

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

曹光跃¹, 薛怀民¹, 王金光²

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 山东省地质调查院, 山东 济南 250013)

摘要: 对胶东青山群中酸性火山岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学研究。结果表明, 3 个粗面岩-粗面英安岩和 1 个流纹岩的年龄分别为 119.4 ± 0.9 Ma、 118.2 ± 1.0 Ma、 120.2 ± 0.9 Ma 和 120.0 ± 0.8 Ma, 都形成于早白垩世 120~118 Ma 之间。研究表明郯庐断裂带山东段及其两侧中生代青山群火山岩的年龄与苏皖段断裂带内火山岩的年龄相似, 明显小于苏皖段断裂带附近火山岩盆地的火山岩年龄。其结果表明在中国东部岩石圈减薄的大背景下, 受郯庐断裂控制的岩浆喷发事件持续的时间可能更长。胶东青山群中酸性火山岩表现出富钾、富碱、贫镁、贫钛和低 Ni、Cr 的地球化学特征, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损。按地球化学组成可进一步分为粗面岩-粗面英安岩和流纹岩两类, 前者富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P; 而后者则强烈亏损 Ba、Sr 等大离子亲石元素和 Ti、P 等高场强元素。粗面岩-粗面英安岩相对流纹岩具有高的 Sr 和 Ba 含量以及 La/Nb、Ba/Nb 比值, 而具有低的 Rb/Ba 比值和 Eu 负异常, 说明它们来源于不同的岩浆源区。推测粗面岩-粗面英安岩可能是下地壳(俯冲扬子下地壳或者古老华北下地壳)部分熔融和富集地幔部分熔融混合的产物; 流纹岩是由于区域拉张环境和高热异常背景下, 下地壳发生深熔产生的岩浆喷出地表形成的, 岩浆在上升过程中发生有分离结晶(大量斜长石的分离结晶)过程。

关键词: 郯庐断裂; 胶东; 青山群; 锆石 U-Pb 年龄; 火山岩

中图分类号: P597; P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)06-1019-20

Zircon U-Pb age and geochemistry of Mesozoic intermediate and acidic volcanic rocks from the Shandong segment (Jiaodong area) of the Tan-Lu fault

CAO Guang-yue¹, XUE Huai-min¹ and WANG Jin-guang²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250013, China)

Abstract: In this paper, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating was carried out for four samples of volcanic rocks from Qingshan Group in Jiaodong area and, as a result, their concordant ages were obtained, which are 119.4 ± 0.9 Ma, 118.2 ± 1.0 Ma, 120.2 ± 0.9 Ma and 120.0 ± 0.8 Ma, respectively. The results show that all the volcanic rocks in Jiaodong area were formed from about 120 Ma to 118 Ma in the Early Cretaceous period. The ages of Qingshan Group volcanic rocks from Shandong Province controlled by Tan-Lu fault are similar to those from the Su-Wan segment of the Tan-Lu fault zone, but younger than those around the Tan-Lu fault zone, which indicates that the duration of volcanic eruption along Tan-Lu fault is probably longer than the duration in other areas

收稿日期: 2014-02-27; 修订日期: 2014-10-11

基金项目: 地质矿产调查评价专项(12120114085401)

作者简介: 曹光跃(1989-), 男, 汉族, 硕士研究生, 岩浆岩岩石学专业, E-mail: dirkcaogy@163.com; 通讯作者: 薛怀民(1962-), 男, 汉族, 研究员, 主要从事岩石学与地球化学研究, E-mail: huaiminx@sina.com。

under the background of lithospheric thinning in eastern China. Geochemically, all the intermediate and acidic volcanic rocks have high K_2O , ALK, LREE values and low MgO , TiO_2 , Ni, Cr, HREE values. According to the geochemical features, the volcanic rocks can be subdivided into trachyte-trachydacite and rhyolite. The trachyte-trachydacite is characterized by LILE enrichment (Rb, Ba, K) and HFSE depletion (Nb, Ta, Ti, P), but the rhyolite exhibits stronger depletion of Ba, Sr and HFSE (Ti, P). Compared with the rhyolite, the trachyte-trachydacite possesses higher Sr and Ba values as well as La/Nb and Ba/Nb ratios, but lower Rb/Ba ratios and δEu values. All these data indicate that they might have been derived from different magma sources. It is inferred that the trachyte-trachydacite rocks were derived from the mixture of the partial melting of the lower crust (Yangtze Craton or North China Craton) and enriched lithospheric mantle. In addition, the rhyolites were related to the partial melting of the lower crust in the regional extension environment and high geothermal anomaly background with crystallization differentiation during the magma evolution.

Key words: Tan-Lu fault; Jiaodong; Qingshan Group; zircon U-Pb chronology; volcanic rocks

郯庐断裂带是我国东部最大的巨型断裂带,也是世界上规模最大的断裂带之一,总体呈北北东向展布,在我国境内绵延约 2 400 km (王小凤等, 2000)。该断裂带由南向北可以分为 3 段(张鹏等, 2007),即苏皖段、山东段(又称沂沭断裂带)以及沈阳-渤海段(又称营潍断裂带),它自中生代形成以来,经历了长期、复杂的演化历史(徐嘉炜, 1984; 许志琴, 1984; Xu and Zhu, 1994; 万天丰等, 1996; 朱光等, 2004)。断裂带演化的不同阶段伴有相应的火山岩浆活动,形成了一系列沿断裂带分布的岩浆岩,这些岩浆岩为认识郯庐断裂带的时空演化过程提供了可能。

山东段是郯庐断裂发育最典型的地段,纵贯山东中部,将山东分为鲁东和鲁西两个在地质构造上具明显差异的地块。虽然中生代(青山群)火山岩在鲁东和鲁西地区均有分布,但两区在岩性上存在明显的差异,其中鲁西地区的以中基性岩为主,而鲁东地区则以中酸性岩为主(金隆裕, 1994),这些中生代火山岩的分布明显受到郯庐断裂及其派生的次级断裂控制(邱检生等, 1996)。近年来,对郯庐断裂带两侧火山岩的研究相对较多,但是这些研究多集中在地球化学及同位素组成等方面(邱检生等, 1996; 苏尚国等, 1999; 邱检生等, 2001a, 2001b; 裴福萍等, 2004; 凌文黎等, 2006; 唐嘉锋等, 2008; Ling *et al.*, 2009; 匡永生等, 2012),精度较高的锆石 U-Pb 年代学的工作较少。虽然目前的年代学工作显示其主要形成于早白垩世,但火山作用持续的时间界限并不清楚。故本文以胶莱盆地为重点,对胶东地区中生代中酸性火山岩进行了精确的定年,并结合该区火山岩的地球化学性质,探讨其地质意

义。

1 地质背景及样品特征

研究区跨越了华北板块和扬子板块及其间的晚三叠世碰撞造山带(苏鲁造山带),郯庐断裂(沂沭断裂带)将其分为鲁东和鲁西 2 个地质构造单元,其中鲁西和五莲-即墨断裂以北的鲁东地区属于华北板块,该断裂以南部分的鲁东地区(胶南隆起)属于扬子板块。

区内的中生代火山岩主要分布在沂沭断裂带内及其两侧的断陷型陆相火山岩盆地中,火山岩的分布明显受断裂控制(图 1),典型的火山岩分布区包括鲁西(沂沭断裂西侧)的邹平、蒙阴、费县-平邑盆地及临朐、沂源等地,沂沭断裂带内的安丘、沂水、莒县盆地,鲁东(沂沭断裂东侧)的胶莱盆地等(金隆裕, 1994; 邱检生, 1996)。中生代火山岩主要是下白垩统青山群火山岩系,金隆裕(1994)将其划分为 3 个火山活动旋回:第 1 旋回以中性火山岩及相应的火山碎屑岩、火山沉积岩类为主;第 2 旋回为偏碱性的中性熔岩及相应的火山碎屑岩为主;第 3 旋回以酸性熔岩及相应的火山碎屑岩为主。刘明渭等(2003)将其划分为 4 个火山活动旋回,所形成的火山岩从早到晚依次为后乔组、八亩地组、石前庄组和方戈庄组,其中后乔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。

胶莱盆地位于沂沭断裂带和五莲-即墨断裂之间,呈北东向展布,发育以玄武安山岩-粗安岩-安粗岩为代表的中偏碱性火山熔岩及火山碎屑岩,以及

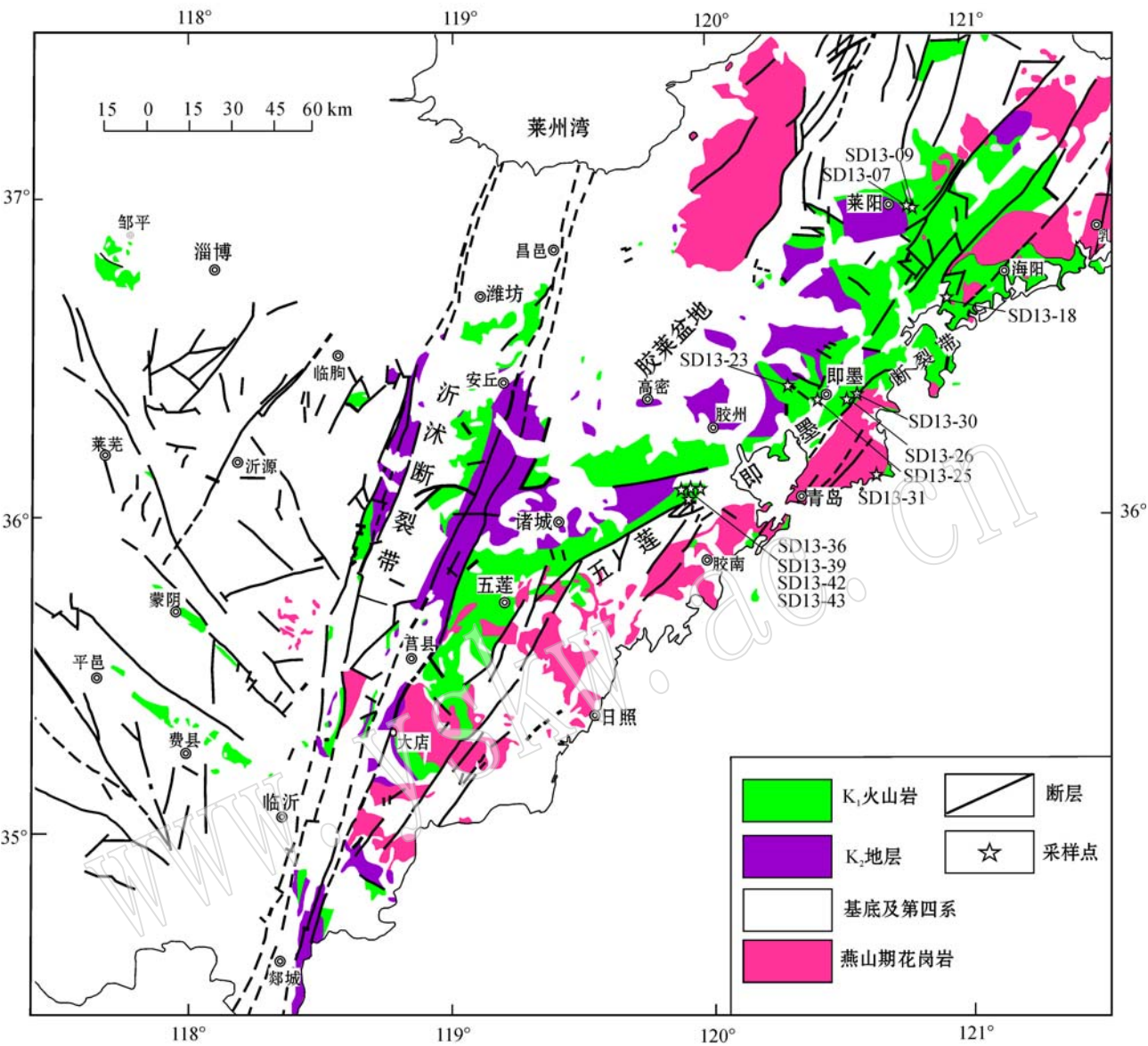


图 1 山东省地质简图及采样位置

Fig. 1 Simplified geological map of Shandong Province and sampling sites of volcanic rocks

以流纹质的酸性熔岩及火山碎屑岩为主的青山群火山岩。本文主要采集胶莱盆地青山群中的中酸性火山岩,样品采自胶州、即墨、崂山、莱阳、海阳地区,具体采样位置见图 1,其中火山岩可以分为粗面岩-粗面英安岩(SD13-07, 09, 18, 23, 25, 30, 36, 42, 43)和流纹岩(SD13-26, 39)两类,另外样品 SD13-31 为崂山 A 型花岗岩。部分样品岩相学特征(图 2): 样品 SD-07, 09, 18, 23, 42, 43 为斑状结构,斑晶主要为钾长石,斜长石、黑云母,部分样品有辉石或石英,斑晶含量在 5%~40%之间,基质为玻基交织结构或者交织结构。样品 SD13-25: 斑状结构,斑晶主要为钾长石约

15%,斜长石约 10%,黑云母约 5%,石英约 5%。基质为隐晶质结构。样品 SD13-30: 斑状结构,斑晶主要为斜长石约 15%,钾长石约 5%。基质为斜长石、钾长石等微晶组成的细粒结构。样品 SD13-36: 斑状结构,斑晶主要为钾长石和黑云母,含量约 5%。基质为隐晶质结构。见有石英颗粒集合体,有的形成隐晶质玛瑙。SD13-26 和 SD13-39 为流纹岩,SD13-26 见有明显的流纹构造,斑晶主要为钾长石(含量约 20%)和石英(含量约 10%),部分钾长石有熔蚀现象;SD13-39 没有流纹构造,斑晶主要为石英,少量钾长石,斜长石,含量约 30%,基质为玻基微晶结构。

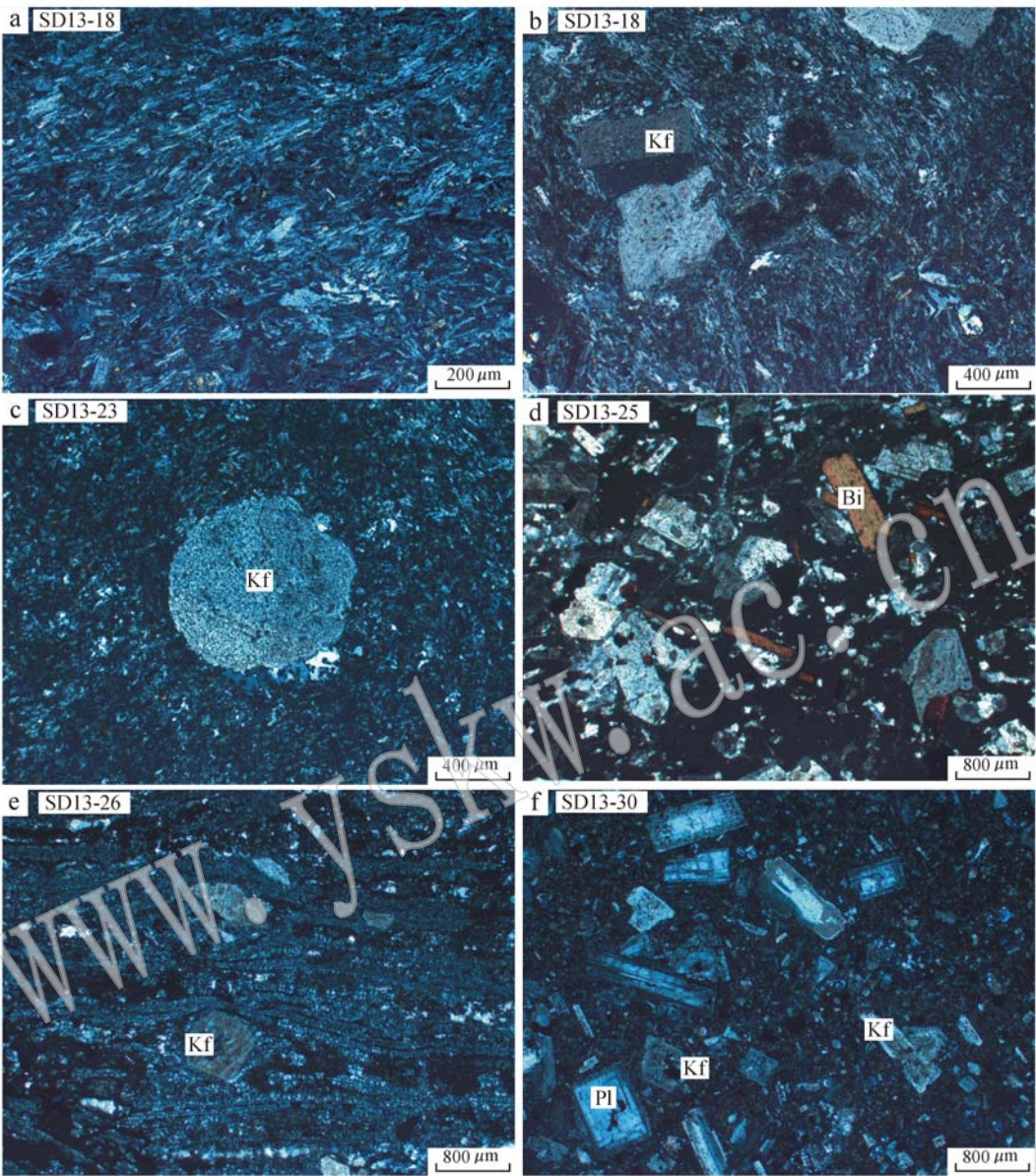


图 2 胶东青山群中酸性火山岩样品的显微照片(+)

Fig. 2 Microphotographs of selected samples for volcanic rocks from Qingshan Group in Jiaodong area(+)

a, b—钾长石斑晶, 基质为交织结构; c—钾长石斑晶, 基质为交织结构; d—钾长石、斜长石、黑云母斑晶, 基质为隐晶质结构; e—流纹构造;
f—钾长石、斜长石斑晶, 基质为微晶细粒结构
a, b—K-feldspar phenocryst, groundmass with pilotaxitic texture; c—K-feldspar phenocryst, groundmass with pilotaxitic texture; d—K-feldspar, plagioclase, biotite phenocryst, groundmass with cryptocrystalline texture; e—rhyolitic structure; f—K-feldspar, plagioclase phenocryst, groundmass with microcrystalline texture

2 分析方法

主微量元素的测试是在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行的。其中主量元素采用 X 荧光光谱法(XRF)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 I ICP-MS 测定, 误差范围在 5% ~ 10%。分析结果及相关参数见表 1。

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

表 1 胶东青山群中酸性火山岩主量元素($w_B/\%$)、微量及稀土元素含量($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 1 Major($w_B/\%$)and trace element($w_B/10^{-6}$)values of the volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaodong area

样号	SD13-07	SD13-09	SD13-18	SD13-23	SD13-25	SD13-26	SD13-30	SD13-31	SD13-36	SD13-39	SD13-42	SD13-43
岩性	粗面岩	粗安岩	粗面岩	粗面岩	粗面英安岩	流纹岩	粗安岩	花岗岩	粗面岩	流纹岩	粗面英安岩	粗面岩
SiO ₂	64.42	62.24	63.63	65.98	68.77	74.43	62.61	76.90	65.16	78.34	67.87	68.64
TiO ₂	0.80	0.74	0.61	0.47	0.50	0.20	0.64	0.12	0.42	0.18	0.66	0.49
Al ₂ O ₃	16.20	15.77	16.69	14.95	16.07	13.61	15.89	12.19	16.75	11.41	15.10	15.66
Fe ₂ O ₃ ^T	4.67	4.53	4.70	3.49	2.58	1.22	4.45	1.04	2.31	1.20	3.35	2.30
MnO	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.05	0.07	0.01	0.04	0.04	0.05	0.06
MgO	0.90	2.47	1.05	2.30	0.64	0.10	1.85	0.07	0.47	0.10	0.70	0.24
CaO	1.60	2.73	2.15	2.80	0.33	0.10	3.62	0.25	2.04	0.08	0.74	0.35
Na ₂ O	4.87	3.52	5.18	4.00	4.10	4.48	3.93	4.49	3.26	3.01	3.49	3.97
K ₂ O	4.86	4.03	3.98	3.85	5.08	5.09	3.68	4.37	6.21	4.34	6.26	7.13
P ₂ O ₅	0.25	0.23	0.24	0.17	0.12	0.02	0.28	0.01	0.10	0.02	0.22	0.10
烧失量	1.36	3.65	1.66	1.89	1.71	0.68	2.95	0.53	3.18	1.28	1.53	1.07
总量	99.97	99.97	99.96	99.97	99.97	99.98	99.97	99.98	99.94	100.00	99.97	100.01
Q	13.32	17.45	12.45	18.52	24.44	28.71	16	33.77	18.07	44.39	21.85	17.6
σ	4.37	2.85	4.01	2.64	3.24	2.91	2.86	2.31	3.94	1.52	3.79	4.78
V	127	99.3	76.7	62.7	16.9	4.04	76.9	1.9	22.8	3.55	31.3	13
Cr	109	105	9.77	90.6	2.75	0.65	46.3	0.29	5.39	1.49	2.12	0.49
Co	17.4	16.8	13.8	14.5	3.24	0.33	11.5	0.16	2.97	0.11	4.06	0.78
Ni	41	0.1	8.38	43.2	2.96	0.36	18.2	0.09	1.13	0.13	3.46	0.47
Cu	17.1	20.8	16	14.7	3.06	0.80	14.8	3.56	2.14	1.17	3.36	0.94
Zn	84.7	71.9	57.6	44.4	49.6	34.5	52.7	44.8	41.9	49.3	41	45.3
U	2.43	2.31	1.95	1.62	1.12	1.65	1.82	2.23	2.32	3.54	1.15	1.22
Pb	28.4	24.3	17.4	18	20.4	24	15.1	15.7	38.6	19.8	16.3	19.8
Sr	819	547	588	396	269	43.6	762	5.48	298	7.74	245	110
Rb	183	114	78.2	92.7	128	165	71	202	158	179	138	176
Ba	2 112	1 694	2 299	1 633	1 569	86.4	1 767	19.4	1 900	13.4	1 854	1 366
Th	15.7	16.3	12.7	5.49	10.6	19.8	10.1	16	20.9	18.6	12.6	16.7
Ta	0.87	0.75	0.73	0.78	1.34	2.55	0.96	2.53	1.5	2.77	1.2	1.51
Nb	13.2	13.5	12.3	11.8	21.1	39.9	14.7	41.8	23.4	53.1	21.6	27.3
Zr	460	431	374	200	248	199	330	93.6	487	357	212	528
Hf	9.93	9.7	9.3	5.91	7.71	7.97	7.33	3.53	12.7	13.1	7.26	13.1
La	84.6	76.9	105	35.2	91.5	58.4	71.8	34	102	48.9	117	141
Ce	139	157	63	58.6	126	100	103	47.5	151	80.2	175	222
Pr	14.8	15.5	17	6.5	14.5	10.5	11.6	4.89	17.2	9.94	19.5	22.4
Nd	55.5	54.5	55.2	24.6	50.8	34.6	42.4	13.7	54.8	35.7	70.3	76.2
Sm	8.24	8.26	7.6	4.16	7.94	6.29	6.78	2.48	8.27	7.21	11.4	10.8
Eu	2.02	1.65	1.64	1.15	1.61	0.44	1.73	0.12	1.97	0.20	2.1	2.12
Gd	6.18	5.97	6.48	3.32	6.76	5.56	5.43	1.89	7.29	5.79	9.02	9.21
Tb	1.00	0.98	0.88	0.60	1.02	1.00	0.81	0.36	1.25	1.23	1.33	1.46
Dy	4.1	3.74	3.48	2.95	4.54	5.29	3.58	2.18	5.38	6.59	5.28	6.19
Ho	0.66	0.78	0.70	0.51	0.89	0.95	0.71	0.46	0.99	1.31	0.95	1.23
Er	2.49	2.3	2.1	1.71	2.72	3.53	2.23	1.51	2.9	4.04	2.67	3.6
Tm	0.37	0.37	0.29	0.28	0.42	0.62	0.34	0.30	0.49	0.73	0.31	0.56
Yb	2.64	2.14	1.94	1.83	3.23	4.38	2.51	1.9	3.38	4.81	2.94	3.99
Lu	0.33	0.30	0.30	0.26	0.43	0.56	0.29	0.26	0.49	0.64	0.34	0.51
Y	22.3	20.5	20.4	16.2	25.4	33.3	21.5	17.3	30	38.5	24.8	33.4
δEu	0.83	0.69	0.70	0.91	0.65	0.22	0.84	0.16	0.76	0.09	0.61	0.63
(La/Yb) _N	22.99	25.78	38.82	13.80	20.32	9.56	20.52	12.84	21.65	7.29	28.55	25.35
ΣREE	322	330	366	142	312	232	253	112	357	207	418	501
ΣLREE	304	314	349	130	292	210	237	103	335	182	395	475
ΣHREE	17.8	16.6	16.2	11.5	20.0	21.9	15.9	8.9	22.2	25.1	22.8	26.7
Rb/Ba	0.09	0.07	0.03	0.06	0.08	1.91	0.04	10.41	0.08	13.36	0.07	0.13
Nb/U	5.43	5.84	6.31	7.28	18.84	24.18	8.08	18.74	10.09	15.00	18.78	22.38
Nb/Ta	15.22	18.05	16.94	15.19	15.75	15.65	15.25	16.52	15.60	19.17	18.00	18.08
La/Nb	6.41	5.70	8.54	2.98	4.34	1.46	4.88	0.81	4.36	0.92	5.42	5.16
Ba/Nb	160.00	125.48	186.91	138.39	74.36	2.17	120.20	0.46	81.20	0.25	85.83	50.04

注：Q 为 CIPW 标准矿物石英，σ 为里特曼指数。

102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)与 Agilent 7500ce 型 ICP-MS 以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统连接。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 32 μm , 激光剥蚀深度为 30~40 μm , 频率为 5 Hz, 能量密度为 5 J/ cm^2 。信号采集前先用激光剥蚀 3 s 以除去样品表面可能存在的污染,再进行 20 s 的气体空白信号采集后开始触发激光采集 60 s 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 谐和年龄采用 Isoplot3.23 程序(Ludwing, 2001)计算。分析结果见表 2。

3 分析结果

3.1 主量和微量元素地球化学特征

样品中 SiO_2 含量的变化范围相对较大,介于 62.24%~78.34% 之间, CPIW 标准矿物计算结果中 Q 分子为 12.5~44.4(表 1),说明它们都属于硅酸过饱和岩石。岩石中 Na_2O 含量为 3.01%~5.18%, K_2O 含量为 3.68%~7.13%, 全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量为 7.35%~11.1%, 里特曼指数 σ 为

1.52~4.78, 明显表现出富钾和富碱的特点。另外, 这些样品还表现出低钛($\text{TiO}_2 = 0.12\% \sim 0.8\%$)和低镁($\text{MgO} = 0.07\% \sim 2.47\%$)的特征。在 TAS 图解上, 这些样品投在粗面岩-粗面英安岩和流纹岩两个区域中(图 3a)。其中位于流纹岩区域的样品包括 SD13-26、SD13-39 及 SD13-31(崂山 A 型花岗岩), 其余 9 个样品都位于粗面岩-粗面英安岩区(其中 SD13-09 和 SD13-30 位于粗安岩和粗面岩-粗面英安岩边界线上)。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图上(图 3b), 岩石主要为钾玄岩系列及高钾钙碱性系列, 其中流纹岩都为高钾钙碱性系列。

这些火山岩样品均表现出富集轻稀土元素而亏损重稀土的特征, 其中 LREE 为 $130 \times 10^{-6} \sim 475 \times 10^{-6}$, HREE 为 $11.5 \times 10^{-6} \sim 26.7 \times 10^{-6}$, ΣREE 为 $142 \times 10^{-6} \sim 501 \times 10^{-6}$, 而崂山岩体的 ΣREE 相对较低, 为 112×10^{-6} 。在稀土元素球粒陨石标准化图中(图 4), 它们表现为形态类似的右倾模式, HREE 相对平坦, 轻稀土分异程度比重稀土分异程度高。粗面岩-粗面英安岩的 LREE/HREE 在 11.36~21.61 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 13.8~38.82 之间; 流纹岩的 LREE/HREE 为 7.24 和 9.61, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 7.29 和 9.56, 表明粗面岩-粗面英安岩的轻重稀土分异程度比流纹岩的轻重稀土分异程度高。值得注意的是, 粗面岩-粗面英安岩的稀土配分形式与酸性流纹岩并不一致, 粗面岩-粗面英安岩系列为相对弱 Eu

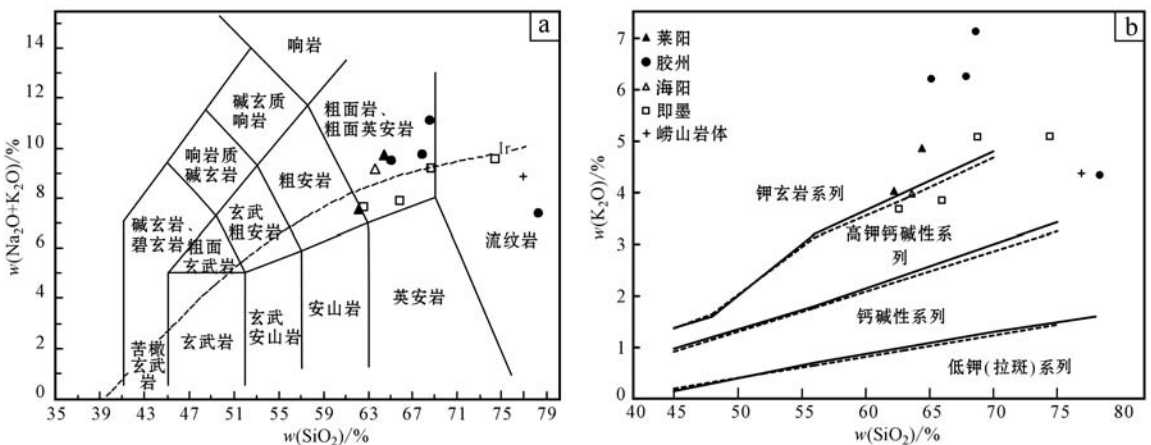


图 3 胶东青山群火山岩 TAS(a) 和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (b) 图解

Fig. 3 TAS(a) and K_2O versus SiO_2 (b) diagrams of Qingshan Group volcanic rocks from Jiaodong area

图 a 中虚线据 Irvine 等(1971), 虚线上方为碱性, 下方为亚碱性; 图 b 中实线据 Peccerillo 等(1976), 虚线据 Middlemost(1985)

Fig. a after Irvine (1971), dashed line represents boundary between alkaline and sub-alkaline series; Fig. b solid line after Peccerillo (1976), dashed line after Middlemost (1985)

表 2 胶东地区青山群中酸性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results for the volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaodong area

分析点	$w_B/10^{-6}$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U	Pb		测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
SD13-09	粗安岩,八亩地组,坐标:N36°58.619', E120°46.975'															
SD-09-01	94.12	70.11	1.88	1.34	0.046 99	0.006 19	0.118 95	0.015 45	0.018 36	0.000 45	228	49	114	14	117	3
SD-09-02	306.36	196.38	5.65	1.56	0.048 51	0.002 33	0.124 98	0.005 89	0.018 69	0.000 26	82	124	120	5	119	2
SD-09-03	228.38	145.61	4.28	1.57	0.048 23	0.002 71	0.125 94	0.006 96	0.018 94	0.000 28	96	111	120	6	121	2
SD-09-04	205.54	139.14	3.96	1.48	0.048 46	0.003 10	0.125 10	0.007 87	0.018 72	0.000 30	122	120	120	7	120	2
SD-09-05	508.10	302.48	9.05	1.68	0.050 10	0.002 22	0.129 33	0.005 57	0.018 72	0.000 28	200	72	123	5	120	2
SD-09-06	187.19	122.21	3.53	1.53	0.045 44	0.003 61	0.117 91	0.009 23	0.018 82	0.000 33	138	— 32	113	8	120	2
SD-09-07	269.42	163.05	4.72	1.65	0.048 37	0.002 56	0.125 10	0.006 48	0.018 76	0.000 28	117	89	120	6	120	2
SD-09-08	156.12	95.47	2.85	1.64	0.046 57	0.004 12	0.121 30	0.010 59	0.018 89	0.000 33	27	160	116	10	121	2
SD-09-09	345.85	245.56	6.81	1.41	0.048 41	0.002 04	0.123 40	0.005 09	0.018 49	0.000 24	119	71	118	5	118	2
SD-09-10	123.62	86.98	2.47	1.42	0.046 86	0.004 34	0.122 12	0.011 18	0.018 90	0.000 34	42	169	117	10	121	2
SD-09-11	246.08	155.06	4.41	1.59	0.049 36	0.002 87	0.124 53	0.007 11	0.018 30	0.000 28	165	102	119	6	117	2
SD-09-12	169.13	109.28	3.12	1.55	0.049 15	0.003 56	0.126 55	0.008 99	0.018 68	0.000 33	155	127	121	8	119	2
SD-09-13	589.54	344.70	10.03	1.71	0.048 95	0.002 19	0.123 38	0.005 37	0.018 28	0.000 26	145	75	118	5	117	2
SD-09-14	408.72	240.97	7.07	1.70	0.050 29	0.002 81	0.127 13	0.006 95	0.018 34	0.000 29	208	97	122	6	117	2
SD-09-15	145.91	109.04	3.01	1.34	0.048 34	0.003 56	0.124 76	0.009 04	0.018 72	0.000 31	131	116	119	8	120	2
SD-09-16	319.80	224.05	6.29	1.43	0.048 80	0.002 06	0.126 32	0.005 23	0.018 78	0.000 25	72	138	121	5	120	2
SD-09-17	399.16	238.06	7.01	1.68	0.056 72	0.002 67	0.143 42	0.006 55	0.018 34	0.000 29	481	73	136	6	117	2
SD-09-18	262.24	161.42	4.82	1.62	0.048 74	0.002 48	0.126 06	0.006 30	0.018 76	0.000 27	135	87	121	6	120	2
SD-09-19	118.00	90.84	2.50	1.30	0.048 19	0.003 98	0.125 13	0.010 21	0.018 84	0.000 31	109	151	120	9	120	2
SD-09-20	209.12	138.18	3.93	1.51	0.048 42	0.002 90	0.124 08	0.007 31	0.018 59	0.000 28	120	104	119	7	119	2
SD-09-21	255.33	162.94	4.69	1.57	0.048 47	0.002 29	0.125 18	0.005 80	0.018 73	0.000 25	122	81	120	5	120	2
SD-09-22	56.97	46.90	22.27	1.21	0.113 34	0.001 73	5.082 25	0.076 83	0.325 27	0.003 72	1 854	13	1 833	13	1 815	18
SD-09-23	314.32	194.36	5.74	1.62	0.048 58	0.002 09	0.125 75	0.005 30	0.018 77	0.000 25	128	73	120	5	120	2
SD-09-24	472.16	275.74	8.40	1.71	0.047 94	0.001 89	0.124 63	0.004 80	0.018 86	0.000 25	96	64	119	4	120	2
SD-09-25	273.97	174.14	8.47	1.57	0.051 96	0.008 07	0.131 37	0.020 28	0.018 34	0.000 33	284	320	125	18	117	2
SD-09-26	219.49	150.92	4.32	1.45	0.049 16	0.003 92	0.128 87	0.010 00	0.019 01	0.000 40	155	136	123	9	121	3
SD-09-27	138.57	97.91	10.21	1.42	0.057 02	0.025 04	0.139 02	0.060 84	0.017 68	0.000 64	492	838	132	54	113	4
SD-09-28	406.85	233.48	7.20	1.74	0.050 10	0.001 89	0.130 49	0.004 81	0.018 90	0.000 24	200	62	125	4	121	2
SD-09-29	225.86	139.45	4.10	1.62	0.049 01	0.002 91	0.127 26	0.007 40	0.018 84	0.000 30	148	103	122	7	120	2
SD-09-30	287.49	208.41	5.76	1.38	0.047 25	0.002 06	0.120 06	0.005 13	0.018 43	0.000 24	62	70	115	5	118	2

续表 2-1
Continued Table 2-1

分析点	$w_{\text{Pb}}/10^{-6}$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U	Pb		测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
SD13-26	流纹岩,后希组,坐标: N36°20.197', E120°28.516'															
SD-26-01	328.78	143.21	4.76	2.30	0.051 24	0.002 15	0.129 52	0.005 31	0.018 34	0.000 25	252	69	124	5	117	2
SD-26-02	328.12	173.82	5.52	1.89	0.050 31	0.001 84	0.130 20	0.004 65	0.018 78	0.000 24	209	59	124	4	120	2
SD-26-03	53.34	40.41	2.57	1.32	0.108 86	0.023 33	0.263 92	0.055 74	0.017 58	0.000 64	1 780	437	238	45	112	4
SD-26-04	351.57	234.93	6.94	1.50	0.049 73	0.001 53	0.129 64	0.003 88	0.018 91	0.000 23	182	47	124	3	121	1
SD-26-05	1 245.54	536.32	18.38	2.32	0.049 03	0.001 11	0.126 38	0.002 78	0.018 70	0.000 21	149	31	121	3	119	1
SD-26-06	160.72	160.41	4.19	1.00	0.052 55	0.002 42	0.134 24	0.006 01	0.018 53	0.000 28	309	74	128	5	118	2
SD-26-07	170.29	163.26	4.29	1.04	0.049 28	0.002 21	0.124 32	0.005 42	0.018 30	0.000 27	161	74	119	5	117	2
SD-26-08	157.62	117.36	3.33	1.34	0.048 66	0.002 48	0.124 11	0.006 21	0.018 51	0.000 26	131	88	119	6	118	2
SD-26-09	83.76	60.66	1.77	1.38	0.048 40	0.003 66	0.127 96	0.009 53	0.019 18	0.000 32	119	135	122	9	122	2
SD-26-10	95.16	100.50	2.60	0.95	0.049 19	0.002 85	0.127 09	0.007 18	0.018 75	0.000 30	157	99	121	6	120	2
SD-26-11	30.88	24.39	315.63	1.27	0.909 84	0.011 41	386.666 38	5.096 73	3.083 40	0.035 17	5 104	8	6 052	13	9 070	56
SD-26-12	588.05	342.46	10.57	1.72	0.049 96	0.001 29	0.129 27	0.003 25	0.018 77	0.000 22	193	37	123	3	120	1
SD-26-13	140.86	190.60	4.74	0.74	0.048 04	0.001 87	0.124 96	0.004 73	0.018 87	0.000 25	101	63	120	4	121	2
SD-26-14	828.73	384.66	13.10	2.15	0.048 02	0.001 16	0.125 83	0.002 96	0.019 01	0.000 22	100	34	120	3	121	1
SD-26-15	135.78	91.27	2.67	1.49	0.053 53	0.002 87	0.139 38	0.007 32	0.018 89	0.000 29	351	91	132	7	121	2
SD-26-16	203.89	148.29	4.26	1.37	0.050 80	0.001 97	0.131 96	0.004 98	0.018 85	0.000 26	232	62	126	4	120	2
SD-26-17	148.89	90.21	2.75	1.65	0.048 79	0.003 06	0.126 42	0.007 72	0.018 80	0.000 33	138	105	121	7	120	2
SD-26-18	116.57	118.61	3.21	0.98	0.049 84	0.004 33	0.127 35	0.010 88	0.018 53	0.000 28	187	198	122	10	118	2
SD-26-19	112.05	209.00	22.44	0.54	0.064 78	0.001 08	0.783 15	0.012 63	0.087 72	0.000 94	767	17	587	7	542	6
SD-26-20	256.50	208.86	5.75	1.23	0.052 02	0.001 98	0.133 52	0.004 92	0.018 62	0.000 26	286	59	127	4	119	2
SD-26-21	297.50	198.58	5.87	1.50	0.048 76	0.001 84	0.127 08	0.004 65	0.018 91	0.000 25	136	61	121	4	121	2
SD-26-22	212.44	144.95	4.13	1.47	0.048 42	0.002 14	0.122 90	0.005 30	0.018 42	0.000 25	120	74	118	5	118	2
SD-26-23	65.69	48.68	1.36	1.35	0.042 69	0.004 56	0.109 61	0.011 59	0.018 63	0.000 36	-140	164	106	11	119	2
SD-26-24	153.74	88.06	2.73	1.75	0.047 65	0.003 52	0.124 84	0.009 02	0.019 01	0.000 37	82	123	119	8	121	2
SD-26-25	617.65	374.03	11.46	1.65	0.049 42	0.001 33	0.129 59	0.003 38	0.019 03	0.000 23	168	38	124	3	122	1
SD13-30	粗安岩,八亩地组,坐标: N36°23.844', E120°31.829'															
SD-30-01	86.63	67.80	1.93	1.28	0.047 43	0.003 35	0.121 67	0.008 47	0.018 61	0.000 30	71	123	117	8	119	2
SD-30-02	47.06	46.58	1.29	1.01	0.040 61	0.004 61	0.111 18	0.012 51	0.019 86	0.000 38	-255	174	107	11	127	2
SD-30-03	65.27	43.19	1.29	1.51	0.052 89	0.004 79	0.136 25	0.012 14	0.018 69	0.000 37	324	165	130	11	119	2
SD-30-04	70.00	52.32	5.74	1.34	0.072 45	0.031 15	0.177 84	0.076 10	0.017 80	0.000 74	999	927	166	66	114	5
SD-30-05	55.71	48.44	1.38	1.15	0.046 05	0.002 66	0.116 13	0.006 40	0.018 29	0.000 31	112	126	112	6	117	2

续表 2-2
Continued Table 2-2

分析点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U		测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
SD-30-06	56.45	54.03	1.41	0.043 40	0.004 50	0.110 34	0.011 31	0.018 44	0.000 35	-102	167	106	10	118	2
SD-30-07	61.92	45.78	1.28	0.048 70	0.004 83	0.122 52	0.011 96	0.018 25	0.000 38	133	179	117	11	117	2
SD-30-08	58.30	55.35	1.44	0.049 16	0.005 27	0.123 13	0.012 88	0.018 17	0.000 48	155	185	118	12	116	3
SD-30-09	102.90	74.93	2.16	0.053 56	0.007 04	0.130 85	0.016 99	0.017 72	0.000 36	353	297	125	15	113	2
SD-30-10	71.45	53.31	1.50	0.052 10	0.005 21	0.131 29	0.012 91	0.018 28	0.000 39	290	183	125	12	117	2
SD-30-11	52.27	49.80	1.44	0.061 27	0.007 98	0.154 17	0.019 83	0.018 25	0.000 38	649	293	146	17	117	2
SD-30-12	58.03	52.10	1.37	0.048 88	0.004 61	0.123 75	0.011 47	0.018 37	0.000 38	142	169	118	10	117	2
SD-30-13	79.48	63.47	1.74	0.048 93	0.004 41	0.121 92	0.010 83	0.018 08	0.000 33	144	165	117	10	116	2
SD-30-14	78.33	63.27	1.71	0.050 96	0.004 52	0.127 66	0.011 12	0.018 17	0.000 36	239	160	122	10	116	2
SD-30-15	65.07	56.81	1.60	0.046 05	0.002 60	0.115 81	0.006 30	0.018 24	0.000 28		123	111	6	117	2
SD-30-16	66.17	58.45	1.59	0.049 24	0.003 89	0.127 47	0.009 94	0.018 78	0.000 32	159	143	122	9	120	2
SD-30-17	79.69	65.99	1.83	0.046 43	0.003 68	0.119 30	0.009 31	0.018 64	0.000 32	20	139	114	8	119	2
SD-30-18	60.56	52.32	1.44	0.045 87	0.004 42	0.118 02	0.011 23	0.018 67	0.000 35	-9	173	113	10	119	2
SD-30-19	67.46	52.47	1.47	0.041 15	0.004 03	0.105 88	0.010 24	0.018 67	0.000 35	-224	154	102	9	119	2
SD-30-20	109.43	76.66	2.23	0.046 05	0.003 86	0.111 85	0.009 18	0.017 62	0.000 30		185	108	8	113	2
SD-30-21	77.89	59.76	1.66	0.054 20	0.004 28	0.137 00	0.010 58	0.018 34	0.000 36	379	139	130	9	117	2
SD-30-22	76.92	56.52	1.62	0.043 19	0.004 06	0.115 01	0.010 68	0.019 32	0.000 34	-113	156	111	10	123	2
SD-30-23	59.71	51.85	1.42	0.051 98	0.004 25	0.134 32	0.010 79	0.018 75	0.000 35	285	148	128	10	120	2
SD-30-24	81.74	63.40	1.77	0.050 80	0.003 55	0.131 25	0.009 00	0.018 74	0.000 32	232	125	125	8	120	2
SD-30-25	47.07	46.24	1.28	0.054 12	0.004 51	0.145 61	0.011 93	0.019 52	0.000 37	376	151	138	11	125	2
SD-30-26	72.28	55.89	1.59	0.052 67	0.003 84	0.136 11	0.009 74	0.018 75	0.000 33	315	131	130	9	120	2
SD-30-27	62.92	56.04	1.50	0.047 09	0.003 94	0.121 67	0.010 02	0.018 74	0.000 34	54	147	117	9	120	2
SD-30-28	53.55	50.44	1.37	0.052 31	0.004 41	0.133 80	0.011 10	0.018 56	0.000 35	299	154	128	10	119	2
SD-30-29	67.40	52.57	1.49	0.050 47	0.004 33	0.130 64	0.011 03	0.018 78	0.000 35	217	156	125	10	120	2
SD-30-30	103.47	66.94	1.92	0.051 72	0.003 98	0.130 25	0.009 81	0.018 27	0.000 35	273	136	124	9	117	2
粗面岩, 后杂组, 坐标: N36°04.756' E119°55.169'															
SD-36-01	98.36	58.88	1.81	0.048 08	0.003 74	0.126 36	0.009 67	0.019 07	0.000 34	103	136	121	9	122	2
SD-36-02	143.40	132.00	3.60	0.049 54	0.002 49	0.128 40	0.006 28	0.018 80	0.000 29	173	85	123	6	120	2
SD-36-03	167.71	99.67	3.08	0.049 64	0.002 58	0.126 47	0.006 41	0.018 48	0.000 28	178	89	121	6	118	2
SD-36-04	177.71	93.66	3.03	0.056 91	0.002 51	0.149 52	0.006 40	0.019 06	0.000 28	488	68	141	6	122	2
SD-36-05	137.39	87.52	2.73	0.049 03	0.003 78	0.128 35	0.009 65	0.018 99	0.000 38	149	132	123	9	121	2
SD-36-06	48.90	39.25	1.10	0.054 03	0.005 51	0.139 38	0.013 97	0.018 71	0.000 41	372	186	132	12	119	3

续表 2-3

分析点	$\alpha_{\text{Th}}/10^{-6}$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
	Th	U	Pb		Th/U	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ
SD-36-07	165.25	85.26	2.75	1.94	0.049 08	0.002 88	0.127 02	0.007 29	0.018 78	0.000 30	152	101	121	7	120	2	
SD-36-08	155.75	91.52	2.86	1.70	0.051 87	0.002 94	0.135 97	0.007 53	0.019 02	0.000 30	280	98	129	7	121	2	
SD-36-09	64.82	53.13	1.47	1.22	0.052 05	0.004 14	0.131 45	0.010 23	0.018 32	0.000 36	288	141	125	9	117	2	
SD-36-10	57.97	48.40	1.37	1.20	0.048 78	0.004 16	0.128 73	0.010 78	0.019 14	0.000 36	137	152	123	10	122	2	
SD-36-11	79.10	63.97	1.82	1.24	0.048 95	0.003 78	0.125 38	0.009 51	0.018 58	0.000 33	145	137	120	9	119	2	
SD-36-12	77.68	61.97	1.72	1.25	0.048 07	0.004 14	0.123 54	0.010 46	0.018 65	0.000 35	103	153	118	9	119	2	
SD-36-13	78.52	56.89	1.64	1.38	0.048 57	0.003 63	0.122 85	0.009 03	0.018 35	0.000 32	127	132	118	8	117	2	
SD-36-14	67.53	46.73	1.40	1.45	0.048 62	0.004 80	0.128 86	0.012 56	0.019 23	0.000 38	130	181	123	11	123	2	
SD-36-15	136.94	67.51	2.28	2.03	0.050 16	0.003 63	0.132 18	0.009 37	0.019 12	0.000 34	202	128	126	8	122	2	
SD-36-16	143.57	87.36	2.78	1.64	0.049 28	0.003 89	0.130 00	0.010 07	0.019 14	0.000 36	161	140	124	9	122	2	
SD-36-17	206.61	117.5	4.47	1.76	0.062 67	0.008 41	0.155 80	0.020 66	0.018 03	0.000 36	697	300	147	18	115	2	
SD-36-18	79.65	56.48	1.66	1.41	0.048 44	0.003 94	0.127 34	0.010 19	0.019 07	0.000 34	121	145	122	9	122	2	
SD-36-19	123.27	66.45	2.18	1.86	0.048 14	0.003 57	0.132 83	0.009 70	0.020 02	0.000 34	106	131	127	9	128	2	
SD-36-20	79.23	61.48	1.73	1.29	0.048 99	0.003 70	0.126 04	0.009 34	0.018 67	0.000 34	147	132	121	8	119	2	
SD-36-21	54.14	42.03	1.23	1.29	0.054 52	0.004 82	0.143 88	0.012 48	0.019 15	0.000 39	393	159	136	11	122	2	
SD-36-22	330.42	208.63	6.23	1.58	0.048 43	0.001 52	0.125 60	0.003 84	0.018 81	0.000 23	120	49	120	3	120	1	
SD-36-23	187.27	83.44	2.82	2.24	0.047 37	0.002 95	0.122 28	0.007 48	0.018 73	0.000 29	68	105	117	7	120	2	
SD-36-24	60.34	47.67	1.37	1.27	0.040 59	0.004 29	0.108 16	0.011 33	0.019 33	0.000 34	-256	167	104	10	123	2	
SD-36-25	303.72	117.09	4.07	2.59	0.053 51	0.002 82	0.132 92	0.006 82	0.018 02	0.000 29	350	87	127	6	115	2	
SD-36-26	97.26	76.56	2.20	1.27	0.047 13	0.003 11	0.123 94	0.008 03	0.019 08	0.000 30	56	112	119	7	122	2	
SD-36-27	88.28	68.12	2.00	1.30	0.050 56	0.003 34	0.131 53	0.008 52	0.018 87	0.000 31	221	118	125	8	121	2	
SD-36-28	88.85	64.76	1.86	1.37	0.049 91	0.003 52	0.129 49	0.008 96	0.018 82	0.000 33	191	125	124	8	120	2	
SD-36-29	133.43	80.07	2.48	1.67	0.049 45	0.003 53	0.127 49	0.008 90	0.018 71	0.000 35	169	123	122	8	119	2	
SD-36-30	111.79	83.05	2.37	1.35	0.050 38	0.003 60	0.128 69	0.009 01	0.018 53	0.000 34	213	126	123	8	118	2	

负异常(δE_u 在 0.61~0.91 之间),其中样品 SD13-23 稀土配分形式在最下方, Eu 异常并不明显,暗示可能是岩浆的分异程度不同所致。而流纹岩 SD13-26 和 SD13-39 则为强烈的负 Eu 异常(δE_u 分别为 0.22 和 0.09),其强烈负 Eu 异常与崂山 A 型花岗岩 (SD13-31)相似,稀土配分形式呈强负 Eu 异常的深“V”字型模式曲线。

两类岩石在微量元素原始地幔标准化蛛网图上的差别也很明显(图 4),其中粗面岩-粗面英安岩富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K,相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P;而流纹岩(SD13-26 和 SD13-39)强烈亏损大离子亲石元素 Ba、Sr 和高场强元素 Ti、P,其

蛛网图的型式也和崂山 A 型花岗岩(SD13-31)相似,指示其可能的成因联系。过渡元素 $Co(0.112 \times 10^{-6} \sim 17.4 \times 10^{-6})$ 、 $Ni(0.134 \times 10^{-6} \sim 43.2 \times 10^{-6})$ 、 $Cr(0.489 \times 10^{-6} \sim 109 \times 10^{-6})$ 的含量均较低,反映岩浆可能经历了较高级的演化或者岩浆是由源区物质较低程度的部分熔融形成的。两个流纹岩样品相对于粗面岩-粗面英安岩具有低的 $Sr(7.74 \times 10^{-6}$ 和 $43.6 \times 10^{-6})$ 和 $Ba(86.4 \times 10^{-6}$ 和 $13.4 \times 10^{-6})$ 含量。粗面岩-粗面英安岩具有低的 Rb/Ba 比值、高的 La/Nb 和 Ba/Nb 比值。流纹岩则具有高的 Rb/Ba 比值,低 La/Nb 和 Ba/Nb 比值。

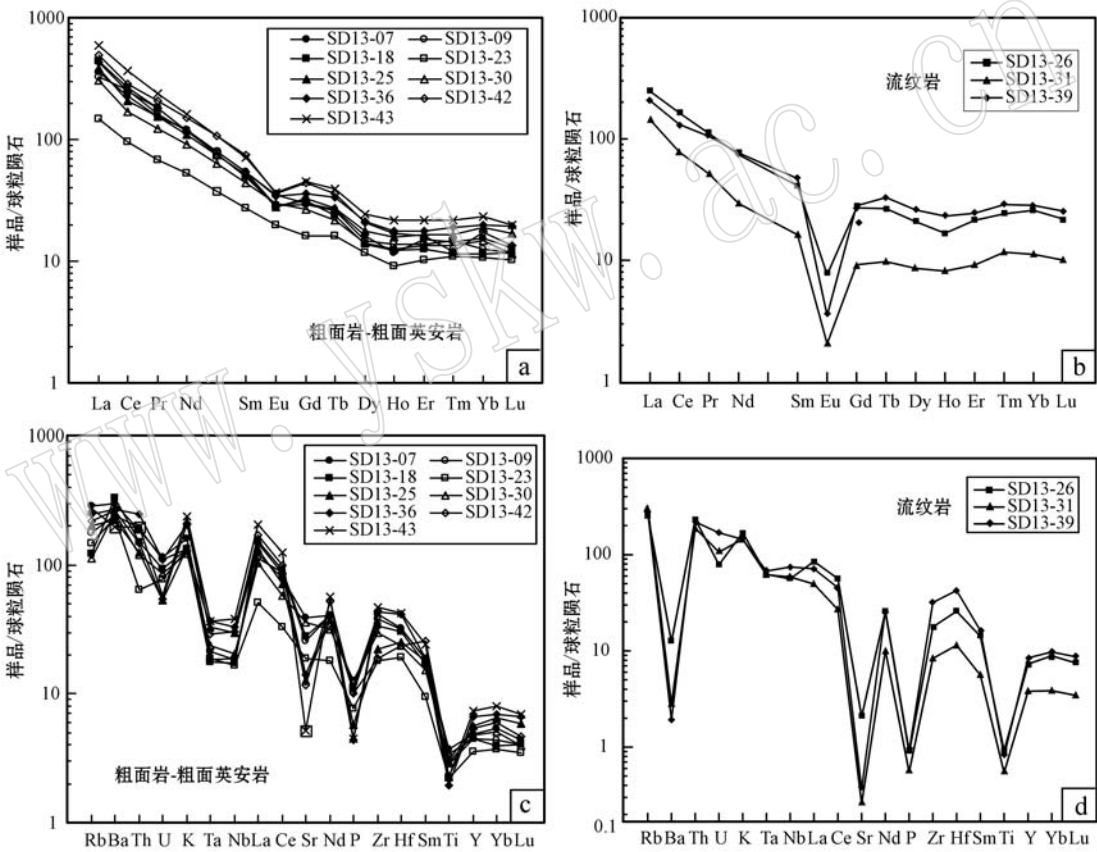


图 4 胶东青山群火山岩稀土元素标准化图和微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spidergrams of the Qingshan Group volcanic rocks from Jiaodong area (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

3.2 锆石 U-Pb 年代学

本次定年的 4 个青山群中酸性火山岩样品分别采自莱阳、即墨及胶州地区,具体的采样位置见图 1,详细的经纬度、分布层位和测试结果见表 2。锆石的 CL 图像见图 5。

样品 SD13-09 采自莱阳北官庄村采石场(N36°

58.619',E120°46.975'),岩性为粗安岩,属于八亩地组。其中锆石以长柱状为主,颗粒粗大,长径多为 250~400 μm ,部分锆石长径达 500 μm ,长宽比多大于 2:1,部分大于 4:1,环带不发育,所挑选的锆石中有个别的老锆石,因此在数据分析的时候已排除在外。本次研究共获得了 30 个锆石颗粒测试点的数

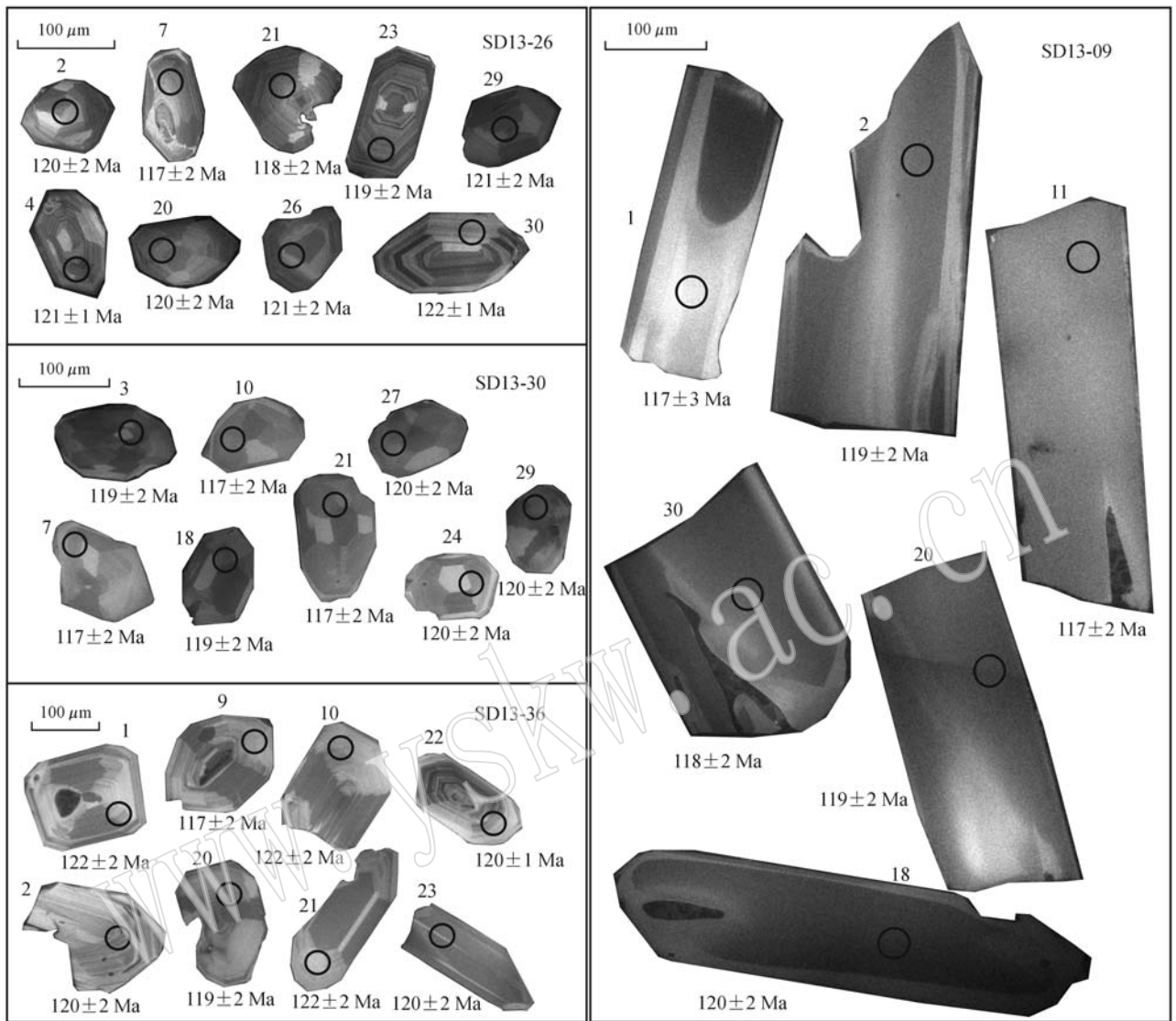


图 5 胶东青山群中酸性火山岩中部分锆石的阴极发光照片

Fig. 5 CL images of dated zircon crystals from the Qingshan Group volcanic rocks in Jiaodong area

据,其中分析点 SD-09-22 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $1\,815 \pm 18$ Ma,属于继承或捕获的锆石。而点 SD-09-27 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 113 ± 4 Ma,略低于其它分析点的年龄值。点 SD-09-17 与其它点不谐和。其余 27 个分析点都位于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线上,交于 119.3 ± 0.3 Ma(MSWD=0.23),这与它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 119.4 ± 0.9 Ma(MSWD=0.31)一致(图 6)。因此该年龄可以代表该粗安岩形成的年龄。

样品 SD13-26 采自即墨训虎山(N36°20.197', E120°28.516'),岩性为流纹岩,属于后夙组。其中锆石以短柱状为主,长径多为 100~200 μm ,长宽比一般在 1:1~2:1 之间,CL 图显示锆石的韵律环带

发育,少部分锆石出现有核-边结构。本次研究对该样品中的 25 个锆石颗粒进行了测试,其中分析点 SD-26-03 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 112 ± 4 Ma,低于其它分析点的年龄值。而分析点 SD-26-11 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $9\,070 \pm 56$ Ma,明显不合理。SD-26-19 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 542 ± 6 Ma,应为继承或捕获的锆石。另外,SD-26-15 和 SD-26-23 和其它测试点不谐和。其余的 20 个点作 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图,交于 119.6 ± 0.4 Ma(MSWD=8.7),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 120.0 ± 0.8 Ma(MSWD=0.65),两者基本一致(图 6)。因此加权平均年龄可以代表流纹岩的形成时代。

样品 SD13-30 采自即墨邴家庄(N36°23.844',

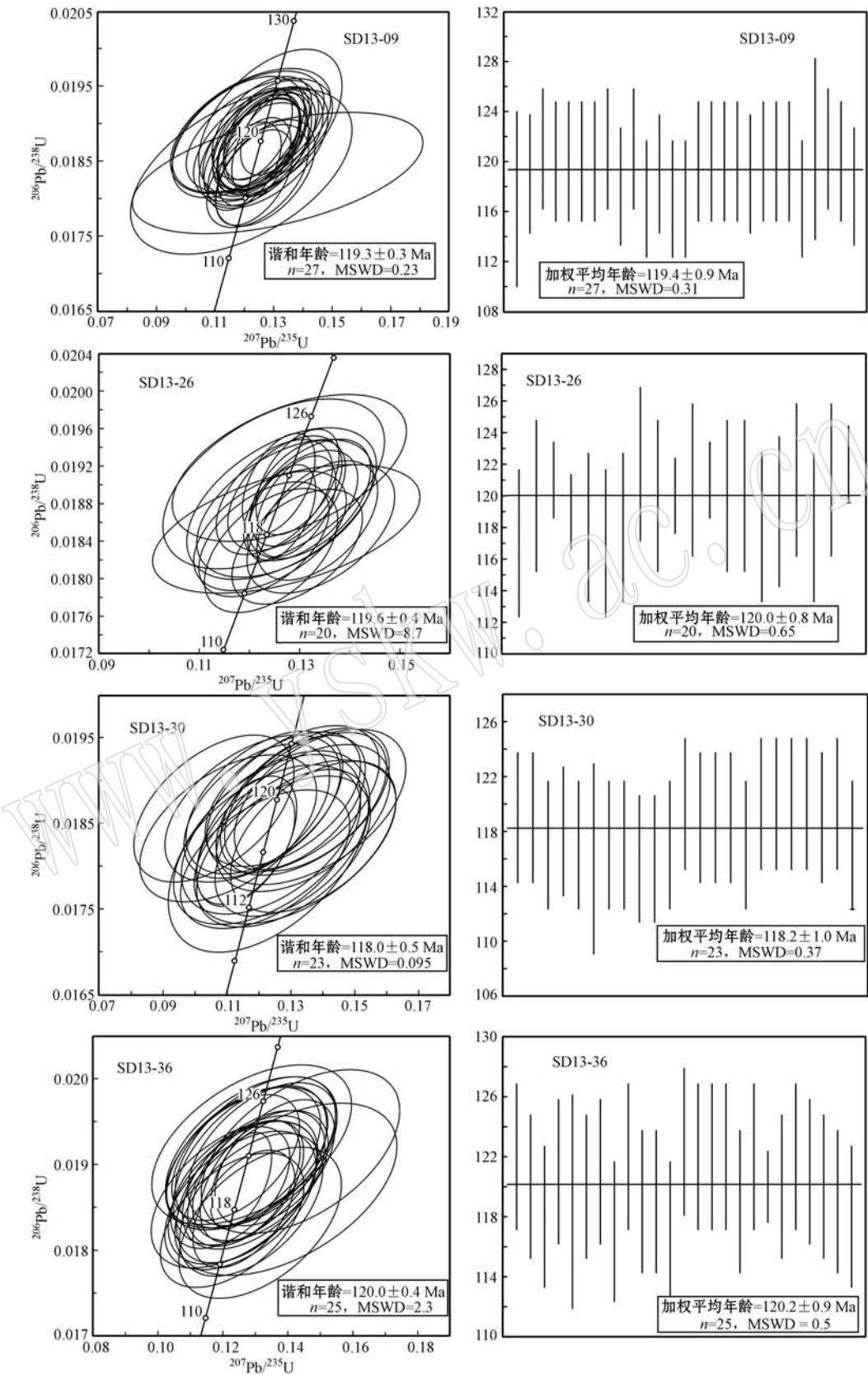


图 6 胶东青山群中酸性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄图
Fig. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age diagrams of the Qingshan Group volcanic rocks in Jiaodong area

E120°31.829′), 岩性为粗安岩, 属于八亩地组。其中锆石以短柱状为主, 长径多为 100~200 μm , 长宽比在 1:1~2:1 之间, 部分锆石呈扇形分带结构, 或有不明显的韵律环带结构。对该样品共获得了 30 个锆石颗粒的测试点数据, 其中点 SD-30-02、SD-30-22、SD-30-25 表面年龄要略高于其它分析点的年龄, 点 SD-30-04、SD-30-09、SD-30-11、SD-30-20 则和其他点不谐和。其余 23 个点作 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图, 谐和年龄为 118.0 ± 0.5 Ma (MSWD = 0.095), 这与它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 118.2 ± 1.0 Ma (MSWD = 0.37) 一致(图 6)。所以该年龄代表粗安岩形成的年龄。

样品 SD13-36 采自胶州后乔村(N36°04.756′, E119°55.169′), 岩性为粗面岩, 属于后乔组。其中锆石以短柱状为主, 长径多为 100~250 μm , 长宽比在 1:1~2:1 之间, 环带发育, 少部分锆石见有核-边结构。本次研究共获得了 30 个锆石颗粒测试点的数据, 其中分析点 SD-36-19 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 128 ± 2 Ma, 明显的高于其它分析点的年龄值。而点 SD-36-04、SD-36-17、SD-36-24、SD-36-25 则和其它点不谐和。对其余 25 个点作 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图, 谐和年龄为 120.0 ± 0.4 Ma (MSWD = 2.3), 这与它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 120.2 ± 0.9 Ma (MSWD = 0.5) 一致(图 6), 因此该年龄可以代表粗面岩的形成年龄。

4 讨论

4.1 山东中生代青山群火山岩的时空分布

山东地区青山群火山岩在鲁西、沂沭断裂带内及胶东地区都有分布。前人对该套火山岩的年代学已有一定的研究。苏尚国等(1999)获得沂沭断裂带内青山群火山岩的 K-Ar 全岩年龄为 124.6~100.7 Ma。唐嘉锋等(2008)获得青山群火山岩的 K-Ar 年龄大致在 118~93 Ma 之间。由于 K-Ar 定年法并不准确, 存在 K 含量测量的不准确性而产生年龄的误差, 因此这些 K-Ar 法获得的青山群火山岩的部分年龄可能并不准确。

另外, 邱检生等(1996)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 111.4 ± 2.1 Ma, 蒙阴橄榄安粗岩系火山岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 119.6 ± 3.7 Ma。邱检生等(2001a)获得胶莱盆地青山群火山岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 108.2 ± 0.6 Ma

和 109.9 ± 0.6 Ma。邱检生等(2001b)测得鲁西富钾火山岩形成年龄为 124.3~114.7 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, 年龄为 106~98 Ma。Ling 等(2009)得到鲁西青山群火山岩的锆石 U-Pb 年龄为 128 Ma。匡永生等(2012)测得胶东青山群基性火山岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 122~113 Ma, 断裂带内粗面玄武岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 99.7 Ma。邱检生等(2012)用 LA-ICP-MS 测得断裂带钾质和钠质火山岩的年龄分别为 124 ± 1.3 Ma 和 106.4 ± 4 Ma。李友连等(2012)获得断裂带内钠质火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 96.5 ± 1.4 Ma。据不完全统计, 鲁西、沂沭断裂带内及鲁东青山群火山岩的形成时间分别为 128~115 Ma、124~96.5 Ma 和 122~108 Ma, 这些年龄数据之间明显存在较大的差异。对这些年龄数据不同的学者有以下几点认识: ① 山东青山群火山岩形成时间主要集中在 124~100 Ma 之间, 属早白垩世中晚期; ② 山东中生代青山群火山岩形成时代由西向东逐渐变轻(邱检生等, 1996, 2001a; 凌文黎, 2006); ③ 胶东青山群火山岩是双峰式的(Fan *et al.*, 2001; Ling *et al.*, 2009; 匡永生等, 2012), 匡永生等(2012)认为基性岩形成时间(122~113 Ma)早于酸性岩形成时间(110~98 Ma); ④ 断裂带内汤头盆地钠质火山岩比钾质火山岩的形成时间晚(邱检生等, 2012)。

本次运用较高精度 LA-ICP-MS 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 个年龄分别为 119.4 ± 0.9 Ma、 120.0 ± 0.8 Ma、 118.2 ± 1.0 Ma 以及 120.2 ± 0.9 Ma。年龄集中一致, 在 120~118 Ma 之间, 这与基性岩年龄相似(122~113 Ma), 因此并不能认为基性岩比酸性岩的形成时代要早。而且本文报道的鲁东地区年龄 120~118 Ma 及匡永生等(2012)报道的年龄 122~113 Ma 比部分鲁西和断裂带内的火山岩年龄要大或小, 这与认为山东青山群火山岩由西到东逐渐变轻的趋势不符。但本次获得 4 个一致中酸性火山岩的锆石 U-Pb 年龄, 可以肯定在 120~118 Ma 时间内胶东地区发生有大规模中酸性岩浆喷发事件。

4.2 与郯庐断裂带沿线火山岩及其两侧火山岩形成时间的对比

郯庐断裂形成于晚三叠世印支期的华北板块和扬子板块的碰撞造山过程中(Yin and Nie, 1993; 万天丰等, 1996; 王小凤等, 2000; 陈宣华等, 2000), 其后在早白垩世初再次发生大规模的左行平移(朱光

等, 2001, 2004), 随后与中国东部一起变为区域性的伸展活动并伴随有一系列的岩浆活动。

沿郯庐断裂带分布有许多火山岩, 其年代学已有一定的研究。谢成龙等(2008)获得郯庐断裂带南段巢湖庐江一带火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 125~93 Ma。牛漫兰等(2007)测得郯庐断裂带内安徽肥东和山东沂水地区火山岩的 K-Ar 年龄分别为 119.2 ± 2.3 Ma 和 114.8 ± 1 Ma。由此可以看出, 郯庐断裂带山东段中生代青山群火山岩的年龄(124~100 Ma)与苏皖段断裂带内火山岩的年龄相似(125~93 Ma)。这说明山东青山群火山岩和断裂带内的火山岩应该是在郯庐断裂区域伸展活动过程中大致相同的一段时间形成的。而苏皖段郯庐断裂带附近北淮阳地区火山岩的年龄在 133~127 Ma 之间(夏群科等, 2003; 黄皓等, 2012)。薛怀民等(2002)在北大别东部测得火山岩锆石 U-Pb 年龄为 129.2 ± 2.6 Ma。宁芜盆地内火山岩的年龄为 130~127 Ma(张旗等, 2003; 闫峻等, 2009; 薛怀民等, 2010)。庐枞盆地内火山岩的年龄为 133~127 Ma(刘洪等, 2002; 周涛发等, 2008)。薛怀民等(2010)总结认为下扬子地区晚中生代火山活动持续的时间很短(≤ 6 Ma), 主要集中在 130 Ma 左右。由此可以看出, 郯庐断裂带山东段中生代青山群火山岩的年龄(124~100 Ma)与苏皖段断裂带内火山岩的年龄相似(125~93 Ma), 而明显小于苏皖段附近盆地的火山岩年龄(133~124 Ma)。中国东部在中新生代发生有大规模的岩石圈减薄事件(Zhang and Huo, 1991; Menzies, 1993; 吴福元等, 1999; Gao *et al.*, 2002, 2004; 周新华, 2006)。郯庐断裂作为中国东部发育的最大最深断裂带, 其切割深度可达壳幔边界, 是地壳薄弱带。郯庐断裂作为中国东部岩石圈减薄过程岩浆上升的有利通道, 岩浆喷发事件在郯庐断裂带上持续的时间可能更长, 所以受郯庐断裂带控制的山东青山群火山岩及断裂带内的火山岩比断裂带邻近火山岩的年龄要晚。

4.3 岩石成因的探讨

在主量元素-SiO₂ 协变图上(图 7), 整体上看 Al₂O₃、FeO* (全铁)、CaO、MgO、TiO₂、P₂O₅ 都和 SiO₂ 呈较明显的负相关性, 貌似是两端岩浆混合或者同一岩浆端员结晶分异演化形成的。然而 Na₂O、K₂O 与 SiO₂ 之间没有明显的相关性, 而且单独看粗面岩-粗面英安岩 Al₂O₃、TiO₂ 与 SiO₂ 没有明

显的相关性, K₂O 与 SiO₂ 则具有明显的正相关性, 说明这些样品可能来源于不同的岩浆源区。另外, 粗安岩-粗面英安岩和流纹岩存在显著地 REE 球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4)的差异性, 也进一步说明两类样品来源于不同的岩浆源区。本文胶东青山群中酸性火山岩都表现出低 MgO、TiO₂、Cr、Ni 和 Co 含量, 明显的负 Eu 和 Sr 异常, 表明其岩浆来源以壳源为主。

粗面岩-粗面英安岩富集大离子亲石元素和亏损高场强元素, 而且具有较高的 La/Nb (2.98~8.54) 和 Ba/Nb (50~187) 比值, 在 La/Nb-Ba/Nb 图中(图 8), 样品集中在岛弧火山岩区, 明显靠近壳源区而远离地幔源区。另外, 样品的 Nb/U 比值为 5.43~22.38, 而大陆地壳和现代地幔该比值相对均一, 分别为 10 和 47(Hofmann, 1988), 因此岩浆演化过程中必定有幔源性质物质的加入。另外, 粗面岩-粗面英安岩的 REE 球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图比较一致, 而且其 Rb/Ba 比值较低, 表明岩浆混染作用并不显著。据此可以初步推断, 粗面岩-粗面英安岩可能是下地壳物质与地幔物质混合形成。目前部分学者认为山东青山群火山岩是富集地幔部分熔融的产物(邱检生等, 1996; 刘燊等, 2003); 还有的认为是俯冲扬子下地壳和岩石圈地幔部分熔融的混合(Zhang *et al.*, 2002; 闫峻等, 2007); Ling 等(2009)则认为基性火山岩为富集地幔部分熔融的产物, 而酸性火山岩为古老下地壳和中生代底侵岩浆的熔融产物。对胶东地区已有的同位素资料显示, 晚白垩的胶州大西庄玄武岩在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) - \epsilon\text{Nd}(t)$ 图中靠近亏损地幔(闫峻等, 2005); 而早白垩的青山群火山岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 值集中在 0.706~0.709 之间, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值集中在 -12~-20 之间, 在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) - \epsilon\text{Nd}(t)$ 图中靠近富集地幔(邱检生等, 1996; 闫峻等, 2007; Ling *et al.*, 2009; 匡永生等, 2012)。大多数人认为山东早白垩世青山群火山岩的形成有富集地幔物质的贡献(邱检生等, 1996; 刘燊等, 2003; Ling *et al.*, 2009; 匡永生等, 2012)。虽然本次采集的胶东中酸性火山岩样品缺少 Sr-Nd 同位素数据, 但是研究区已有的同位素显示其有富集地幔物质的贡献, 因此, 认为粗面岩-粗面英安岩可能是下地壳(俯冲扬子下地壳或者古老华北下地壳)部分熔融和富集地幔部分熔融混合的产物。

流纹岩样品具有极低的 MgO、TiO₂、Cr、Ni、Co 含

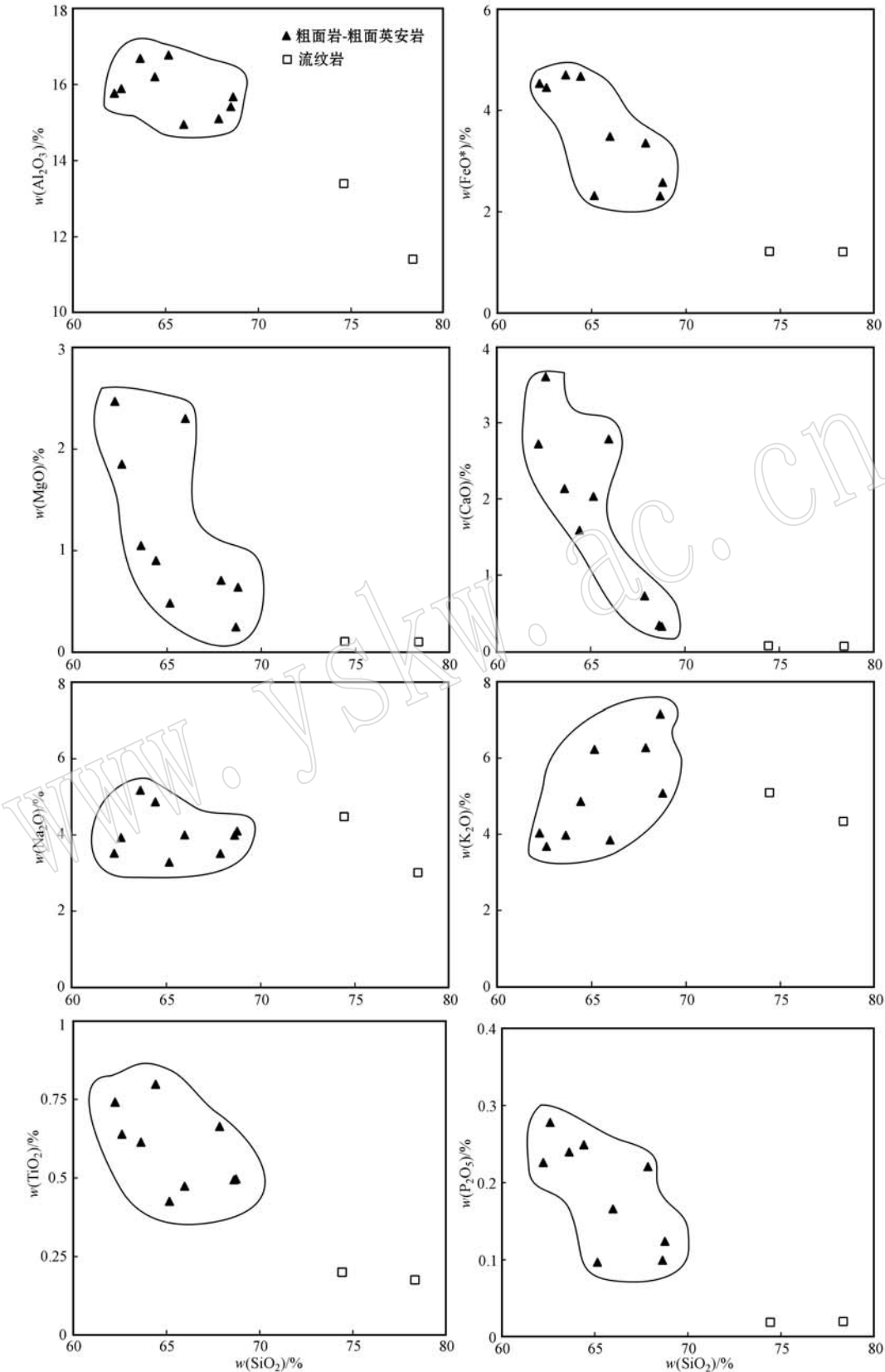


图 7 胶东青山群中酸性火山岩主要氧化物和 SiO_2 的协变图

Fig. 7 Variations of major oxides versus SiO_2 diagrams of Qingshan Group volcanic rocks in Jiaodong area

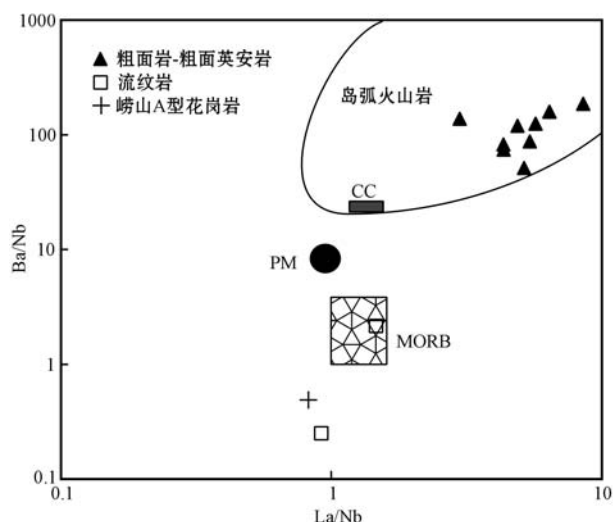


图 8 胶东青山群中酸性火山岩的 Ba/Nb-La/Nb 图解
(底图数据引自 Jahn *et al.*, 1999)

Fig. 8 La/Nb versus Ba/Nb diagram of the Qingshan Group volcanic rocks in Jiaodong area (data after Jahn *et al.*, 1999)

CC—大陆地壳; PM—原始地幔; MORB—洋中脊玄武岩

CC—continental crust; PM—primitive mantle; MORB—middle ocean ridge basalt

量, 极低的 La/Nb (1.46 和 0.92) 和 Ba/Nb (2.17 和 0.25) 比值, 而且强烈的亏损 Ba、Sr、Eu 特征, 显示出岩浆源区主要以地壳物质为主。强烈负 Eu 异常表明岩浆在分离结晶过程中具有大量斜长石结晶或者在部分熔融过程中有大量斜长石的残留。流纹岩通常形成于地热异常背景下地壳物质的部分熔融, 本次研究流纹岩的主微量元素特征和崂山 A 型花岗岩十分相似, 而且流纹岩与崂山 A 型花岗岩产出地理位置相邻近, 因此认为流纹岩和崂山 A 型花岗岩来源相同的岩浆源区。赵广涛等 (1997) 认为崂山 A 型花岗岩来源于玄武质岩浆的底侵作用导致下地壳深融而形成的岩浆, 岩浆在上升过程中伴有一定的分离结晶和同化混染。因此认为流纹岩可能是由于区域拉张环境和高热异常背景下, 下地壳发生深融产生的岩浆喷出地表形成的, 岩浆在上升过程中发生有分离结晶 (大量斜长石的分离结晶) 过程。

5 结论

(1) 本文得到胶东青山群 4 个中酸性火山岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄分别为 119.4 ± 0.9 Ma, 120.0 ± 0.8 Ma, 118.2 ± 1.0 Ma 和 120.2 ± 0.9 Ma, 表明胶东地区在 120~118 Ma 较短的时间内发生有大规模的中酸性岩浆喷发事件。

(2) 郯庐断裂带山东段中生代青山群火山岩的年龄与苏皖段断裂带内火山岩的年龄相似, 而明显小于苏皖段附近盆地的火山岩年龄。郯庐断裂作为中国东部岩石圈减薄过程岩浆上升的有利通道, 岩浆喷发事件在郯庐断裂带上持续的时间可能更长, 所以受郯庐断裂带控制的山东青山群火山岩及断裂带内的火山岩比邻近断裂带盆地内的火山岩年龄晚。

(3) 胶东青山群中酸性火山岩都具有富钾、富碱、贫镁、贫钛, 低 Ni、Cr, 根据主微量元素的差异可以进一步分为粗面岩-粗面英安岩和流纹岩两类。胶东中酸性火山岩都富集轻稀土而亏损重稀土, 粗面岩-粗面英安岩富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K, 而亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P; 流纹岩强烈亏损 Ba、Sr 等大离子亲石元素和 Ti、P 等高场强元素。粗面岩-粗面英安岩相对流纹岩具有高的 Sr 和 Ba 含量以及 La/Nb、Ba/Nb 比值, 而具有低的 Rb/Ba 比值和 Eu 负异常, 说明它们来源于不同的岩浆源区。

(4) 粗面岩-粗面英安岩可能是下地壳 (俯冲扬子下地壳或者古老华北下地壳) 部分熔融和富集地幔部分熔融混合的产物; 流纹岩是由于区域拉张环境和高热异常背景下, 下地壳发生深融产生的岩浆喷出地表形成的, 岩浆在上升过程中发生有分离结晶 (大量斜长石的分离结晶) 过程。

References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- Chen Xuanhua, Wang Xiaofeng, Zhang Qing, *et al.* 2000. Geochronologic study on the formation and evolution of Tan-Lu fault [J]. *Journal of ChangChun University of Science and Technology*, 30(3): 215~220 (in Chinese with English abstract).
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, *et al.* 2001. Post-Orogenic Bimodal Volcanism Along the Sulu Orogenic Belt in Eastern China [J]. *Phys. Chem. Earth*, 26: 733~746.
- Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, *et al.* 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 198: 307~322.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 432: 892~897.
- Hang Hao and Xue Huaimin. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Early Cretaceous volcanic rocks from Jinggantai Formation in Beihuiyang belt on the northern margin of the Dabie Orogen and their

- geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 371~381(in Chinese with English abstract).
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 90(3): 297~314.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523~548.
- Jahn Bor-ming, Wu Fuyuan, Lo ChingHua, *et al.* 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. *Chemical Geology*, 157: 119~146.
- Jin Longyu. 1994. Petrology and geochemical characteristics of the lower cretaceous volcanic rocks in the YiShu rift zone and adjacent area[J]. *Geology of Shandong*, 10(1): 40~51(in Chinese with English abstract).
- Kuang Yongsheng, Pang Chongjin, Luo Zhenyu, *et al.* 2012. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology and geochemistry of mafic rocks from Qingshan Group, Jiaodong area: Implications for the destruction of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 073~1 091(in Chinese with English abstract).
- Li Youlian, Qiu Jiansheng and Liu Liang. 2012. Geochronology and geochemistry of sodic volcanic rocks from Shenguan in Tancheng County, Shandong Province: Implications for unraveling the nature of mantle source and petrogenesis[J]. *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[J]. *Lithos*, 113: 640~658.
- Ling Wenli, Xie Xianjun, Liu Xiaoning, *et al.* 2006. Zircon U-Pb dating on the Mesozoic volcanic suite from the QingShan Group stratotype section in eastern Shangdong Province and its tectonic significance[J]. *Science in China(Series D)*, 36(5): 401~411(in Chinese).
- Liu Hong, Qiu Jiansheng, Luo Qinghua, *et al.* 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province: Geochemical constraints[J]. *Geochimica*, 31(2): 129~140(in Chinese with English abstract).
- Liu Mingwei, Zhang Qingyu and Song Wanqian. 2003. Division of the cretaceous lithostratigraphic and volcanic sequences of Shandong[J]. *Journal of Stratigraphy*, 27(3): 247~253(in Chinese with English abstract).
- Liu Shen, Hu Ruizhong, Zhao Junhong, *et al.* 2003. Tectonic setting and petrogenesis of QingShan Formation volcanic rocks in western Shandong Province: Evidence from major elements and trace elements[J]. *Geochimica*, 32(4): 306~311(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex (rev. 2. 4): A Geochronologica Toolkit for Microsoft Excle. Berkeley Geochronology Center[J]. Special Publication, No. 1a, 1~55.
- Menzies M A, Fan W M and Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 76(1): 71~81.
- Middlemost E A K. 1985. *Magmas and Magmatic Rocks*[M]. London: Longman, 1~266.
- Niu Manlan, Xie Chenglong, Song Chuansong, *et al.* 2007. K-Ar dating of early Cretaceous volcanic rocks along the Tan-Lu fault zone and its tectonic significance[J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(2): 382~387(in Chinese with English abstract).
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 58: 63~81.
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Wang Qinghai, *et al.* 2004. Mesozoic basalt and mineral chemistry of the mantle-derived xenocrysts in Feixian, Western Shandong, China: Constraints on nature of Mesozoic lithospheric mantle[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 88~98(in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Zhou Jincheng, *et al.* 1996. Geology, Geochemistry and genesis of the Mesozoic shoshonitic volcanic rocks in Shandong Province[J]. *Earth Science*, 21(5): 546~553(in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Luo Qinghua, *et al.* 2001a. ^{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]. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 351~355(in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Xu Xisheng and Luo Qinghua. 2001b. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and source denoting of K-rich volcanic rocks lamprophyres in western Shandong Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(18): 1 499~1 508(in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Liu Liang and Li Youlian. 2012. Geochronology and geochemistry of potassic and sodic volcanic rocks in Tangtou basin, Shandong Province: Implications for lithospheric thinning beneath the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 044~1 056(in Chinese with English abstract).
- Su Shangguo, Zhou Xunruo and Gu Delin. 1999. Characteristics and evolution of Mesozoic volcanic rocks in the middle part of Tancheng-Lujiang fault belt, Yishui Area, Shandong Province[J]. *Geological*

- Review, 45(Sup.): 565~572(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[A]. Saunders AD and Norry MJ. Magmatism in the Ocean Basin[J]. London, Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Tang Jiafeng, Liu Yulin and Wang Qifei. 2008. Geochronology of Mesozoic volcanic rocks in Shandong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1333~1338(in Chinese with English abstract).
- Wan Tianfeng and Zhu Hong. 1996. The maximum sinistral strike-slip and its forming age of Tancheng-Lujiang fault zone[J]. Geological Journal of China Universities, 2(1): 14~27(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofeng, Li Zhongjian and Chen Bolin. 2000. Tanlu Fault Zone [M]. Beijing: Geological Publ. House(in Chinese).
- Wu Fuyuan and Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in the eastern China[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 29(4): 313~318(in Chinese with English abstract).
- Xia Qunke, Zheng Yongfei and Deloule E. 2003. U-Pb ages and oxygen isotope compositions of zircons from post-collisional volcanic rocks of Dabieshan[J]. Geological Journal of China Universities, 9(2): 163~171(in Chinese with English abstract).
- Xie Chenglong, Zhu Guang, Niu Manlan, *et al.* 2008. Zircon U-Pb geochronology of the late Mesozoic volcanic rocks from the Chaohu-Lujiang segment of the Tan-Lu fault zone[J]. Chinese Journal of Geology, 43(2): 294~308(in Chinese with English abstract).
- Xu Jiawei. 1984. Tancheng-Lujiang Wrench Fault System[M]. Collection of Structural Geology, (3): 18~22(in Chinese).
- Xu J W and Zhu G. 1994. Tectonic models of the Tan-Lu fault zone, eastern China[J]. International Geol. Rev., 36: 771~784.
- Xu Zhiqin. 1984. Outline of the Tan-Lu Rift Valley System[M]. Collection of Structural Geology, (3): 39~46(in Chinese).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen and Liu Xiaochun. 2002. U-Pb zircon dating of granitic gneisses in eastern Dabie mountains, Central China [J]. Chinese Journal of Geology, 37(2): 165~174(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen and Ma Fang. 2010. Zircon U-Pb SHRIMP ages of sub-volcanic bodies related with porphyritic Fe-deposits in the Luzong and Ningwu basins, Middle and Lower Yangtze River Reaches, Central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(9): 2653~2664(in Chinese with English abstract).
- Yan Jun, Chen Jiangfeng, Xie Zhi, *et al.* 2005. Studies on petrology and geochemistry of the Later Cretaceous basalts and mantle-derived xenoliths from eastern Shandong[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 99~112(in Chinese with English abstract).
- Yan Jun and Chen Jiangfeng. 2007. Geochemistry of Qingshan formation volcanic rocks from Jiaolai Basin, eastern Shandong Province: Petrogenesis and geological implication[J]. Geochimica, 36(1): 1~10(in Chinese with English abstract).
- Yan Jun, Liu Haiquan, Song Chuanzhong, *et al.* 2009. Zircon U-Pb geochronology of the volcanic rocks from Fanchang-Niugwu volcanic basins in the lower Yangtze region and its geological implications [J]. Chinese Science Bulletin, 54(16): 1716~1724(in Chinese with English abstract).
- Yin A and Nie S Y. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault system, eastern Asia[J]. Tectonics, 12(4): 801~813.
- Zhang P and Huo S. 1991. Metallogenic model of kimberlite in North China Craton, China. In: Proceeding of the Fifth Kimberlite Conference[J]. CMRM Special Publication, 92: 466~469.
- Zhang Peng, Wang Liangshu, Shi Huosheng, *et al.* 2010. The Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the Shangdong segment of the Tan-Lu fault zone[J]. Acta Geologica Sinica, 80(9): 1316~1323(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, *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[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144(2): 241~254.
- Zhang Qi, Jian Ping, Liu Dunyi, *et al.* 2003. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and its geological implications[J]. Science in China(Series D), 46(8): 830~837(in Chinese).
- Zhao Guangtao, Wang Dezi and Cao Qinchun. 1997. The geochemistry and genesis of the LaoShan granitoids, Shandong Province[J]. Geological Journal of China Universities, 3(1): 1~12(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, *et al.* 2008. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong basin and its significance[J]. Science in China(Series D), 51(10): 1470~1482(in Chinese).
- Zhou Xinhua. 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: Review and prospect[J]. Earth Sci. Front., 13: 50~64(in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Song Chuanzhong, Wang Daoxuan, *et al.* 2001. Studies on ^{40}Ar - ^{39}Ar thermochronology of strike-slip time of the Tan-Lu fault zone and their tectonic implications[J]. Science in China(Series D), 31(3): 250~256(in Chinese).
- Zhu Guang, Wang Daoxuan, Liu Guosheng, *et al.* 2004. Evolution of the Tan-Lu fault zone and its responses to plate movements in west pacific basin[J]. Chinese Journal of Geology, 39(1): 36~49(in

Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈宣华, 王小凤, 张青, 等. 2000. 郯庐断裂带形成演化的年代学研究[J]. 长春科技大学学报, 30(3): 215~220.
- 黄皓, 薛怀民. 2012. 北淮阳早白垩世金剛台组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(3): 371~381.
- 金隆裕. 1994. 沂沭裂谷及其邻区下白垩世火山熔岩地球化学特征[J]. 山东地质, 10(1): 40~51.
- 匡永生, 庞震进, 罗震宇, 等. 2012. 胶东青山群基性火山岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学和地球化学特征——对华北克拉通破坏过程的启示[J]. 岩石学报, 28(4): 1073~1091.
- 李友连, 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[J]. 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[J]. 中国科学(D辑), 36(5): 401~411.
- 刘洪, 邱检生, 罗清华, 等. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约[J]. 地球化学, 31(2): 129~140.
- 刘明渭, 张庆玉, 宋万千. 2003. 山东省白垩纪岩石地层序列与火山岩系地层划分[J]. 地层学杂志, 27(3): 247~253.
- 刘荣, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 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[J]. 地球化学, 32(4): 306~311.
- 牛漫兰, 谢成龙, 宋传中, 等. 2007. 郯庐断裂带早白垩世火山岩的 K-Ar 年龄及其构造意义[J]. 地质科学, 42(2): 382~387.
- 裴福萍, 许文良, 王清海, 等. 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[J]. 高校地质学报, 10(1): 88~98.
- 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[J]. 地球科学, 21(5): 546~553.
- 邱检生, 王德滋, 罗清华, 等. 2001a. 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, 7(3): 351~355.
- 邱检生, 徐夕生, 罗清华. 2001b. 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, 46(18): 1499~1508.
- 邱检生, 刘亮, 李友连. 2012. 山东汤头盆地钾质及钠质火山岩的年代学与地球化学-对华北克拉通岩石圈减薄的启示[J]. 岩石学报, 28(4): 1044~1056.
- 苏尚国, 周若, 顾德林. 1999. 山东沂水郯庐断裂带中段中生代火山岩特征及演化[J]. 地质论评, 45(增刊): 565~572.
- 唐嘉峰, 刘玉琳, 王启飞. 2008. 山东中生代火山岩年代学研究[J]. 岩石学报, 24(6): 1333~1338.
- 万天丰, 朱鸿. 1996. 郯庐断裂带的最大左行走滑断距及其形成时期[J]. 高校地质学报, 2(1): 14~27.
- 王小凤, 李中坚, 陈柏林. 2000. 郯庐断裂带[M]. 北京: 地质出版社.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 29(4): 313~318.
- 夏群科, 郑永飞, Deloule E. 2003. 大别山碰撞后火山岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成[J]. 高校地质学报, 9(2): 163~171.
- 谢成龙, 朱光, 牛漫兰, 等. 2008. 郯庐断裂带巢湖-庐江段晚中生代火山岩的锆石 U-Pb 年代学[J]. 地质科学, 43(2): 294~308.
- 徐嘉伟. 1984. 郯城-庐江平移断裂系统[A]. 构造地质论丛, (3): 18~22.
- 许志琴. 1984. 郯庐裂谷系概述[A]. 构造地质论丛, (3): 39~46.
- 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 2002. 大别山东部花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年代学[J]. 地质科学, 37(2): 165~174.
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2010. 长江中下游地区庐(江)-枞(阳)和宁(南京)-芜(湖)盆地内与成矿有关潜火山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 26(9): 2653~2664.
- 闫峻, 陈江峰. 2007. 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[J]. 地球化学, 36(1): 1~10.
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等. 2005. 鲁东晚白垩世玄武岩及其中幔源包体的岩石学和地球化学研究[J]. 岩石学报, 21(1): 99~112.
- 闫峻, 刘海泉, 宋传中, 等. 2009. 长江中下游繁昌-宁芜火山岩盆地火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 54(16): 1716~1724.
- 张鹏, 王良书, 钟锴, 等. 2007. 郯庐断裂带的分段性研究[J]. 地质论评, 53(5): 586~594.
- 张旗, 简平, 刘敦一, 等. 2003. 宁芜火山岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国科学(D辑), 33(4): 309~314.
- 赵广涛, 王德滋, 曹钦臣. 1997. 崂山花岗岩岩石地球化学与成因[J]. 高校地质学报, 3(1): 1~12.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 2008. 安徽庐枞(庐江-枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义[J]. 中国科学(D辑), 38(11): 1342~1353.
- 周新华. 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究的若干问题[J]. 地学前缘, 13(2): 50~64.
- 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 2001. 郯庐断裂带走滑时代的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学研究及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 31(3): 250~256.
- 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 2004. 郯庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应[J]. 地质科学, 39(1): 36~49.