

鲁东青山组中性火山岩的地球化学特征： 岩石成因和地质意义

闫 峻^{1*}, 陈江峰²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘 要：山东郯庐断裂东部胶莱盆地下白垩统青山组中性火山岩 SiO_2 含量在 61.14% ~ 64.43% 之间, 在 TAS 上位于亚碱性系列岩石区域, 多数属于粗面英安岩, 少数为粗面安山岩。全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量为 7.41% ~ 8.86%。岩石富集大离子亲石元素 Ba、Th 和 LREE、Pb, 亏损高场强元素 Nb 和 Ti, 具有富集的 Sr、Nd 同位素组成和低的放射成因 Pb。初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 比值为 0.706 98 ~ 0.708 74, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -13.78 ~ -16.44。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ 比值分别为 16.585 ~ 16.719、15.400 ~ 15.411 和 36.724 ~ 37.011。岩石的地球化学特征表明其起源于深俯冲的扬子地壳, 可能为下地壳的部分熔融, 并且有少量的来自软流圈地幔物质的加入, 在岩浆房中经历了单斜辉石和少量斜长石的结晶分异。胶莱盆地 110 Ma 时期, 同位素富集性质的岩石圈地幔在火山岩中没有反映, 暗示了可能已经减薄或置换为同位素亏损的岩石圈地幔, 但深俯冲的扬子地块下地壳在该地区岩石圈之下依然存在, 并对火山活动有物质贡献。

关键词：火山岩; 地球化学; 扬子下地壳; 青山组; 岩石成因论; 胶莱盆地

中图分类号：P581; P597

文献标识码：A

文章编号：0379-1726(2007)01-0001-10

Geochemistry of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin, eastern Shandong Province: Petrogenesis and geological significance

YAN Jun^{1*} and CHEN Jiang-feng²

1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: The Late Cretaceous Qingshan Formation intermediate volcanic rocks in Jiaolai Basin located in east Tancheng-Lujiang fault are silicon-saturation with SiO_2 of 61.14% ~ 64.43%. These rocks belong to meta-alkaline series and most of them are trachydacite with a few show trachyandesite affinity. The total alkaline contents are 7.41% ~ 8.86%. They are characterized by Ba, Th, LREE and Pb enrichment and Nb and Ti depletion, with moderate initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ ratios (0.706 98 ~ 0.708 74), high negative $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (-13.78 ~ -16.44) and low radiogenic Pb isotopic ratios [$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t) = 16.585 \sim 16.719$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t) = 15.400 \sim 15.407$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t) = 36.724 \sim 37.011$]. The geochemical characteristics of these rocks indicate that the primitive magma was dominantly derived from partial melting of deep-subducted crust, probably lower crust of the Yangtze Block, together with a small quantity of melt from the isotopic depleted asthenosphere and underwent crystallized fractionation of clinopyroxene and small plagioclase in magma chamber. At 110 Ma, the isotopic enriched lithospheric mantle under Jiaolai Basin was not geochemically reflected in the volcanic rocks, which implies that the enriched lithospheric mantle might have thinned or transformed into the isotopic depleted lithospheric mantle. However, the deep-subducted lower crust of the Yangtze Block still existed under the lithosphere and contributed to the Late Mesozoic volcanic rocks.

Key words: volcanic rock; geochemistry; lower crust of the Yangtze Block; Qingshan Formation; Jiaolai Basin

收稿日期(Received): 2006-05-16; **改回日期(Revised):** 2006-09-10; **接受日期(Accepted):** 2006-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(40472031); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-107)

作者简介: 闫峻(1966-), 男, 教授, 地球化学专业。

* **通讯作者(Corresponding author):** YAN Jun, E-mail: jyan@ustc.edu, Tel: +86-551-2901993

YAN Jun et al.: Geochemistry of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

0 引言

以郯庐断裂为界,鲁东和鲁西地区陆相火山盆地中广泛发育中生代早白垩世火山岩,鲁西地区火山岩以中基性为主,在地层层序上主要被划归西洼组,而鲁东地区火山岩以中酸性为主,被划归青山组^[1],有的学者把郯庐断裂两侧的这套火山岩都归于青山组^[2-3]。近年来,对鲁西地区青山组火山岩的研究相对较多,该地区火山岩以富钾为特征,一般认为其起源于交代成因的富集的岩石圈地幔^[3-6]。鲁东地区火山岩的研究程度较为薄弱,邱检生等^[3]认为鲁东地区火山岩也属于富钾火山岩类型,在岩石学类型上属于钾玄岩(shoshonite)系列,形成岩石的原始岩浆也同样起源于富集的岩石圈地幔,岩石圈地幔的富集机制是受到古太平洋俯冲洋壳和俯冲的扬子陆壳析出流体的多次交代。然而,本次工作对鲁东青山组火山岩的研究表明,该地区火山岩部分岩石具有富钾的特征,另有一部分岩石为亚碱性,并不富钾,其地球化学特征显示出与前人工作所不同的岩石成因。

1 鲁东地区地质概况

秦岭-大别-苏鲁造山带横贯中国中部,是华北地块和扬子地块之间的三叠纪碰撞造山带^[7-8]。由于郯庐断裂的错移,苏鲁地块相对于大别地块向北平移约 500 km^[9]。一般认为苏鲁地块北界为五莲-烟台断裂^[10-14],把该断裂以北划为华北地块(图 1)。胶莱盆地位于该断裂以北,其西以沂沭断裂(郯庐断裂山东段)为界与鲁西分隔,传统上将之划归华北板块东南缘^[15]。但大别造山带的最新研究发现北淮阳地区应归属扬子地块北缘,这样与北淮阳地区构造位置相似的胶莱盆地也可能是扬子板块的北缘^[16]。盆地的长轴方向呈 NE 向,与区内 NE、NNE 向的断裂构造带一致。结晶基底由新太古界胶东群和古元古界荆山群组成,前者主要为一套中深变质的片麻岩、变粒岩和浅粒岩,并夹有大量的斜长角闪岩。中元古界粉子山群、新元古界蓬莱群地层不整合覆盖于结晶基底之上。中生界

上侏罗统和白垩系主要由一套陆相中酸性火山岩-沉积岩组成,属于断陷盆地产物。新生界主要为河湖相碎屑沉积岩,局部夹有玄武岩。

鲁东地区早白垩世火山岩主要发育在胶莱盆地(图 1),下部为青山组,上部为王氏群。青山组分为两个喷发旋回,第一旋回以玄武粗安岩-粗安岩-安粗岩为代表的中偏碱性火山熔岩和火山碎屑岩为主,第二旋回以流纹质的酸性熔岩和火山碎屑岩为主。邱检生等^[2]对青山群第一旋回中偏碱性火山岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年结果为 (109.9 ± 0.6) Ma,对第二旋回酸性流纹质火山岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年结果为 (108.2 ± 0.6) Ma。鲁西地区青山组火山岩多分布于蒙阴、平邑-费县、莱芜、邹平、临朐和沂源等盆地中(图 1),主要为粗面玄武岩、钾玄岩、粗安岩和少量的安山岩。其中,蒙阴盆地青山组火山岩的形成年龄为 124 ~ 115 Ma^[3-4],早于鲁东地区青山组火山岩。

2 岩相学特征和分析方法

样品分别采自胶莱盆地,位于胶州和青岛之间的杨河镇和河套镇(图 1)。青岛河套镇样品为斑状结构,斑晶主要为斜长石(奥-中长石),自形到半自形板状,粒度 0.5 ~ 2 mm × 1.5 ~ 5 mm,含量 15% 左右。辉石斑晶较少,含量约 5%,粒度 0.5 ~ 1.5 mm,自形到半自形。基质具玻基交织结构,主要由斜长

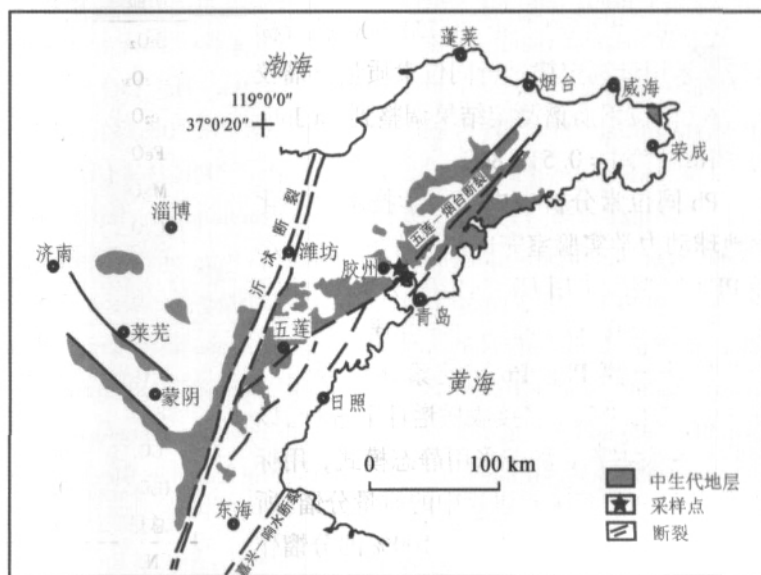


图 1 山东郯庐断裂两侧白垩纪地层分布图

Fig. 1 Sketch map showing distributions of Cretaceous strata along two sides of Tancheng-Lujiang Fault in Shandong

石微晶及填隙物碱性长石和暗色矿物组成，不透明矿物主要为磁铁矿。胶州杨河镇样品具有斑状结构，斑晶主要由斜长石（奥—中长石）和辉石组成，含量分别为 20% 和 5% 左右，斜长石粒径多为 1 mm × 2 mm，辉石为 0.5 mm 左右。基质为玻基交织结构，主要由斜长石微晶及填隙物碱性长石和不透明矿物（主要为磁铁矿）组成。

全岩样品用破碎机破碎成 < 1 cm 大小的碎块，剔除其中有风化面和裂隙的碎块，剩下的样品用 HCl 溶液（HCl : H₂O = 1 : 6，体积比）浸泡 2 h，然后用水洗净，再用圆盘粉碎机细碎，细碎好的样品缩分出 100 ~ 200 g，用无污染球磨机磨至 200 目以下用来进行下一步的元素和同位素分析。

主元素和微量元素在湖北省地质实验研究所测定。全岩主元素用 X 射线荧光熔片法分析，FeO 含量采用湿化学法分析。微量元素采用电感耦合等离子体原子发射光谱法（ICP-AES）进行分析，分析精度除 Nb、Zr 和 Hf 以外均优于 4%，Nb 为 5.6%，Zr 为 21.5%，Hf 为 52.1%。稀土元素分析采用阳离子交换分离 - 电感耦合等离子体原子发射光谱法（ICP-AES），所有稀土元素的分析精度均优于 5%。

Sm、Nd、Rb、Sr 含量和 Nd、Sr 同位素比值在中国科学技术大学化学地球动力学实验室测定，分析流程见文献 [17]。质谱测定在 Finnigan/MAT 262 多接收质谱计上完成。在测试过程中 Sr、Sm 和 Nd 同位素组成分别采用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.119 400、¹⁴⁹Sm/¹⁵²Sm = 0.516 858、¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 900 进行标准化，采用瑞利定律进行同位素质量分馏校正。Nd 同位素质谱测定结果调整到 La Jolla 的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511 860。

Pb 同位素分析在中国科学技术大学化学地球动力学实验室完成。样品在聚四氟乙烯 PFA 管型瓶中用 HF + HNO₃ 分解，在 1.5 mol/L HCl + 0.65 mol/L HBr 介质中用阴离子交换法分离 Pb。Pb 同位素比值测定在 Finnigan/MAT 262 多接收质谱计上进行。以硅胶作为发射剂，测定采用静态模式，用标准样 SRM 981 控制质谱计中的质量分馏，所报道结果已对每质量单位 0.100% 的分馏作了校正。由实测 Pb 同位素组成扣除岩石形成以来的放射成因 Pb 贡献，计算出 Pb 同位素初始比值。

3 地球化学特征

3.1 主元素

样品主元素分析结果列于表 1。SiO₂ 含量较为均一，为 61.14% ~ 64.43%，CIPW 标准矿物计算结果中 Q 分子为 13.36 ~ 16.37，是硅饱和岩石。各样品含量在扣除烧失量后换算成 100%，在 TAS 图上（图 2）主要投在粗面英安岩范围内，少数在粗面安山岩和粗面英安岩的界线上，在岩石系列上属于亚碱性系列。在 K₂O-SiO₂ 图上（图 3），杨河地区的样品投在钾玄岩（shoshonite）区域，而河套样品属于高钾钙碱性（HKCA）系列。所有样品的里特曼指数（σ）均小于 4，杨河样品稍高，在 3.45 ~ 3.66 之间，高于河套样品（2.90 ~ 3.11），同样表明杨河地区的样品更加富碱。样品的全碱（K₂O + Na₂O）含量为 7.41% ~ 8.86%，K₂O/Na₂O 为 0.86 ~ 1.33，仅杨河样品的 K₂O/Na₂O 比值大于 1，表现出富钾富碱的性质。样品的氧化系数普遍较高，其 *w* 值（Fe₂O₃ /（Fe₂O₃ + FeO））变化于 0.70 ~ 0.85 之间，显示出大陆交代源区的特征^[19]。在主元素 - SiO₂ 协变图上（图 4），CaO、

表 1 胶莱盆地青山组火山岩主元素(%)分析结果

Table 1 Major element compositions (%) of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

样号	01SD162	01SD163	01SD164	01SD165	01SD171	01SD172
产地	青岛河套	青岛河套	青岛河套	青岛河套	胶州杨河	胶州杨河
SiO ₂	61.18	62.13	61.44	61.14	64.43	63.09
Al ₂ O ₃	16.56	16.19	16.31	16.35	16.06	16.54
Fe ₂ O ₃	3.54	4.00	3.63	3.57	3.57	3.50
FeO	1.37	0.97	1.40	1.50	0.65	0.83
MgO	2.68	2.10	2.46	2.90	1.25	1.34
CaO	4.42	4.37	4.35	4.38	2.54	3.43
Na ₂ O	3.90	3.79	3.99	3.90	3.81	3.75
K ₂ O	3.51	3.80	3.58	3.35	5.05	4.58
MnO	0.07	0.06	0.08	0.10	0.04	0.05
TiO ₂	0.90	0.89	0.89	0.90	0.86	0.97
P ₂ O ₅	0.25	0.26	0.26	0.25	0.26	0.32
CO ₂	0.13	0.17	0.19	0.08	0.13	0.27
H ₂ O ⁺	0.91	1.08	1.25	1.29	0.87	1.86
总量	99.42	99.81	99.83	99.71	99.52	100.53
Ne	0	0	0	0	0	0
Hy	5.90	4.16	5.17	6.36	3.11	3.34
Q	13.62	14.88	13.37	13.36	16.37	16.04
σ	3.02	3.01	3.11	2.90	3.66	3.45
w	0.72	0.80	0.72	0.70	0.85	0.81

YAN Jun et al.: Geochemistry of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

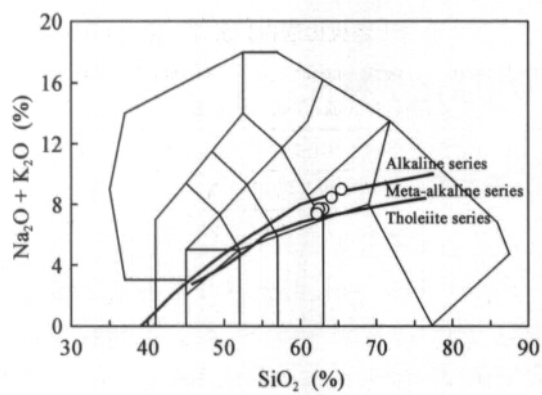


图 2 胶莱盆地青山组火山岩 TAS 图解

Fig. 2 TAS diagram of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

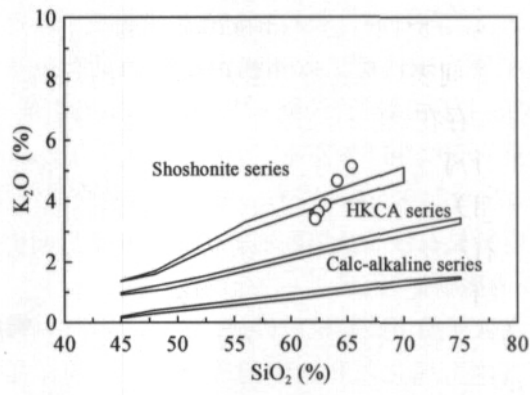


图 3 胶莱盆地青山组火山岩 K₂O-SiO₂ 图解

Fig. 3 K₂O-SiO₂ diagram of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

岩石系列的划分界限引自文献[18]。

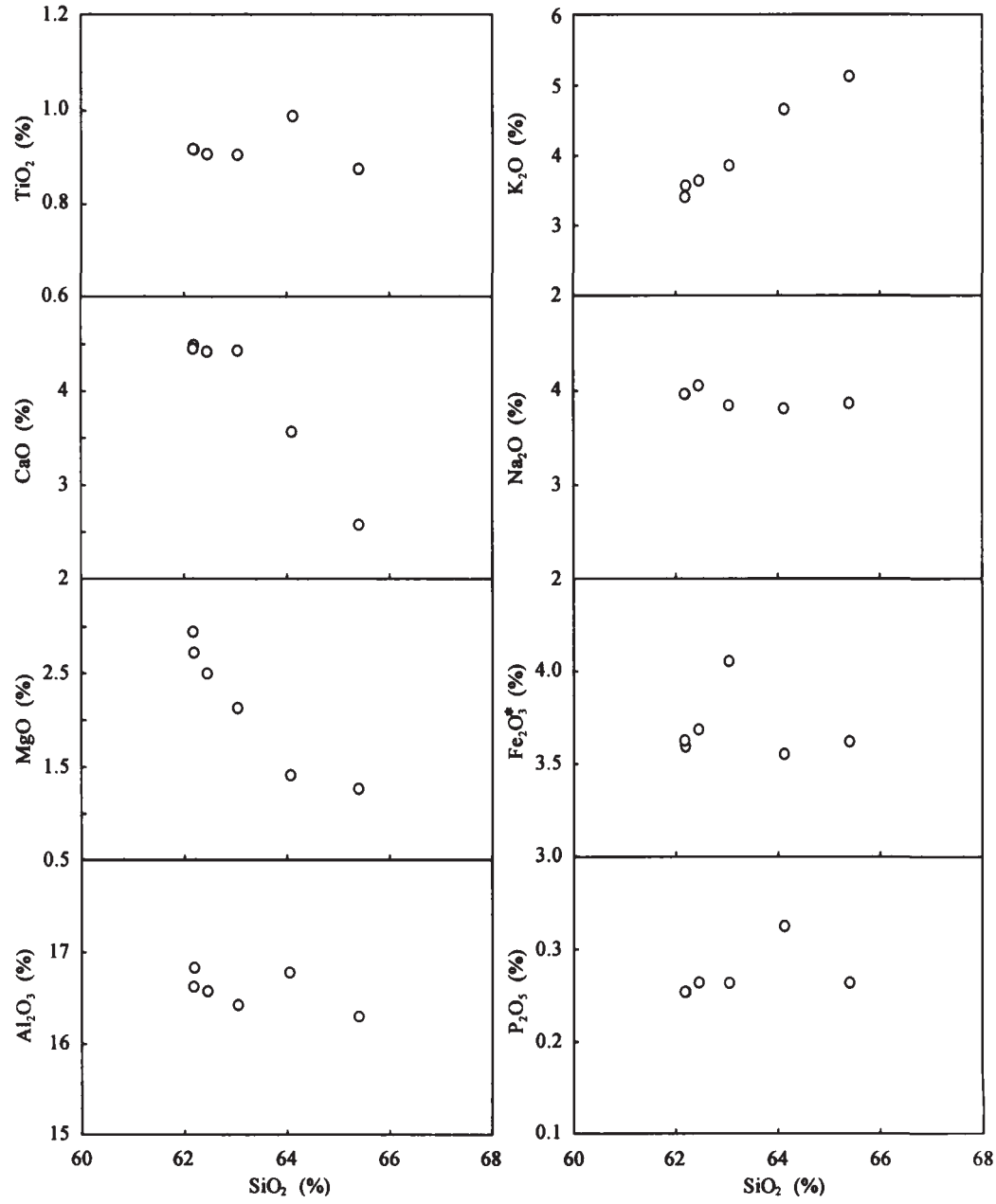


图 4 胶莱盆地青山组火山岩主元素-SiO₂ 协变图

Fig. 4 SiO₂ vs. major element plots of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

MgO 与 SiO₂ 之间呈显著的负相关关系, Al₂O₃ 与 SiO₂ 之间表现为弱的负相关关系, 表明在成岩过程中存在单斜辉石的分离结晶和轻微的斜长石的分离结晶作用。TiO₂、Fe₂O₃* 和 P₂O₅ 与 SiO₂ 的相关性不明显, 反映岩浆没有经历明显的磷灰石和 Ti-Fe 氧化物的结晶分异。Na 和 K 元素在结晶分异过程中都表现为类似的不相容元素的性质, K₂O 与 SiO₂ 呈显著的正相关关系, 而 Na₂O 与 SiO₂ 没有相关性, 也暗示了一定的斜长石的结晶分异。

3.2 微量元素

样品微量元素分析结果列于表 2。样品富集 REE,其 ΣREE 为 226 ~ 316 μg/g。在球粒陨石标准化分布模式图上(图 5), 表现出一致的右倾模式, 其 (La/Yb)_N 在 15.8 ~ 21.5 之间, HREE 分布模式平坦, (Dy/Yb)_N 为 1.16 ~ 1.21, 表明岩浆的源区没有石榴子石相的残留。MREE 的分布模式也较为平坦, 表明有角闪石的分离结晶作用。值得注意的是, 本地区样品的 LREE 富集程度以及 HREE 的分异程度均低于鲁西方城青山组玄武岩(图 5), 后者的 (La/Yb)_N 和 (Dy/Yb)_N 分别 39.3 ~ 49.3 和 1.72 ~ 2.34^[21]。本地区样品的 δEu 在 0.90 ~ 0.97 之间, 有着轻微的 Eu 负异常。

在微量元素蛛网图上(图 6), 本地区样品富集大离子亲石元素 Ba 和 Th, 具有显著的 Pb 的正异常和 Nb 和 Ti 高场强元素的负异常, 类似于方城青山组玄武岩, 而 Rb、Ba 的富集程度高于方城玄武岩^[21]。样品的 Cr 和 Ni 含量较低, 分别为 10 ~ 30 μg/g 和 12 ~ 17 μg/g, 低于鲁西青山组火山岩^[6], 也远低于原始岩浆值 (Cr > 1 000 μg/g, Ni > 400 ~ 500 μg/g)^[23], 说明岩浆经历了高度的演化或反映了源区基性程度较低的性质。

3.3 Sr-Nd-Pb 同位素

Sr、Nd 和 Pb 同位素组成分析结果列于表 3 和表 4。样品表现出富集的 Sr、Nd 同位素组成, 其中 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(*t*) 比值(校正到 110 Ma) 变化较大, 为 0.706 98 ~ 0.708 74, ε_{Nd}(*t*) 值相对较为均一, 为 -13.78 ~ -16.44。在 ε_{Nd}(*t*)-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(*t*) 相关图上(图 7), 样品投在富集的第Ⅳ象限, 构成微弱的反相关排列, 与方城晚青山组玄武岩的 Nd 同位素组成

表 2 胶莱盆地青山组火山岩微量元素(μg/g)分析结果

Table 2 Trace element contents (μg/g) of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

样号	01SD162	01SD163	01SD164	01SD165	01SD171	01SD172
产地	青岛河套	青岛河套	青岛河套	青岛河套	胶州杨河	胶州杨河
La	56.2	53.8	52.1	53.2	75.5	69.5
Ce	106	104	100	101	143	130
Pr	11.5	11.1	11.3	10.8	15.7	14.1
Nd	40.2	39.8	38.9	38.4	53.3	48.8
Sm	6.37	6.38	6.19	6.05	8.03	7.37
Eu	1.78	1.79	1.75	1.77	2.15	2.15
Gd	5.20	5.11	5.07	5.09	6.24	5.78
Tb	0.82	0.81	0.79	0.77	0.91	0.88
Dy	4.04	4.03	4.00	3.92	4.41	4.04
Ho	0.78	0.77	0.77	0.76	0.85	0.77
Er	2.28	2.23	2.22	2.18	2.38	2.20
Tm	0.37	0.36	0.36	0.35	0.39	0.36
Yb	2.21	2.18	2.23	2.13	2.37	2.19
Lu	0.33	0.33	0.33	0.32	0.35	0.32
Nb	4.40	4.40	4.30	4.40	2.50	3.40
Ta	3.90	3.80	4.00	3.90	3.80	3.80
Y	21.2	21.2	20.8	20.6	22.5	20.6
Rb	86	110	93	81	149	125
Sr	622	621	578	614	520	640
Ba	1 598	1 715	1 698	1 597	2 926	2 686
Th	10.0	8.8	9.1	8.9	12.8	12.5
U	2.0	2.2	2.0	1.9	2.1	1.9
Zr	367	365	362	571	419	420
Hf	8.0	7.4	7.9	11.7	8.9	8.5
Ga	15.7	18.7	19.1	14.6	15.5	17.7
Pb	17.6	15.9	18.5	15.5	22.0	22.2
Ni	15	14	15	15	12	17
Cr	29	30	26	30	10	25
δEu	0.92	0.93	0.93	0.95	0.97	0.97
(La/Yb) _N	17.1	16.6	15.8	16.8	21.4	21.4
(Dy/Yb) _N	1.19	1.20	1.16	1.19	1.20	1.20
ΣREE	238	233	226	227	316	316

基本一致, 而 Sr 同位素组成小于方城青山组玄武岩。后者的高放射成因 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(*t*) 和低放射成因 ε_{Nd}(*t*) 值, 被解释为代表了受到印支期俯冲扬子下地壳影响的华北地块南部岩石圈地幔的特征^[21]。本地区样品的 Nd 模式年龄 *T*_{DM} 为 1.71 ~ 1.85 Ga, 与胶东地区晚中生代 adakite 质岩类似(1.6 ~ 2.1 Ga)^[26], 略高于方城青山组玄武岩(1.57 ~ 1.74 Ga)^[21]。

样品具有较为一致的 Pb 同位素组成, 亏损放射成因 Pb, 其 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb(*t*) 比值为 16.585 ~ 16.719, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb(*t*) 比值为 15.400 ~ 15.411, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb(*t*) 比值为 36.724 ~ 37.011。在 ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb(*t*)-²⁰⁶Pb/

YAN Jun et al.: Geochemistry of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

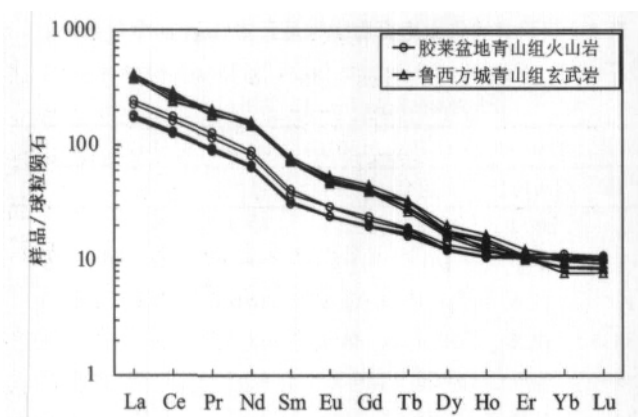


图 5 胶莱盆地青山组火山岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

球粒陨石标准化值引自文献 [20], 方城青山组玄武岩数据引自文献 [21]。

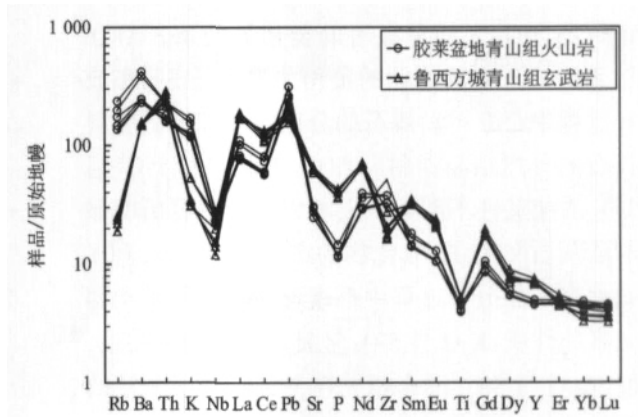


图 6 胶莱盆地青山组火山岩微量元素蛛网图

Fig. 6 Primitive mantle-normalized spidergram Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

原始地幔值引自文献 [22], 方城青山组玄武岩数据引自文献 [21]。

$^{204}\text{Pb}(t)$ 图解上 (图 8a), 投在 GEOCHRON 线 (零等时线) 的左侧和 NHRL 线 (北半球参考线) 之上, 具有比方城青山组玄武岩更低的 Pb 同位素组成, 后者也投在 GEOCHRON 的左边 [21]。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ 图解上 (图 8b), 样品显示出与 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ 图解类似的特征, 投在 NHRL 之上, 低于方城青山组玄武岩, 远离富集放射成因 Pb 的上地壳所在区域, 说明岩浆在上升过程中, 没有上地壳物质的混染。

4 讨论

4.1 岩石成因

鲁东胶莱盆地晚中生代火山岩、鲁西的邹平、蒙阴、费县 - 平邑断陷型陆相火山盆地内晚中生代火山岩以及下扬子断陷带中的庐枞、宁芜和溧水火山盆地的晚中生代火山岩普遍具有富钾富碱的特征,

表 3 胶莱盆地青山组火山岩 Sr、Nd 同位素组成

Table 3 Sr and Nd isotopic compositions of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin ($t = 110\text{ Ma}$)

样 号	采样地点	Rb ($\mu\text{g/g}$)	Sr ($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$
01SD163	青岛河套	93.1	703.2	0.383	0.707 662	16	0.707 12
01SD165	青岛河套	101.1	712.6	0.410	0.707 564	14	0.706 98
01SD171	胶州杨河	118.8	554.9	0.620	0.709 624	16	0.708 74
01SD172	胶州杨河	135.8	716.9	0.548	0.708 998	16	0.708 22

样 号	采样地点	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(t)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$
01SD163	青岛河套	6.965	42.35	0.099 4	0.511 862	10	0.511 791	-13.78	1.71
01SD165	青岛河套	7.392	44.94	0.099 4	0.511 849	11	0.511 778	-14.03	1.73
01SD171	胶州杨河	8.127	52.03	0.094 4	0.511 740	7	0.511 672	-16.09	1.80
01SD172	胶州杨河	7.847	49.37	0.096 1	0.511 723	7	0.511 654	-16.44	1.85

表 4 胶莱盆地青山组火山岩 Pb 同位素组成

Table 4 Pb isotopic compositions of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin ($t = 110\text{ Ma}$)

样 号	采样地点	Th ($\mu\text{g/g}$)	U ($\mu\text{g/g}$)	Pb ($\mu\text{g/g}$)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$
01SD163	青岛河套	8.8	2.2	15.9	16.605	3	15.411	2	36.954	6	16.589	15.403	36.743
01SD165	青岛河套	8.9	1.9	15.5	16.599	2	15.407	2	36.943	6	16.585	15.400	36.724
01SD171	胶州杨河	12.8	2.1	22.0	16.730	2	15.416	2	37.234	5	16.719	15.411	37.011
01SD172	胶州杨河	12.5	1.9	22.2	16.703	3	15.412	3	37.196	7	16.693	15.407	36.980

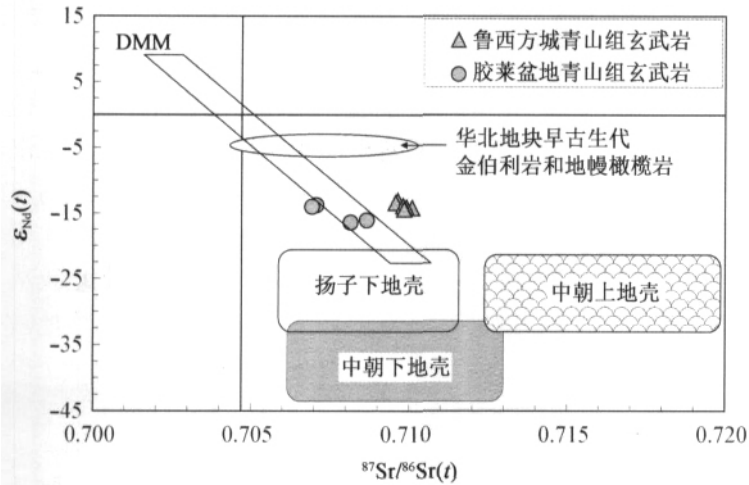


图 7 胶莱盆地青山组火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 图解
Fig. 7 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ plot for Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin
方城青山组玄武岩数据引自文献[21]，DMM 地幔端员引自文献[24]，中朝下地壳、中朝上地壳和扬子下地壳的范围引自文献[25]。

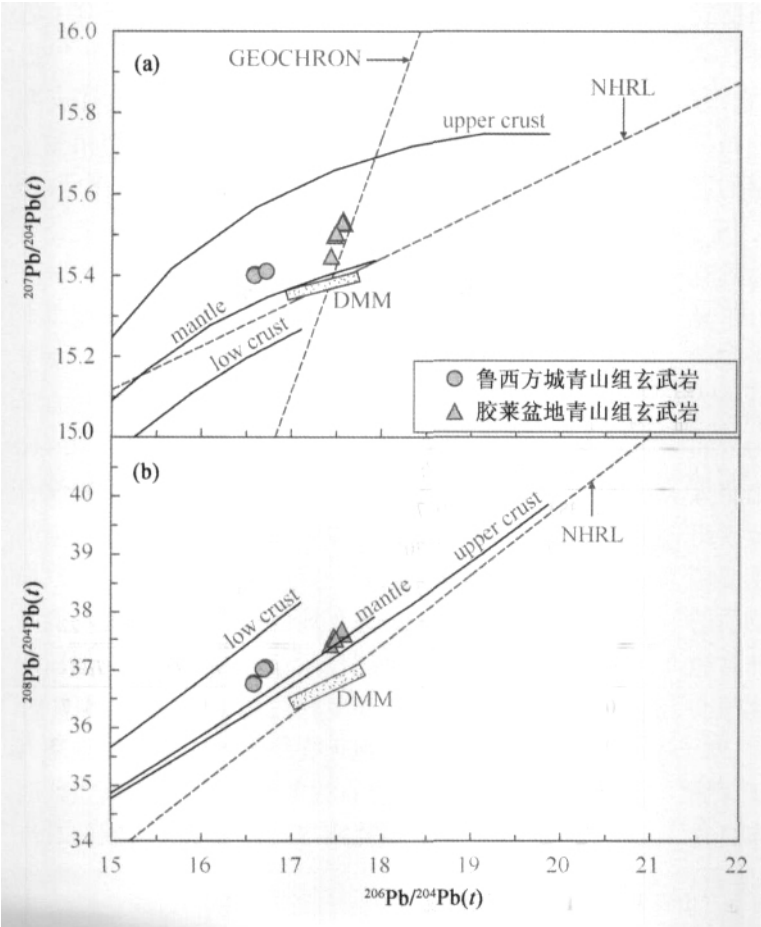


图 8 胶莱盆地青山组火山岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ (a) 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ (b) 图解
Fig. 8 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ (a) and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ vs. $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)$ (b) plots for Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin
DMM 地幔端员引自文献 [24]；GEOCHRON 为零等时线，NHRL 为北半球参考线，引自文献 [27]；中国大陆地幔、下地壳和上地壳演化线引自文献 [28]；方城青山组玄武岩数据引自文献[21]。

被认为共同构成中国东部的一个特殊的“钾玄岩省”(shoshonite province)^[29-30]。本次研究的火山岩中仅杨河地区的样品属于钾玄岩系，而河套地区的样品属于高钾钙碱性岩石系列(图 3)，但杨河和河套地区的样品具有一致的微量元素和同位素特征，显示出都起源于类似性质的源区和演化过程。钾玄岩起源于碱性玄武岩浆，是高压缺水条件下结晶分异的产物^[31]，本次研究的火山岩不符合这种成岩模式。

本地区火山岩为中性亚碱性岩石，其可能的岩浆起源有 3 种：(1) 富集的岩石圈地幔；(2) 原位下地壳和亏损物质的混合；(3) 俯冲的扬子下地壳和亏损物质的混合。邱检生等^[3-5]和刘 等^[6]根据郯庐断裂带山东段两侧的青山组火山岩富集 LREE、大离子亲石元素，亏损高场强元素以及富集的 Sr-Nd 同位素组成等特征，认为这些火山岩起源于受到交代改造的富集岩石圈地幔，但这些岩石是否起源于地幔尚缺乏明确的论证。诚然，鲁西青山组火山岩中发育有基性岩石，且青山组中酸性岩石和基性岩石的地球化学特征相似。基性岩石，如方城青山组玄武岩起源于富集的岩石圈地幔是容易理解的，但本次研究的火山岩的 SiO₂ 在 61.14% ~ 64.43% 之间，MgO 在 1.25% ~ 2.90% 之间，CIPW 标准矿物 Q 分子为 13.36 ~ 16.37，不属于碱性岩，如果其原始岩浆起源于岩石圈地幔，则必定经历了高度的结晶分异作用。然而，方城青山组玄武岩具有比胶莱盆地青山组火山岩更加富集 LREE 的特征^[21]，这种基性岩浆的结晶分异和同化混染都不可能产生 LREE 富集程度更低的胶莱盆地青山组火山岩。因此，本地区火山岩虽然具有与方城玄武岩类似的 Sr、Nd 和 Pb 同位素组成，但不是起源于富集的岩石圈地幔。基性下地壳的部分熔融可以产生类似胶莱盆地青山组火山岩的岩浆，一种简单的推断是源自原位下地壳。Jahn *et al.*^[25]归纳的华北下地壳的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值在 -32 ~ -44 之间， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 在 0.706 ~ 0.713 之间 ($t = 130 \text{ Ma}$) (图 7)，具有大于 2.5 Ga 的 T_{DM} 年龄。胶莱盆地青山组火山岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值在 -13.78 ~

-16.44 之间, T_{DM} 为 1.71 ~ 1.85 Ga, 显然, 单纯的华北下地壳的部分熔融是不现实的。如果有同位素亏损性质的岩浆的混合, 如来自软流圈的玄武岩浆, 在理论上可以产生类似胶莱盆地青山组火山的同位素组成。但将 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值从 -40 降低到 -15, 简单的估算玄武岩浆的混合量约在 40% 以上, 这将使得混合岩浆的 MgO 升高到 4.0% 以上。虽然结晶分异可以降低 MgO 含量, 但结晶分异基本不会改变 Nb/U 和 Ce/Pb 比值。青山组样品具有极低的 Nb/U 和 Ce/Pb 比值 (Nb/U = 1.2 ~ 2.3, Ce/Pb = 5.4 ~ 6.5), 而软流圈物质具有较为一致的 Nb/U 和 Ce/Pb 比值 (Nb/U = 47, Ce/Pb = 25)^[32], 显然, 40% 以上玄武岩浆的混合量将使得样品的 Nb/U 和 Ce/Pb 比值分别达到 20 和 13 以上。因此, 原位下地壳熔融和亏损物质的混合也不符合胶莱盆地青山组火山岩的成因模式。印支期扬子地块和华北地块发生大陆碰撞^[7], 扬子地块发生深俯冲^[33], 深俯冲的物质已经在白垩纪华北地块南缘的岩浆活动中得到体现, 典型的例子是 Zhang *et al.*^[21] 对方城玄武岩的研究, 方城玄武岩的地球化学特征反映了其来自俯冲的扬子下地壳物质和富集的岩石圈地幔分别部分熔融的混合。扬子下地壳的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 在 -20 ~ -34 之间,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(t) 在 0.705 ~ 0.712 之间 ($t = 130$ Ma)^[25], 具有富集 LREE 和大离子亲石元素 Ba、Th、K、Pb 正异常, 高场强元素 Nb、Zr、Ti 负异常的特征^[34]。由深俯冲的扬子下地壳部分熔融, 加上少量的亏损地幔物质的混合, 即可产生类似胶莱盆地青山组火山岩的地球化学特征。值得注意的是, 胶莱盆地青山组火山岩具有比方城青山组玄武岩更低的 Pb 同位素组成, 这一方面表明了下地壳为胶莱火山岩的主要源区, 另一方面也暗示了参与方城玄武岩源区物质的华北岩石圈地幔在胶莱火山岩源区中的贡献非常微弱, 因为, 华北岩石圈地幔的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb(t) 比值高达 20.2^[21]。

综上所述, 胶莱盆地青山组火山岩起源于深俯冲的扬子下地壳的部分熔融, 并且有少量的来自软流圈地幔物质的加入, 在岩浆房中经历了单斜辉石、角闪石和少量斜长石的结晶分异, 在其快速上升过程中, 没有显著上地壳物质的混染。值得一提的是, 本文的讨论基于现有的扬子和华北地块上、下地壳的地球化学数据。显然, 这些数据要达到对于各端员的详细判别还十分有限, 还需要扬子地块、大别地块和华北地块可代表上、下地壳的岩石地球化学数据的充分积累。

4.2 地质意义

印支期扬子地块和华北地块发生大陆碰撞, 扬子地块向华北地块之下的深俯冲超过 200 km, 并快速折返, 在大别山地区出露了世界上最大面积的超高压变质岩。该地区的大陆深俯冲及壳幔相互作用成为研究大陆动力学演化的极佳场所。华北地块从早古生代至新生代之间, 克拉通性质的岩石圈地幔被大洋型的岩石圈地幔所置换, 岩石圈发生了至少 100 km 厚的减薄^[35-42]。近年来, Zhang *et al.*^[21, 43, 44] 和 Zhang^[45] 通过对华北地块南部方城青山组玄武岩及其中橄榄石巨晶的研究, 指出晚中生代时期, 早古生代富集难熔的岩石圈地幔通过与来自下部玄武质岩浆的相互作用, 以交代的方式转变为玄武质组成饱满的同位素组成富集性质的岩石圈地幔, 在新生代, 这种性质的岩石圈地幔进一步被新生的、同位素亏损的岩石圈地幔所置换。基于在方城玄武岩中发现了俯冲的扬子下地壳的物质贡献, Zhang *et al.*^[21, 43, 44] 提出华北地块东部岩石圈减薄的动力学机制和印支期扬子地块向华北地块之下的俯冲与碰撞密切相关。

胶莱盆地青山组中性火山岩的喷发时代 (110 Ma) 晚于方城玄武岩 (125 Ma)^[21], 构造位置上分属郯庐断裂带的东西两侧。本次研究表明, 与方城玄武岩类似的是, 在胶莱盆地青山组火山岩的物质来源中, 也有深俯冲的扬子下地壳的贡献, 同样反映了扬子地块深俯冲而引发华北地块东部岩石圈动力学演化的可能机制; 与方城玄武岩不同的是, 在 110 Ma 时期, 胶东地区晚中生代富集的岩石圈地幔没有在火山岩的物质来源中得到反映, 而同位素亏损的软流圈来源的物质有了一定的体现。由此, 可以推断, 至 110 Ma 时期, 鲁东地区的岩石圈地幔可能已经减薄消失或置换为同位素性质亏损的、类似新生代的岩石圈地幔。与新生代时期不同的是, 110 Ma 时期深俯冲的扬子下地壳在华北地块东部南缘还有残留, 并对火山活动有直接的物质贡献, 而新生代时期该下地壳或已经消耗殆尽, 或由于软流圈的对流而带走。

5 结 论

(1) 胶莱盆地青山组中性火山岩为硅饱和亚碱性岩石, 具有富集大离子亲石元素和 LREE、亏损高场强元素、富集的 Sr、Nd 同位素组成和低放射成因 Pb 的特征。

(2) 胶莱盆地青山组火山岩起源于深俯冲的扬子地壳、可能为下地壳的部分熔融,并且有少量的来自软流圈地幔物质的加入,在岩浆房中经历了单斜辉石、角闪石和少量斜长石的结晶分异。

(3) 胶莱盆地 110 Ma 时期,同位素富集性质的岩石圈地幔可能已经减薄或置换为同位素亏损的岩石圈地幔,但深俯冲的扬子地块下地壳依然在该地区岩石圈之下存在,并对火山活动有物质贡献。

参考文献(References):

- [1] 李守军, 何文渊. 山东省中生代地层划分与对比[J]. 高校地质学报, 1997, 3(1): 87-93.
Li Shou-jun, He Wen-yuan. Stratigraphic division and correlation of the Mesozoic strata in Shandong [J]. Geol J China Univ, 1997, 3(1): 87-93 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邱检生, 王德滋, 罗清华, 刘洪. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年——以五莲分岭山火山机构为例[J]. 高校地质学报, 2001, 7(3): 351-355.
Qiu Jian-sheng, Wang De-zi, Luo Qing-hua, Liu Hong. ^{40}Ar - ^{39}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]. Geol J China Univ, 2001, 7(3): 351-355 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邱检生, 蒋少涌, 张晓琳, 胡建. 大别-苏鲁造山带南北两侧晚中生代富钾火山岩的成因: 微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素制约[J]. 地球学报, 2004, 25(2): 255-262.
Qiu Jian-sheng, Jiang Shao-yong, Zhang Xiao-lin, Hu Jian. Petrogenesis of K-rich volcanic rocks on the northern and southern sides of the Dabie-Sulu orogenic belt, eastern China: Constraints from trace elements and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. Acta Geosci Sinica, 2004, 25(2): 255-262 (in Chinese with English abstract).
- [4] 邱检生, 徐夕生, 罗清华. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及源区示踪[J]. 科学通报, 2001, 46(18): 1500-1508.
Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Luo Qing-hua. The ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and resource denoting of the potash rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province [J]. Chinese Sci Bull, 2001, 46(18): 1500-1508 (in Chinese).
- [5] 邱检生, 王德滋, 曾家湖, McInnes B I A. 鲁西中生代富钾火山岩及煌斑岩微量元素和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. 高校地质学报, 1997, 3(4): 384-395.
Qiu Jian-sheng, Wang De-zi, Zeng Jia-hu, McInnes B I A. Study on trace element and Nd-Sr isotopic geochemistry of Mesozoic potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong province [J]. Geol J China Univ, 1997, 3(4): 384-395 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞. 鲁西青山组火山岩形成的构造背景及其成因探讨: 主元素和微量元素的证据[J]. 地球化学, 2003, 32(4): 306-316.
Liu Shen, Hu Rui-zhong, Zhao Jun-hong, Feng Cai-xia. Tectonic setting and petrogenesis of Qingshan Formation volcanic rocks in western Shandong Province: Evidence from major elements and

trace elements [J]. Geochimica, 2003, 32(4): 306-316 (in Chinese with English abstract).

- [7] Li Shuguang, Xiao Yilin, Liou Deliang, Chen Yizhi, Ge Ningjie, Zhang Zongqing, Sun Shen-su, Cong Bolin, Zhang Ruyuan, Hart S R, Wang Songshan. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes[J]. Chem Geol, 1993, 109(1-4): 98-111.
- [8] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Dong Shuwen. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China[J]. Earth Planet Sci Lett, 1998, 161(1-4): 215-230.
- [9] Xu Jiawen, Zhu Guang, Tong Weixing, Cui Kerei, Liu Qing. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean [J]. Tectonophysics, 1987, 134(4): 273-310.
- [10] Okay A I, Sengor A M C. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China[J]. Geology, 1992, 20(5): 411-414.
- [11] Yin An, Nie Shangyou. An indentation model for the North and South China collision and the development of Tanlu and Honam fault systems, eastern Asia[J]. Tectonics, 1993, 12(4): 801-813.
- [12] Li Zheng-xiang. Collision between the North and South China blocks: A crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu Fault[J]. Geology, 1994, 22(8): 739-742.
- [13] Cong Bolin. Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996: 1-224.
- [14] Zhai Mingguo, Cong Bolin, Guo Jinghui, Liu Wenjun, Li Yong-gang, Wang Qingchen. Sm-Nd geochronology and petrography of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu region of China and their geotectonic implication[J]. Lithos, 2000, 52(1-4): 23-33.
- [15] 徐贵忠, 周瑞, 闫臻, 余宏全, 王艺芬, 杨茂森, 李兵. 论胶东地区中生代岩石圈减薄的证据及其动力学机制[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(4): 368-380.
Xu Gui-zhong, Zhou Rui, Yan Zhen, Yu Hong-quan, Wang Yi-fen, Yang Mao-sen, Li Bing. Discussion on the evidences of Mesozoic lithosphere thinning and its dynamic mechanism in Jiaodong area [J]. Geotecton Metallogen, 2001, 25(4): 368-380 (in Chinese with English abstract).
- [16] Faure M, Lin Wei, Breton N L. Where is the North China-South China block boundary in eastern China? [J]. Geology, 2001, 29(2): 119-122.
- [17] Foland K A, Allen J C. Magma sources for Mesozoic anorogenic granites of the White Mountain magma series, New England USA [J]. Contrib Mineral Petrol, 1991, 109: 195-211.
- [18] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Can J Earth Sci, 1971, 8(5): 523-548.
- [19] Kay R W, Gast P W. The rare earth content and origin of alkali-rich basalts[J]. J Geol, 1973, 81(6): 653-682.
- [20] Boynton W V. Geochemistry of the rare-earth elements: Meteorite studies[C] // Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.

YAN Jun et al.: Geochemistry of Qingshan Formation volcanic rocks from Jiaolai Basin

- [21] Zhang Hong-fu, Sun Min, Zhou Xin-hua, Fan Wei-ming, Zhai Ming-guo, Yin Ji-feng. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts[J]. Contrib Mineral Petrol, 2002, 144(2): 241–254.
- [22] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geol Soc Spec Publ 42, 1989: 313–345.
- [23] Wilson M. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1–466.
- [24] Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics[J]. Ann Rev Earth Planet Sci, 1986, 14: 493–571.
- [25] Jahn Bor-ming, Wu Fuyuan, Lo Ching-Hua, Tsai Chin-Ho. 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]. Chem Geol, 1999, 157(1/2): 119–146.
- [26] 张旗, 王焰, 王元龙. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约 [J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 505–513.
- Zhang Qi, Wang Yan, Wang Yuan-long. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian Period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks [J]. Acta Petrol Sinica, 2001, 17(4): 505–513 (in Chinese with English abstract).
- [27] Hart S R. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle[J]. Nature, 1984, 309(5971): 753–757.
- [28] 李龙, 郑永飞, 周建波. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 61–68.
- Li Long, Zheng Yong-fei, Zhou Jian-bo. Dynamic model for Pb isotope evolution in the continental crust of China [J]. Acta Petrol Sinica, 2001, 17(1): 61–68 (in Chinese with English abstract).
- [29] 邱检生, 王德滋, 周金城, 曾家湖. 山东中生代橄榄安粗岩系火山岩的地质地球化学特征及岩石成因 [J]. 地球科学, 1996, 21(5): 546–552.
- Qiu Jian-sheng, Wang De-zi, Zhou Jin-cheng, Zeng Jia-hu. Geology, geochemistry and genesis of Mesozoic shoshonitic volcanic rocks in Shandong Province [J]. Earth Sci, 1996, 21(5): 546–552 (in Chinese with English abstract).
- [30] 王德滋, 任启江, 邱检生, 陈克荣, 徐兆文, 曾家湖. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用[J]. 地质学报, 1996, 70(1): 23–34.
- Wang De-zi, Ren Qi-jiang, Qiu Jian-sheng, Chen Ke-rong, Xu Zhao-wen, Zeng Jia-hu. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite province, eastern China, and their metallogenesis[J]. Acta Geol Sinica, 1996, 70(1): 23–34 (in Chinese with English abstract).
- [31] Meen J K. Formation of shoshonites from calcalkaline basalt magmas: Geochemical and experimental constraints from the type locality[J]. Contrib Mineral Petrol, 1987, 97(3): 333–351.
- [32] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. Earth Planet Sci Lett, 1988, 90(3): 297–314.
- [33] Ye Kai, Cong Bolin, Ye Danian. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km [J]. Nature, 2000, 407: 734–736.
- [34] Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, Zhang Hongfei, Han Yinwen, Zhao Zidan, Yiken. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1998, 62(11): 1959–1975.
- [35] Griffin W L, O'Reilly S Y, Ryan C G. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa, Siberia and China: Proton microprobe studies[C]//Proc International Symposium on Cenozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and Its Environs. Beijing: Science Press, 1992: 1–20: 65–66.
- [36] Griffin W L, Zhang A, O'Reilly S Y, Ryan C G. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton[C]//Flower M F J, Chung Sun-Lin, Lo Ching-Hua, Lee Tung-Yi. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia (Geodynamics Series, Vol. 27). Washington D C: AGU, 1998: 107–126.
- [37] Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic Lithoproses and the loss of > 120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean Craton, China [C]//Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, Neary C R. Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geol Soc London Spec Pub 76, 1993: 71–78.
- [38] Menzies M A, Xu Y G. Geodynamics of the North China Craton [C]//Flower M F J, Chung Sun-Lin, Lo Ching-Hua, Lee Tung-Yi. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia (Geodynamics Series, Vol. 27). Washington D C: AGU, 1998: 155–165.
- [39] Fan W M, Zhang H F, Baker J, Jarvis K E, Mason P R D, Menzies M A. On and off the north China craton: Where is the Archaean Keel?[J]. J Petrol, 2000, 41(7): 933–950.
- [40] Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism[J]. Phys Chem Earth (A), 2001, 26(9/10): 747–757.
- [41] Wu Fuyuan, Walker R J, Ren Xiangwen, Sun Deyou, Zhou Xinhua. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China[J]. Chem Geol, 2003, 196(1–4): 107–129.
- [42] Gao Shan, Rudnick R L, Carlson R W, McDonough W F, Liu Yongsheng. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton[J]. Earth Planet Sci Lett, 2002, 198(3/4): 307–322.
- [43] Zhang Hong-fu, Sun Min, Zhou Mei-fu, Fan Wei-ming, Zhou Xin-hua, Zhai Ming-guo. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks[J]. Geol Mag, 2004, 141(1): 55–62.
- [44] Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, Zhou Meifu, Fan Weiming, Zheng Jianping. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2003, 67(22): 4373–4387.
- [45] Zhang Hong-Fu. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean Craton[J]. Earth Planet Sci Lett, 2005, 237(3/4): 768–780.