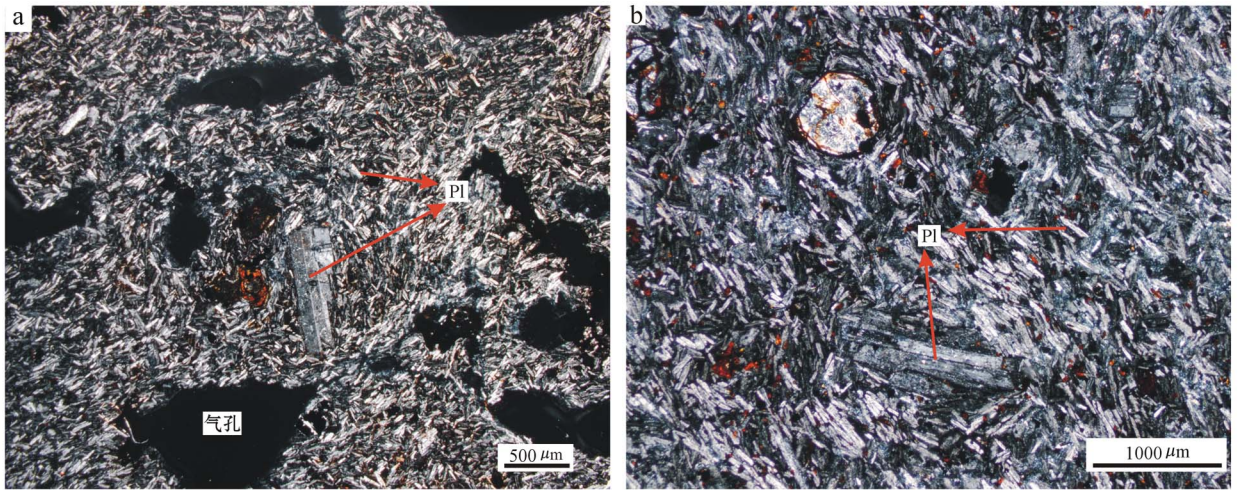


图 2 神泉火山岩典型岩相学显微照片(正交偏光)  
Fig. 2 Microphotographs of Shenquan volcanic rocks (crossed nicols)

长石律聚片双晶,可见卡钠复合双晶。基质具交织结构,主要由斜长石微晶及其间的填隙物组成,斜长石微晶间的填隙物主要为碱性长石,偶见歪长石微晶。

## 2 样品与分析方法

以往区调资料将区内火山岩多定名为安山质岩石,采用国际地科联推荐的 TAS 分类,火山岩投影在粗面岩/粗面英安岩区(图 3)。由于火山岩的基质矿物主要为斜长石微晶,火山岩基质总体表现为安山结构,而并非粗面结构,加之火山岩中缺乏石英或

石英含量很低,因此将其定名为粗面岩/粗面英安岩与岩相学特征不符。为此,笔者采用地球化学性质较稳定的高场强元素  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  分类图解(图 4),并结合岩相学观察将其定名为粗面安山岩。本次定年样品为出露于火山口附近的粗安岩(SQ-12),样品总体较新鲜,采样点经纬度坐标为:  $N34^{\circ}52'43.9''$ ,  $E118^{\circ}26'15.2''$ 。

锆石 U-Pb 年龄测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室进行。在严格避免污染的条件下,对全岩样品进行了破碎、淘洗和磁选以及重液分离,分离出锆石精样。然后在双目镜下观

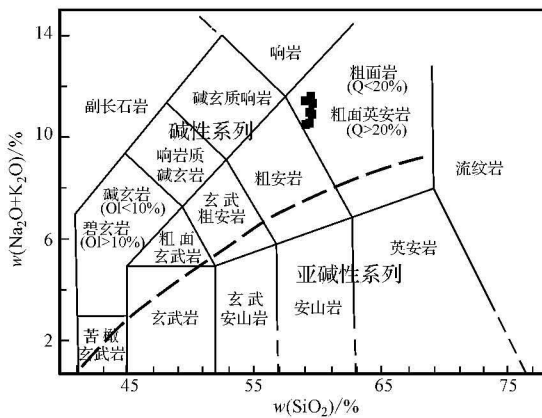


图 3 神泉火山岩 TAS 图解(据 Le Bas 等, 1986)  
Fig. 3 TAS diagram of volcanic rocks in Shenquan (base map after Le Bas *et al.*, 1986)  
碱性与亚碱性分界线据 Irvine & Baragar (1971)  
alkaline/subalkaline dividing line after Irvine & Baragar (1971)

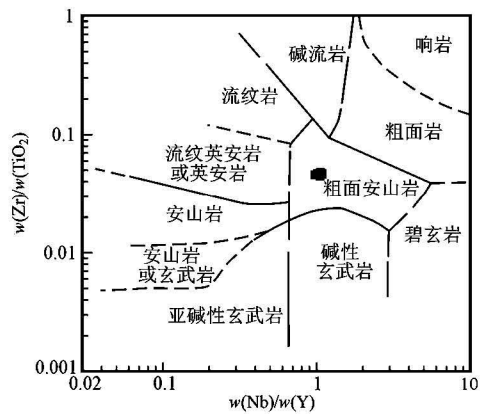


图 4 神泉火山岩  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  岩石分类图解  
(底图据 Winchester 和 Floyd, 1976)  
Fig. 4  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  classification diagram of Shenquan volcanic rocks (base map after Winchester and Floyd, 1976)

察所分离锆石的特征(如颜色、透明度、晶型等),挑选出表面平整光洁,具不同长宽比例、不同锥面特征和颜色的锆石颗粒。将挑选的锆石颗粒用环氧树脂胶结,待固结后细磨至锆石颗粒中心露出,并抛光制成样品靶。对抛光后的锆石样品,先采用装有阴极荧光探头的扫描电镜进行阴极发光(CL)图像拍摄,以了解被测锆石的内部结构,作为锆石年龄测定选取分析点位的依据。分析过程中使用与 Agilent 7500a ICP-MS 相连接的 New Wave 213 nm 激光取样系统,激光束斑直径为  $30\ \mu\text{m}$ ,频率为  $5\ \text{Hz}$ 。样品经剥蚀后,由 He 气作为载体,再与 Ar 气混合后进入 ICP-MS 进行分析。U-Pb 分馏根据澳大利亚锆石标样 GEMOC/GJ-1( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $608.5 \pm 1.5\ \text{Ma}$ , Jackson *et al.*, 2004)来校正,采用锆石标样 Mud Tank( $732 \pm 5\ \text{Ma}$ , Black and Gulson, 1978)作为内标以控制分析精度。每个测试的流程约分析 15 个样品,开始和结束前分别分析 2 次 GJ 标样,另外测试 1 个 MT 标样,期间一般测 10 个待测样品点。U-Pb 年龄和 U、Th、Pb 的计数由 Glitter(ver. 4.4)获得。详细的分析方法和流程类似于 Griffin 等(2004)。由于  $^{204}\text{Pb}$  的信号极低,以及载气中  $^{204}\text{Hg}$  的干扰,该方法不能直接精确测得其含量,因此,使用嵌入 Excel 的 ComPbCorr# 3-15G 程序(Andersen, 2002)来进行铅校正,年龄谐和图用 Isoplot 程序(ver2.49, Ludwig, 2001)获得。

矿物探针成分测定在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用 JEOL JXA-8800M 型电子探针仪完成,矿物定量分析的电子探针工作条件为:加速电压  $15.0\ \text{kV}$ ,束电流  $2 \times 10^{-8}\ \text{A}$ ,束斑直径  $1 \sim 2\ \mu\text{m}$ 。

全岩元素地球化学组成分析前首先经详细的岩相学观察与鉴定,选出新鲜均匀具代表性的样品,然后对样品进行破碎、研磨至 200 目以上待测。主量元素在南京大学现代分析中心采用 XRF 方法测定,测试仪器为瑞士生产的 ARL9800XP+ 型 X 射线荧光光谱仪。使用  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  和  $\text{LiBO}_2$ (67:33)混合熔剂和加拿大 Glaisse 高温自动燃气熔样机制样,测试条件为: X 射线工作电压  $40\ \text{kV}$ ,电流  $60\ \text{mA}$ ,分析精度优于 5%。微量元素(包括稀土元素)分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行,样品用  $1.5\ \text{mL}$  浓  $\text{HF} + 1.5\ \text{mL}$  浓  $\text{HNO}_3$  在  $190^\circ\text{C}$  溶解 48 h 后,采用 ELAN 6100DRC 型 ICP-MS 测定,对 USGS 国际标准样品(BHVO-2、AGV-1、BCR-2)的测定结果表

明,样品测定值和推荐值的相对误差小于 10%,详细分析流程见刘晔等(2007)。

Sr-Nd 同位素组成在南京大学内生金属矿床成矿机制重点实验室采用 Triton TI 表面热电离质谱(TIMS)测定。测试过程中,将样品烘干后称取  $50\ \text{mg}$ ,完全溶解于  $\text{HF} + \text{HNO}_3$  的混合酸中,采用 Bio Rad50WX8 阳离子交换树脂分离提纯出 Sr 和 Nd。Sr、Nd 同位素比值分别采用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 、 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  进行质量分馏校正,实验过程中测定的标样 NIST SRM 987 的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710235 \pm 4(2\sigma)$ ,标样 JNdi-1 的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512117 \pm 3(2\sigma)$ ,详细分析方法见濮巍等(2005)。

### 3 年代学测试结果

被测锆石多为浅黄色或无色,少量为褐色及褐红色,透明-半透明,柱状或长柱状,自形程度较好,锆石颗粒普遍较小,长径多在  $100\ \mu\text{m}$  以下,宽度多变化于  $50 \sim 70\ \mu\text{m}$ 。锆石阴极发光图像(CL)显示其韵律环带结构不发育,而多呈补片状或条带状均匀吸收(图 5),与中基性岩浆起源的锆石 CL 图像相似(Corfu *et al.*, 2003)。被测锆石的 Th/U 比值均很高,变化于  $4.15 \sim 10.49$ (表 1),与典型岩浆锆石具有高 Th/U 比值的特征一致(Wu and Zheng, 2004),说明它们为典型的岩浆结晶锆石。

本次测试共获得 12 个有效测定点数据(表 1),在  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谐和图(图 6)上,所有测试点均投影在谐和线上或谐和线附近,谐和度均在 95% 以上,这一特征指示被测锆石未遭受明显的后期热事件影响。12 个锆石测定点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化于  $94 \sim 100\ \text{Ma}$  之间,经计算获得其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $96.5 \pm 1.4\ \text{Ma}$ (MSWD = 4.6,  $2\sigma$ ;  $n = 12$ ),代表火山岩的结晶年龄。这一年龄与李庄玄武岩的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄(约为  $99\ \text{Ma}$ ,匡永生等, 2012)较接近,其年龄值相对偏低与样品为火山喷发晚期形成的近火口熔岩相的层位分布特点一致。沂沭断裂带及两侧中生代占主体的富钾火山岩的形成年龄多为  $110 \sim 125\ \text{Ma}$ (邱检生等 2001, Qiu *et al.*, 2002),而本次获得的钠质火山岩的年龄明显偏新,说明钠质火山岩总体较钾质火山岩形成晚。沂沭断裂带内汤头盆地火山岩的定年结果显示二者的锆石 U-Pb 年龄分别为  $106.4 \pm 0.4\ \text{Ma}$  和  $124.0 \pm 1.3\ \text{Ma}$ ,也表明盆地内钠质火山岩较钾质火山岩形成晚

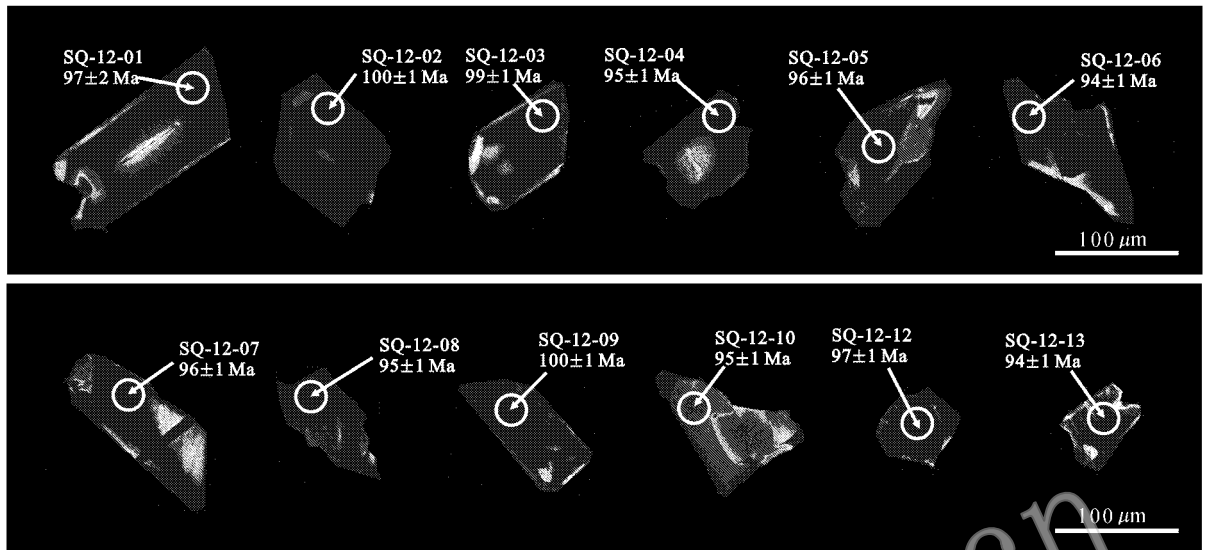


图 5 神泉火山岩代表性被测锆石的阴极发光图像、LA-ICP-MS 分析点位及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  视年龄

Fig. 5 CL images, localities of the points for LA-ICP-MS measurements and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  apparent ages of representative zircons from volcanic rocks in Shenquan

表 1 神泉火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of volcanic rocks in Shenquan

测定点号	Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
SQ-12-1	8.15	0.048 02	0.003 03	0.100 03	0.006 23	0.015 11	0.000 24	97	6	97	2
SQ-12-2	4.23	0.048 34	0.001 18	0.104 60	0.002 55	0.015 70	0.000 20	101	2	100	1
SQ-12-3	4.37	0.046 65	0.001 55	0.099 23	0.003 26	0.015 43	0.000 21	96	3	99	1
SQ-12-4	5.48	0.050 12	0.001 15	0.102 76	0.002 34	0.014 87	0.000 19	99	2	95	1
SQ-12-5	4.32	0.049 40	0.001 20	0.102 29	0.002 47	0.015 02	0.000 19	99	2	96	1
SQ-12-6	6.64	0.052 39	0.001 36	0.106 05	0.002 73	0.014 68	0.000 19	102	3	94	1
SQ-12-7	4.19	0.047 47	0.002 16	0.098 11	0.004 40	0.014 99	0.000 23	95	4	96	1
SQ-12-8	5.30	0.048 68	0.001 38	0.100 03	0.002 81	0.014 90	0.000 20	97	3	95	1
SQ-12-9	4.37	0.046 57	0.001 39	0.100 45	0.002 95	0.015 64	0.000 21	97	3	100	1
SQ-12-10	10.49	0.054 34	0.002 24	0.111 11	0.004 49	0.014 83	0.000 22	107	4	95	1
SQ-12-12	4.15	0.053 62	0.001 47	0.111 73	0.003 01	0.015 12	0.000 20	108	3	97	1
SQ-12-13	4.94	0.048 24	0.002 08	0.097 90	0.004 14	0.014 72	0.000 21	95	4	94	1

(邱检生等 2012)。胶莱盆地大西庄发育晚白垩世末(全岩 $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  年龄为  $73.5 \pm 0.3$  Ma, 闫峻等, 2003) 的碱性玄武岩, 其成分明显富钠 ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.43 \sim 2.85$ , 闫峻等, 2003)。因此, 区内幔源中基性火山岩的成分总体具有由钾质向钠质演化的趋势。

#### 4 矿物化学特征

如前所述, 神泉火山岩斑晶及基质均主要由斜

长石组成。电子探针分析结果表明, 这些斜长石显著富钠贫钙,  $\text{Na}_2\text{O} = 10.65\% \sim 12.75\%$ ,  $\text{CaO} = 0.05\% \sim 0.17\%$ , 由探针成分计算的端员组分中 Ab 分子含量均在 97% 以上, 而 An 值均低于 1% (表 2), 种属均为钠长石。基质微晶中存在歪长石, 而斜长石微晶之间的填隙物则主要为正长石 (表 2、图 7)。由于斑晶与基质主要由钠长石组成, 因而导致火山岩明显富钠。

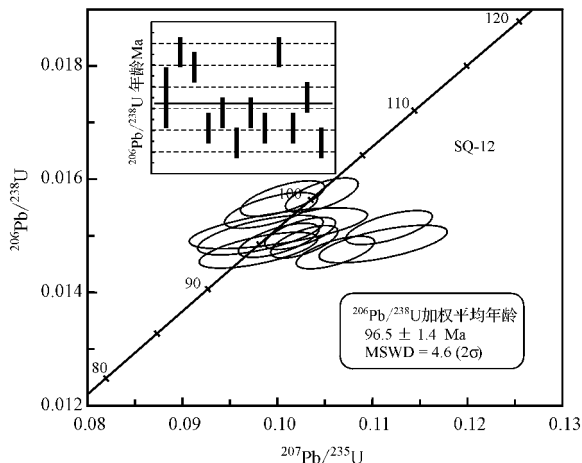


图 6 神泉火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb concordia diagram of zircons from volcanic rocks in Shenquan

### 5 元素地球化学特征

神泉火山岩代表性岩石样品的主量、微量和稀土元素测定结果见表 3。

#### 5.1 主量元素

神泉火山岩的 SiO<sub>2</sub> 含量为 57.73% ~ 58.84% , MgO 含量为 1.16% ~ 2.38% , 变化范围均很小。火山岩富碱, 其 (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) 值介于 10.34% ~ 11.95% , 里特曼指数 (σ) 为 7.13 ~ 8.77 (表 3) , 在 TAS 图解上投影于碱性岩系 (图 3) 。岩石明显富钠, 其 Na<sub>2</sub>O 含量介于 7.21% ~ 8.24% , K<sub>2</sub>O 含量为 2.10% ~ 4.09% , Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 比值介于 1.76 ~ 3.92 , 采用 An-Ab'-Or 三角关系图解 (图 8) 和 K<sub>2</sub>O-

表 2 神泉火山岩矿物电子探针成分分析结果

w<sub>B</sub>/%

Table 2 Electron microprobe analyses of minerals from volcanic rocks in Shenquan

类别	序号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	总量	An	Or	Ab	种属
斑晶	1	68.63	/	19.27	/	/	0.07	10.65	0.05	98.67	0.34	0.29	99.37	钠长石
	2	68.56	/	19.47	0.04	/	0.06	12.75	0.04	100.92	0.24	0.22	99.54	
	3	68.08	/	19.00	/	/	0.05	12.55	0.06	99.74	0.21	0.31	99.48	
	4	67.29	/	18.99	0.02	0.01	0.07	12.20	0.05	98.63	0.33	0.24	99.43	
	5	67.88	/	19.09	0.03	0.01	0.15	12.37	0.39	99.92	0.63	2.04	97.33	
	6	68.78	/	19.20	0.04	/	0.17	12.54	0.07	100.8	0.73	0.37	98.90	
	7	68.61	/	19.00	0.05	/	0.07	12.56	0.06	100.35	0.31	0.30	99.39	
	8	66.95	/	19.92	0.07	0.02	0.08	12.12	0.04	99.2	0.37	0.22	99.41	
基质微晶	1	67.90	0.03	18.96	0.37	/	0.13	12.05	0.09	99.53	0.58	0.46	98.96	钠长石
	2	65.43	1.68	20.29	0.27	0.03	0.17	11.81	0.06	99.74	0.77	0.31	98.92	
	3	67.26	/	19.80	0.08	/	0.14	11.67	0.04	98.99	0.68	0.24	99.08	
	4	66.95	0.01	19.54	0.16	0.01	0.24	11.11	2.94	100.96	1.01	14.70	84.29	
基质裂隙物	1	64.05	/	18.54	0.15	0.01	0.01	0.50	16.11	99.37	0.04	95.50	4.46	正长石
	2	63.71	0.13	18.83	0.20	/	0.01	0.40	16.39	99.67	0.02	96.42	3.56	
	3	62.74	/	18.98	0.35	0.01	/	0.28	16.86	99.22	/	97.51	2.49	
	4	63.24	0.05	18.96	0.18	/	/	0.31	16.98	99.72	0.01	97.26	2.73	

Na<sub>2</sub>O 关系图 (图 9) 进行判别, 样品点均投影于钠质火山岩区。按照 TAS 分类方案建议的 (Na<sub>2</sub>O - 2) > K<sub>2</sub>O 为钠质类型的判别准则, 它们也均为钠质火山岩, 因此, 神泉火山岩为典型的钠质火山岩。

#### 5.2 稀土和微量元素特征

神泉火山岩稀土元素相对于球粒陨石标准化配分曲线如图 10a, 图 10b 为其微量元素相对于原始地幔标准化的蛛网图。由图表资料可以看出, 该区火山岩具有较高的稀土元素总量, ΣREE = 411.3 × 10<sup>-6</sup> ~ 456.3 × 10<sup>-6</sup>; 富轻稀土元素, LREE/HREE = 19.53 ~ 21.10 (La/Yb)<sub>N</sub> = 29.69 ~ 33.26, 其球

粒陨石标准化的配分型式呈明显的右倾型, 其中轻稀土元素之间的分馏程度明显高于重稀土元素, (La/Sm)<sub>N</sub> 和 (Gd/Yb)<sub>N</sub> 值分别为 6.07 ~ 6.51 和 2.56 ~ 2.83; 岩石缺乏明显的铕异常 (δEu = 0.77 ~ 0.82), 反映成岩过程中斜长石的分离结晶作用不显著。

微量元素组成上, 神泉火山岩富集 Rb, Ba, K 等大离子亲石元素, 贫 Nb, Ta, Ti 等高场强元素, 具有与俯冲作用有关岩浆岩的典型特征 (Kelemen *et al.*, 1990; Stolz *et al.*, 1996)。在原始地幔标准化蛛网图上具有一定的 Pb 负异常, 与区内富钾火山岩

表 3 神泉火山岩主量(  $w_B/\%$  )、微量和稀土元素(  $w_B/10^{-6}$  )含量Table 3 Major(  $w_B/\%$  ), trace and rare(  $w_B/10^{-6}$  ) element content of volcanic rocks in Shenquan

样号	SQ-3	SQ-8	SQ-9	SQ-10	SQ-12	SQ-14	SQ-15
SiO <sub>2</sub>	58.00	58.38	57.73	58.84	58.26	58.83	58.67
TiO <sub>2</sub>	0.85	0.83	0.86	0.83	0.82	0.83	0.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.62	17.53	17.38	17.25	17.07	17.2	17.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>1</sup>	6.87	6.01	6.24	6.00	7.12	6.83	6.60
MnO	0.06	0.04	0.08	0.10	0.07	0.06	0.05
MgO	2.06	2.38	2.29	2.20	1.37	1.16	1.64
CaO	1.66	1.54	1.63	2.00	1.98	1.75	1.57
Na <sub>2</sub> O	8.24	8.24	7.99	8.24	7.21	8.20	7.66
K <sub>2</sub> O	2.10	2.58	2.29	2.55	4.09	3.32	3.51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.82	0.82	0.82	0.79	0.78	0.79	0.81
烧失	2.14	2.05	2.97	1.81	1.49	0.96	1.90
总量	100.5	100.5	100.4	100.7	100.4	100.0	100.5
$\sigma$	7.13	7.61	7.17	7.35	8.37	8.38	7.96
ALK	10.34	10.82	10.28	10.79	11.30	11.52	11.17
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	3.92	3.19	3.49	3.23	1.76	2.47	2.18
Cs	0.50	0.29	0.27	0.34	0.36	0.18	0.24
Rb	30.6	31.9	29.5	33.4	51.7	41.1	43.7
Sr	630	473	560	550	642	394	488
Ba	497	449	625	1267	1364	684	980
Sc	9.64	9.12	9.40	9.77	9.28	9.15	9.01
Y	29.6	27.1	28.1	27.0	26.9	27.9	27.0
Ga	21.4	19.1	21.7	22.6	19.1	21.2	22.0
Nb	28.2	28.1	29.1	28.5	28.3	27.7	28.7
Ta	1.39	1.36	1.42	1.38	1.36	1.36	1.40
Zr	384	393	399	384	386	391	395
Hf	7.27	7.33	7.46	7.18	7.26	7.33	7.43
U	1.34	1.14	1.28	1.36	0.94	1.00	1.41
Th	6.29	6.39	6.40	6.17	6.04	6.14	6.25
Pb	13.2	11.6	11.3	11.1	9.98	10.1	11.9
V	84.9	78.2	96.3	82.6	68.8	64.7	98.6
Cr	36.1	36.4	37.3	40.0	34.2	34.4	50.0
Co	14.4	10.4	13.6	13.6	12.4	11.5	12.2
Ni	25.3	18.5	25.3	23.8	20.7	18.6	28.1
La	109	105	115	101	108	108	113
Ce	191	196	192	185	191	189	192
Pr	22.1	22.2	22.9	20.7	21.8	21.8	21.9
Nd	76.4	75.7	78.2	72.0	75.4	77.1	76.1
Sm	11.2	10.8	11.3	10.4	11.0	11.2	10.9
Eu	2.60	2.39	2.62	2.41	2.62	2.59	2.58
Gd	7.93	7.50	7.85	7.35	7.69	7.80	7.68
Tb	0.99	0.92	0.97	0.91	0.95	0.96	0.95
Dy	5.24	4.95	5.20	4.86	5.00	5.03	5.00
Ho	1.00	0.95	0.98	0.93	0.94	0.95	0.95
Er	2.71	2.55	2.63	2.53	2.46	2.55	2.55
Tm	0.38	0.37	0.38	0.36	0.34	0.36	0.36
Yb	2.46	2.36	2.43	2.29	2.20	2.27	2.34
Lu	0.38	0.37	0.38	0.36	0.34	0.35	0.37
ΣREE	433.0	431.5	443.1	411.3	430.1	429.8	436.6
LR/HR	19.53	20.61	20.28	19.99	20.58	20.20	20.61
(La/Yb) <sub>N</sub>	29.75	29.86	31.94	29.69	33.26	32.09	32.60
(La/Sm) <sub>N</sub>	6.11	6.10	6.42	6.11	6.18	6.07	6.51
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	2.60	2.56	2.61	2.59	2.83	2.77	2.65
δEu	0.80	0.77	0.81	0.80	0.82	0.81	0.82

$\sigma$  为里特曼指数; ALK = K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>1</sup> 代表全铁。



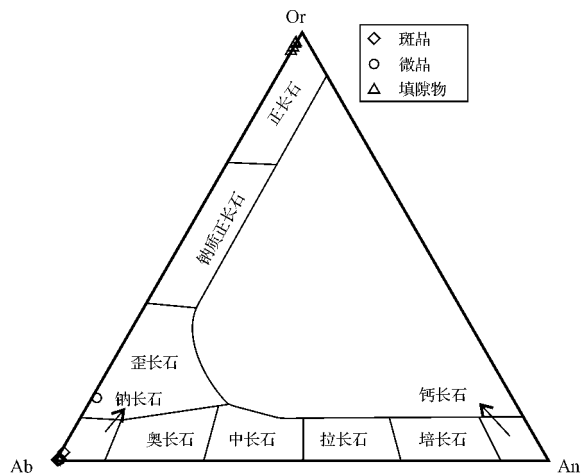


图 7 神泉火山岩中长石斑晶和基质的 An - Ab - Or 三角图解

Fig. 7 An - Ab - Or triangle diagram for feldspars in phenocryst and matrix of Shenquan volcanic rocks

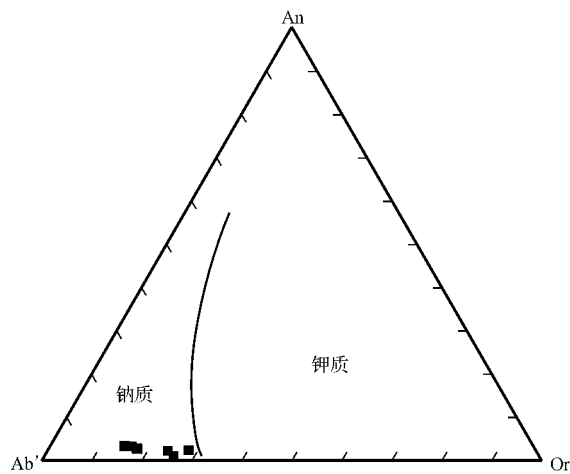


图 8 神泉火山岩 An - Ab - Or 三角图解 (底图据 Irvine and Baragar, 1971)

Fig. 8 An - Ab - Or triangle diagram of volcanic rocks in Shenquan (base map after Irvine and Baragar, 1971)

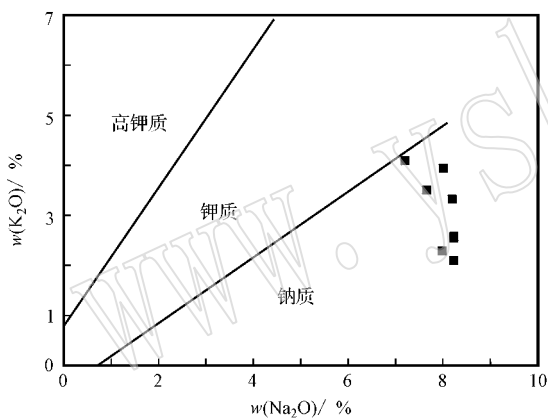


图 9 神泉火山岩 K<sub>2</sub>O - Na<sub>2</sub>O 关系图 (底图据 Middlemost, 1972)

Fig. 9 K<sub>2</sub>O versus Na<sub>2</sub>O diagram of volcanic rocks in Shenquan (base map after Middlemost, 1972)

常表现出 Pb 的正异常有较明显的区别。神泉火山岩的上述稀土和微量元素组成特征与邻近的方城玄武岩十分相似 (图 10a、10b), 表明二者的源区组成和成岩过程有相似性。

## 6 Sr-Nd 同位素组成

神泉火山岩代表性样品的 Sr-Nd 同位素组成及根据年龄计算的有关参数见表 4。由表中数据可看出, 区内火山岩的 Sr、Nd 同位素组成相对均一, 其  $I_{Sr} = 0.7068 \sim 0.7077$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = -16.7 \sim -16.8$ ,

指示火山岩源区具有富集地幔特征。沂沭断裂带及二侧中生代典型幔源岩石均具有类似的 Sr、Nd 同位素组成, 如方城玄武岩的  $I_{Sr} = 0.7096 \sim 0.7101$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = -13.1 \sim -14.4$  (Zhang *et al.*, 2002), 即墨玄武岩的  $I_{Sr} = 0.7072 \sim 0.7075$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = -15.9 \sim -17.0$  (Fan *et al.*, 2001), 莱芜玄武质安山岩  $I_{Sr} = 0.7075 \sim 0.7081$ ,  $\epsilon_{Nd}(t) = -14.3 \sim -16.0$  (Ying *et al.*, 2006), 说明区内源区地幔的富集特征具有普遍性。

## 7 岩石成因讨论

前人对沂沭断裂带及其两侧地区晚中生代中基性火山岩的研究均表明, 这些火山岩的岩浆在上升过程中未受到显著的浅部地壳物质的混染, 如方城玄武岩含有辉石岩捕虏体和橄榄石捕虏晶, 说明其岩浆上升速度快, 不具备与陆壳物质发生强烈相互作用的地质前提 (Zhang *et al.*, 2002)。蒙阴钾质火山岩中尽管未发现幔源包体, 但岩石的  $K_2O/P_2O_5$ 、 $K_2O/TiO_2$  比值相对稳定, 全岩 Sr、Nd 同位素组成与从全岩中分离出的单斜辉石单矿物十分接近 (Qiu *et al.*, 2002)。神泉钠质火山岩的稀土和微量元素特征与邻近的方城玄武岩相似 (图 10a、10b), 其 Sr、Nd 同位素 (特别是 Nd 同位素) 组成较均一, 岩石的  $K_2O/TiO_2$  和  $K_2O/P_2O_5$  比值变化范围均较小, 这些特征也说明其成岩过程中浅部地壳物质的混染作

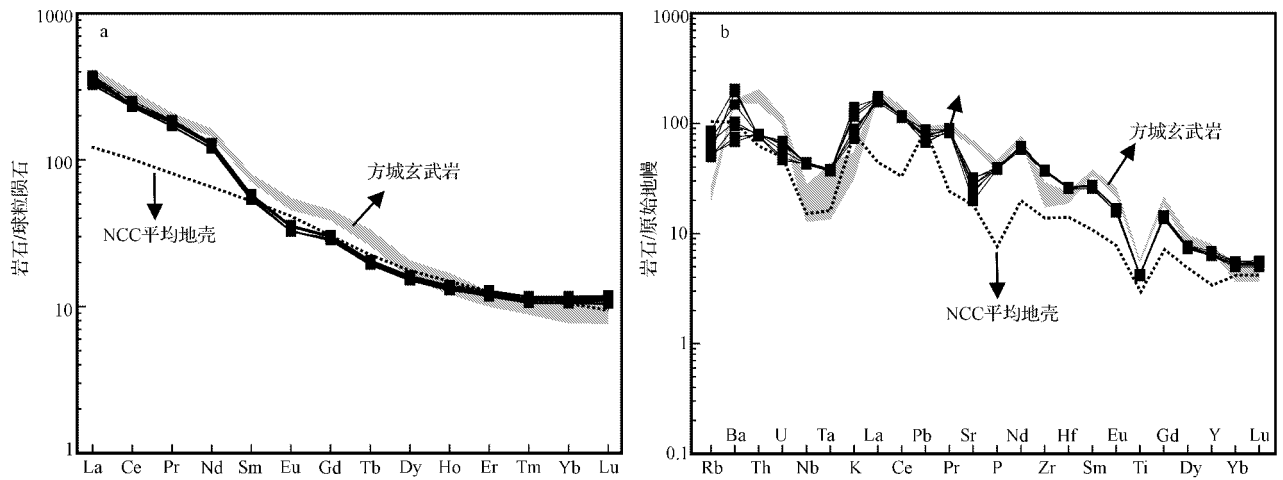


图 10 神泉火山岩稀土元素配分曲线 (a) 及微量元素蛛网图 (b)

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) of volcanic rocks in Shenquan

球粒陨石数据引自 Boynton (1984), 原始地幔数据引自 McDonough and Sun (1995), 虚线为 NCC (华北克拉通) 平均地壳值 (鄢明才和迟清华, 1997), 方城玄武岩数据引自 Zhang 等 (2002)

normalized values for chondrite from Boynton (1984), and those for primitive mantle from McDonough and Sun (1995), dotted line representing the average crust value of NCC (North China Craton) (after Yan Mingcai and Chi Qinghua, 1997), data of Fangcheng basalts from Zhang *et al.* (2002)

表 4 神泉火山岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of volcanic rocks in Shenquan

样号	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$	$I_{\text{Sr}}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{2\text{DM}}/\text{Ga}$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
SQ-5	0.31	0.708 180	4	0.707 749	0.088 700	0.511 716	3	-16.7	1.74	-0.55
SQ-10	0.18	0.707 907	3	0.707 666	0.087 200	0.511 710	2	-16.8	1.73	-0.56
SQ-12	0.23	0.707 078	3	0.706 759	0.088 500	0.511 716	2	-16.7	1.74	-0.55
SQ-14	0.30	0.707 298	4	0.706 884	0.087 700	0.511 707	5	-16.8	1.74	-0.55

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  所示的  $2\sigma$  误差为小数点后的最后位数, 表中所列  $t_{2\text{DM}}$  年龄计算公式如下:  $t_{2\text{DM}} = (1/\lambda) \ln(1 + A)$ ,  $A = \frac{[(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] - [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}}] (e^{\lambda t} - 1)}{[(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}]}$ , 式中: 下角标 m 代表样品现今测定值; 下角标 DM 代表亏损地幔值 ( $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2136$ , ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513151$  (Miller and O'Nions, 1985); 下角标 c 代表大陆壳平均值 ( $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}} = 0.118$  (Jahn and Condie, 1995),  $t$  为样品结晶年龄  $\lambda = 6.54 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$ 。

用不强, 因此, 我们可以有效地利用全岩元素-同位素组成反演源区地幔组成。

神泉钠质火山岩的元素和 Sr-Nd 同位素特征指示其源区应为富集地幔。如前所述, 沂沭断裂带及其两侧中生代典型幔源岩石均具有类似的 Sr、Nd 同位素组成, 这一特征甚至可以扩展至整个华北克拉通中生代的中基性岩石, 如华北克拉通北部辽西义县组玄武岩 ( $t = 130 \sim 135 \text{ Ma}$ ) 的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化于  $-6.8 \sim -11.0$  之间 (周新华等, 2001), 北京南口中生代橄榄粗玄武岩 ( $t = 128 \text{ Ma}$ ) 的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-8.5 \sim -13.9$  (邵济安等, 2001), 太行山中生代煌斑岩 ( $t = 120 \text{ Ma}$ ) 的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-8.3 \sim -15.2$  (Chen and Zhai, 2003), 说明华北克拉通中生代岩石圈地

幔的富集特征具普遍性。

对华北克拉通中生代大规模富集岩石圈地幔的形成机制目前存在着不同的认识, 概括起来主要有以下几种观点: ① 华北中生代地幔的富集主要与扬子-华北板块碰撞及它们之间的大陆深俯冲作用有关, 由于深俯冲的扬子大陆地壳同软流圈地幔相互作用形成富集地幔 (Zhou *et al.*, 2002; 周新华等, 2005); ② 华北中生代地幔的富集主要与岩石圈大规模拆沉作用有关, 由于太古宙古老地壳物质被拆沉而重循环进入地幔, 导致地幔成分发生改变形成富集地幔 (洪大卫等, 2003; Gao *et al.*, 2004, 2008); ③ 华北中生代地幔的富集与古太平洋板块的俯冲有关, 是俯冲板片析出熔体和岩石圈地幔熔

体混合作用的结果(Chen *et al.*, 2004)。

由于深俯冲的扬子大陆地壳的影响难以波及到华北腹地和北缘,古太平洋板块俯冲的影响应主要限于华北克拉通东部,而中生代镁铁质岩石具显著偏低  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的特征在整个华北克拉通又具普遍性,因此,我们认为岩石圈大规模拆沉作用应该是导致华北中生代地幔富集的主控因素。已有的研究表明,加厚下地壳镁铁-超镁铁岩石相变为高密度的榴辉岩是造成岩石圈拆沉作用的主因,因拆沉进入地幔的榴辉岩将发生部分熔融,所产生的熔体与橄榄岩反应是造成华北陆下岩石圈地幔化学不均一性的主要机制(Gao *et al.*, 2009),这一过程目前多数学者认为应主要发生在中生代晚期(Chen *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2012)。但华北克拉通周缘地幔的富集还存在着有先期因俯冲进入地幔的壳源物质的

影响,如以鲁西地块为例,其北部济南-邹平一带镁铁质岩石的  $I_{\text{Sr}}$  值变化于 0.703 96~0.705 98(李全忠等, 2007),而南部费县-蒙阴一带镁铁质岩石则变化于 0.708 44~0.712 47,胶莱盆地中生代镁铁质岩石的  $I_{\text{Sr}}$  值也偏高(0.707 24~0.707 50, Fan *et al.*, 2001),因此,华北克拉通南缘幔源岩石极可能存在有因深俯冲而进入地幔的扬子陆壳的影响。选择亏损地幔(DMM)分别与华北克拉通上壳(NCC UC)、华北克拉通下壳(NCC LC)及扬子克拉通下壳(YC LC)作为二元混合的端员,按表 5 所列参数进行模拟计算,可以看出,神泉钠质火山岩的  $\text{Sr}$ 、 $\text{Nd}$  同位素组成最接近亏损地幔(DMM)与扬子克拉通下地壳(YC LC)的混合线(图 11),这也说明火山岩源区中应含有因俯冲进入地幔的扬子陆壳组分。

值得注意的是,神泉火山岩在构造位置上较之

表 5 神泉钠质火山岩 Sr-Nd 同位素组成二元混合模拟采用的端员参数

Table 5 Parameters used in binary mixing simulation for Sr-Nd isotopic compositions of Shenquan sodic volcanic rocks

端员	亏损地幔(DMM)	华北下壳(NCC LC)	华北上壳(NCC UC)	扬子下壳(YC LC)
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.702 64	0.712 00	0.720 00	0.711 00
$\tau_{\text{c}}(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	6	477	350	300
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.513 151	0.511 148	0.511 958	0.511 000
$\tau_{\text{c}}(\text{Nd}) \times 10^{-6}$	0.33	8	26	20
资料来源	Zindler 和 Hart(1986)	Zhou 等(2002)	Jahn 等(1999)	Jahn 等(1999)

蒙阴-费县盆地的富钾火山岩更靠近大别-苏鲁聚合带,因此,如果其源区仅受到因深俯冲进入地幔的扬子陆壳物质的改造以及华北克拉通大规模拆沉导致的富集事件的影响,则其  $I_{\text{Sr}}$  值(=0.706 8~0.707 7)应不低于蒙阴-费县盆地的富钾火山岩( $I_{\text{Sr}}$  = 0.708 715~0.711 418, Qiu *et al.*, 2002)。但实际情况正好相反,其  $I_{\text{Sr}}$  值介于鲁西地块南部与北部的镁铁质岩石之间(图 11),这一特征指示其源区可能还受到了软流圈地幔组分的进一步改造。在原始地幔标准化蛛网图上,神泉钠质火山岩表现出一定的 Pb 负异常,与区内富钾火山岩多具 Pb 正异常的特征明显不同(图 12),其 Nb、Ta 等高场强元素的亏损程度也较弱。一般而言,地壳物质以明显亏损 Nb、Ta 等高场强元素和富集 Pb 为特征,软流圈地幔起源岩浆则常具 Pb 负异常,因此,微量元素组成也指示神泉钠质火山岩源区在先前富集地幔的基础上进一步叠加了软流圈地幔组分的改造。

徐义刚等(2007)对山东晚中生代岩浆岩的研究发现,其锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值随岩石年龄变新而逐渐增

大,如年龄为 125~132 Ma 锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于 -10~-18 之间,而年龄为 120~125 Ma 的锆石其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -1~-8。这一研究结果指示在山东晚中生代岩浆作用中,随着时代的变新,软流圈地幔组分的贡献越来越显著。郑建平等(2006)通过对比研究郯庐断裂带内、外地幔包体发现,断裂带内的地幔交代作用明显加强,表明该断裂带是新生软流圈物质上涌及地幔改造与置换作用的良好通道。穿越郯庐断裂带的一系列地学断面显示,该断裂带下的岩石圈比两侧薄 20~40 km(朱光等, 2002),郯庐断裂带从晚白垩世—早第三纪已转变成巨型的伸展构造,断裂引张程度不断增强(朱光等, 2004)。谢成龙等(2008)进一步指出郯庐断裂带是华北克拉通岩石圈减薄中的强减薄带,它为软流圈地幔上涌并对原有地幔进行改造提供了良好通道。区内钠质火山岩空间上主要分布在断裂带内部,应是断裂带内部更有利于软流圈地幔上涌,并可能对原有富集岩石圈地幔进行再改造所致。对国内外典型裂谷带(如东非裂谷东支、挪威奥斯陆裂谷、德国莱茵地堑和我国

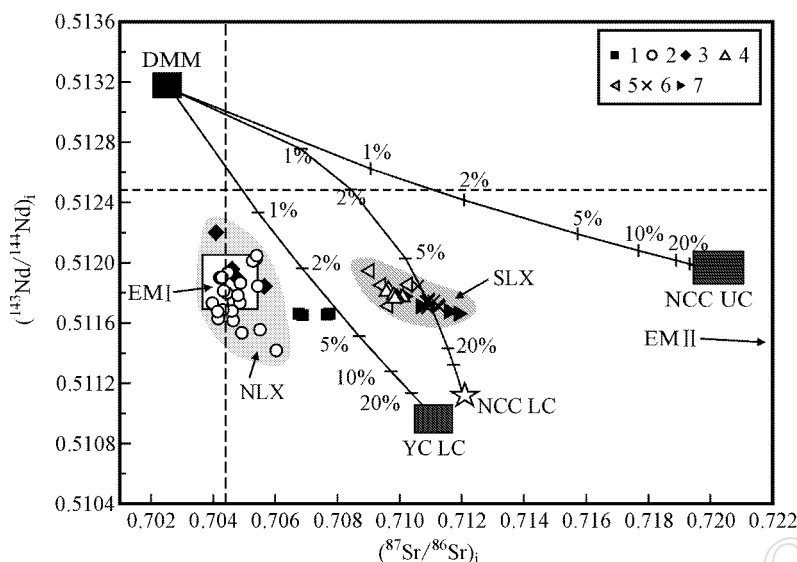


图 11 神泉钠质火山岩 Sr-Nd 同位素组成二元混合模拟关系图

Fig. 11 Binary mixing simulation for Sr-Nd isotopic compositions of Shenquan sodic volcanic rocks

1—神泉钠质火山岩; 2—邹平辉长岩; 3—济南辉长岩; 4—方城玄武岩; 5—平邑镁铁质火山岩; 6—沂南辉长岩; 7—蒙阴富钾火山岩; NLX—鲁西地块北部中生代镁铁质岩石; SLX—鲁西地块南部中生代镁铁质岩石; DMM—亏损地幔; EM I 和 EM II—富集地幔; YC LC—扬子克拉通下地壳; NCC LC—华北克拉通下地壳; NCC UC—华北克拉通上地壳; 资料引自 Guo 等 (2001), Zhang 等 (2002), Xu 等 (2004), Ying 等 (2006), 李全忠等 (2007), 所有样品的同位素组成均计算到 96.5 Ma, 各端员参数的选择见表 5, 图中曲线上的数字代表地壳端员的百分数

1—Shenquan sodic volcanic rocks; 2—Zouping gabbro; 3—Jinan gabbro; 4—Fangcheng basalt; 5—Pingyi mafic volcanic rocks; 6—Yinan gabbro; 7—Mengyin K-rich volcanic rocks; NLX—Mesozoic mafic igneous rocks from the north part of western Shandong Block; SLX—Mesozoic mafic igneous rocks from the south part of western Shandong Block; DMM—depleted mantle; EM I and EM II—enriched mantle; YC LC—lower crust of Yangtze Craton; NCC LC—lower crust of North China Craton; NCC UC—upper crust of North China Craton; Data from Guo *et al.* (2001), Zhang *et al.* (2002), Xu *et al.* (2004), Ying *et al.* (2006) and Li Quanzhong *et al.* (2007); All the ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) and  $\epsilon(\text{Nd})_t$  values corrected to 96.5 Ma; parameters of each end-members used in the simulation listed in Table 5, data shown on the binary mixing curves representing the proportions of crust end-member

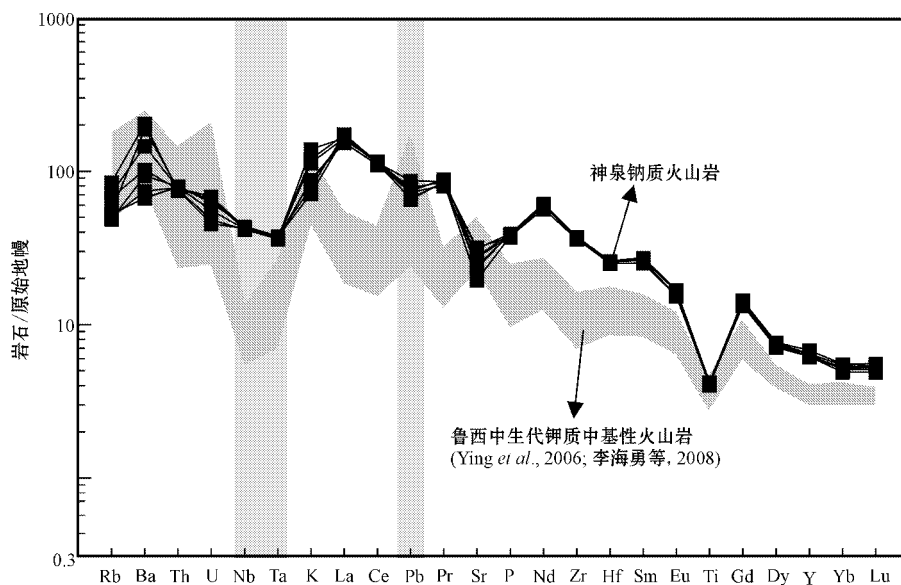


图 12 神泉钠质火山岩与鲁西中生代钾质中基性火山岩微量元素分布模式对比图

Fig. 12 Comparisons of primitive mantle-normalized trace element patterns between Shenquan sodic volcanic rocks and Mesozoic potassic mafic-intermediate volcanic rocks of western Shandong

的攀西裂谷等)钠质火山岩的研究均表明,这些火山岩的形成均与软流圈地幔的上涌有关(Furman, 2007; Shellnutt and Jahn, 2011)。沂沭断裂带内部汤头盆地共存钾质与钠质火山岩的现象也表明,其晚期钠质火山岩较早期钾质火山岩的源区中含有较高的亏损软流圈地幔组分(邱检生等, 2012)。综上所述,神泉钠质火山岩的源区地幔应是叠次改造事件综合作用的结果,即在三叠纪时期,首先遭受了因深俯冲进入地幔的扬子陆壳物质的改造,随后又受到了因华北岩石圈大规模拆沉导致的地幔富集作用,至晚白垩世,随着郯庐断裂引张作用加剧,又叠加了上涌的软流圈地幔的改造,同时在断裂减压作用的影响下,促使了这一经叠次改造的富集地幔的部分熔融。由于地幔岩石的部分熔融一般只能形成玄武岩浆,因此这一岩浆必须经进一步的分异演化才能形成粗安质的火山岩。神泉钠质火山岩的  $I_{Sr}$  值( $=0.7068\sim0.7077$ )与区内玄武岩相近( $SiO_2=49.20\%\sim51.76\%$ ,  $I_{Sr}=0.70616\sim0.70621$ , 匡永生等, 2012)相近,暗示二者有相同的岩浆源区,其较之玄武岩显著富硅、富碱,贫钙、镁及高  $Rb/Sr$  和  $Rb/Ba$  比值的特点充分反映这一粗安质火山岩经历了明显的分异演化。因此,神泉钠质火山岩是由叠次改造的富集地幔部分熔融形成的岩浆经进一步分异演化的产物。

## 8 结论

(1) 神泉火山岩富碱富钠( $Na_2O/K_2O=1.76\sim3.92$ ),多种方法判别表明其属于典型的钠质火山岩。其锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $96.5\pm1.4$  Ma,较之区内中生代占主体的富钾火山岩的形成年龄晚,综合对比表明,沂沭断裂带及其两侧中生代火山岩总体具有由钾质向钠质演变的趋势。

(2) 神泉钠质火山岩富轻稀土和大离子亲石元素,贫高场强元素,轻重稀土元素分馏显著,具有富集的 Sr、Nd 同位素组成[ $I_{Sr}=0.7068\sim0.7077$ ,  $\epsilon Nd(t)=-16.7\sim-16.8$ ],表明其总体应起源于富集的岩石圈地幔的部分熔融,但在微量元素蛛网图上,神泉钠质火山岩表现出一定的  $Pb$  负异常,说明其源区在先期富集地幔的基础上,叠加有软流圈地幔组分的改造。

(3) 神泉钠质火山岩源区极可能遭受了因扬子板块深俯冲和华北克拉通岩石圈拆沉等多次富集事

件的影响,至晚白垩世,随着郯庐断裂引张的加剧,诱发了软流圈地幔上涌,并对先期形成的富集地幔进一步改造,同时在断裂减压作用的影响下,促使了这一经叠次改造的富集地幔的部分熔融,由此产生的岩浆经进一步分异演化,最终导致了神泉钠质火山岩的形成。

## References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}Pb$ [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.
- Black L P and Gulson B L. 1978. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways range, Northern Territory[J]. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3: 227~232.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Elements Geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier, 63~144.
- Chen B and Zhai M. 2003. Geochemistry of Late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle[J]. *Geological Magazine*, 140(1): 87~93.
- Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, et al. 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang orogen, North China Craton: Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148: 489~501.
- Chen L H and Zhou X H. 2004. Ultramafic xenoliths in Mesozoic diorite in west Shandong Province[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 47(6): 489~499.
- Corfu F and Sven Dahlgren S. 2008. Perovskite U-Pb ages and the Pb isotopic composition of alkaline volcanism initiating the Permo-Carboniferous Oslo Rift[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 265: 256~269.
- Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. 2003. Atlas of zircon textures[A]. Hancher J M and Hoskin P W O. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*[C]. 53: 469~500.
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*(A), 26: 733~746.
- Furman T. 2007. Geochemistry of East African Rift basalts: An overview[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 48: 147~160.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton[J]. *Nature*, 432: 892~897.
- Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 270: 41~53.

- Gao S, Zhang J F, Xu W L, *et al.* 2009. Delamination and destruction of the North China Craton [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 3367~3378.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, *et al.* 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons [J]. *Precambrian Research*, 131: 231~282.
- Guo F, Fan W M, Wang Y J, *et al.* 2001. Late Mesozoic mafic intrusives complexes in North China Block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 26: 759~771.
- Hong Dawei, Wang Tao, Tong Ying, *et al.* 2003. Mesozoic granitoids from North China Block and Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt and their deep dynamic process [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 231~256 (in Chinese with English abstract).
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523~548.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology [J]. *Chemical Geology*, 211: 47~69.
- Jahn B M and Condie K C. 1995. Evolution of the Kaapvaal craton as viewed from geochemical and Sm-Nd isotopic analyses of intracratonic pelites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2239~2258.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, *et al.* 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. *Chemical Geology*, 157(1~2): 119~146.
- Jin Longyu. 1994. Petrology and geochemical characteristics of the lower Cretaceous volcanic rocks in the Yishu rift zone and adjacent area [J]. *Geology of Shandong*, 10(1): 231~256 (in Chinese with English abstract).
- Kelemen P B, Kingler R J and Johnson K T M. 1990. High field strength element depletions in arc basalt due to mantle-magma interaction [J]. *Nature*, 345: 521~524.
- Kuang Yongsheng, Pang Chongjin, Luo Zhenyu, *et al.* 2012.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology and geochemistry of mafic rocks from Qingshan Group, Jiaodong area: Implications for the destruction of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1073~1091 (in Chinese with English abstract).
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, *et al.* 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. *Journal of Petrology*, 27: 745~750.
- Li Haiyong, Xu Zhaowen, Lu Xiancai, *et al.* 2008. Evolution of Mesozoic volcanic rocks in the Zouping basin, western Shandong Province: Constraints for mantle sources [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2537~2547 (in Chinese with English abstract).
- Li Quanzhong, Xie Zhi, Chen Jiangfeng, *et al.* 2007. Pb-Sr-Nd isotopic characteristics of the gabbros from Jinan and Zouping and the contribution of the lower crust to the magma source [J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 297~310 (in Chinese with English abstract).
- Liu Mingwei, Zhang Qingyu and Song Wanqian. 2003. Division of the Cretaceous lithostratigraphic and volcanic sequences of Shandong [J]. *Journal of Stratigraphy*, 27(3): 247~253 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ye, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu, *et al.* 2007. Evaluation of accuracy and long-term stability of determination of 37 trace elements in geological samples by ICP-MS [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1023~1210 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. *Isoplot/Ex (rev. 2.49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]*. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, (1): 1~58.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 120: 223~253.
- Middlemost E A K. 1972. A simple classification of volcanic rocks [J]. *Bulletin of Volcanology*, 36: 382~397.
- Miller R G and O'Nions R K. 1985. Source of Precambrian chemical and clastic sediments [J]. *Nature*, 314: 325~330.
- Pu Wei, Gao Jianfeng, Zhao Kuidong, *et al.* 2005. Separation method of Rb-Sr, Sm-Nd using DCTA and HIBA [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 41(4): 445~450 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Luo Qinghua, *et al.* 2001.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating for volcanic rocks of Qingshan Formation in Jiaolai basin, Eastern Shandong Province: A case study of the Fenlingshan volcanic apparatus in Wulian County [J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 351~355 (in Chinese with English abstract).
- Qiu J S, Xu X S and Lo Q H. 2002. Potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong province:  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating and source tracing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(2): 91~99.
- Qiu Jiansheng, Liu Liang and Li Youlian. 2012. Geochronology and geochemistry of potassic and sodic volcanic rocks in Tangtuo basin, Shandong Provinces: Implications for lithospheric thinning beneath the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1044~1056 (in Chinese with English abstract).
- Schiano P, Clocchiatti R, Ottolini L, *et al.* 2004. The relationship between potassic, calc-alkaline and Na-alkaline magmatism in South Italy volcanoes: A melt inclusion approach [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 121~137.
- Shao Ji'an, Li Xianhua, Zhang Lüqiao, *et al.* 2001. Geochemical condition for genetic mechanism of the Mesozoic bimodal dike swarms in Nankou-Guyajit [J]. *Geochimica*, 30(6): 517~524 (in Chinese

- with English abstract ).
- Shellnutt J G and Jahn B M. 2011. Origin of Late Permian Emeishan basaltic rocks from the Panxi region ( SW China ): Implications for the Ti-classification and spatial-compositional distribution of the Emeishan flood basalts [ J ]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 199 : 85~95.
- Stolz A J, Jochum K P, Spettel B, *et al.* 1996. Fluid and melt-related enrichment in the sub-arc mantle : evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts [ J ]. *Geology*, 24 : 587~590.
- Velázquez V F, Comin-Chiaromonte P, Cundari A, *et al.* 2006. Cretaceous Na-alkaline magmatism from the Misiones Province ( Paraguay ): Its relationships with the Paleocene Na-alkaline analog from Asuncion and geodynamic significance [ J ]. *The Journal of Geology*, 114 : 593~614.
- Wang D Z, Ren Q J, Qiu J S, *et al.* 1996. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite province, eastern China, and their metallogenesi [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 9( 3 ): 246~259.
- Winchester J A and Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination : application to altered and metamorphosed igneous rocks [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 70 : 175~195.
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 49( 15 ): 1 554~1 569.
- Xie Chenglong, Zhu Guang, Niu Manlan, *et al.* 2008. Geochemistry of Late Mesozoic volcanic rocks from the Chaohu-Lujiang segment of the Tan-Lu fault zone and lithospheric thinning processes [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 24( 8 ): 1 823~1 838 ( in Chinese with English abstract ).
- Xu Y G, Ma J L, Huang X L, *et al.* 2004. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province : petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton [ J ]. *International Journal of Earth Sciences*, 93 : 1 025~1 041.
- Xu Yigang, Wu Xiangyang, Luo Zhenyu, *et al.* 2007. Zircon Hf isotope compositions of Middle Jurassic-Early Cretaceous intrusions in Shandong Province and its implication [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 23( 2 ): 307~316 ( in Chinese with English abstract ).
- Xu Zhiqin, Zhang Qiaoda and Zhao Min. 1982. The main characteristics of the paleorift in the middle section of the Tancheng-Lujiang fracture zone [ J ]. *Acta Geoscientia Sinica*, ( 4 ): 17~41 ( in Chinese with English abstract ).
- Yan Mingcai and Chi Qinghua. 1997. Chemical Compositions of Continental Crust and Rocks in Eastern China [ M ]. Beijing : Sciences Press, 15~21 ( in Chinese ).
- Yan Jun, Chen Jiangfeng, Xie Zhi, *et al.* 2003. Mantle xenoliths from Late Cretaceous basalt in eastern Shandong Province : New constraint on the timing of lithospheric thinning in eastern China [ J ]. *Chinese Sciences Bulletin*, 48( 14 ): 1 570~1 574.
- Yang D B, Xu W L, Gao S, *et al.* 2012. Repeated modification of lithospheric mantle in the eastern North China Craton : Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating of dunite xenoliths in western Shandong [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 57 : 651~659.
- Ying J F, Zhou X H and Zhang H F. 2006. The geochemical variations of mid-Cretaceous lavas across western Shandong Province, China and their tectonic implications [ J ]. *International Journal of Earth Sciences*, 95 : 68~79.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, *et al.* 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton : evidence from major-element, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144 : 241~253.
- Zhang Zengqi and Liu Mingwei. 1996. Lithostratigraphy of Shandong Province [ M ]. Wuhan : China University of Geosciences Press, 207~254 ( in Chinese ).
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, Griffin W L, *et al.* 2006. Lithospheric thinning accompanying mantle lateral spreading, erosion and replacement beneath the eastern part of North China : evidence from peridotites [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 13( 2 ): 76~85 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhou X H, Sun M, Zhang G H, *et al.* 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China : isotopic evidence from granulite xenolith in Hannuoba, Sino-Korean craton [ J ]. *Lithos*, 62 : 111~124.
- Zhou Xinhua, Zhang Hongfu, Ying Jifeng, *et al.* 2005. Geochemical records of subsequent effects of continental deep subduction : discussion of mantle source variations of the Mesozoic lithospheric mantle of the North China Craton [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 21( 4 ): 1 255~1 263 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhou Xinhua, Zhang Guohui, Yang Jinhui, *et al.* 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China Craton and implications to geodynamic processes [ J ]. *Geochimica*, 30( 1 ): 10~23 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhu Guang, Song Chuanzhong, Niu Manlan, *et al.* 2002. Lithospheric textures of the Tan-Lu fault zone and their genetic analysis [ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 8( 3 ): 248~256 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhu Guang, Wang Daoxuan, Liu Guosheng, *et al.* 2004. Evolution of the Tan-Lu fault zone and its response to plate movements in west Pacific basin [ J ]. *Chinese Journal of Geology*, 39( 1 ): 36~49 ( in Chinese with English abstract ).
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics [ J ]. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 14 : 493~571.

## 附中文参考文献

- 洪大卫,王涛,童英,等. 2003. 华北地台和秦岭-大别-苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程[J]. 地学前缘, 10(3): 231~256.
- 金隆裕. 1994. 沂沭裂谷及其邻区晚白垩世火山熔岩地球化学特征[J]. 山东地质, 10(1): 40~51.
- 匡永生,庞崇进,罗震宇,等. 2012. 胶东青山群基性火山岩的 Ar-Ar 年代学和地球化学特征:对华北克拉通破坏过程的启示[J]. 岩石学报, 28(4): 1073~1091.
- 李海勇,徐兆文,陆现彩,等. 2008. 鲁西邹平盆地中生代火山岩的演化:对地幔源区的约束[J]. 岩石学报, 24(11): 2537~2547.
- 李全忠,谢智,陈江峰,等. 2007. 济南和邹平辉长岩的 Pb-Sr-Nd 同位素特征和岩浆源区中下地壳物质贡献[J]. 高校地质学报, 13(2): 297~310.
- 刘明渭,张庆玉,宋万千. 2003. 山东省白垩纪岩石地层序列与火山岩系地层划分[J]. 地层学杂志, 27(3): 247~253.
- 刘晔,柳小明,胡兆初,等. 2007. ICP-MS 测定地质样品中 37 个元素的准确度和长期稳定性分析[J]. 岩石学报, 23(5): 1203~1210.
- 濮巍,高剑峰,赵葵东,等. 2005. 利用 DCTA 和 HIBA 快速有效分离 Rb-Sr, Sm-Nd 的方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 41(4): 445~450.
- 邱检生,王德滋,罗清华,等. 2001. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  定年——以五莲分岭山火山机构为例[J]. 高校地质学报, 7(3): 351~355.
- 邱检生,刘亮,李友连. 2012. 山东汤头盆地钾质及钠质火山岩的年代学与地球化学:对华北克拉通岩石圈减薄的启示[J]. 岩石学报, 28(4): 1044~1056.
- 邵济安,李献华,张履桥,等. 2001. 南口-古崖居中生代双峰式岩墙群形成机制的地球化学制约[J]. 地球化学, 30(6): 517~524.
- 谢成龙,朱光,牛漫兰,等. 2008. 郟庐断裂带巢湖-庐江段晚中生代火山岩地球化学特征与岩石圈减薄过程[J]. 岩石学报, 24: 1823~1838.
- 徐义刚,巫祥阳,罗震宇,等. 2007. 山东中侏罗世—早白垩世侵入岩的锆石 Hf 同位素组成及其意义[J]. 岩石学报, 23(2): 307~316.
- 许志琴,张巧大,赵民. 1982. 郟庐断裂中段古裂谷的基本特征[J]. 中国地质科学院院报, (4): 17~41.
- 鄯明才,迟清华. 1997. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京:科学出版社, 15~21.
- 闫峻,陈江峰,谢智,等. 2003. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体:对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据[J]. 科学通报, 48(14): 1570~1574.
- 张增奇,刘明渭. 1996. 山东省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 207~254.
- 郑建平,路凤香,Griffin W L, 等. 2006. 华北东部橄榄岩与岩石圈减薄中的地幔伸展和侵蚀置换作用[J]. 地学前缘, 13(2): 76~85.
- 周新华,张国辉,杨进辉,等. 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义[J]. 地球化学, 30(1): 10~23.
- 周新华,张宏福,英基丰,等. 2005. 大陆深俯冲后效作用的地球化学记录——华北中生代岩石圈地幔源区特征变异的讨论[J]. 岩石学报, 21(4): 1255~1263.
- 朱光,宋传中,牛漫兰,等. 2002. 郟庐断裂带的岩石圈结构及其成因分析[J]. 高校地质学报, 8(3): 248~256.
- 朱光,王道轩,刘国生,等. 2004. 郟庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应[J]. 地质科学, 39(1): 36~49.