# 鲁西临朐地区早白垩世青山群火山岩的年代学、 地球化学及岩石成因

曹光跃,薛怀民,刘哲,路增龙 中国地质科学院地质研究所,北京,100037

**内容提要**:本文对鲁西临朐青山群火山岩进行了系统的年代学、元素地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成研究, 据此探讨其岩石成因。临朐早白垩世青山群火山岩主要为一套中性岩(SiO<sub>2</sub> = 52.43%~67.81%),岩石组合为安 山岩-粗安岩-粗面岩-粗面英安岩,属于钙碱性岩类。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得粗安岩的年龄为 121.3 ± 1.5 Ma,形成于早白垩世。岩石地球化学表现出富集轻稀土元素和 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素,明显的亏损 Nb、 Ta、Ti 等高场强元素的特征。临朐火山岩具有富集的 Sr-Nd 同位素特征,其( $^{87}$  Sr/ $^{86}$  Sr),值在 0.704346~0.708656 之间, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在-14.6~-9.2之间,并且具有低的 Hf 同位素组成,其锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$ 值在-29.3~-21.6。岩石具 有与变基性岩熔融产生熔体相一致的 Mg<sup>\*</sup>值,但镜下存在显著的矿物不平衡结构和变化范围较大的 Cr(26.7×  $10^{-6} ~ 239 \times 10^{-6}$ )和 Ni(10×10<sup>-6</sup> ~ 69.7×10<sup>-6</sup>)含量。研究表明,临朐青山群火山岩形成于早白垩世伸展的构造 背景下,是华北古老下地壳部分熔融熔体与富集地幔熔体发生岩浆混合形成的。

关键词:鲁西;青山群;火山岩;临朐;岩浆混合;锆石 U-Pb 年龄

大部分学者对华北克拉通岩石圈在显生宙期间 发生明显的减薄已达成了共识,但对岩石圈减薄发 生的具体时间、机制以及构造控制因素还存在较大 的争议(Menzies et al.,1993,2007;Griffin et al., 1998;Gao Shan et al.,2002,2004;Xu Yigang et al.,2004,2009;Deng Jingfu et al.,2006;Zhang Hongfu et al.,2006;Wu Fuyuan,2008,2014)。岩 石圈的巨量减薄通常诱发强烈而广泛的岩浆活动, 华北克拉通内大规模的岩浆活动主要发生于晚中生 代,是岩石圈发生巨量减薄的直接响应,因此它们是 研究华北克拉通深部物质演化及动力学机制的有效 探针。

华北克拉通东南缘山东省境内(鲁西地块)发育 了一套晚中生代青山群火山岩,前人对该套火山岩 已有一定的研究(Qiu Jiansheng et al.,1996,1997, 2001,2005; Zhang Hongfu et al.,2002; Guo Feng et al.,2003; Liu Shen et al.,2003; Pei Fuping et al.,2004; Ying Jifeng et al.,2006; Li Haiyong et al.,2008; Ling Wenli et al.,2009; Niu Manlan et al., 2012; Miao Baihu et al., 2015; Zhang Yongqing et al., 2017)。但是目前对岩石的成因 仍然存在分歧,绝大多数学者认为鲁西高镁的中基 性青山群火山岩来源于富集地幔的部分熔融 (Zhang Hongfu et al., 2002; Guo Feng et al., 2003; Liu Shen et al., 2003; Pei Fuping et al., 2004; Ying Jifeng et al., 2006; Li Haiyong et al., 2008; Niu Manlan et al., 2012); 而对中酸性、低镁 火山岩存在不同认识,如蒙阴盆地安山质岩:一种认 为是拆沉加厚下地壳与上覆岩石圈地幔不同程度反 应的结果,另一种认为高镁安山岩来源于富集地幔 部分熔融,而低镁安山岩来源于加厚下地壳熔融 (Ling Wenli et al., 2009; Niu Manlan et al., 2012)。鲁西中生代青山群火山岩的分布明显受郯 庐断裂的次级断裂控制,主要出露在邹平、蒙阴、平 邑-费县、沂源、临朐等断陷型陆相火山岩盆地内。 前人对鲁西晚中生代青山群火山岩的研究主要集中 在蒙阴、平邑-费县、邹平盆地,而对靠近郯庐断裂带 的临朐火山岩盆地缺少相应的同位素年代学、同位 素地球化学与岩浆成因的研究。早白垩世郯庐断裂 带的伸展运动为软流圈的上涌和岩石圈的减压熔

注:本文为科技部国际合作与交流专项(编号 2014DFR21270)、深部探测技术与实验研究国家专项(编号 SinoProbe-05-05)和地质调查局项目(编号 12120114085401、121201102000150021)资助成果。

收稿日期:2017-04-26;改回日期:2017-09-06;责任编辑:周健。

作者简介:曹光跃,男,1989年生。博士研究生,岩浆岩岩石学专业。Email:dirkcaogy@163.com。通讯作者:薛怀民,男,1962年生。研 究员,主要从事岩石学与地球化学研究。Email:huaiminx@sina.com。

融,及随后的壳幔相互作用提供了有利的条件(Niu Manlan et al.,2010;Huang Xiaolong et al.,2012; Zhu Guang et al.,2012)。因此,对靠近郯庐断裂 带的临朐火山岩的研究还可以为岩石圈伸展减薄过 程中壳幔相互作用提供丰富的地质信息。为此,本 文以鲁西地块北部临朐地区青山群火山岩为研究对 象,进行年代学、主量与微量元素以及 Sr-Nd-Hf 同 位素组成的系统研究,旨在进一步探讨其岩石成因 及动力学过程。

1 地质背景及样品特征

鲁西地块位于华北克拉通东南缘,东以沂沭断 裂为界,紧靠苏鲁-大别造山带。鲁西地区地层是整 个山东省地层发育最全的,主要出露太古宙一元古 宙基底、古生代海相沉积、中生代断陷盆地沉积以及 新生代河湖相沉积。区内中生代青山群火山岩的分 布明显受断裂控制,主要出露在邹平、蒙阴、平邑-费 县、沂源、临朐等断陷型陆相火山岩盆地内(图 1a)。 青山群火山岩自下而上分为四个火山旋回,分别为 后夼组、八亩地组、石前庄组和方戈庄组(Liu Mingwei et al.,2003),其中后夼组主要为流纹质凝 灰岩、凝灰质砂岩;八亩地组主要为安山质-粗安质 熔结凝灰岩、安山质熔岩;石前庄组主要为流纹岩、 流纹质凝灰岩;方戈庄组主要为粗安岩、玄武粗 安岩。

临朐盆地位于鲁西地块东部,东侧靠近沂沭断 裂带,北连昌乐凹陷,西跨五井断裂。盆地的结晶基 底主要为太古界泰山群变质岩系,主要岩性为黑云 斜长片麻岩、片岩、变粒岩和混合片麻岩等。古生界 地层不整合覆盖于结晶基底之上,主要岩性为灰岩、 页岩等。中生界出露上侏罗统的陆相沉积砂岩以及 白垩系陆相的青山群火山岩;新生界主要为河湖相 碎屑沉积岩,以及第三系玄武岩。

临朐盆地内中生代青山群火山岩位于临朐县南 边的辛寨镇和卧龙镇一带,主要为八亩地组火山岩, 其岩性主要为灰紫色、灰绿色安山质火山集块岩、角 砾岩及少量凝灰岩和熔岩。我们选取了几处较为新 鲜的凝灰岩及熔岩作为研究对象。具体采样位置见



图 1 鲁西中生代岩浆岩分布简图(a)和临朐中生代青山群火山岩盆地地质简图及采样位置(b)

Fig. 1 Distribution of Mesozoic igneous rocks in western Shandong (a) and simplified geological map of Linqu area and sampling sites of Qingshan Group volcanic rocks (b)

1-第四系;2-新生代玄武岩;3-第三系;4-青山群;5-莱阳群;6-淄博群;7-古生代地层;8-前寒武基底;9-断层;10-采样位置
 1-Quaternary;2-Cenozoic basalt;3-Tertiary;4-Qingshan Group;5-Laiyang Group;6-Zibo Group;7-Paleozoic strata;
 8-Precambrian basement;9-fault;10-sample locations

图(图 1b),岩性主要为安山岩、粗安岩和粗面岩。 样品具有斑状结构(图 2),其中安山岩和粗安岩斑 晶主要为斜长石、角闪石、碱性长石,以及少量的黑 云母和辉石,含量 20%~60%;基质为玻基微晶或 玻基交织结构,主要由斜长石、碱性长石、角闪石以 及不透明氧化物组成。粗面岩斑晶主要由斜长石、 碱性长石和少量黑云母组成,含量 40%~50%;基 质为玻基交织结构或隐晶质结构,主要由斜长石、碱 性长石、不透明氧化物以及玻璃质物质组成。显微 镜下可见明显的矿物不平衡结构:如角闪石复杂环 带(图 2d);嵌晶结构(角闪石中包含浑圆状的斜长 石)(图 2e);自形的角闪石围绕斜长石的核生长(图 2f);斜长石具有筛孔状核,暗化的幔,干净的亮边 (图 2g);斜长石具有熔蚀的核,边部为干净的振荡 环带(图 2h)。

# 2 分析方法

LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 年龄测定在北京 大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部 重点实验室进行,将德国 Lambda Physik 公司的 ComPex 102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波 长 193nm)与 Agilent 7500ce 型 ICP-MS 以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统连接,采 用了屏蔽矩(Shield Touch)和 cs 透镜。剥蚀物质的 载气为 He 气。用美国国家标准技术研究院研制的 人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行 仪器最优化,采用 Plesovice 标准锆石外部校正法进 行锆石原位 U-Pb 分析。采用的激光束斑直径为 32µm,激光剥蚀深度为 30~40µm,频率为 5Hz,能 量密度为 5J/cm<sup>2</sup>。信号采集前先用激光剥蚀 3s 以 除去样品表面可能存在的污染,再进行 20s 的气体 空白信号采集后开始触发激光采集 60s 的样品信号。同位素比值数据处理和 U-Pb 表观年龄计算采用 Glitter 程序进行,普通铅校正采用 Anderson (2002)的方法,U-Pb 谐和年龄是在 Isoplot3.23 程序(Ludwing,2001)中进行的。分析结果见表 1。

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质 大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 (GPMR)利用激光剥蚀多接收等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005 (Lambda Physik,德国),MC-ICP-MS 为 Neptune Plus (Thermo Fisher Scientific,德国),使用氦气作 为载气,激光输出能量密度为 5.3J/cm<sup>2</sup>,斑束直径 为44μm。详细仪器操作条件和分析方法可参照 Hu Zhaochu et al. (2012)。数据的分析处理(包括 对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采 用软件 ICPMSDataCal (Liu Yongsheng et al., 2010)完成。分析结果见表 2。

主微量元素的测试是在核工业北京地质研究院 分析测试中心进行的。其中主量元素采用 X 射线 荧光光谱(XRF)测定,检测方法和依据是 GB/T 14506.14-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 14 部 分:氧化亚铁量测定》和 GB/T 14506.28-2010《硅酸 盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量 测定》,误差小于 0.5%;微量元素和稀土元素采用 德国 Finnigan-MAT 公司生产的 ELEMENT XR 等离子体质谱分析仪测定,检测方法和依据是 GB/ T 14506.30-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分:44 个元素量测定》,误差范围在 5%~10%。 分析结果及相关参数见表 3。

Rb-Sr和 Sm-Nd 同位素比值采用同位素稀释 法测定,在中国科技大学地球与空间科学学院放射

表 1 临朐青山群火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果

Table 1	LA-ICP-MS zircon	U-Pb dating resu	lts for th	e volcanic rocks	from Qingsha	n Group in Li	ngu area

分析点		$(\times 10^{-6})$			$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}\mathrm{Pb}/^{235}\mathrm{U}$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		206 Pb/238 U	
	Th	U	Pb	Th/U	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ
SD73b-01	16.28	12.65	8.82	1.29	0.16457	0.00332	10.22492	0.20626	0.45057	0.00642	2503	17	2455	19	2398	29
SD73b-02	108.31	85.40	2.38	1.27	0.04942	0.00336	0.1297	0.00864	0.01903	0.00031	168	120	124	8	122	2
SD73b-04	116.12	83.76	2.43	1.39	0.04869	0.00339	0.12854	0.00879	0.01914	0.00031	133	123	123	8	122	2
SD73b-05	89.40	138.45	90.14	0.65	0.16729	0.00243	11.08392	0.15413	0.4805	0.00498	2531	11	2530	13	2529	22
SD73b-07	209.49	149.24	4.30	1.40	0.05191	0.00246	0.13448	0.00621	0.01879	0.00027	281	79	128	6	120	2
SD73b-09	236.87	131.31	4.04	1.80	0.04896	0.00262	0.12755	0.0067	0.01889	0.00027	146	93	122	6	121	2
SD73b-10	145.80	210.49	136.22	0.69	0.1664	0.00242	10.88023	0.15109	0.47419	0.00486	2522	11	2513	13	2502	21
SD73b-16	295.49	205.35	5.99	1.44	0.04826	0.00181	0.12809	0.00467	0.01925	0.00024	112	62	122	4	123	2
SD73b-17	349.13	587.33	14.83	0.59	0.05081	0.00119	0.14174	0.00319	0.02023	0.00023	232	31	135	3	129	1
SD73b-18	93.31	77.71	2.14	1.20	0.04855	0.0038	0.12617	0.0097	0.01884	0.00034	126	138	121	9	120	2
SD73b-19	241.11	148.22	4.43	1.63	0.0493	0.00221	0.12844	0.00562	0.0189	0.00026	162	76	123	5	121	2



### 图 2 临朐青山群火山岩样品的显微照片

Fig. 2 Microphotographs for the selected sample of the Qingshan Group volcanic rocks in Linqu area

(a)一斜长石斑晶,基质为微晶细粒结构;(b)一斜长石,角闪石斑晶,基质为玻基交织结构;(c)一斜长石,黑云母斑晶,基质为交织结构; (d)一自形角闪石的环带结构;(e)一角闪石中包含浑圆状的斜长石;(f)一自形角闪石围绕斜长石的核生长;(g)一斜长石具有筛孔状核,暗 化的幔,干净的亮边;(h)一斜长石具有溶蚀的核,边部为干净的振荡环带;Pl一斜长石;Am一角闪石;Bi一黑云母

(a)—Plagioclase phenocryst, groundmass with microcrystalline texture; (b)—plagioclase, amphibole phenocryst, groundmass with hyalopilitic texture; (c)—plagioclase, biotite phenocryst, groundmass with pilotaxitic texture; (d)—euhedral amphibolite with zonal structure; (e)—amphibolite containing rounded plagioclase; (f)—amphibolite containing plagioclase core; (g)—plagioclase showing sieve-texture core, dark mantle and clear rim; (h)—plagioclase showing corrosive core and oscillatory zoning rim; Pl—plagioclase; Am—amphibole; Bi—biotite

表 2 临朐青山群火山岩锆石 Hf 同位素组成

Fable 2	Zircon Hf	' isotopic	compositions	of the	volcanic	rocks	from	Qingshan	Group in	Linqu area
---------	-----------	------------	--------------	--------	----------	-------	------	----------	----------	------------

分析点	$^{176}{ m Hf}/^{177}{ m Hf}$	$1\sigma$	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	$1\sigma$	$^{176}{ m Yb}/^{177}{ m Hf}$	$1\sigma$	年龄 (Ma)	$\varepsilon_{\rm Hf}(t)$	$T_{\rm DM1}$	$T_{\rm DM2}$
SD73b-01	0.281327	0.000015	0.000727	0.000014	0.026844	0.000433	2503	3.8	2667	2734
SD73b-02	0.282005	0.000012	0.000673	0.000005	0.023656	0.000167	122	-24.5	1739	2398
SD73b-04	0.282057	0.000013	0.000965	0.000005	0.034138	0.000495	122	-22.7	1681	2298
SD73b-05	0.281254	0.000011	0.000763	0.000012	0.023771	0.000266	2531	1.8	2768	2864
SD73b-07	0.282041	0.000014	0.001061	0.000007	0.037698	0.000460	120	-23.3	1707	2330
SD73b-09	0.281874	0.000142	0.002163	0.000044	0.073299	0.003400	121	-29.3	1996	2655
SD73b-10	0.281244	0.000015	0.000543	0.000009	0.016744	0.000361	2522	1.7	2765	2865
SD73b-16	0.282048	0.000017	0.001118	0.000013	0.038997	0.000848	123	-23.0	1700	2316
SD73b-18	0.282089	0.000027	0.000908	0.000019	0.028289	0.000380	120	-21.6	1634	2237
SD73b-19	0.282041	0.000014	0.001284	0.000013	0.042548	0.000917	121	-23.3	1716	2330

性成因同位素地球化学实验室热电离质谱仪 MAT-262 上完成的。Sr-Nd 同位素比值测定分别采用  $^{86}$ Sr/ $^{88}$ Sr=0.1194 和 $^{146}$ Nd/ $^{149}$ Nd=0.7219 进行质 量分馏标准化校正,Sr 和 Nd 同位素比值测量精度 优于 0.003%,详细的化学流程和同位素比值测定 参见 Chen Fukun et al. (2002)。分析结果及相关 参数见表 4。

# 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年代学

粗安岩(SD-73b)中的锆石以长柱状为主,长径 多为100~200 $\mu$ m,长宽比多在1:1与2:1之间, CL图中显示锆石环带发育,Th/U比值在0.59~ 1.63之间,具有典型岩浆结晶锆石的特征(图3)。 对该样品共获得了11个锆石颗粒的测试点数据,其 中点SD73b-01、SD73b-05和SD73b-10为继承或捕 获的锆石,其<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb年龄分别为2503Ma、 2531Ma和2522Ma。另外对8个年轻的锆石作 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U-<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U谐和图(图4b),其中点 SD73b-17不谐和,其余都位于谐和线上,它们的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U加权平均年龄为121.3±1.5Ma (MSWD=0.31),该年龄代表了岩石形成的年龄。

#### 3.2 主量元素

临朐青山群火山岩样品 SiO<sub>2</sub>含量为 52.43%~ 67.81%,主要为中性岩。在扣除烧失量重新换算成 100%后(Le Maitre et al.,1989; Deng Jingfu et al.,2015),在 TAS 图中(图 5a)样品投在安山岩、粗 安岩和粗面岩-粗面英安岩内。在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图中 (图 5b),岩石主要位于高钾钙碱性系列和钾玄岩系 列范围内。岩石中 Na<sub>2</sub>O 含量为 2.90%~5.12%, K<sub>2</sub>O 含量为 2.12%~4.71%,全碱(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 含量为 5.02%~9.83%,里特曼指数  $\sigma$  为 1.89~ 5.16。在 AR-SiO<sub>2</sub>图中(图 6b),样品主要落在钙碱





Fig. 3 CL images of dated zircon crystals from the volcanic rocks from Qingshan Group in Linqu area

性范围内。同时临朐青山群火山岩还具有较高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量(13.89%~18.34%),在A/CNK-A/NK 图解中(图 6a),主要位于准铝质岩范围内。样品全 铁 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量在 2.62%~7.79%之间,表现出低镁 (MgO=0.53%~3.47%)、低钛(TiO<sub>2</sub>=0.35%~ 0.83%)的特征。在主量元素-SiO<sub>2</sub>协变图上(图 7), MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>都和 SiO<sub>2</sub>呈 明显的负相关性,表明可能是两端元岩浆混合或者 同一岩浆结晶分异演化形成的。

### 3.3 微量元素

临朐青山群火山岩稀土元素变化范围并不大, 表现出富集轻稀土而亏损重稀土的特征,其中 LREE含量为102.3×10<sup>-6</sup>~228.3×10<sup>-6</sup>,HREE 含量为5.3×10<sup>-6</sup>~16.6×10<sup>-6</sup>。在稀土元素球粒

## 表 3 临朐青山群火山岩主量元素(%)和微量元素(×10<sup>-6</sup>)含量

# Table 3 Major (%) and trace element (×10<sup>-6</sup>) compositions of the volcanic rocks from Qianshan Group in Linqu area

样号	SD14-73	SD14-76	SD14-79	SD14-80	SD14-82	SD-73b	SD16-150a	SD16-150b	SD16-151
岩性	粗安岩	粗面岩	粗面岩	粗安岩	安山岩	粗安岩	粗面岩	粗安岩	粗面岩
SiO <sub>2</sub>	60.46	62.01	67.81	59.08	54.41	52.43	61.17	57.16	66.73
${\rm TiO}_2$	0.79	0.57	0.35	0.70	0.82	0.75	0.60	0.83	0.38
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	17.34	14.80	15.36	16.60	13.89	16.13	16.09	18.34	16.53
$TFe_2O_3$	5.02	6.63	2.62	6.16	7.79	4.11	5.09	5.59	3.74
FeO	0.74	1.02	0.54	1.52	0.61	0.87	3.36	1.12	0.85
MnO	0.08	0.07	0.04	0.07	0.15	0.21	0.06	0.17	0.04
MgO	2.09	2.31	1.16	2.00	3.47	1.22	2.29	2.20	0.53
CaO	5.19	4.17	3.04	4.85	7.95	9.12	2.74	5.80	2.76
$Na_2O$	4.25	3.98	4.41	4.06	2.90	4.36	5.12	4.42	4.56
$K_2O$	2.61	3.24	3.34	3.99	2.12	3.15	4.71	2.21	3.78
$P_2O_5$	0.33	0.23	0.20	0.29	0.26	0.39	0.24	0.33	0.11
Loi	1.81	1.93	1.57	2.11	6.24	8.06	1.84	2.90	0.78
Total	99.96	99.93	99.90	99.91	99.99	99.93	99.95	99.95	99.94
AR	1.88	2.23	2.46	2.20	1.60	1.85	3.18	1.76	2.52
A/CNK	0.90	0.84	0.94	0.84	0.65	0.59	0.87	0.91	1.00
A/NK	1.77	1.47	1.41	1.51	1.97	1.52	1.19	1.90	1.43
σ	2.62	2.67	2.39	3.87	1.89	4.72	5.16	2.92	2.91
Sc	17.1	17.0	7.1	13.4	19.3	11.4	9.7	18.4	6.2
Cr	66.2	118	83.6	73.2	239	91.1	36.0	26.7	98.1
Ni	16.8	33.4	18.0	20.2	69.7	16.4	14.1	10.0	18.2
Со	11.0	16.7	5.51	14.7	23.9	9.63	14.0	19.4	5.18
V	154	131	57.3	136	146	134	113	198	59.7
Cs	1.39	2.80	2.30	4.29	0.56	2.29	1.20	1.70	1.21
Rb	63.2	79	99.3	136	33.1	61.6	119	55.2	82.7
Ba	1234	816	1548	1130	777	1467	954	1004	1300
Sr	804	579	725	665	514	806	333	718	595
Pb	15.0	13.5	19.1	17.5	10.6	16.2	21.5	15.8	23.6
Ga	19.8	18.0	16.9	21.1	18.7	17.1	18.0	24.6	15.1
Th	4.83	3.09	5.64	8.80	5.39	16.50	8.08	5.10	6.56
0	1.39	0.92	1.63	2.30	1.18	3.02	2.11	1.27	1.69
Zr	100	91.6	145	181	120	204 5 16	135	138	28.9
	4.17	2. 39	4.03	5.10	3. 69	5.16	5.65	0.26	1.00
I a V	15 0	15 7	7.0	16.3	16.8	20.6	14.7	18 2	7.0
Nb	7 18	13.7	5 70	9.02	7 21	13 90	8 58	7 32	6.73
La	34 1	23.9	29.8	41.9	28.6	57.9	37 5	32 0	33 1
Ce	61.4	42 5	47.9	74 8	52.8	104	62.2	63 7	47.8
Pr	7. 55	5. 65	5. 26	8.62	6.36	11.80	7.56	7.94	5.08
Nd	30.1	24.1	18.9	33.4	25.6	45.6	30.1	29.5	17.7
Sm	5.40	4.67	2.95	5.67	4.79	7.12	4.79	5.67	2.39
Eu	1.60	1.45	0.78	1.53	1.40	1.90	1.47	1.75	0.80
Gd	4.13	3.57	2.20	4.54	4.17	6.44	3.93	4.72	1.94
Tb	0.63	0.66	0.35	0.66	0.58	0.87	0.57	0.71	0.27
Dy	3.14	3.16	1.78	3.58	3.07	3.96	2.74	3.61	1.35
Ho	0.55	0.62	0.27	0.62	0.61	0.73	0.49	0.67	0.23
Er	1.44	1.53	0.76	1.66	1.71	1.96	1.32	1.83	0.65
Tm	0.22	0.24	0.12	0.27	0.26	0.32	0.22	0.30	0.11
Yb	1.39	1.44	0.93	1.64	1.47	2.02	1.27	1.92	0.64
Lu	0.17	0.26	0.12	0.23	0.24	0.26	0.17	0.25	0.10
δEu	1.00	1.04	0.90	0.89	0.94	0.84	1.01	1.01	1.10
Nb/Ta	21.5	21.0	15.4	17.0	18.5	17.9	17.1	20.3	14.3
LREE/HREE	12.0	8.9	16.2	12.6	9.9	13.8	13.4	10.0	20.2
(La/Yb) <sub>N</sub>	17.6	11.9	23.0	18.3	14.0	20.6	21.2	12.0	37.2
LREE	140.2	102.3	105.6	165.9	119.6	228.3	143.6	140.6	106.9
HREE	11.7	11.5	6.5	13.2	12.1	16.6	10.7	14.0	5.3



图 4 临朐青山群火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图和<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 加权平均年龄图 Fig. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams and <sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U weighted average age diagrams of the volcanic rock from Qingshan Group in Linqu area



图 5 临朐青山群火山岩 TAS(a)和 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>(b)图解

Fig. 5 TAS (a) and K<sub>2</sub>O versus SiO<sub>2</sub>(b) diagrams of Qingshan Group volcanic rocks from Linqu area (a)—据 Le Bas et al. (1986);其中 Ir 实线据 Irvine et al. (1971),线上方为碱性,下方为亚碱性;(b)—中实线据 Peccerillo et al. (1976) (a)—After Le Bas et al. (1986);the soild line represents boundary between alkaline and sub-alkaline series(after Irvine et al., 1971); (b)—soild line after Peccerillo et al. (1976)

陨石标准化配分图中(图 8a),它们表现为相似的右 倾模式,轻重稀土分异程度高(LREE/HREE=8.9 ~20.2;(La/Yb)<sub>N</sub>=11.9~37.2);铕异常不明显 ( $\delta$ Eu=0.84~1.10),说明没有斜长石的分离结晶 或者源区斜长石的残留。其中样品 SD14-79 和 SD16-151 具有更低的重稀土亏损以及较高的 La/ Yb 比值,可能是源区石榴子石的残留比例不同或 者部分熔融程度不同所致。

临朐青山群火山岩的原始地幔标准化微量元素 蛛网图也较为一致(图 8b),都表现为强烈富集 Rb、 Ba、K、Pb等大离子亲石元素(LILE),相对亏损 Nb、Ta、Ti等高场强元素(HFSE)。临朐火山岩具 有较大变化范围的Cr(26.7×10<sup>-6</sup>~239×10<sup>-6</sup>)和 Ni(10×10<sup>-6</sup>~69.7×10<sup>-6</sup>)含量。

### 3.4 Sr-Nd 同位素

临朐青山群火山岩具有富集的 Sr-Nd 同位素 组成特征和古老的 Nd 同位素模式年龄(表 4),其 (<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr),值为 0.704346~0.708656,ε<sub>Nd</sub>(*t*)值为 -14.6~-9.2;*T*<sub>DM2</sub>在 2.2~1.6Ga 之间。在 Sr-Nd 同位素图解中(图 9),临朐青山群火山岩 Sr-Nd



图 6 临朐青山群火山岩 A/CNK-A/NK(a)(据 Maniar and Piccoli, 1989)和 AR-SiO<sub>2</sub>(b)(据 Wright, 1969) Fig. 6 A/CNK vs. A/NK(a)(after Maniar and Piccoli, 1989)and AR vs. SiO<sub>2</sub>(b)(after Wright, 1969) diagrams of the Qingshan Group volcanic rocks from Linqu area

同位素部分与鲁西铜石二长岩体相似,主体与鲁西 沂南闪长岩以及汉诺坝基性麻粒岩相似,位于济南-邹平辉长岩和方城玄武岩、沂南辉长岩之间。

### 3.5 锆石 Hf 同位素

除点 SD73b-09 以外,其他锆石的<sup>176</sup> Lu/<sup>177</sup> Lu 比值都小于 0.002,说明锆石在形成以后具有较小 的放射性成因 Hf 的积累。继承锆石和新生的年轻 锆石具有明显不同的 Hf 同位素组成。继承锆石 的<sup>176</sup> Hf/<sup>177</sup> Hf 比值为 0.281244~0.281327,对应的  $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 均为正值,为 1.7~3.8,Hf 二阶段模式年龄 为 2865~2734Ma;新生的年轻锆石<sup>176</sup> Hf/<sup>177</sup> Hf 比 值为 0.281874~0.282089,对应的  $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 均为负值, 为-29.3~-21.6,Hf 二阶段模式年龄在 2.7~ 2.2Ga 之间(表 2,图 10)。

# 4 讨论

### 4.1 蚀变作用对成分的影响

临朐青山群火山岩具有较大的烧失量变化范围 (LOL = 0.78%~8.06%),其中样品 SD-73b 和 SD14-82 具有较大的烧失量分为 8.06% 和 6.24%, 镜下也发现其矿物和基质存在蚀变的痕迹,表明活 动元素(例如:K、Na、Rb、Sr、Ba等)可能在蚀变过程 中发生了活动。临朐青山群火山岩样品 SiO<sub>2</sub>、CaO 与烧失量之间具有明显的相关性,表明这些元素可 能在蚀变过程中发生了活动;而其他主量元素与烧 失量之间缺乏明显的相关性(图略),表明这些元素 受蚀变作用的影响较小。微量元素 Zr 在低级变质 作用和蚀变过程中一般是不活动的,可以用来示踪 蚀变作用对岩石地球化学成分变化的影响(Polat et al.,2002)。因此,Zr和其他元素之间的相关性可以 用来反映这些元素在蚀变过程中的活动性。临朐火 山岩样品的 REE、HFSE(Nb、Ta、Ti和 Hf)、Th、U 与 Zr 之间具有明显的相关性(图略),表明这些元素 在蚀变过程中基本是不活动的。因此,这些元素可 以用来示踪临朐青山群火山岩的源区特征。

### 4.2 岩石成因

临朐青山群火山岩具有低的 MgO、Ni 含量,富 集大离子亲石元素和轻稀土元素,相对亏损 Nb、 Ta、Ti 等高场强元素为特征,具有较大的(<sup>87</sup>Sr/ <sup>86</sup>Sr), 比值(0.704346~0.708656)变化范围,低的  $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-14.6~-9.2),这表明临朐青山群火山 岩具有壳源特征的岩浆源区。实验岩石学显示,玄 武岩/变玄武岩在 8~32kbar 压力下部分熔融可形 成具有高钾钙碱性特征的中酸性熔体(Rapp et al., 1995),并且熔体具有低 MgO、Mg<sup>#</sup> (<45)和高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量。临朐火山岩主量元素的组成与实验岩 石学下地壳部分熔融的熔体一致(图7)。样品 SD73b 中存在太古代继承性锆石,这些古老锆石年 龄(~2.5Ga)与华北克拉通基底的古老年龄相一致 (Wu Fuyuan et al., 2005a; Geng Yuansheng et al, 2012)。另外,岩石中锆石具有较低的 Hf 同位素组 成, $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 为-29.3~-21.6,这与来源于晚太古代 下地壳的侏罗纪铜石二长花岗岩相似(Xu Yigang et al.,2007);并且 ε<sub>Hf</sub>(t) 值主要位于 2.5Ga 地壳演

3.0

2.5

(a)

准铝质





(据 Wolf et al., 1994; Rapper et al., 1995; Springer et al., 1997; Sisson et al., 2005; Xiao L et al., 2007) Fig. 7 Major element oxide variations of the Linqu volcanic rocks (the shaded area represents the compositions of the experimental melts produced by partial melts of lower crustal rocks) (after Wolf et al., 1994; Rapper et al., 1995; Springer et al., 1997; Sisson et al., 2005; Xiao L et al., 2007)



图 8 临朐青山群火山岩稀土元素标准化图和微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔值据 Sun et al.,1989) Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spider-grams of the Qingshan Group volcanic rocks from Linqu area(normalization values after Sun et al., 1989)



# 图 9 临朐青山群火山岩 Sr-Nd 同位素关系图 Fig. 9 Sr-Nd isotope diagrams of the Qingshan Group volcanic rocks from Linqu area

数据来源:地幔端元引自 Zindler et al.,1986;方城玄武岩据 Zhang Hongfu et al.,2002;济南-邹平辉长岩据 Li Quanzhong et al.,2007; Huang Xiaolong et al.,2012;沂南辉长岩-闪长岩据 Xu Yigang et al.,2004a,2004b;铜石岩体据 Xu Yigang et al.,2004a;汉诺坝基性 麻粒岩包体据 Zhou Xinhua et al., 2002; Liu Yongsheng et al., 2004;女山-莒南麻粒岩包体据 Huang Xiaolong et al.,2004; Ying Jifeng et al.,2010

Date sources: mantle domains from Zinlder et al., 1986; Fangcheng basalts from Zhang Hongfu et al., 2002; Jinan-Zouping gabbros from Li Quanzhong et al., 2007; Huang Xiaolong et al., 2012; Yinan gabbros and diorites from Xu Yigang et al., 2004a, 2004b; Tongshi intrusive rocks from Xu Yigang et al., 2004a; Hannuoba granulite xenoliths from Zhou Xinhua et al., 2002; Liu Yongsheng et al., 2004; Nushan and Junan granulite xenoliths from Huang Xiaolong et al., 2004; Ying Jifeng et al., 2010 化线上(图 10)。所有这些特征都表明临朐青山群 火山岩主要来源于华北古老下地壳的部分熔融。

石榴子石强烈的相容 HREE(如:Yb 和 Lu), 角闪石强相容 MREE, HREE(如:Dy 和 Ho)和 Y。 当石榴子石作为主要的残留相时,熔体 HREE 呈陡 倾形式,其Y/Yb>10,(Ho/Yb)<sub>N</sub>>1.2;相反,角闪 石作为主要残留相时,HREE 将呈平坦形式,其 Y/  $Yb \approx 10$ ,  $(Ho/Yb)_N \approx 1$  (Ge Xiaoyue et al., 2002; Hu Jian et al., 2012)。另外, Sr 和 Eu 对斜长石为 强相容元素,因此斜长石的分离结晶将会导致熔体 中 Sr 和 Eu 的强烈亏损。临朐青山群火山岩具有 高(La/Yb)<sub>N</sub>比值和低的 HREE、Y 含量,其 Y/Yb =8.55~11.57,(Ho/Yb)<sub>N</sub>=0.86~1.29,并且没 有 Eu 和 Sr 的负异常,表明其源区石榴子石和角闪 石为主要残留相,而没有或很少斜长石的残留,这与 镜下观察到大量斜长石及少量角闪石相符。石榴子 石的残留会导致(Dy/Yb)<sub>N</sub>、(Gd/Yb)<sub>N</sub>和(La/Yb)<sub>N</sub> 之间呈正相关关系,而角闪石的残留则会导致(Dy/ Yb)<sub>N</sub>和(La/Yb)<sub>N</sub>之间呈负相关关系。临朐火山岩 中 (Gd/Yb)<sub>N</sub>和(La/Yb)<sub>N</sub>之间呈现的正相关趋势 (图 11a),说明存在石榴子石的残留;而(Gd/Yb)<sub>N</sub> 和(La/Yb)<sub>N</sub>之间近水平直线关系(图 11b),表明残 留相中除了有石榴子石,还有角闪石的存在。此外, 临朐火山岩强烈的亏损 Nb、Ta、Ti(图 8b),高 Nb/ Ta比值为14~21(平均为18),明显高于大陆地壳 (12~13:图 11d), 这可能是源区有金红石残留所致 (Xiong Xiaolin et al., 2005)。Nb/Ta 和 TiO<sub>2</sub>之间

Table 4         Sr-Nd isotope components of volcanic rocks from Qiangshan Group in Linqu area													
样号 K (×1	Rb	Sr	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	$\pm 2\sigma$	(87 Sr/	Sm	Nd	$^{147}\mathrm{Sm}/$	<sup>143</sup> Nd/	10	- (t)	$T_{\rm DM2}$
	$(\times 10^{-6})$	$(\times 10^{-6})$				<sup>86</sup> Sr) <sub>t</sub>	$(\times 10^{-6})$	$(\times 10^{-6})$	$^{144}\mathrm{Nd}$	<sup>144</sup> Nd	$\perp 2\sigma$	$\epsilon_{\rm Nd}(\iota)$	(Ma)
SD14-73	63.2	804	0.227	0.706218	14	0.705831	5.40	30.1	0.1085	0.511917	8	-12.7	1949
SD14-76	79.0	579	0.395	0.705020	14	0.704346	4.67	24.1	0.1171	0.512088	10	-9.5	1690
SD14-79	99.3	725	0.396	0.706421	14	0.705746	2.95	18.9	0.0944	0.511807	12	-14.6	2105
SD14-80	136	665	0.592	0.709263	14	0.708253	5.67	33.4	0.1026	0.511964	11	-11.7	1868
SD16-150a	119	333	1.0248	0.710404	15	0.708656	4.79	30.1	0.1104	0.512099	7	-9.2	1664

临朐青山群火山岩 Sr-Nd 同位素分析结果 表 4



图 10 临朐青山群火山岩中锆石 em值与年龄关系图 Fig. 10 Plot of zircon  $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$  against U-Pb age of volcanic rock from Qingshan Group in Lingu area

的正相关关系(图 11c),同样说明存在金红石的残 留。综上所述,临朐火山岩可能是在含金红石+石 榴子石+角闪石残留相熔融下形成的,其形成深度 大于 50km (Rapper et al., 1995; Skjerlie et al., 2002; Patino et al., 2004; Xiong Xiaolin et al., 2005),表明早白垩世华北东南缘局部地区存在加厚 的下地壳。

如前所述,临朐青山群火山岩主要来源于华北 古老下地壳,虽然临朐青山群火山岩的 Sr-Nd 同位 素主体与汉诺坝下地壳麻粒岩相似,但是与邻区女 山和莒南下地壳麻粒岩包体明显不同(图 9)。此 外,临朐火山岩 Sr-Nd 同位素与壳幔混合成因的鲁 西地区沂南闪长岩的组成相似(图 9; Xu Yigang et al.,2004a),表明其可能的相似成因。另外,临朐青 山群火山岩具有较大变化的 Cr (26.7×10<sup>-6</sup>~239 ×10<sup>-6</sup>)含量,最高的 Cr 含量比邻区莒南太古宙下 地壳麻粒岩的平均值还要大(Ying Jifeng et al., 2010),不太可能由单独的基性麻粒岩部分熔融形 成,表明可能有地幔物质的加入。此外,临朐青山群 火山岩中普遍存在矿物不平衡结构。角闪石呈复杂 环带(图 2d),发育嵌晶结构(角闪石中包含浑圆的 斜长石)(图 2e);自形角闪石围绕斜长石的核生长 (图 2f);部分角闪石存在熔蚀的核。角闪石的这种 熔蚀结构和复杂环带表明岩浆的温度或者组分发生 明显变化(Holland et al., 1994; Bachman et al., 2002)。自形角闪石围绕斜长石的核生长显然与岩 浆演化过程中更基性的岩浆注入有关。角闪石包含 的浑圆状斜长石可能与后期注入基性岩浆,早期形 成的斜长石受热而发生熔蚀有关。斜长石具有筛孔 状核,暗化的幔,干净的亮边(图 2g);斜长石具有熔 蚀的核,边部为干净的振荡环带(图 2h)。斜长石的 这种不平衡结构,同样被认为是岩浆混合的结果 (Tepley et al., 1999; Andrews et al., 2008; Chen Bin., 2012)。因此, 我们认为临朐青山群火山岩来 源于华北古老下地壳与地幔的混合。

到目前为止,鲁西地区仅在邹平、淄博和临朐等 地发现有小规模的软流圈物质对早白垩世岩浆活动 的贡献(Zhong Junwei et al., 2012: Pang Chongjing,2015)。事实上,鲁西地区广泛发育早白 垩世中基性岩浆岩,岩石地球化学研究表明这些中 基性 岩 主 要 来 源 于 富 集 的 岩 石 圈 地 幔 (Zhang Hongfu et al. , 2002, 2003; Guo Feng et al. , 2003; Xu Yigang et al., 2004a, 2004b; Ying Jifeng et al., 2006; Huang Xiaolong et al., 2012)。因此,临朐青 山群火山岩形成过程中混合的幔源岩浆端元更可能 来源于富集的岩石圈地幔。研究表明,鲁西中生代 岩石圈地幔性质具有明显的空间不均一性。鲁西地 区北部的济南-邹平地区具有明显的 EM I 型地幔 特征(Qiu Jiansheng et al., 2005; Li Quanzhong et al.,2007; Huang Xiaolong et al.,2012); 而鲁西地 区南部具有 EM Ⅱ型地幔特征(Zhang Hongfu et al.,2002;Xu Yigang et al.,2004a,2004b)。随着与 大别-苏鲁造山带之间距离的增加,即从东南部到西 北部,华北东南缘镁铁质岩石的 K<sub>2</sub> O/Na<sub>2</sub> O、Ce/ Pb、La/Nb、<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr 比值逐渐下降,而  $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 值和 ε<sub>Nd</sub>(t) 值逐渐增加(Yang Qingliang et al., 2012)。



图 11 临朐青山群火山岩(La/Yb)<sub>N</sub>与(Gd/Yb)<sub>N</sub>、(Dy/Yb)<sub>N</sub>(a,b)以及 Nb/Ta 与 TiO<sub>2</sub>、Nb(c,d)之间关系图 (大陆地壳 Nb/Ta 比值据 Matthias et al.,2000)

Fig. 11 Variation of  $(Gd/Yb)_N$  and  $(Dy/Yb)_N$  vs.  $(La/Yb)_N(a, b)$ ; Nb/Ta vs. TiO<sub>2</sub> and Nb diagrams (c, d) of the Qingshan Group volcanic rocks from Linqu area (continental crust value of Nb/Ta from Matthias et al., 2000)

这种地球化学组成的梯度变化体现了扬子板块俯冲 对上覆华北岩石圈地幔改造程度的空间效应,扬子 板块对华北岩石圈地幔交代作用影响范围大约在 200~300km(Yang Qingliang et al.,2012; Yang Debin et al.,2012)。临朐位于沂南北部约100km, 靠近郯庐断裂带,其岩石圈地幔显然在扬子板块深 俯冲的影响范围内。因而,我们认为临朐青山群火 山岩形成过程中混合的富集岩石圈地幔是由于深俯 冲扬子地壳熔体交代改造华北古老岩石圈地幔形 成的。

# 4.3 地球动力学过程

华北克拉通内部鲁西、鲁东和郑庐断裂山东段 发育了大量的早白垩世青山群火山活动,与中国东 部大规模岩浆活动的峰期一致,绝大部分学者认为 这期岩浆活动与华北克拉通岩石圈减薄密切相关 (Xu Yigang et al.,2004a,2009;Wu Fuyuan et al., 2005b; Zhu Rixiang et al.,2012a,2012b; Li Hongkui et al.,2017)。此外,山东青山群火山岩 的分布明显受郑庐断裂及其次级断裂控制。郑庐断 裂带在早白垩世转变为伸展运动,控制发育了一系 列 NNE 向展布的断陷盆地和变质核杂岩,表明华 北东部早白垩世大规模岩浆活动形成于伸展拉张的 构造背景(Zhu Guang et al.,2012,2016)。区域构 造、地球物理、岩浆活动以及成矿作用等大量的研究 表明,华北克拉通东部岩石圈大规模减薄和陆内的 伸展与古太平洋板块向欧亚大陆俯冲有关(Wu Fuyuan et al.,2005b; Zhu Guang et al.,2012, 2016; Zhu Rixiang et al.,2012b)。因此,我们认为 包括临朐火山岩在内的山东早白垩世青山群火山岩 的形成应与这一大的动力学背景有关。

三叠纪时扬子板块向华北板块俯冲,俯冲的扬 子陆壳物质熔融形成的中酸性熔体(其富集 LREE 和 LILE,亏损 HFSE,具有高 Sr 和低 Nd、Pb 同位 素)向上运移,进入上覆岩石圈地幔并且与地幔橄榄 岩反应,最终使其转变为高度富集的岩石圈地幔。 这种富集的岩石圈地幔比难熔岩石圈地幔具有较低 的固相线温度,因此在岩石圈地幔受到热扰动或者 减压过程中更容易发生部分熔融(Zhang Xiaohui et al.,2010;Herzberg,2011)。在早白垩世岩石圈伸 展减薄的背景下,富集的岩石圈地幔发生部分熔融, 形成了鲁西地区早白垩世富集特征的幔源岩浆活动 (Zhang Hongfu et al.,2002,2003;Guo Feng et al.,2003;Xu Yigang et al.,2004a,2004b;Ying Jifeng et al.,2006;Ling Wenli et al.,2009;Lan Tinggang et al., 2011; Huang Xiaolong et al., 2012; Yang Debin et al., 2012; Yang Qingliang et al., 2012)。这种富集的幔源岩浆底侵到下地壳,促使地壳发生部分熔融,随后与底侵注入的镁铁质岩浆发生混合形成了临朐青山群火山岩。

## 5 结论

(1)临朐青山群火山岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 121.3 ± 1.5 Ma,形成时代为早白 垩世。

(2)临朐早白垩世青山群火山岩主要为一套安 山质的钙碱性岩类,表现出富集轻稀土元素和 Rb、 Ba、K等大离子亲石元素,明显的亏损 Nb、Ta、Ti等 高场强元素;具有富集的 Sr-Nd 同位素特征,其 (<sup>87</sup> Sr/<sup>86</sup> Sr)<sub>t</sub>值在 0.704346~0.705831 之间, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在-14.6~-9.5之间;具有较低的锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 为-29.3~-21.6。

(3)临朐青山群火山岩形成于早白垩世伸展的 构造背景下,是华北古老下地壳部分熔融熔体与富 集地幔熔体发生岩浆混合形成的。

**致谢:**感谢中国地质大学(武汉)胡兆初老师,张 晨西博士,北京大学马芳老师和中国科学技术大学 陈福坤老师等在实验分析测试中的帮助。感谢两位 评审专家对本文提出的宝贵意见!

#### References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report <sup>204</sup>Pb. Chemical Geology, 192: 59~79.
- Andrews B J, Gardner J E, Housh T B. 2008. Repeated recharge, assimilation, and hybridization in magmas erupted from El Chichón as recorded by plagioclase and amphibole phenocrysts. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 175(4): 415 ~426.
- Bachmann O, Dungan M A. 2002. Temperature-induced Al-zoning in hornblendes of the Fish Canyon magma, Colorado. American Mineralogist, 87(8-9):1062~1076.
- Chen Bin, Jahn B M, Suzuki K. 2012. Petrological and Nd-Sr-Os isotopic constraints on the origin of high-Mg adakitic rocks from the north China craton: tectonic implications. Geology, 41(1): 91~94.
- Chen Fukun, Satir M, Ji J, Zhong D. 2002. Nd-Sr-Pb isotopes of Tengchong Cenozoic volcanic rocks from western Yunnan, China: evidence for an enriched-mantle source. Journal of Asian Earth Sciences, 21(1): 39~45.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015. On the correct application in the common igneous petrological

diagrams: Discussion and suggestion. Geological Review, 61(4): 717~734 (in Chinese with Enghish abstract).

- Deng Jinfu, Su Shangguo, Liu Cui, Zhao Guochun, Zhao Xingguo, Zhou Su, Wu Zongxu. 2006. Dicussion on the lithospheric thinning of the North China Craton: delaminaton or thermal erosion and chemical metasomatism? Earth Science Frontiers, 13(2): 105~119 (in Chinese with Enghish abstract).
- Gao Shan, Rudnick R L, Carlson R W, McDonough W F, Liu Yongsheng. 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. Earth & Planetary Science Letters, 198(3): 307~322.
- Gao Shan, Rudnick R L, Yuan Hongling, Liu Xiaoming, Liu Yongsheng, Xu Wenliang, Ling Wenli, Ayers J, Wang Xuanche, Wang Qinghai. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 432 (7019): 892 ~897.
- Ge Xiaoyue, Li Xianhua, Chen Zhigang, Li Wuping. 2002. Geochemistry and petrogene-sis of Jurassic high Sr/low Y granitoids in eastern China: Constrains on crustal thick-ness. Chinese Science Bulletin, 47(11): 962~968.
- Geng Yuansheng, Du Lilin, Ren Liudong. 2012. Growth and reworking of the early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes. Gondwana Research, 21(2~3): 517~529.
- Griffin W L, Andi Z, O'Nions S Y, Ryan C G. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korran Craton. In Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. AGU, Geodynamics Series 27: 107~126.
- Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, Lin Ge. 2003. Geochemistry of late Mesozoic mafic magmatism in west Shandong Province, eastern China: Characterizing the lost lithospheric mantle beneath the North China Block. Geochemical Journal, 37(1): 63~77.
- Herzberg C. 2011. Identification of source lithology in the Hawaiian and Canary Islands: Implications for origins. Journal of Petrology, 52(1): 113~146.
- Holland T, Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. Contributions to Mineralogy and Petrology, 116 (4): 433~447.
- Hu Jian, Jiang Shaoyong, Zhao Haixiang, Shao Yi, Zhang Zunzhong, Xiao E, Wang Yanfen, Dai Baozhang, Li Haiyong. 2012. Geochemistry and petrogenesis of the huashan granites and their implications for the mesozoic tectonic settings in the xiaoqinling gold mineralization belt, nw China. Journal of Asian Earth Sciences, 56(3): 276~289.
- Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, Liu Wengui, Zhang Wen, Tong Xirun, Lin Lin, Zong keqing, Li Ming, Chen Haiyong, Zhou Lian, Yang Lu. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. Journal of Analytical

Atomic Spectrometry, 27(9): 1391~1399.

- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Liu Dunyi. 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from nushan, east China: implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean Craton. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68(1): 127~149.
- Huang Xiaolong, Zhong Junwei, Xu Yigang. 2012. Two tales of the continental lithospheric mantle prior to the destruction of the North China Craton: Insights from Early Cretaceous mafic intrusions in western Shandong, East China. Geochimica et Cosmochimica Acta, 96(11): 193~214.
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, 8(5): 523~548.
- Lan Tangguang, Fan Hongrui, Hu Fangfang, Tomkins A, Yang Kuifeng, Liu Yongsheng. 2011. Multiple crust-mantle interactions for the destruction of the north China craton: geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic evidence from the longbaoshan alkaline complex. Lithos, 122(1~2): 87~106.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rock based on the total alkalisilica diagram. Journal of Petrology, 27: 745~750.
- Le Maitre R W. 1989. A Classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford:Blackwell, 1~193.
- Li Haiyong, Xu Zhaowen, Lu Xiancai, Chen Lihui, Liu Suming, Yang Xiaolan, Zhang Jun, Li Hongchao, Chen Wei. 2008. Evolution of mesozoic volcanic rocks in the zouping basin, western shandong province: constraints for mantle sources. Acta Petrologica Sinica, 24(11): 2537~2547 (in Chinese with Enghish abstract).
- Li Hongkui, Li Dapeng, Geng Ke, Guo Baokui, Zhou Chuanyuan, Liang Taitao. 2017. The Mesozoic Magmatic activities Framework in Jiaodong Area: SHRIMP chronology recording of single particle zircon. Acta Geologica Sinica, 91(1): 163~ 179 (in Chinese with Enghish abstract).
- Li Quanzhong, Xie Zhi, Chen Jiangfeng, Gao Tianshan, Yu Gang, Qian Hui. 2007. Pb-Sr-Nd isotopic characteristics of the gabbros from jinan and zouping and the contribution of the lower crust to the magma source. Geological Journal of China Universities, 13 (2): 297 ~ 310 (in Chinese with Enghish abstract).
- Ling Wenli, Duan Ruichun, Xie Xianjun, Zhang Yongqing, Zhang Junbo, Cheng Jianping, Liu Xiaoming, Yang Hongmei. 2009. Contrasting geochemistry of the Cretaceous volcanic suites in Shandong province and its implications for the Mesozoic lower crust delamination in the eastern North ChinaCraton. Lithos, 113(3~4): 640~658.
- Liu Mingwei, Zhang Qinyu, Song Wanqian. 2003. Division of the cretaceous lithostratigraphic and volcanic sequences of Shandong. Journal of Stratigraphy, 27 (3): 247 ~ 253 (in

Chinese with Enghish abstract).

- Liu Shen, Hu Ruizhong, Zhao Junhong, Feng Caixia. 2003. Tectonic setting and petrogenesis of QingShan Formation volcanic rocks in western Shandong Province: Evidence from major elements and trace elements. Geochemica, 32(4): 306~ 311 (in Chinese with Enghish abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Yuan Hongling, Zhou Lian, Liu Xiaoming, Wang Xuance, Hu Zhaochu, Wang Linsen. 2004.
  U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: insights on evolution of lower continental crust. Chemical Geology, 211(1−2): 87 ~109.
- Liu yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1~2): 537~571.
- Ludwig K R. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49); A Geochronologica Toolkit for Microsoft Excle. Berkeley Geochronology Center. Special Publication, 1: 1~55.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635~643.
- Menzies M A, Fan Weiming, Zhang Ming. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of > 120km of Archean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. Geological Society, London, Special Publications, 76(1): 71~81.
- Menzies M A, Xu Yigang, Zhang Hongfu, Fan Weiming. 2007. Integration of geology, geophysics and geochemistry: a key to understanding the North China Craton. Lithos, 96(1~2): 1~ 21.
- Miao Baihu, Xu Zhaowen, Wang Hao, Li Haiyong, Yang Xiaonan, Zuo Changhu, Zhao Zengxia. 2015. Genesis and source characteristics of basalitic andesite for the lower Qingshan Formation in Zouping volcanic Basin, Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 89 (1): 37 ~ 48 (in Chinese with English abstract).
- Niu Manlan, Zhu Guang, Xie Chenglong, Wu Qi, Liu Guosheng. 2010. Geochemistry of Late Mesozoic intrusions from the southern segment of Zhangbaling uplift along the Tan-Lu Fault Zone and its implications for the lithospheric thinning. Acta Petrologica Sinica, 26 (9): 2783 ~ 2804 (in Chinese with Enghish abstract).
- Niu Manlan, Fu Pengyuan, Wu Qi, Zhu Guang, Xia Wenjing. 2012. Geochemistry and petrogenesis of early Cretaceous volcanic rocks from Mengyin basin. Acta Petrologica Sinica, 28 (12): 4125~4138 (in Chinese with Enghish abstract).
- Patiño Douce, Alberto E. 2004. Vapor-Absent Melting of Tonalite at 15~32 kbar. Journal of Petrology, 46(2): 275~290.
- Pang Chongjin, 2015. Geochronology and Geochemistry of the Cretaceous mafic to intermediate volcanic rocks in the eastern

North China Craton. Ph. D. Dissertation. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).

- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contributions to Mineralogy & Petrology., 58(1): 63~81.
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Wang Qinghai, Wang Dongyan, Lin Jingqian. 2004. Mesozoic basalt and mineral chemistry of the mantle-derived xenocrysts in Feixian, Western Shandong, China: Constaints on nature of Mesozoic lithospheric mantle. Geological Journal of China Universities, 10(1): 88~98 (in Chinese with Enghish abstract).
- Polat A, Hofmann A W, Rosing M T. 2002. Boninite-like volcanic rocks in the 3. 7 - 3. 8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth. Chemical Geology, 184(3): 231~254.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezhi, Zhou Jincheng, Zeng Jiahu. 1996. Geology, Geochemistry and genesis of the Mesozoic shoshonitic volcanic rocks in Shandong Province. Earth Science, 21(5): 546~553 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiangsheng, Wang Dezhi, Zeng Jiahu, Brent I. A. McInnes. 1997. Study on trace element and Nd-Sr Isotopic Geochemistry of Mesozoic postah-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shangdong Province. Geological Journal of China Universities, 3 (4): 384 ~ 396 (in Chinese with Enghish abstract).
- Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Luo Qinghua. 2001. <sup>40</sup> Ar-<sup>39</sup> Ar dating and source denoting of K-rich volcanic rocks lamprophyres in western Shandong Province. Chinese Science Bulletin, 46(18): 1499~1508 (in Chinese with Enghish abstract).
- Qiu Jiansheng, Hu Jian, Jiang Shaoyong, Wang Rucheng, Xu Xisheng. 2005. Mesozoic-Cenozoic mafic magmatism in western Shandong Province and its implication for the chemical evolution of the mantle. Earth Science, 30(6): 646~658 (in Chinese with Enghish abstract).
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crustmantle recycling. Journal of Petrology, 36(4): 891~931.
- Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, Glazner A F. 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources. Contributions to Mineralogy and Petrology, 148 (6): 635  $\sim$ 661.
- Skjerlie K P, Douce A E P. 2002. The Fluid-absent Partial Melting of a Zoisite-bearing Quartz Eclogite from 1. 0 to 3. 2 GPa: Implications for Melting in Thickened Continental Crust and for Subduction-zone Processes. Journal of Petrology, 43(2): 291 ~314.
- Springer W, Seck H A. 1997. Partial fusion of basic granulite at 5~ 15 kbar: implications for the origin of TTG magmas. Contributions to Mineralogy and Petrology, 127(1): 30~45.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics

of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basin. London, Geological Society Special Publication, 42(1): 313~345.

- Tepley F J, Davidson J P, Clynne M A. 1999. Magmatic interactions as recorded in plagioclase phenocrysts of chaos crags, Lassen Volcanic Center, California. Journal of Petrology, 40(5): 787~806.
- Wolf M B, Wyllie P J. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time. Contributions to Mineralogy and Petrology, 115(4): 369~383.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to question of non-orogenic granite geneses. Geological Magazine, 106(4): 370~384.
- Wu Fuyuan, Zhao Guochun, Wilde S A, Sun Deyou. 2005a. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 523~545.
- Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, Zhang Xiaoou, Yang Jinghui, 2005b. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth and Planetary Science Letters 233(1~2): 103~119.
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, Zheng Jianping. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the north china craton. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1145~1174 (in Chinese with Enghish abstract).
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Zhu Rixiang, Zhang Guowei. 2014. Thinning and destruction of the cratonic lithosphere: a global perspective. Science China Earth Sciences, 57 (12): 2878 ~2890.
- Xiao L, Clemens J D. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: experimental and field constraints. Lithos, 95(3-4): 399~414.
- Xiaolin, Adam J, Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt; implications for TTG genesis. Chemical Geology, 218 (3-4); 339~359.
- Xu Yigang. 2004. Lithospheric thinning beneath North China: a temporal and spatial perspective. Geological Journal of China Universities, 10(3): 324 ~ 331 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang, Huang Xiaolong, Ma Jinlong, Wang Yanbin, Lizuka Y, Xu Jifeng, Wang Qiang, Wu Xiangyang. 2004a. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: constraints from SHRIMP zircon U - Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. Contributions to Mineralogy and Petrology, 147 (6): 750~767.
- Xu Yigang, Ma Jinlong, Huang Xiaolong, Lizuka Y, Chung Sunlin, Wang Yanbin, Wu Xiangyang. 2004b. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province: petrogenesis and mantle domains beneath the North China Craton. International Journal of Earth Sciences, 93(6): 1025

 $\sim 1041.$ 

- Xu Yigang, Wu Xiangyang, Luo Zhenyu, Huang Xiaolong, Xie Liewen. 2007. Zircon Hf isotope compositions of Middle Jurassic-Early Cretaceous intrusions in Shandong Province and its implications. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 307~316 (in Chinese with Enghish abstract).
- Xu Yigang, Li Hongyan, Pang Chongjing, He Bin. 2009. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton. Chinese Sci Bull, 54(14):1974~1989 (in Chinese with Enghish abstract).
- Yang Debin, Xu Wenliang, Pei Fuping, Yang Chenghai, Wang Qinghai. 2012. Spatial extent of the influence of the deeply subducted South China Block on the southeastern North China Block: constraints from Sr-Nd-Pb isotopes in Mesozoic mafic igneous rocks. Lithos, 136(4): 246~260.
- Yang Qingliang, Zhao Zifu, Zheng Yongfei. 2012. Slab-mantle interaction in continental subduction channel: Geochemical evidence from Mesozoic gabbroic intrusives in southeastern North China. Lithos, 155(1): 442~460.
- Ying Jifeng, Zhou Xinhua, Zhang Hongfu. 2006. The geochemical variations of mid-Cretaceous lavas across western Shandong Province, China and their tectonic implications. International Journal of Earth Sciences, 95(1): 68~79.
- Ying Jifeng, Zhang Hongfu, Tang Yanjie. 2010. Lower crustal xenoliths from Junan, Shandong province and their bearing on the nature of the lower crust beneath the North China Craton. Lithos, 119(3): 363~376.
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, Fan Weiming, Zhai Mingguo, Ying Jifeng. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major-, traceelement and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144 (2): 241 ~254.
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, Zhou Meifu, Fan Weiming, Zheng Jianping. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern north China Craton: evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. Geochimicaet Cosmochimica Acta, 67(22): 4373~4387.
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Meifu, Fan Weiming, Zhou Xinhua, Zhai Mingguo. 2004. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. Geological Magazine, 141(01): 55~62.
- Zhang Hongfu, Zhou Xinhua, Fan Weiming, Sun Ming, Guo Feng, Ying Jifeng, Tang Yanjie, Zhang Jin, Niu Lifeng. 2005. Nature, composition, enrichment processes and its mechanism of the Mesozoic lithospheric mantle beneath the Southeastern North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 21(4): 1271~ 1280 (in Chinese with Enghish abstract).
- Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Jiang Neng, Zhai Mingguo, Zhang Yanbin. 2010. Early Devonian alkaline intrusive complex from the northern North China craton: a petrological monitor of

post-collisional tectonics. Journal of the Geological Society, 167(4): 717~730.

- Zhang Yongqing, Ling Wenling, Zhang Junbo, Duan Ruichun, Ren Bangfang, Yang Hongmei. 2017. Geochemistry and petrogenesis of the Mesozoic volcanic rocks from the Qingshan Group in western Shandong. Acta Geologica Sinica, 91(12): 2697~2709 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Junwei, Huang Xiaolong. 2012. Spatial variation of zircon Hf isotopes for the Early Cretaceous mafic intrusions in western Shandong and its genesis. Geotectonica et Metallogenia, 135 (4):578~580 (in Chinese with Enghish abstract).
- Zhou Xinhua, Sun Min, Zhang Guohui, Chen Shaohai. 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean Craton. Lithos, 62(3-4): 111 ~124.
- Zhu Guang, Jiang Dazhi, Zhang Bilong, Chen Yin, 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: evidence from crustal deformation kinematics. Gondwana Research, 22(1): 86~103.
- Zhu Guang, Wang Wei, Gu Chengchuan, Zhang Shuai, Liu Cheng. 2016. Late Mesozoic evolution history of the Tan-Lu Fault Zone and its indication to destruction processes of the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 32(4): 935~949 (in Chinese with Enghish abstract).
- Zhu Rixiang, Yang Jinghui, Wu Fuyuan. 2012a. Timing of destruction of the North China Craton. Lithos, 149(4): 51 ~60.
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, Zhang Hongfu, Xia Qunke, Zheng Tianyu. 2012b. Destruction of the North China Craton. Science China Earth Sciences, 55(10): 1565~1587.
- Zindler A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. Annual review of Earth and Planetary Sciences, 14(1): 493~571.

### 参考文献

- 邓晋福,苏尚国,刘翠,赵国春,赵兴国,周肃,吴宗絮. 2006. 关 于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论:是拆 沉,还是热侵蚀和化学交代?地学前缘,13(2):105~119.
- 邓晋福,刘翠,冯艳芳,肖庆辉,狄永军,苏尚国,赵国春,段培新, 戴蒙. 2015.关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议.地 质论评,61(4):717~734.
- 李海勇,徐兆文,陆现彩,陈立辉,刘苏明,杨小男,张军,李红超, 陈伟. 2008. 鲁西邹平盆地中生代火山岩的演化对地幔源区的 约束. 岩石学报,24(11):2537~2547.
- 李洪奎,李大鹏,耿科,郭宝奎,禚传源,梁太涛. 2017. 胶东地区燕 山期岩浆活动及其构造环境——来自单颗锆石 SHRIMP 年代 学的记录. 地质学报, 91(1): 163~179.
- 李全忠,谢智,陈江峰,高天山,喻钢,钱卉.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. 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.地层学杂志,27(3):247~253.

- 刘燊,胡瑞忠,赵军红,冯彩霞.2003.西青山组火山岩形成的构造 背景及其成因探讨——主元素和微量元素证据.地球化学,32 (4):306~311.
- 缪柏虎,徐兆文,王浩,李海勇,杨小男,左昌虎,赵增霞. 2015. 山东 邹平青山下亚组玄武安山岩源区性质及成因. 地质学报,89 (1):37~48.
- 牛漫兰,朱光,谢成龙,吴齐,刘国生.2010. 郑庐断裂带张八岭隆 起南段晚中生代侵入岩地球化学特征及其对岩石圈减薄的指 示.岩石学报,26(9):2783~2804.
- 牛漫兰,傅朋远,吴齐,朱光,夏文静. 2012. 蒙阴盆地早白垩世火山 岩地球化学特征及其岩石成因. 岩石学报,28(12):4125~4138.
- 庞崇进. 2015. 华北克拉通东部白垩纪中基性火山岩的年代学和地 球化学特征. 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文.
- 裴福萍,许文良,王清海,王冬艳,林景仟. 2004. 鲁西费县中生代 玄武岩及幔源捕掳晶的矿物化学──对岩石圈地幔性质的制 约. 高校地质学报,10(1):88~98.
- 邱检生,王德滋,周金城,曾家湖.1996.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.地球科学,21(5): 546~553.
- 邱检生,王德滋,曾家湖,Brent I. A. McInnes. 1997. 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.高校 地质学报,3(4):384~396.

邱检生,徐夕生,罗清华.2001.鲁西富钾火山岩和煌斑岩的

<sup>40</sup> Ar-<sup>39</sup> Ar 定年及源区示踪.科学通报,46(18):1499~1508.

邱检生,胡建,蒋少涌,王汝成,徐夕生.2005.鲁西中、新生代镁铁 质岩浆作用与地幔化学演化.地球科学.30(06):646~658.

- 吴福元,徐义刚,高山,郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破 坏研究的主要学术争论. 岩石学报,24(06):1145~1174.
- 徐义刚. 2004. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征. 高校地质学报, 10(03): 324~331.
- 徐义刚, 巫祥阳, 罗震宇, 马金龙, 黄小龙, 谢烈文. 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. 岩 石学报, 23(2): 307~316.
- 徐义刚,李洪颜,庞崇进,何斌. 2009. 论华北克拉通破坏的时限. 科 学通报,54(14):1974~1989.
- 张宏福,周新华,范蔚茗,孙敏,郭锋,英基丰,汤艳杰,张瑾,牛 利锋.2005.华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过 程及其形成机理.岩石学报,21(04):1271~1280.
- 张永清,凌文黎,张军波,段瑞春,任邦方,杨红梅.2017.山东西部 中生代青山群火山岩的地球化学特征及其岩石成因.地质学 报,91(12):2697~2709.
- 钟军伟,黄小龙.2012.鲁西早白垩世基性侵入岩的锆石 Hf 同位素 组成变化及其成因.大地构造与成矿学,36(4):572~580.
- 朱光,王薇,顾承串,张帅,刘程.2016. 郑庐断裂带晚中生代演化 历史及其对华北克拉通破坏过程的指示.岩石学报,32(4): 935~949.

# Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Early Cretaceous Volcanic Rocks of the Qingshan Group in the Linqu Area, Western Shandong Province

CAO Guangyue, XUE Huaimin, LIU Zhe, LU Zenglong

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

### Abstract

In this paper, we report the geochronology, major and trace element geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope data for the early Cretaceous volcanic rocks of the Qingshan Group in the Linqu area, with an objective to constrain the petrogenesis. The volcanic rocks are mainly intermediate rocks, with a SiO<sub>2</sub> content varying between 54.41%~67.81%. Rock association consists mainly of andesite, trachyandesite, trachyte and trachydacite. These volcanic rocks belong to calc-alkaline series. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating yields an age of 121.3 ± 1.5 Ma for trachyandesite, indicating that the rocks crystallized in Early Cretaceous. The rocks are geochemically characterized by enrichment of LREE and LILE (e. g. , Rb, Ba, K), and depletion of HFSE (e. g. , Nb, Ta, Ti). These volcanic rocks have enriched Sr-Nd isotopic composition ( $\epsilon_{Hf}(t) = -29.3 \sim -21.6$ ). The rocks have the similar Mg<sup>#</sup> values as the melts produced by metabasite, with large range of Cr (26.7×10<sup>-6</sup>~239×10<sup>-6</sup>) and Ni (10×10<sup>-6</sup>~69.7×10<sup>-6</sup>) content, and show significant mineral textural disequilibrium. The study further indicates that the Linqu volcanic rocks of the Qingshan Group may be the product of magma mixing between lower crust-derived melts of ancient North China Craton and mantle-derived melts of enriched mantle under the lithospheric extension setting.

Key words: western Shandong; Qingshan Group; volcanic rocks; Linqu area; magma mixing; zircon U-Pb age