

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.337



鲁东中生代青山群火山岩锆石 U-Pb 年代学

张永清^{1,2}, 凌文黎³, 张军波³, 段瑞春⁴, 任邦方^{1,2}, 杨红梅⁴

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

2. 中国地质调查局泥质海岸带地质环境重点实验室, 天津 300170

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

4. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430074

摘要: 青山群火山岩是山东境内最具代表性的中生代火山岩, 研究其形成时代及其成因对了解华北克拉通东部的地质演化历史具有重要意义. 对鲁东万第地区中生代青山群中基性火山岩和中酸性火山岩样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 结果分别为 117 ± 2 Ma 和 116 ± 4 Ma, 表明万第地区中生代青山群火山岩的形成年龄为早白垩世中晚期. 结合前人研究结果, 可得鲁东青山群火山岩岩浆开始和结束的时间均略晚于鲁西; 万第中基性和中酸性火山岩形成过程中均受到过华北克拉通古老地壳物质的影响, 且万第中基性火山岩还受到了扬子陆壳深俯冲的影响.

关键词: 鲁东; 中生代; 青山群; 锆石 U-Pb; 年代学.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2019)01-0344-11

收稿日期: 2018-05-30

Zircon U-Pb Geochronology of the Mesozoic Volcanic Rocks from Qingshan Group in the Eastern Shandong

Zhang Yongqing^{1,2}, Ling Wenli³, Zhang Junbo³, Duan Ruichun⁴, Ren Bangfang^{1,2}, Yang Hongmei⁴

1. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2. Key Laboratory of Muddy Coast Geo-Environment, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430074, China

Abstract: The mesozoic volcanic rocks from the Qingshan Group are the most representative in the Shandong Province, and investigation of its genesis and forming time is very important to reveal the evolution history of the eastern North China Craton. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of meta-basic volcanic rocks and meta-acid volcanic rocks from the Qingshan Group in the eastern Shandong are reported in this paper. The dating results show that the ages of the meta-basic and meta-acidic volcanic rocks are 117 ± 2 Ma (MSWD=3.2) and 116 ± 4 (MSWD=3.5) respectively, which represent the formation time of the volcanic rocks from the Qingshan Group. Based on the synthesis of geochronology, the start and the end age of the volcanic rocks from the Qingshan Group in the eastern Shandong are younger than those in the western Shandong. The meta-basic volcanic rocks might have undergone multiple events induced by continental crustal materials both from the North China Craton and the deep subduction of the Yangtze Craton.

Key words: eastern Shandong; Mesozoic; Qingshan Group; zircon U-Pb; geochronology.

基金项目: 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目(No.40521001).

作者简介: 张永清(1982-), 女, 高级工程师, 现从事同位素地球化学和地质年代学研究. ORCID: 0000-0003-0695-924X.

E-mail: zhangyq823@163.com

引用格式: 张永清, 凌文黎, 张军波, 等, 2019. 鲁东中生代青山群火山岩锆石 U-Pb 年代学. 地球科学, 44(1): 344-354.

山东地区位于华北克拉通东南部,郯庐断裂带(在山东境内称沂沭断裂带)呈近 NNE 向将其分割为鲁西、鲁中(沂沭断裂带)和鲁东 3 个地质构造单元.山东地区是研究华北克拉通中生代地幔组成及岩石圈演化的重要地区(Zhang *et al.*, 2002; Ling *et al.*, 2009; 夏群科等, 2017; 曹光跃等, 2018),区内广泛发育中生代火山岩,为认识岩石圈减薄事件及其动力学过程提供了重要的物质基础.

青山群火山岩是山东境内最具代表性的中生代火山岩,研究其形成时代及其地质成因对了解华北克拉通东部的地质演化历史具有重要意义.前人对青山群火山岩已经做了一定的年代学研究(邱检生等, 1996, 2001a, 2001b, 2012; 凌文黎等, 2006; 唐嘉锋等, 2008; Ling *et al.*, 2009; 匡永生等, 2012a, 2012b; 李友连等, 2012; 曹光跃等, 2014, 2018; 庞崇进, 2015; 周建波等, 2016).总体青山群火山岩年龄均属早白垩世中晚期,然而对于青山群火山岩的时空分布特征仍然存在争议,主要包括(1)火山作用持续的时间界限不清楚;(2)鲁西和鲁东火山岩的形成时代是否存在先后关系(邱检生等, 1996, 2001a; 凌文黎等, 2006; 匡永生等, 2012b; 曹光跃等,

2014);(3)鲁东地区中基性火山岩和中酸性火山岩的喷发时间是否存在先后关系(匡永生等, 2012b).要理清这些问题,需要开展大量的年代学研究,本文选择鲁东莱阳地区青山群火山岩作为研究对象,采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)进行锆石 U-Pb 定年,并对其所揭示的地质意义进行讨论.

1 地质概况

青山群中生代火山岩在山东省分布广泛,常发育于断陷盆地及断裂带一侧,受断裂构造的控制较明显(图 1).由于陆相火山岩具有多变性和复杂性,青山群火山岩的岩性组成在山东地区的不同构造单元存在较大变化(图 2).鲁东地区以中性、酸性火山岩或双峰式火山岩为主;鲁西则以中性火山岩、基性火山岩为主;而地处鲁东、鲁西之间的潍坊、郯城地区,则主要发育中性火山岩、偏碱性火山岩.

在鲁东莱阳地区,青山群火山岩岩相变化较大.莱阳盆地北缘,主要为中-酸性熔岩及火山碎屑岩,下部为淡紫红色、粉红色酸性凝灰岩(沉凝灰岩)、英

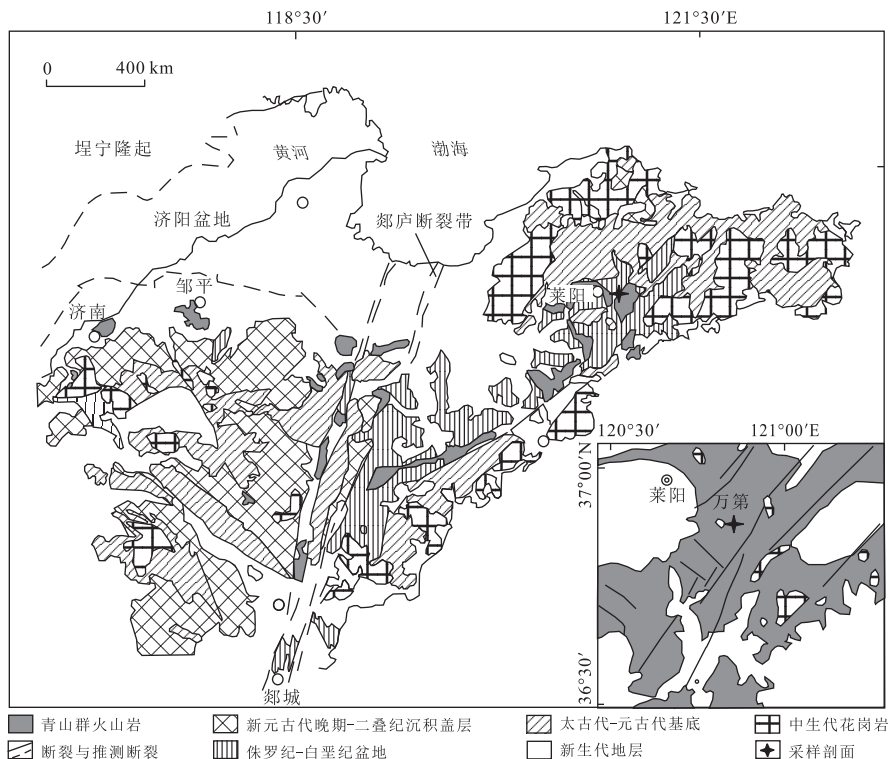


图 1 山东区域地质简图

Fig.1 Simplified geological map of the Shandong Province

据 Zhang *et al.* (2014)、山东省地质矿产局(1991)修改

表 1 万第火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the volcanic rocks in the Wandu area

样品及 分析号	U (10^{-6})	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		年龄(Ma)					
			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
WD16-1	354	0.09	0.039 6	0.000 4	0.282 5	0.005 6	0.051 8	0.001 1	250	2	253	4	276	46
WD16-2	465	0.05	0.030 9	0.000 3	0.217 7	0.005 1	0.051 2	0.001 2	196	2	200	4	249	55
WD16-3	663	2.20	0.018 4	0.000 2	0.123 1	0.002 6	0.048 4	0.001 1	118	1	118	2	121	51
WD16-4	238	1.59	0.017 8	0.000 2	0.120 7	0.003 8	0.049 1	0.001 6	114	1	116	3	155	73
WD16-5	196	0.78	0.125 7	0.001 2	1.115 6	0.016 5	0.064 4	0.001 0	763	7	761	8	753	32
WD16-6	232	0.93	0.018 5	0.000 2	0.126 3	0.004 8	0.049 4	0.001 9	118	1	121	4	167	89
WD16-7	365	0.72	0.092 3	0.000 9	0.809 2	0.011 7	0.063 6	0.001 0	569	5	602	7	727	32
WD16-8	620	0.34	0.331 0	0.003 1	5.345 1	0.052 2	0.117 1	0.001 2	1 843	15	1 876	8	1 913	19
WD16-9	96	0.56	0.336 0	0.003 4	5.196 7	0.074 2	0.112 1	0.001 7	1 868	17	1 852	12	1 834	27
WD16-10	172	0.90	0.021 2	0.000 2	0.155 8	0.005 0	0.053 3	0.001 8	135	2	147	4	343	73
WD16-11	51	1.06	0.113 1	0.001 7	1.008 7	0.045 9	0.064 7	0.003 0	691	10	708	23	764	96
WD16-12	284	0.21	0.038 8	0.000 4	0.291 9	0.008 0	0.054 6	0.001 5	245	3	260	6	394	62
WD16-13	104	0.63	0.028 2	0.000 5	0.193 2	0.013 3	0.049 8	0.003 5	179	3	179	11	184	156
WD16-14	121	1.37	0.105 5	0.001 2	0.901 9	0.022 0	0.062 0	0.001 6	647	7	653	12	673	53
WD16-15	315	1.37	0.042 8	0.000 4	0.370 7	0.006 4	0.062 8	0.001 1	270	3	320	5	701	38
WD16-16	239	0.91	0.017 8	0.000 3	0.121 6	0.006 6	0.049 7	0.002 8	114	2	117	6	179	125
WD16-17	95	1.01	0.122 9	0.001 3	1.095 0	0.021 4	0.064 6	0.001 3	747	7	751	10	762	42
WD21-1	384	1.03	0.018 4	0.000 3	0.124 2	0.005 2	0.049 0	0.002 1	118	2	119	5	146	97
WD21-2	243	1.45	0.018 6	0.000 3	0.124 0	0.005 5	0.048 5	0.002 2	119	2	119	5	123	102
WD21-3	129	1.09	0.017 0	0.000 4	0.121 4	0.010 8	0.051 9	0.004 7	108	2	116	10	283	194
WD21-4	254	1.48	0.018 4	0.000 3	0.124 1	0.005 2	0.048 8	0.002 1	118	2	119	5	140	96
WD21-6	427	0.88	0.423 4	0.005 0	10.07 3	0.125 1	0.172 5	0.001 9	2 276	23	2 442	11	2 582	18
WD21-7	153	1.08	0.018 0	0.000 4	0.123 2	0.010 3	0.049 7	0.004 2	115	2	118	9	180	187
WD21-8	249	1.32	0.017 3	0.000 3	0.122 3	0.006 6	0.051 2	0.002 8	111	2	117	6	251	121
WD21-9	165	1.23	0.017 9	0.000 5	0.126 1	0.015 3	0.051 0	0.006 3	115	3	121	14	241	262
WD21-10	214	1.25	0.018 6	0.000 3	0.123 3	0.007 3	0.048 0	0.002 9	119	2	118	7	97	137
WD21-11	143	1.43	0.018 7	0.000 3	0.121 0	0.007 8	0.047 0	0.003 1	119	2	116	7	46	149
WD21-12	120	1.08	0.018 9	0.000 4	0.127 8	0.010 1	0.048 9	0.003 9	121	2	122	9	145	177
WD21-14	186	1.31	0.018 6	0.000 3	0.122 6	0.007 1	0.047 8	0.002 8	119	2	117	6	89	134
WD21-15	212	1.62	0.018 3	0.000 3	0.121 3	0.007 0	0.048 0	0.002 8	117	2	116	6	101	132
WD21-16	231	1.35	0.018 3	0.000 3	0.121 4	0.005 6	0.048 0	0.002 2	117	2	116	5	101	106
WD21-19	137	1.47	0.018 2	0.000 3	0.120 1	0.008 1	0.047 9	0.003 3	116	2	115	7	95	155
WD21-20	138	0.96	0.018 5	0.000 5	0.121 4	0.013 4	0.047 7	0.005 4	118	3	116	12	83	248
WD21-21	140	0.99	0.027 9	0.000 4	0.190 7	0.009 0	0.049 5	0.002 4	178	3	177	8	172	107
WD21-22	168	1.37	0.018 4	0.000 3	0.124 2	0.007 3	0.048 9	0.002 9	118	2	119	7	145	134
WD21-23	184	1.30	0.018 9	0.000 3	0.129 5	0.006 6	0.049 7	0.002 6	121	2	124	6	180	116
WD21-25	197	1.42	0.019 1	0.000 3	0.131 4	0.008 6	0.049 8	0.003 3	122	2	125	8	188	148
WD21-26	113	1.06	0.019 4	0.000 5	0.127 6	0.013 6	0.047 8	0.005 2	124	3	122	12	86	239
WD21-27	175	1.22	0.017 3	0.000 3	0.118 5	0.008 8	0.049 5	0.003 7	111	2	114	8	173	167

安质角砾岩,上部主要为中性火山岩,包括灰绿、褐紫色安山岩、玄武安山岩、安山质火山角砾岩、火山角砾岩、含集块火山角砾凝灰岩、安山质集块岩等,并混有大量的陆源碎屑物质,形成青山群顶部的碎屑沉积层.莱阳南部万第一带,以基性熔岩为主,下部为灰绿色厚层状具气孔或杏仁构造的玄武安山岩,夹多层安山玄武质火山角砾岩及部分薄层玄武岩、安山岩和英安岩;上部为浅灰色薄层斑状黑云安山岩夹安山质凝灰角砾岩、玄武安山岩、薄层橄榄玄武岩及安山凝灰岩(山东省地质矿产局,1991).

本文研究样品 WD16 ($N36^{\circ} 50.616'$, $E120^{\circ}53.629'$)和 WD21($N36^{\circ}53.005'$, $E120^{\circ}52.682'$)来自鲁东莱阳万第地区中基性火山岩和中酸性火山岩,具体采样位置如图 1 所示.

2 样品分析方法

对两件样品进行激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)法锆石 U-Pb 同位素测年.用于分选锆石的大样野外采集重量为 15~20 kg,在室内经

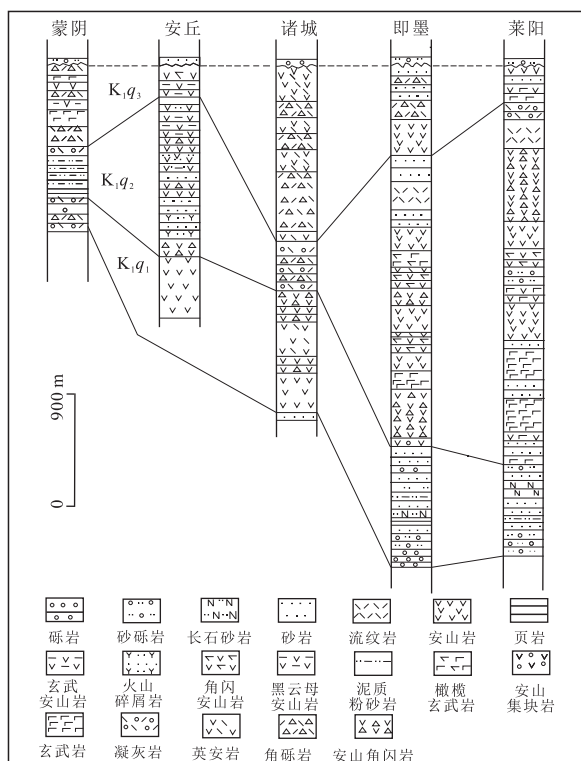


图 2 山东中生代青山群剖面

Fig.2 The section of the Mesozoic Qingshan Group in Shandong Province

据 Ling *et al.*(2009)、山东省地质矿产局(1991)修改

无污染碎样后用淘盘进行重矿物富集,然后在双目显微镜下进行人工挑纯.对选好的锆石晶体先进行透射光、反射光和阴极发光照像,作为原位 U-Pb 同位素测量时选择打点位置的依据.

锆石 U-Pb 同位素组成在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行分析和测试,实验条件及流程见 Zhang *et al.*(2007)和 Liu *et al.*(2010).实验过程中,利用 NIST610 玻璃标样作

为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量,²⁹Si 作为内标进行校正;采用 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行同位素分馏校正,采用 Andersen(2002)报道的软件对普通铅进行校正,采用 GLITTER4.0 程序(Jackson *et al.*, 2004)和 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)进行数据处理,单个数据分析的误差为 1σ,数据分析结果见表 1.

3 结果分析

用于测年的锆石颗粒多呈短柱状,长径多为 80~200 μm.样品 WD21 为中酸性火山岩,CL 图像显示锆石震荡环带清晰,具典型的岩浆锆石特征,所测锆石的 U 含量为 113×10⁻⁶~427×10⁻⁶,Th/U 比值为 0.88~1.62;样品 WD16 为中基性火山岩,CL 图像显示多数锆石具有岩浆结晶锆石的晶纹,呈同心圆状震荡环带或者板条状,部分锆石晶纹不明显,所测锆石的 U 含量为 51×10⁻⁶~663×10⁻⁶,Th/U 比值为 0.05~2.20.不同成因锆石具有不同的 U、Pb 含量与 Th/U 比值,一般情况下,岩浆锆石具有较高的 U、Pb 含量,较大的 Th/U 比值(一般大于 0.4),而变质锆石则 U、Pb 含量较低,Th/U 比值较小.本文两件火山岩样品参与加权平均年龄计算的锆石的 Th/U 比值均大于 0.9,具有岩浆锆石 Th/U 比值特征(Wu and Zheng, 2004),说明参与加权平均年龄计算的锆石应为岩浆锆石,其年龄代表成岩年龄.

样品 WD16,共测定获得了 17 个有效的锆石 U-Pb 同位素年龄数据点(图 4a,表 1),其中 3、4、6 和 16 号点其²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄加权平均值为 117±2 Ma(MSWD=3.2),代表万第青山群中基性

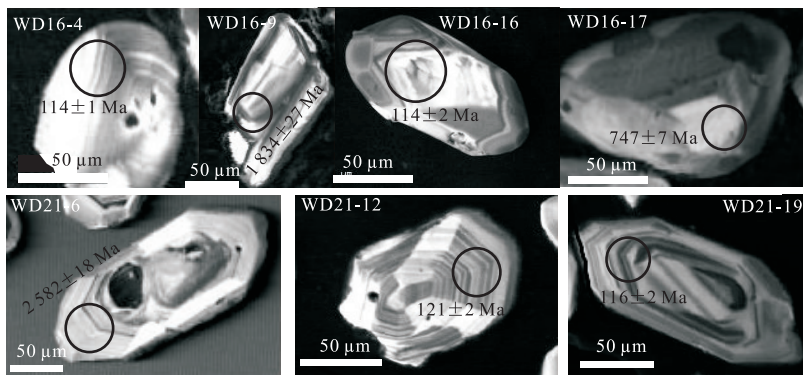


图 3 万第火山岩典型锆石 CL 图片

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircons from the Wandu volcanic rocks

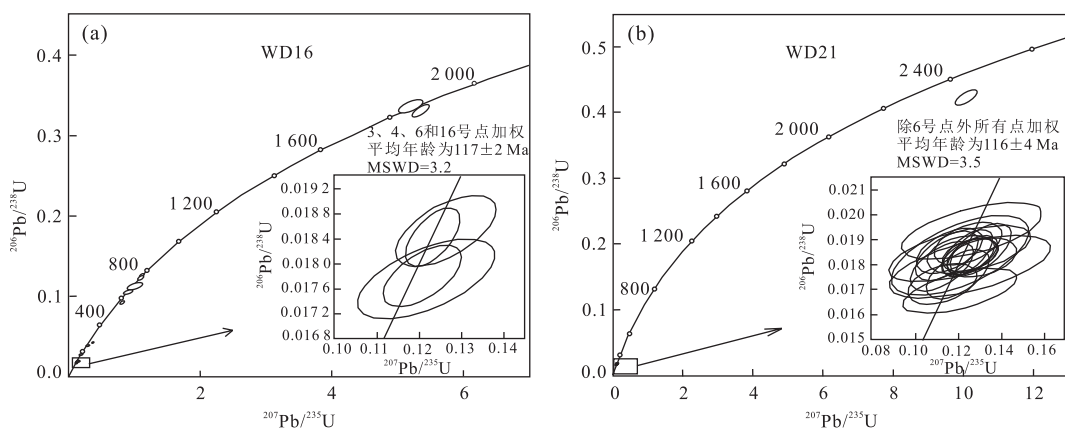


图 4 万第火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 LA-ICP-MS zircon U-Pb Concordia diagrams of the Wandu volcanic rocks

火山岩的形成年龄,其余 13 个数据点年龄分散,明显老于青山群火山岩的形成年龄,可能代表了捕获或者继承锆石的年龄,在 8 和 9 号点分别获得了 1913 ± 19 Ma 和 1834 ± 27 Ma 的年龄,5、11、14 和 17 号点获得了 647~763 Ma 之间的年龄,1、2、7、10、12、13 和 15 号点获得了 135~569 Ma 之间的年龄;样品 WD21,共测定获得了 23 个有效的锆石 U-Pb 同位素年龄数据点(图 4b,表 1),其中 6 号点获得 2582 ± 18 Ma 年龄,可能为捕获或者继承锆石的年龄,其余数据点具有在误差范围内一致的 U-Pb 同位素组成, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 116 ± 4 Ma (MSWD=3.5),代表万第青山群中酸性火山岩的形成年龄。

4 讨论

采自鲁东莱阳万第剖面的青山群火山岩样品的主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素数据列于表 2。万第火山岩 SiO_2 含量分布在 48.0%~54.6% 和 61.2%~63.8% 之间,分别为中基性和中酸性系列火山岩。万第火山岩均存在不同程度的蚀变作用,具有较大的烧失量变化范围 (LOI = 1.79%~11.75%)。在图 5a 上,万第火山岩显示出轻稀土元素 (LREE) 相对重稀土元素 (HREE) 富集的特征。在图 5b 中,均表现出大离子亲石元素 (LILE) 相对富集和高场强元素 (HFSE) 亏损的总体特征,明显富集的 LILE 包括 Rb、Th、U、K 和 Ba,明显亏损的 HFSE 为 Nb、Ta、P 和 Ti,且均存在显著的 Pb 正异常。万第火山岩的 Sr-Nd 同位素组成变化较小,中基性岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值变化范围为 0.7087~0.7091, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值变化范围为

0.511584~0.511620,相应的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -17.6~-16.9;中酸性岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.7098~0.7099, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值变化范围为 0.511579~0.511573,相应的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -17.8~-17.7。

对于山东地区中生代青山群火山岩前人已经进行了包括同位素定年在内的较为系统的地球化学研究,但是青山群火山岩的形成时代、鲁西和鲁东火山岩及鲁东中基性和中酸性岩是否存在先后关系等仍存在较大争议。邱检生等 (1996, 2001a, 2001b) 获得胶莱盆地橄榄安粗岩系火山岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 111 ± 2 Ma,蒙阴橄榄安粗岩系火山岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 120 ± 4 Ma,胶莱盆地青山群火山岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 108 ± 1 Ma 和 110 ± 1 Ma,鲁西富钾火山岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 124 ± 1 Ma~ 115 ± 1 Ma;凌文黎等 (2006) 对胶东青山群火山岩剖面进行锆石 U-Pb 定年,分别获得后乔组年龄为 106 ± 2 Ma,石前庄组年龄为 105 ± 4 Ma 和 98 ± 1 Ma;唐嘉锋等 (2008) 获得青山群火山岩的 K-Ar 年龄集中在 119~93 Ma 之间,其中鲁东莱阳后乔组两个年龄为 117 ± 2 Ma 和 116 ± 2 Ma,八亩地组为 108 ± 1 Ma 和 103 ± 2 Ma,石前庄组为 104 ± 1 Ma,胶州方戈庄组为 93 ± 1 Ma,鲁西蒙阴八亩地组 108 ± 2 Ma,断裂带内的火山岩年龄为 118 ± 2 Ma, 118 ± 3 Ma, 108 ± 2 Ma 和 110 ± 1 Ma; Ling *et al.* (2009) 对鲁西蒙阴八亩地组和方戈庄组青山群火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果均为 128 ± 2 Ma;匡永生等 (2012b) 测得胶东青山群基性火山岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄集中在 122 ± 2 Ma~ 113 ± 1 Ma;邱检生等 (2012, 2013) 测得断裂带八亩地组钾质和钠质火山岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $119 \pm$

表 2 万第青山群火山岩主量(%)、微量元素(10^{-6})和 Sr-Nd 同位素组成

Table 2 Major (%), trace element (10^{-6}) and Sr-Nd isotopic compositions for the volcanic rocks in the Wandu area

样品号	WD03	WD04	WD07	WD08	WD16	WD18	WD21	WD23
SiO ₂	53.56	54.6	54.61	53.98	47.96	61.17	63.76	62.94
TiO ₂	0.86	0.83	0.86	0.84	0.84	0.32	0.33	0.32
Al ₂ O ₃	16.54	16.47	16.32	16.37	14.24	16.61	17.11	16.86
Fe ₂ O ₃ ^T	6.92	6.35	6.49	7.69	6.73	4.49	4.46	4.45
MnO	0.09	0.11	0.1	0.11	0.07	0.08	0.07	0.08
MgO	4.1	3.84	3.7	4.35	1.46	1.42	1.35	1.37
CaO	7.36	7.85	7.62	7.07	10.67	3.27	1.18	1.91
Na ₂ O	3.04	3.14	3.17	3.06	2.69	3.54	5.68	5.75
K ₂ O	2.31	2.43	2.64	2.58	2.71	3.93	4.13	4.22
P ₂ O ₅	0.38	0.37	0.38	0.38	0.42	0.31	0.32	0.31
LOI	4.39	3.61	3.64	3.38	11.75	5.08	1.79	2.13
Total	99.55	99.6	99.53	99.81	99.54	100.22	100.18	100.34
Be	1.58	1.49	1.66	1.26	1.49	1.56	1.61	1.66
Cr	123	126	116	77.8	111	9.38	6.44	7.42
Co	34.2	27.8	48.5	24.3	19.0	18.5	44	36.2
Ni	33	33.6	32.9	24.8	39.0	3.72	3.18	3.11
Ga	20	20.8	21.2	13.8	17.2	19.5	19.9	19.5
Rb	57	57.7	71.7	66.7	67.6	40.2	55.4	45.6
Sr	1 137	1 150	1 118	772	347	468	544	488
Y	21.7	22.3	23.8	15	21.0	14.4	13.2	13.1
Zr	247	251	294	204	237	198	234	233
Nb	11.6	11.8	14	3.63	12.4	12	12.2	12.1
Cs	0.57	0.55	0.79	0.85	2.54	2.08	0.79	0.86
Ba	1 841	1 923	1 988	1 458	1 704	2 177	2 918	3 341
La	67.1	69.7	78	51.1	65.5	39.3	55.3	41.3
Ce	127	130	148	95	130	71.2	95.5	61.9
Pr	13.6	14.1	15.7	10.1	13.1	8.23	9.83	7.91
Nd	50.7	51.6	56.7	37.4	48.8	30.1	34.5	28.7
Sm	7.76	7.94	8.59	5.58	7.65	4.56	4.52	4.21
Eu	1.92	2.05	2.05	1.38	1.81	1.32	1.27	1.22
Gd	5.12	5.43	5.71	3.78	5.10	2.91	2.93	2.85
Tb	0.69	0.73	0.78	0.49	0.70	0.41	0.4	0.38
Dy	3.99	4.19	4.32	2.74	3.80	2.32	2.27	2.2
Ho	0.75	0.78	0.86	0.55	0.74	0.43	0.43	0.42
Er	1.94	2.02	2.13	1.37	1.98	1.19	1.16	1.15
Tm	0.26	0.29	0.32	0.2	0.28	0.17	0.17	0.18
Yb	1.95	2.02	2.13	1.36	1.94	1.26	1.3	1.34
Lu	0.27	0.29	0.3	0.19	0.27	0.19	0.19	0.19
Hf	5.15	5.43	6.2	4.32	4.93	4.23	4.79	4.9
Ta	0.56	0.58	0.68	0.17	0.60	0.58	0.63	0.64
Pb	18.8	18.9	19.8	15.2	22.6	21.1	25.9	26
Th	10.9	11.4	13.2	8.16	9.84	7.25	9.65	8.83
U	2.05	2.23	2.58	1.7	1.90	1.73	1.54	1.81
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.145 1	0.145 1	0.185 6	0.25	0.563 8	0.248 8	0.294 5	0.270 5
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.709 328	0.709 246	0.709 317	0.709 299	0.709 643	0.710 312	0.710 279	0.710 232
2σ(10 ⁻⁶)	±2	±3	±3	±3	±2	±3	±2	±3
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _t	0.709 081	0.708 999	0.709	0.708 873	0.708 681	0.709 888	0.709 777	0.709 771
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.092 5	0.093 1	0.091 5	0.090 1	0.094 6	0.091 6	0.079 2	0.088 8
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.511 658	0.511 657	0.511 657	0.511 657	0.511 694	0.511 645	0.511 641	0.511 645
2σ(10 ⁻⁶)	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _t	0.511 585	0.511 584	0.511 585	0.511 586	0.511 619 7	0.511 573	0.511 579	0.511 575
ε _{Nd} (t)	-17.5	-17.6	-17.5	-17.5	-16.9	-17.8	-17.7	-17.7
T _{DM} (Ga)	1.87	1.88	1.86	1.84	1.86	1.87	1.71	1.83
T _{2DM} (Ga)	1.97	1.97	1.96	1.96	1.93	1.98	1.92	1.97

注: ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr、¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比值由 Rb、Sr、Sm、Nd 的 ICP-MS 含量计算获得; (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_t 和 ε_{Nd}(t) 的计算参数采用 (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.196 7, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512 638, 其中 t = 120 Ma.

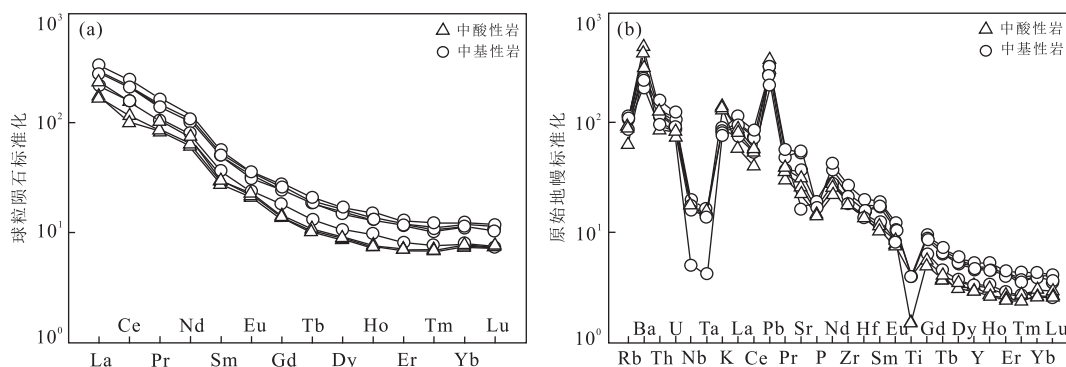


图 5 万第火山岩稀土元素球粒陨石标准化(a)和微量元素原始地幔标准化(b)图解

Fig.5 Chondrite normalized REE and primitive mantle normalized multi-element diagrams for the volcanic rocks in the Wandu area

1 Ma和 118 ± 1 Ma, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为 124 ± 1 Ma和 106 ± 4 Ma;李友连等(2012)获得断裂带内八亩地组钠质火山岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 97 ± 1 Ma;曹光跃等(2014)对胶东地区中酸性火山岩进行锆石 U-Pb 定年,其中八亩地组年龄为 119 ± 1 Ma 和 118 ± 1 Ma;后乔组年龄为 120 ± 1 Ma;庞崇进(2015)通过对山东地区的青山群火山岩进行 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年,分别获得邹平八亩地组年龄为 129 ± 1 Ma, 郯城火山岩年龄为 100 ± 1 Ma, 胶州八亩地组年龄为 111 ± 1 Ma, 莱阳八亩地组年龄为 119 ± 1 Ma, 125 ± 1 Ma 和 126 ± 2 Ma;周建波等(2016)利用 LA-ICP-MS 方法对莱阳盆地的青山群火山岩进行锆石 U-Pb 年龄测定,获得青山群火山岩的形成时代为 119 ± 1 Ma;曹光跃等(2018)对鲁西临朐地区八亩地组中性火山岩进行锆石 U-Pb 定年,获得年龄为 121 ± 2 Ma;总体青山群火山岩年龄数据变化范围较大(表 3,图 6),但均属早白垩世中晚期,本文获得万第地区中基性和中酸性火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 117 ± 2 Ma 和 116 ± 4 Ma,也属早白垩世中晚期.将近年来山东地区青山群火山岩的年代学数据(表 3)进行火山岩年龄数据分布统计,在图 6 上,显示出 119 Ma 和 108 Ma 两个主峰,表明这两个时期是山东青山群火山岩主要喷发时期.

前人研究认为山东中生代青山群火山岩形成时代具有由西向东逐渐变年轻(邱检生等, 1996, 2001b;凌文黎等, 2006)的趋势;曹光跃等(2014)依据对鲁东地区的测年结果($120 \sim 118$ Ma)及匡永生等(2012b)报道的年龄 $122 \sim 113$ Ma 比部分鲁西和断裂带内的火山岩年龄要大或小,认为与山东青山群火山岩具有由西到东逐渐变年轻趋势的观点不符.从表 3 统计的近年来山东地区青山群火山岩的

年代学数据来看,总体上鲁西、断裂带内和鲁东地区青山群火山岩年龄集中在 $108 \sim 129$ Ma、 $97 \sim 124$ Ma、 $93 \sim 126$ Ma 之间,3 个构造单位中青山群火山岩岩浆的持续时间相互交叉,断裂带内火山岩岩浆开始时间介于鲁西和鲁东之间,结束时间晚于鲁东和鲁西,没有明显的由西向东逐渐变年轻的特征,但是鲁东青山群火山岩岩浆开始和结束的时间均略晚于鲁西;唐嘉锋等(2008)认为前人研究青山群火山岩形成时代时,没有区分青山群各组(后乔组、石前庄组、方戈庄组和八亩地组)年龄的不同,测试结果不能正确地反映各组火山岩的形成时代,并通过测定鲁东八亩地组青山群火山岩的 K-Ar 年龄为 108 Ma,鲁西八亩地组青山群火山岩的 K-Ar 年龄为 108 Ma,认为鲁东鲁西同层位火山岩的喷发时间大致相当,不存在鲁西比鲁东青山群火山岩年龄老的特征.选择八亩地组年龄进行对比(现有资料显示八亩地组年龄数据较多),结果显示鲁西八亩地组年龄为 $108 \sim 129$ Ma,断裂带内为 $106 \sim 124$ Ma,鲁东为 $103 \sim 126$ Ma,同样显示 3 个构造单位中青山群火山岩岩浆的持续时间相互交叉,不存在明显的形成时代由西向东逐渐变年轻的趋势,但也存在鲁东青山群火山岩岩浆开始和结束的时间均略晚于鲁西的特征.

前人研究认为鲁东青山群火山岩是双峰式的,且基性岩形成时间早于酸性岩形成时间(Fan *et al.*, 2001; Ling *et al.*, 2009; 匡永生等, 2012b).曹光跃等(2014)运用 LA-ICP-MS 法进行锆石 U-Pb 定年,获得胶莱盆地中生代青山群中酸性火山岩的 4 个年龄均集中在 $120 \sim 118$ Ma 之间,与前人研究的基性岩年龄相似($122 \sim 113$ Ma),因此认为基性岩形成时间早于酸性岩形成时间的结论不成立.本次研究获得了误差范围内一致的中基性和中酸性火

表 3 山东地区青山群火山岩年代学数据

Table 3 The geochronology data of the volcanic rocks from the Qingshan Group in the Shandong Province

地区	鲁西						断裂带	
	地层层位	年龄(定年方法)	岩性(研究区)	资料来源	年龄(定年方法)	岩性(研究区)	资料来源	
八面地组	111±1 Ma(⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar法)	酸性(胶州)	庞崇进, 2015	129±1 Ma(⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar法)	中基性(邹平)	庞崇进, 2015	118±1 Ma; 119±1 Ma(U-Pb法)	邱检生等, 2013
	119±1 Ma; 125±1 Ma; 126±2 Ma(⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar法)	中性(莱阳)	庞崇进, 2015	121±2 Ma(U-Pb法)	中性(临朐)	曹光跃等, 2018	124±1 Ma; 106±4 Ma (⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar法)	邱检生等, 2012
	119±1 Ma; 118±1 Ma (U-Pb法)	中酸性(胶东)	曹光跃等, 2014	128±2 Ma(U-Pb法)	中酸性(蒙阴)	Ling <i>et al.</i> , 2009		
	108±1 Ma; 103±2 Ma (K-Ar法)	中酸性(莱阳)	唐嘉锋等, 2008	108±2 Ma(K-Ar法)	基性(蒙阴)	唐嘉锋等, 2008		
方戈庄组	93.3±1.2 Ma(K-Ar法)	中酸性(胶州)	唐嘉锋等, 2008	128±2 Ma(U-Pb法)	中酸性(蒙阴)	Ling <i>et al.</i> , 2009		
后布组	106±2 Ma(U-Pb法)	中酸性(胶州)	凌文黎等, 2006					
	117±2 Ma; 116±1 Ma (K-Ar法)	中酸性(莱阳)	唐嘉锋等, 2008					
石前庄组	105±4 Ma; 98±1 Ma (U-Pb法)	中酸性(胶州)	凌文黎等, 2006					
	104±1 Ma(K-Ar法)	基性(莱阳)	唐嘉锋等, 2008					
未分组	111±2 Ma (Rb-Sr法)	中酸性(胶莱)	邱检生等, 1996	120±4 Ma (Rb-Sr法)	中酸性(蒙阴)	邱检生等, 1996	110±Ma(K-Ar法)	唐嘉锋等, 2008
	110±1 Ma; 108±1 Ma (⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar法)	中酸性(五莲)	邱检生等, 2001b	124±1 Ma; 115±1 Ma (⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar法)	中酸性(蒙阴)	邱检生等, 2001a	97±1 Ma(U-Pb法)	李友连等, 2012
未分组	117±2 Ma(U-Pb法)	中基性(莱阳)	本文				108±2 Ma(K-Ar法)	唐嘉锋等, 2008
	116±4 Ma(U-Pb法)	中酸性(莱阳)	本文				100±1 Ma(⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar法)	庞崇进, 2015
	96±3 Ma; 113±1 Ma; 122±2 Ma(⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar法)	基性(胶东)	匡永生等, 2012a, 2012b					
	119±1 Ma(U-Pb法)	基性(莱阳)	周建波等, 2016					

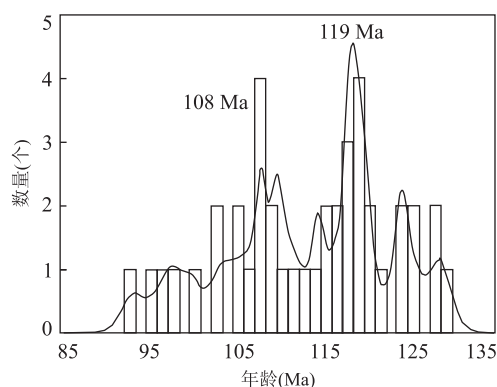


图 6 山东青山群火山岩年龄数据分布图

Fig.6 Histogram of date for the volcanic rocks from the Qingshan Group in Shandong Province

山岩的锆石 U-Pb 年龄,与基性岩形成时间早于酸性岩形成时间的结论不符,但是在该时期鲁东地区应该有大规模中基性和中酸性岩浆喷发事件。

因此,山东地区 3 个构造单元青山群火山岩年龄具有由西到东逐渐变年轻的趋势及鲁东基性岩形成时间早于酸性岩形成时间的结论值得商榷,但存在鲁东火山岩岩浆开始和结束的时间略晚于鲁西的特征;为了更好地研究青山群火山岩形成时代及其空间分布特征,建议在以后的研究中不仅需要明确青山群火山岩不同层位的年龄,同时还需要采用高精度的定年方法进行年代学分析。

万第中基性火山岩除获得了 117 ± 2 Ma 的形成年龄及 $1.8 \sim 1.9$ Ga 的年龄信息外,还获得了 ~ 0.7 Ga 的年龄信息,而中酸性火山岩中只获得 116 ± 4 Ma 的形成年龄及 ~ 2.5 Ga 的年龄,不存在 ~ 0.7 Ga 的年龄信息。万第中基性火山岩和中酸性火山岩中存在 $1.8 \sim 1.9$ Ga 和 ~ 2.5 Ga 的年龄信息,表明万第火山岩的岩浆源区或在岩浆上升过程中可能受到过华北克拉通的古老地壳物质的影响。扬子板块广泛发育的新元古代岩浆作用 ($850 \sim 700$ Ma) 是扬子板块区别于华北板块的一个显著特征(郑永飞, 2003; 郑永飞和张少兵, 2007), 被认为是扬子板块特征的指标(Chen *et al.*, 2003)。万第中基性火山岩和中酸性火山岩虽然获得了一致的青山群火山岩形成年龄,但是中基性火山岩存在 ~ 0.7 Ga 的年龄信息而中酸性火山岩中不存在,表明中基性火山岩除受到华北克拉通的古老地壳物质的影响外,还受到了扬子陆壳深俯冲的物质的影响。

5 结论

(1) 鲁东万第地区中生代青山群中基性火山岩和中酸性火山岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 117 ± 2 Ma 和 116 ± 4 Ma, 表明这一时期发生有大规模的岩浆喷发事件。

(2) 鲁西、断裂带和鲁东三构造单元中青山群火山岩岩浆持续时间相互交叉,没有明显的由西向东逐渐变年轻的特征,但是鲁东青山群火山岩岩浆开始和结束的时间均略晚于鲁西。

(3) 万第中基性和中酸性火山岩的岩浆源区或在岩浆上升过程中可能受到过华北克拉通的古老地壳物质的影响,中基性火山岩除受到过华北克拉通的古老地壳物质的影响外,还受到过扬子陆壳深俯冲的影响。

致谢:感谢两位匿名评审专家提出的建设性意见,让本文得到了很大的提升!

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192 (1-2): 59-79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Cao, G. Y., Xue, H. M., Liu, Z., et al., 2018. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Early Cretaceous Volcanic Rocks of the Qingshan Group in the Linqiu Area, Western Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, 92(3): 503-519 (in Chinese with English abstract).
- Cao, G. Y., Xue, H. M., Wang, J. G., et al., 2014. Zircon U-Pb Age and Geochemistry of Mesozoic Intermediate and Acidic Volcanic Rocks from the Shandong Segment (Jiaodong Area) of the Tan-Lu Fault. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(6): 1019-1038 (in Chinese with English abstract).
- Chen, F. K., Guo, J. H., Jiang, L. L., et al., 2003. Provenance of the Beihuaiyang Lower-Grade Metamorphic Zone of the Dabie Ultrahigh-Pressure Collisional Orogen, China: Evidence from Zircon Ages. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 343-352. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(03\)00068-3](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(03)00068-3)
- Fan, W. M., Guo, F., Wang, Y. J., et al., 2001. Post-Orogenic Bimodal Volcanism along the Sulu Orogenic Belt in Eastern China. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9-10): 733-746. [https://doi.org/10.1016/s1464-1895\(01\)00123-5](https://doi.org/10.1016/s1464-1895(01)00123-5)
- Geology and Mineral Resources Bureau of Shandong Prov-

- ince, 1991. Shandong Province Regional Geology. Geological Publishing House, Beijing, 597 (in Chinese).
- 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. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>
- Kuang, Y. S., Pang, C. J., Hong, L. B., et al., 2012a. Geochronology and Geochemistry of the Late Cretaceous Basalts in the Jiaolai Basin: Constraints on Lithospheric Thinning and Accretion Beneath North China Craton. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(4): 559-571 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, Y. S., Pang, C. J., Luo, Z. Y., et al., 2012b.⁴⁰Ar-³⁹Ar Geochronology and Geochemistry of Mafic Rocks from Qingshan Group, Jiaodong Area: Implication for the Destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1073-1091 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Qiu, J. S., Liu, L., et al., 2012. Geochronology and Geochemistry of Sodic Volcanic Rocks from Shenquan in Tancheng County, Shandong Province: Implications for Unraveling the Nature of Mantle Source and Petrogenesis. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(6): 783-798 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Duan, R. C., Xie, X. J., et al., 2009. Contrasting Geochemistry of the Cretaceous Volcanic Suites in Shandong Province and Its Implications for the Mesozoic Lower Crust Delamination in the Eastern North China Craton. *Lithos*, 113(3-4): 640-658. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.07.001>
- Ling, W. L., Xie, X. J., Liu, X. M., et al., 2006. Zircon U-Pb Ages of Cretaceous Standard Section Qingshan Group Volcanic Rocks and Their Tectonic Significance in Eastern Shandong. *Science in China (Series D)*, 36(5): 401-411 (in Chinese).
- Liu, Y. S., Gao, S., Gao, C. G., et al., 2010. Garnet-Rich Granulite Xenoliths from the Hannuoba Basalts, North China: Petrogenesis and Implications for the Mesozoic Crust-Mantle Interaction. *Journal of Earth Science*, 21(5): 669-691. <https://doi.org/10.1007/s12583-010-0125-x>
- Ludwig, K. R., 2003. Isoplot v.3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Pang, C. J., 2015. Geochronology and Geochemistry of the Cretaceous Mafic to Intermediate Volcanic Rocks in the Eastern North China Craton (Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Liu, L., Li, Y. L., 2012. Geochronology and Geochemistry of Potassic and Sodic Volcanic Rocks in Tangtougou Basin, Shandong Province: Implications for Lithospheric Thinning Beneath the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1044-1056 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Liu, L., Li, Y. L., et al., 2013. Petrogenesis of Potassic Volcanic Rocks in the Middle-South Parts of the Yishu Deep Fault Zone: Constraints from Elemental Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1193-1209.
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., Luo, Q. H., et al., 2001b.⁴⁰Ar-³⁹Ar Dating for Volcanic Rocks of Qingshan Formation in Jiaolai Basin, Eastern Shandong Province: A Case Study of the Fenlingshan Volcanic Apparatus in Wulian County. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 351-355 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., Zhou, J. C., et al., 1996. Geology, Geochemistry and Genesis of the Mesozoic Shoshonitic Volcanic Rocks in Shandong Province. *Earth Science*, 21(5): 546-552 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Xu, X. S., Luo, Q. H., 2001a.⁴⁰Ar-³⁹Ar Dating and Source Denoting of K-Rich Volcanic Rocks Lamprophyres in Western Shandong Province. *Chinese Science Bulletin*, 46(18): 1499-1508 (in Chinese).
- Tang, J. F., Liu, Y. L., Wang, Q. F., 2008. Geochronology of Mesozoic Volcanic Rocks in Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1333-1338 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Xu, Y. G., Gao, S., et al., 2008. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145-1174 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569. <https://doi.org/10.1007/bf03184122>
- Xia, Q. K., Cheng, H., Liu, J., 2017. The Distribution of the Early Cretaceous Hydrous Lithospheric Mantle in the North China Craton: Constraints from Water Content in Peridotites of Tietonggou. *Earth Science*, 42(6): 853-861 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.075>
- Zhang, H. F., Parrish, R., Zhang, L., et al., 2007. A-Type Granite and Adakitic Magmatism Association in Songpan-Garze Fold Belt, Eastern Tibetan Plateau: Implication for Lithospheric Delamination. *Lithos*, 97(3-4): 323-335. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.01.002>

- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2002. Mesozoic Lithosphere Destruction beneath the North China Craton: Evidence from Major-, Trace-Element and Sr-Nd-Pb Isotope Studies of Fangcheng Basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144 (2): 241 – 254. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0395-0>
- Zhang, J. B., Ling, W. L., Liu, Y. S., et al., 2014. Episodic Mesozoic Thickening and Reworking of the North China Archean Lower Crust Correlated to the Fast-Spreading Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 80: 63 – 74. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.10.031>
- Zheng, Y. F., 2003. Neoproterozoic Magmatic Activity and Global Change. *Chinese Science Bulletin*, 48 (16): 1705 – 1720 (in Chinese).
- Zheng, Y. F., Zhang, S. B., 2007. Formation and Evolution of Precambrian Continental Crust in South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 1 – 10 (in Chinese).
- Zhou, J. B., Han, W., Song, M. C., 2016. The Exhumation of the Sulu Terrane and the Forming of the Tancheng-Lujiang Fault: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Dating of the Mesozoic Sediments of the Laiyang Basin, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(4): 1171 – 1181 (in Chinese with English abstract).
- 李友连, 邱检生, 刘亮, 2012. 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. *岩石矿物学杂志*, 31(6): 783 – 798.
- 凌文黎, 谢先军, 柳小明, 等, 2006. 鲁东中生代标准剖面青山群火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *中国科学(D 辑)*, 36(5): 401 – 411.
- 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(博士学位论文). 北京: 中国科学院大学.
- 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. *岩石学报*, 28(4): 1044 – 1056.
- 邱检生, 刘亮, 李友连, 等, 2013. 沂沭断裂带中南段钾质火山岩的元素地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素组成及其对岩石成因的制约. *地质学报*, 87(9): 1193 – 1209.
- 邱检生, 徐夕生, 罗清华, 2001a. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及源区示踪. *科学通报*, 46(18): 1499 – 1508.
- 邱检生, 王德滋, 罗清华, 等, 2001b. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年—以五莲分岭山火山机构为例. *高校地质学报*, 7(3): 351 – 355.
- 邱检生, 王德滋, 周金城, 等, 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 – 552.
- 唐嘉锋, 刘玉琳, 王启飞, 2008. 山东中生代火山岩年代学研究. *岩石学报*, 24(6): 1333 – 1338.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等, 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(6): 1145 – 1174.
- 夏群科, 程徽, 刘佳, 2017. 山东铁铜沟橄榄岩的水含量: 华北克拉通早白垩世富水岩石圈的分布. *地球科学*, 42(6): 853 – 861.
- 郑永飞, 2003. 新元古代岩浆活动与全球变化. *科学通报*, 48(16): 1705 – 1720.
- 郑永飞, 张少兵, 2007. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化. *科学通报*, 52(1): 1 – 10.
- 周建波, 韩伟, 宋明春, 2016. 苏鲁地体折返与郯庐断裂活动: 莱阳盆地中生界碎屑锆石年代学的制约. *岩石学报*, 32(4): 1171 – 1181.

附中文参考文献

- 曹光跃, 薛怀民, 刘哲, 等, 2018. 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. *地质学报*, 92(3): 503 – 519.
- 曹光跃, 薛怀民, 王金光, 等, 2014. 郯庐断裂山东段(胶东)中生代中酸性火山岩的锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征. *岩石矿物学杂志*, 33(6): 1019 – 1038.
- 山东省地质矿产局, 1991. 山东省区域地质志. 北京: 地质出版社, 597.
- 匡永生, 庞崇进, 洪路兵, 等, 2012a. 胶莱盆地晚白垩世玄武岩的年代学和地球化学特征及其对华北岩石圈减薄—增生的制约. *大地构造与成矿学*, 36(4): 559 – 571.
- 匡永生, 庞崇进, 罗震宇, 等, 2012b. 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. *岩石学报*, 28(4): 1073 – 1091.