

胶莱盆地南缘白垩系青山群火山岩地球化学特征

付文钊¹⁾, 杨锋杰^{1,2)}, 周新玉¹⁾, 毛光周^{1,2)}, 金爱文^{1,2)}, 陈桥^{1,2)}, 姜楠¹⁾, 郭帮杰¹⁾

1) 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛, 266590;

2) 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东青岛, 266590

内容提要:在胶莱盆地南缘开展1:5万区调工作的基础上,对胶莱盆地南缘的白垩纪青山群火山岩进行了层型剖面实测及系统采样,经过化学分析及数据整理,得出胶莱盆地南缘白垩纪青山群火山岩SiO₂的含量为51.08%~74.86%,全碱(Na₂O+K₂O)含量的变化范围为3.2%~8.8%,Al₂O₃的含量集中于13.18%~17.3%之间,全铁(TFe₂O₃)含量的变化范围在0.86%~10.48%之间;火山岩微量元素强烈富集大离子亲石元素La和Nd,亏损高场强元素Nb、P和Ti,轻稀土元素(LREE)相对富集,重稀土元素(HREE)相对亏损。后弃组与石前庄组火山岩的地球化学特征较相似,以酸性火山岩为主,而八亩地组和方戈庄组火山岩的地球化学特征较相似,以中—中偏基性火山岩为主;后期喷发的石前庄组与方戈庄组火山岩较前期的后弃组、八亩地组火山岩碱性物质含量增加。通过综合分析得出,胶莱盆地南缘白垩纪青山群火山岩是一套中—酸性过铝质、富钾钙碱性为主的火山岩,其四个不同喷发期次的岩浆应来源于同一岩浆源——下地壳,可能与扬子板块的俯冲作用有关,岩浆形成演化过程中表现出强烈的结晶分异作用,基于青山群火山岩岩性及岩浆源分析,认为其不属于典型的双峰式火山喷发。

关键词:胶莱盆地;白垩纪;火山岩;地球化学;主量元素特征;微量元素特征

本文所提的胶莱盆地南缘其具体地理位置为N36°00'E119°30'~N36°20'E120°00'的经纬度范围,位于山东省潍坊高密市南部,青岛胶州市西南部,在大地构造区域上属于胶莱盆地南部(图1)。山东中生代火山岩与许多重大地质事件有密切关联,扬子板块与华北板块俯冲碰撞、华北岩石圈减薄和太平洋板块俯冲引发的构造体制转换等都与其有不可分割的联系(牛漫兰等,2002;邓晋福等,2003;翟明国等,2003;刘燊等,2003;凌文黎等,2006;Menzies et al., 2007;任凤楼等,2007,2008)。前人对胶莱盆地白垩系火山岩的研究相对较多,主要集中于玄武岩、中性火山岩等的岩石学、地球化学、地质年代学等(韩宗珠等,1993;Zhang H F et al., 2002;裴福萍等,2004;凌文黎等,2006;孟繁聪等,2006;刘进等,2007;唐嘉锋等,2008;匡永生等,2012a,2012b;邱检生等,2001a,2001b,2004,2012;Qiu J S et al., 2002),尤其对青山群的玄武岩的研究,取得了丰富的研究成果(凌文黎等,2006;闫峻

等,2007)。综合前人的研究发现,他们的分析强调青山群火山岩其中的某种岩性或某一性质,并未按火山喷发期次对岩石化学特征进行详尽的讨论,本文作者在对胶莱盆地南缘开展1:5万区调工作的基础上,对胶莱盆地南缘青山群火山岩层型剖面——河西郭—冷家村青山群岩石剖面进行了剖面实测及系统采样和样品的主、微量元素(稀土元素)分析,并对化学分析数据进行归纳整理,总结了胶莱盆地南缘青山群不同喷发期次火山岩的地球化学特征,在此基础上对岩浆来源及其演化过程进行了初步探讨。

1 区域地质背景

胶莱盆地呈北东东向不规则的带状展布,西部宽,东部窄。西部以沂沭断裂带为界,与沂沭断裂带内的盆地相邻;南部边界由于沂沭断裂带的拖曳作用,呈向北凸起的弧形,大致以莒县—五莲—青岛一线为界,其南属大别—苏鲁超高压变质带的一部分——胶南隆起区;东部延伸入黄海;北部与胶北隆

注:本文由国家自然科学基金项目(41202083、41340026)、高校博导类基金项目(20113718110007)、山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(BS2013HZ024)、山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室项目(2013003)和山东科技大学研究生科技创新基金项目(YCA120317)联合资助。

收稿日期:2013-04-25;改回日期:2013-10-16;责任编辑:郝梓国,黄敏。

作者简介:付文钊,男,1987年生,在读博士,矿产普查与勘探专业,Email:fwzh04@163.com。通讯作者:杨锋杰,男,教授,主要从事遥感构造地质学,基础地质学等研究,Email:yangfj126@126.com。

起区超覆接触,局部为断层接触,中部受牟平—即墨断裂带的影响、控制。胶莱盆地经历了多阶段构造演化历史,盆地伸展构造出现时空叠加与复合,形成复杂的伸展构造样式(唐华风等,2003;翟慎德,2003;吴智平等,2004;任凤楼等,2007;李金良等,2007;张岳桥等,2008);同时盆地原形遭受了后期不同类型改造,成为一个典型的复合改造型断陷盆地。

胶莱盆地以牟平—即墨断裂带为界,划分为胶莱盆地东部和西部,盆地西部进一步可划分为诸城凹陷、柴沟地垒、高密凹陷、大野头凸起、莱阳凹陷五个三级单元;盆地东部为海阳凹陷。本文的研究区主要涉及诸城凹陷北部、柴沟地垒的中部及高密凹陷的南缘(图 1),百尺河断裂横贯研究区的东西部。

研究区的地质可划分为基底和盖层两大岩系。基底岩系主要为古元古界的荆山群粉子山群。盖层

岩系由白垩系、古近系和第四系组成,研究区内白垩系总体出露情况较好,主要沉积 3 套地层:莱阳群河湖相碎屑岩系;青山群中酸性火山喷发岩系和王氏群红色河湖相碎屑岩系,局部夹有玄武岩夹层(刘明涓等,2003;李守军等,2010)。

青山群为一套中酸性火山喷发岩系,与莱阳群沉积时具有两个独立盆地不同,青山群沉积期胶莱盆地范围进一步扩大,成为一个统一的盆地。与下伏莱阳群角度不整合接触,向外围超覆不整合于胶南造山带、胶北隆起前寒武纪变质基底及沂沭断裂带汞丹山凸起奥陶纪地层之上,与上覆王氏群角度不整合接触。

2 岩石学特征

胶莱盆地南缘白垩纪青山群火山岩主要分为四

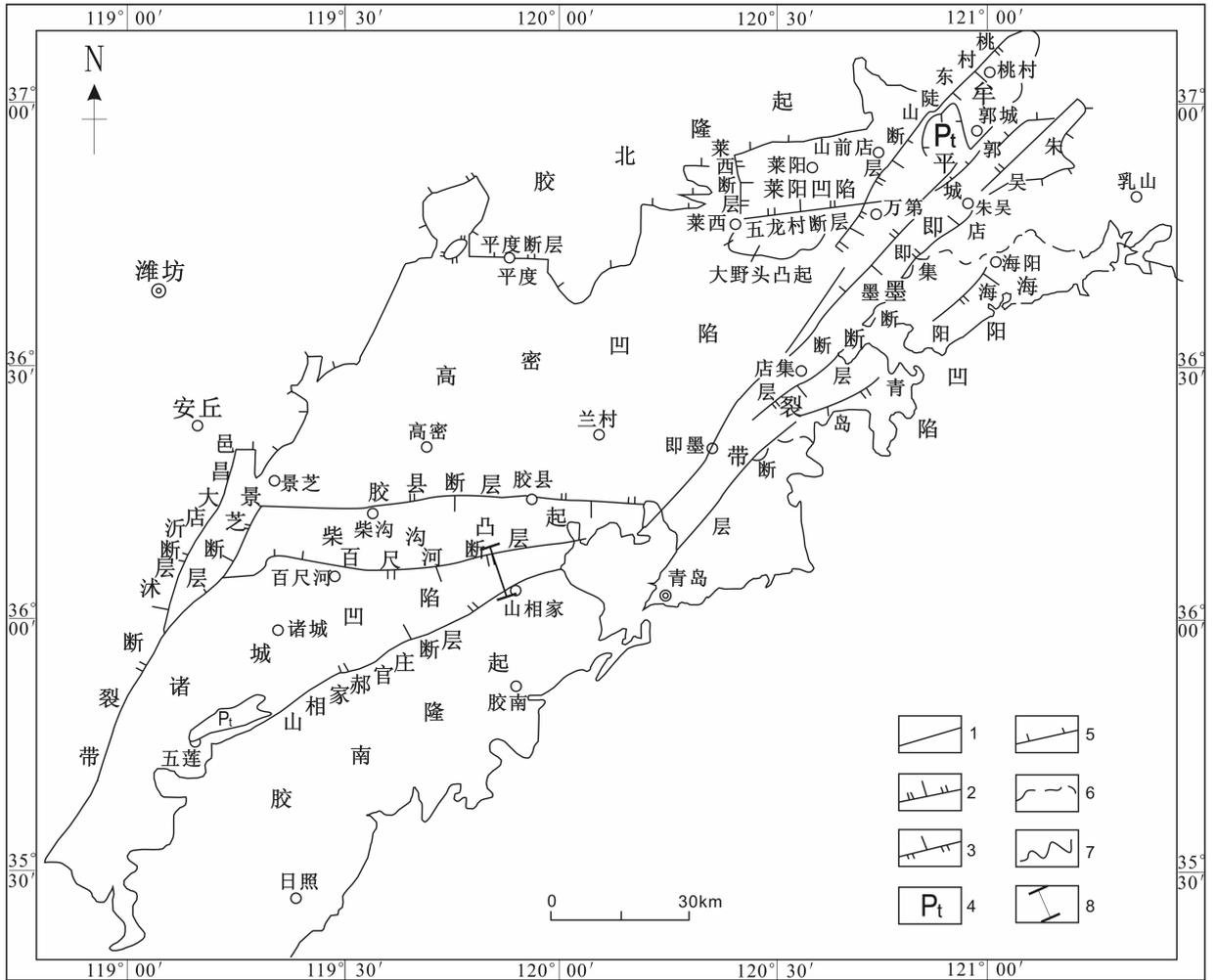


图 1 胶莱盆地构造分区及研究区位置(据张岳桥等,2008)

Fig. 1 Study area location and tectonic division of Jiaolai Basin (Zhang Yueqiao et al., 2008)

- 1—断层;2—正断层;3—逆断层;4—元古界;5—白垩系尖灭层;6—侵入接触线;7—海岸线;8—实测剖面位置
- 1—fault;2—normal fault;3—reverse fault;4—Proterozoic;5—Cretaceous pinch layer;6—intrusive contact line;
- 7—coastline;8—Location of measure section

个喷发旋回,是一套岩性复杂的中基性和中酸性火山喷发岩系,其中夹有厚度不等的碎屑岩(唐华凤, 2003;李金良等,2007;施炜等,2003),根据火山活动及岩石地球化学等特征,分别对应四个组(图 2,张增奇等,1996)。第 I 旋回:后乔组(K_1qh),以紫灰色流纹质凝灰岩为主;第 II 旋回:八亩地组(K_1qb),以中一基性灰紫色玄武安山岩为主;第 III 旋回:石前庄组(K_1qs),主要为浅灰紫色流纹质凝灰岩;第 IV

旋回:方戈庄组(K_1qf),为灰色玄武粗安岩。各组岩石特征分述如下^①。

(1)后乔组:是青山群中发育程度较差的一个组,为青山期火山活动第 I 旋回喷发产物,主要岩性为流纹质凝灰岩(图 3a)、流纹质角砾凝灰岩、流纹质火山角砾岩、流纹质角砾熔岩,局部夹砂砾、砂岩及粉砂岩,不同地段夹层岩性及下伏层位差别较大,与下伏曲格庄组角度不整合接触,与上覆八亩地组

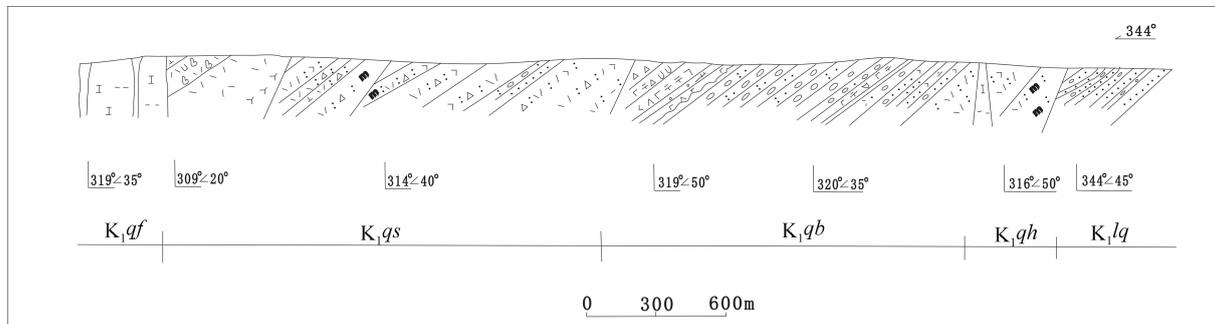


图 2 胶州市河西郭—冷家村下白垩统青山群实测剖面示意图

Fig. 2 Measured section of Lower Cretaceous Qingshan Formation in Hexiguoguo-Lengjiacun, Jiaozhou

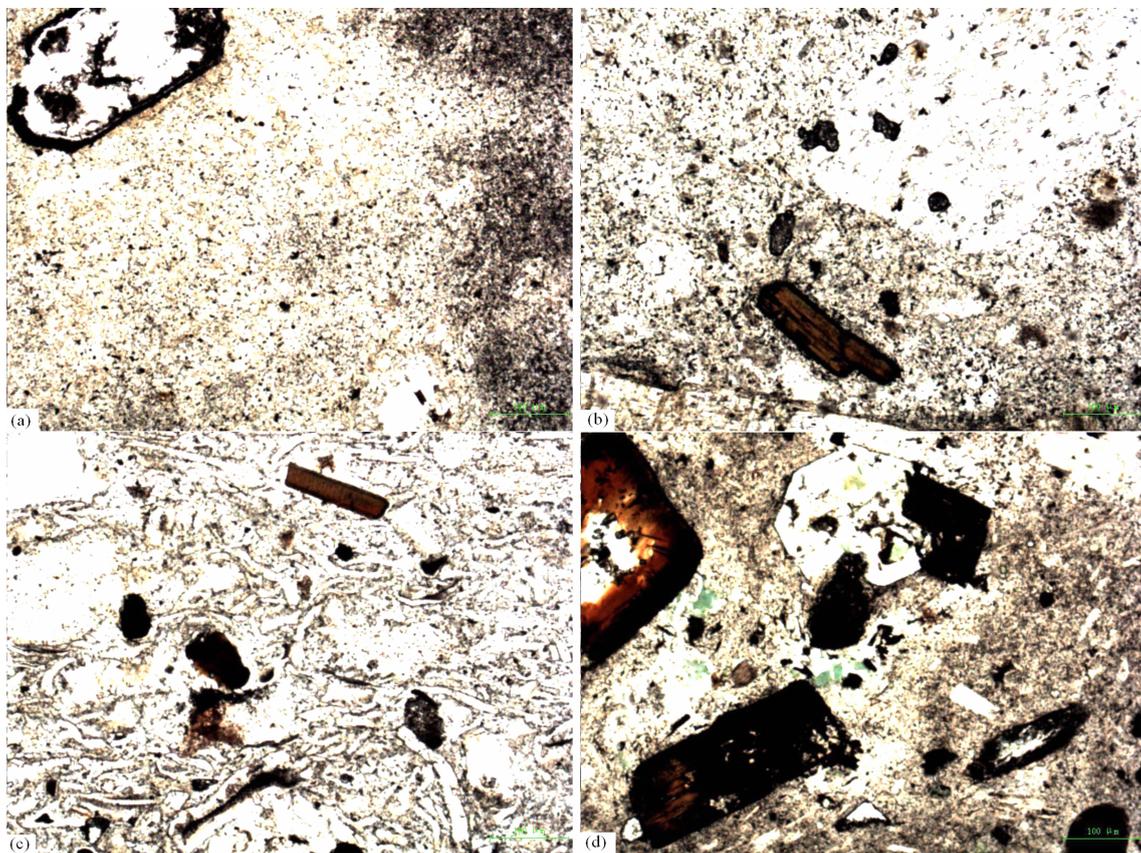


图 3 胶莱盆地南缘火山岩单偏光镜下特征

Fig. 3 Microphoto of volcanic rocks in Jiaolai Basin southern margin

- (a) 后乔组含晶屑凝灰岩; (b) 八亩地组安山岩; (c) 石前庄组流纹岩; (d) 方戈庄组粗安岩
- (a)—Tuff with crystal of Houkuang Formation; (b)—andesite of Bamudi Formation;
- (c)—rhyolite of Shiqianzhuang Formation; (d)—trachyandesite of Fanggezhuang Formation

整合接触。

(2)八亩地组:是青山群发育最完整、分布最广的一个组,为青山期火山活动最强烈的第Ⅱ旋回喷发产物。主要岩性为安山岩(图 3b)、玄武安山岩、安山质集块角砾岩、火山角砾岩等,以中基性火山岩发育为特征,其中局部可见紫色、灰色砂—砾岩夹层。该组的厚度 27~2334m 间,火山机构附近的增厚至 3000m。与下伏后乔组、上覆石前庄组均整合接触。

(3)石前庄组:为青山期火山活动第Ⅲ旋回喷发产物,主要岩石组合为流纹质凝灰角砾岩、凝灰岩、熔结凝灰岩、流纹岩(图 3c),部分地区顶部有英安岩。石前庄组层位比较稳定,岩石组合横向变化不大,岩石成分以酸性为主,易于对比。石前庄组整合或喷发不整合于八亩地组之上,其上被青山群方戈庄组整合覆盖。

(4)方戈庄组:为青山期火山活动第Ⅳ旋回喷发产物,为一套偏碱性的中基性火山岩,岩性组合为玄武粗安岩(图 3d)、角闪安山岩等夹少量正常沉积碎屑岩。厚度较小,喷发规模和强度比八亩地组弱得多,方戈庄组整合或喷发不整合于石前庄组之上,其上被王氏群林家庄组角度不整合覆盖。

3 地球化学特征

3.1 分析测试方法

本次研究选取了 21 件火山岩样进行了主量元素分析、27 件火山岩样进行了微量元素分析、6 件样品进行了稀土元素分析。主量元素与微量元素分析由山东省第四地质矿产勘查院实验测试中心完成的,主量元素分析检测依据 GB/T14506-2010,检测环境温度为 19℃,相对湿度 50%,主要检测仪器设备为 FA2004 电子分析天平、Axios 荧光光谱仪和 50ml 酸式滴定管;微量元素分析检测依据 DZG20-10-1990,检测环境温度为 19℃,相对湿度 50%,主要检测仪器设备为 FA2004 电子分析天平、Axios 荧光光谱仪、WSP-1 平面光栅光谱仪和 AA6300 原子吸收分光光度计。稀土元素分析测试由青岛中科院海洋研究所完成,采用的仪器是等离子质谱仪(ICPMS-Excell 和 X-series)。

3.2 主量元素特征

主量元素分析结果见表 1,由 21 个火山岩样品的全岩氧化物分析结果能够看出,胶莱盆地南缘的白垩纪青山群火山岩 SiO_2 含量的变化范围为 51.08%~74.86%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量的变化

范围为 3.2%~8.8%, TiO_2 的含量较低,为 0.36%~1.45%之间, Al_2O_3 的含量集中于 13.18%~17.3%之间,全铁(TFe_2O_3)含量的变化范围在 0.86%~10.48%之间,表明该套火山岩以中—酸性火山岩为主。

火山岩样品的主要氧化物含量去掉 CO_2 、 H_2O 的含量和扣除烧失量之后,将其余所有数据重新换算成 100%,在国际地科联推荐的火山岩分类的 TAS 图解(Le Maitre et al., 1989)上投图(图 4),此次所取的 21 个火山岩样品中,后乔组和石前庄组比较集中,都落在了流纹岩区域,八亩地组主要落在了玄武安山岩、安山岩、粗面安山岩区域,方戈庄组主要落在了粗安岩、玄武粗面安山岩和粗面岩区域。在 TAS 分类在图解上还可以看到,火山岩样品中的方戈庄组和石前庄组样品更接近于 Ir 分界线,方戈庄组中部分样品位于 Ir 分界线上,说明了两个组

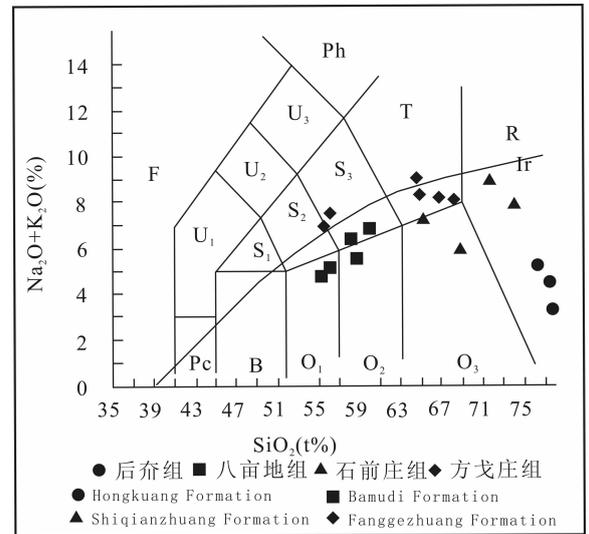


图 4 胶莱盆地南缘青山群火山岩 TAS 图解(路远发, 2004)

Fig. 4 TAS diagram for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin(LU Yuanfa, 2004)

Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; O_1 —玄武安山岩; O_2 —安山岩; O_3 —英安岩; R—流纹岩; S_1 —粗面玄武岩; S_2 —玄武粗面安山岩; S_3 —粗面安山岩; T—粗面岩、粗面英安岩; F—副长石岩; U_1 —碱玄武岩、碧玄武岩; U_2 —响岩质碱玄武岩; U_3 —碱玄武质响岩; Ph—响岩; Ir—Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性(Le Maitre, 1981; Irvine, 1971)

Pc—Picrite basalt; B—basalt; O_1 —basaltic andesite; O_2 —andesite; O_3 —quartz andesite; R—rhyolite; S_1 —trachy basalt; S_2 —basaltic trachyandesite; S_3 —trachyandesite; T—trachyte, toscanite; F—foidite; U_1 —tephrite, basanite; U_2 —phonolite tephrite; U_3 —tephrite phonolite; Ph—phonolite; Ir—boundary of Irvine, the up of Ir is alkalinity, and the down of it is sub-alkaline(Le Maitre, 1981; Irvine, 1971)

的含碱度相对较高,而且方戈庄组高于石前庄组。后乔组和八亩地组则相对较远离 Ir 分界线,后乔组偏离 Ir 分界线更远,说明了两组的含碱度较低,且后乔组低于八亩地组。由此可见,研究区青山群火山岩早期喷发产物含碱度相对偏低,后期喷发产物含碱度相对偏高,随着喷发期次的变化,火山岩含碱度呈现由低到高增加的趋势。样品的 Rittmann 指数 σ 也说明了同样的规律(表 1),火山岩样品的 Rittmann 指数 σ 的变化范围为 0.33~4.73,后乔组、八亩地组和石前庄组火山岩样品的 Rittmann 指数 σ 均小于等于 3,方戈庄组火山岩样品中部分 Rittmann 指数 σ 大于 3,说明后乔组、石前庄组火山岩为酸性钙碱性系列,八亩地组、方戈庄组以中一中偏基性钙碱性系列为主。

样品在 K_2O/SiO_2 关系图解、 K_2O/Na_2O 关系图解和钾质-钠质分类图解上均表现富钾的特点,由此表明该套青山群火山岩以钾质岩为主,并表现出向高钾过渡的特点(图 5、图 6 和图 7);在火山岩 AFM 图上(图 8),样品几乎均在钙碱性区域,极少数落在拉斑玄武系列的区域内,这与金隆裕(1994)

对鲁东地区火山岩的 AFM 图解分析结果一致。在火山岩铝饱和指数图解上(图 9);火山岩样品主要位于过铝质岩石区域,仅有一个样品在准铝质(偏铝质)区域,表明该套火山岩以过铝质火山岩为主。Hark 图解上(图 10),火山岩的 MgO 、 Fe_2O_3 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 和 TiO_2 与 SiO_2 的含量成明显的反比关系, Na_2O 、 K_2O 和 CaO 与 SiO_2 无明显的规律,说明样品来自单一岩浆,但在分离结晶过程中,分离相矿物组合发生了变化。

3.3 微量元素特征

胶莱盆地南缘的火山岩微量元素分析结果如表 2,在微量元素蛛网图上(图 11),后乔组样品的大离子亲石元素 La、Nd 和高场强元素 Th、Hf 为正异常,相对富集,大离子亲石元素 Ba 和高场强元素 Nb、P、Zr、Ti 出现负异常,表现为亏损;八亩地组样品的 Ba、La、Nd 等大离子亲石元素和高场强元素 Hf 为正异常,表现为富集,高场强元素 Nb、P、Ti 等相对亏损;石前庄组样品的大离子亲石元素 La、Nd 和高场强元素 Th、Hf 为正异常,相对富集,大离子亲石元素 Ba 和高场强元素 Nb、P、Ti 为负异常,相对

表 1 胶莱盆地南缘青山群火山岩主量元素分析结果(%)

Table 1 Major element (%) analyzing result of volcanic rocks in Jiaolai Basin southern margin

时代	样号	SiO ₂	TFe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	总量	σ
K ₁ qh	CG02-26-1	74.86	2.65	13.47	0.44	0.43	0.39	2.70	1.67	0.04	0.13	96.80	0.6
	CG03-11''	73.79	1.54	13.18	0.24	1.31	1.78	2.86	0.34	0.02	0.01	95.08	0.33
	DXMGZ-1	76.42	0.86	14.15	0.06	0.05	0.11	4.14	2.08	0.03	0.01	97.93	1.16
	DXMGZ-2	72.61	1.02	14.64	0.07	1.78	0.17	4.30	0.69	0.04	0.01	95.34	1.16
K ₁ qb	DC05-01	57.17	8.06	16.49	1.03	1.52	4.18	2.91	3.61	0.11	0.27	95.37	3.00
	CG03-13	52.30	7.62	15.10	0.99	5.54	6.55	2.34	2.42	0.07	0.48	93.43	2.44
	PJ12-01	55.26	6.45	14.95	0.89	6.56	4.58	3.13	2.93	0.09	0.3	95.15	3.0
	DXSM-1	51.08	10.48	17.3	1.45	2.46	4.41	2.83	1.43	0.16	0.60	92.22	2.25
	DJGZ-1	57.35	6.34	14.98	0.91	6.41	5.92	2.56	2.73	0.10	0.36	97.68	1.95
	DJGZ-2	57.58	6.47	15.33	0.92	6.60	5.33	2.59	2.79	0.09	0.37	98.10	1.99
DJGZ-3	57.15	6.38	14.96	0.91	7.35	5.22	2.55	2.79	0.10	0.37	97.80	2.02	
K ₁ qs	CG01-09	62.41	1.92	9.79	0.35	8.98	1.35	2.48	3.00	0.09	0.11	90.50	1.55
	Th-3	64.10	4.61	14.48	0.60	5.58	2.08	4.52	2.42	0.100	0.13	98.64	2.28
	PJ20-4	70.42	2.57	14.86	0.36	0.94	0.41	5.98	2.82	0.05	0.04	98.47	2.82
	DHFS-1	71.93	1.08	14.66	0.08	1.89	0.31	4.41	3.11	0.06	0.01	97.55	1.95
K ₁ qf	PJ26-2	66.73	5.11	15.47	0.55	1.31	0.74	4.01	3.91	0.05	0.20	98.18	2.64
	CG02-10'	63.28	4.52	17.16	0.50	2.17	1.42	3.60	5.26	0.06	0.17	98.16	3.87
	LY1	53.83	10.06	15.34	2.72	3.7	2.31	2.67	4.49	0.13	0.66	95.92	4.73
	Th-1	63.69	4.81	15.58	0.61	2.79	2.36	3.71	4.47	0.07	0.19	98.30	3.23
	Th-2	53.70	8.14	15.89	1.28	5.23	5.28	3.45	3.13	0.080	0.57	96.76	4.05
	Jm-1	65.44	3.74	15.31	0.52	2.59	2.17	4.06	3.91	0.070	0.15	97.99	2.83

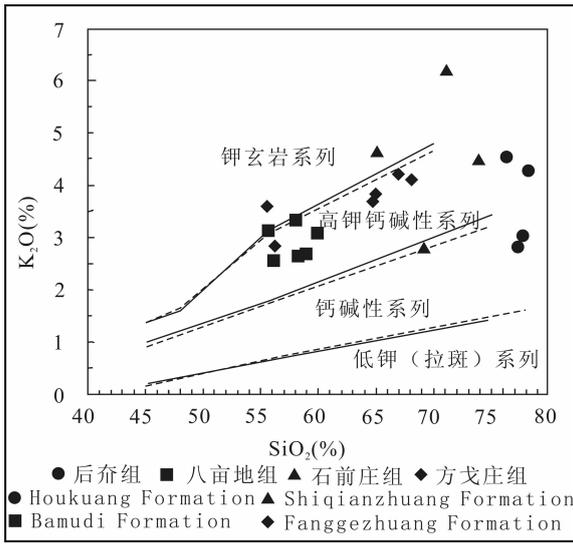


图 5 胶莱盆地南缘青山群火山岩 K_2O/SiO_2 图解(实线据 Peccerillo, et al., 1976; 虚线据 Middlemost, 1985; 路远发, 2004)

Fig. 5 K_2O/SiO_2 diagram for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin (The real line is from Peccerillo et al., 1976, and the dotted line is from Middlemost, 1985; LU Yuanfa, 2004)

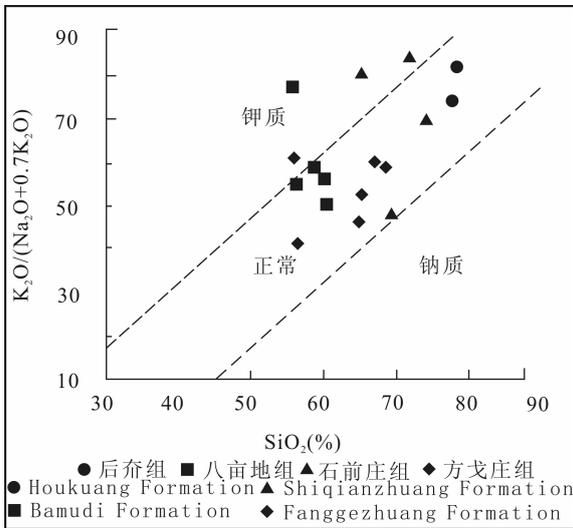


图 6 胶莱盆地南缘青山群火山岩钾质、钠质分类图解 (路远发, 2004)

Fig. 6 K-Na classification diagram for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin (LU Yuanfa, 2004)

亏损;方戈庄组样品富集大离子亲石元素 Ba、La、Nd, 亏损高场强元素 Nb、P、Ti。四套火山岩的大离子亲石元素 La 和 Nd 均表现出了较明显的正异常, 高场强元素 Nb、P 和 Ti 均表现出了较明显的负异常;后夙组与石前庄组相对于八亩地组与方戈庄组

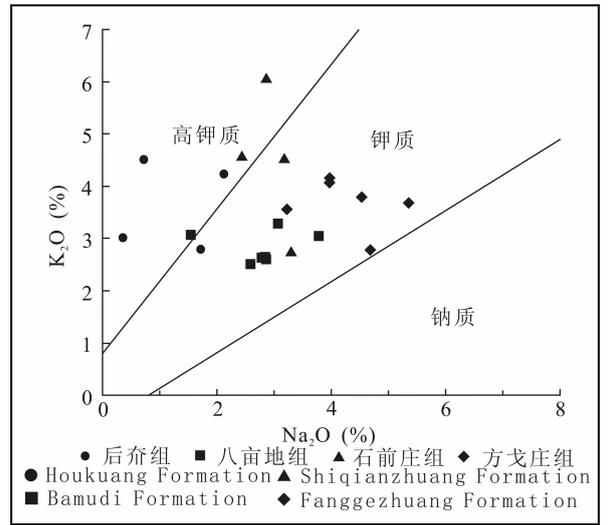


图 7 胶莱盆地南缘青山群火山岩 K_2O-Na_2O 关系图解 (据 Middlemost, 1975;路远发, 2004)

Fig. 7 K_2O-Na_2O diagram for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin (Middlemost, 1975; LU Yuanfa, 2004)

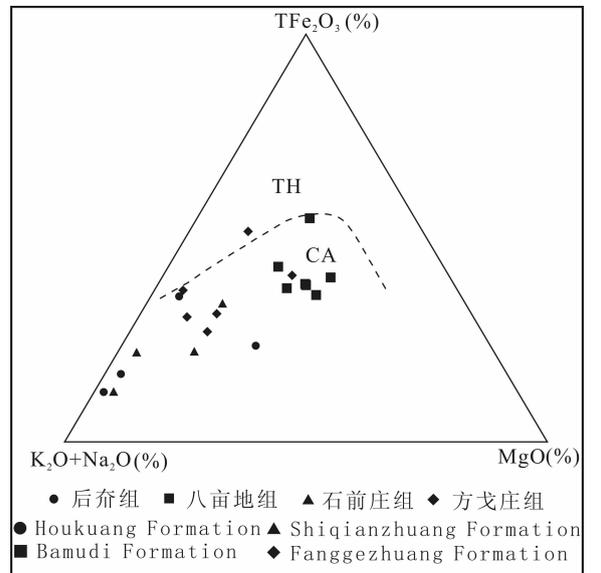


图 8 胶莱盆地南缘青山群火山岩 $FeO^*-Na_2O+K_2O-MgO$ (FAM) 图(路远发, 2004)

Fig. 8 $FeO^*-Na_2O+K_2O-MgO$ (FAM) diagram for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin(LU Yuanfa, 2004)

表现出富 Hf、亏 Ba 的性质,石前庄组 P 和 Sr 的亏损程度要明显高于其他三组。综上,在微量元素特征上,后夙组和石前庄组具有较高的相似性,富集大离子亲石元素 La 和 Nd、高场强元素 Th 和 Hf, 亏损大离子亲石元素 Ba 和高场强元素 Nb、P 和 Ti; 八亩地组和方戈庄组具有较高的相似性,富集大离

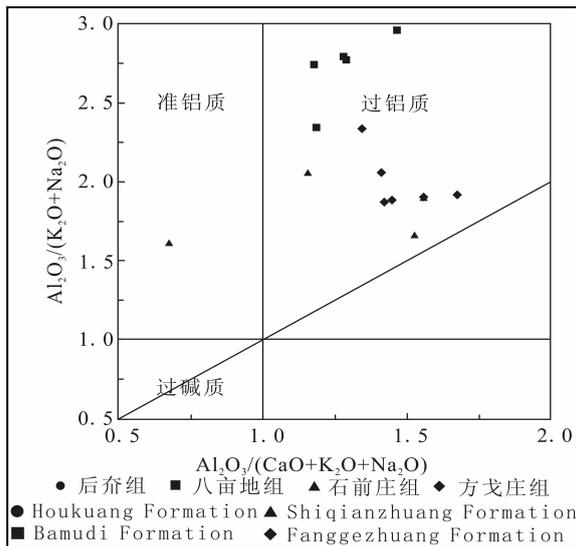


图9 胶莱盆地南缘青山群火山岩铝饱和指数图解(路远发, 2004)

Fig. 9 Aluminum saturation index iagram for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin(LU Yuanfa, 2004)

子亲石元素 Ba、La 和 Nd, 亏损高场强元素 Nb、P、Ti 和 Hf; 四个喷发期次元素差异性较小, 大部分样品 Zr/Hf 为 30~52 之间, 推测青山群四个喷发期次的火山岩应该属于同源岩浆喷发, 根据其微量元素蛛网图走势, 可以判断青山群四个喷发期次的火山岩岩浆来自于地壳。某些元素的差异性说明岩浆在喷发过程中经历了高度的演化。

Nb 的负异常是大陆地壳的特征, 通常指示地壳物质参与了岩浆过程(Hugh et al., 2000)。Nb、Ti 的负异常通常被解译为与俯冲作用有关的火山岩的特征(Condie, 2001)。胶莱盆地南缘的火山岩均表现出高场强元素 Nb、P、Ti 的负异常, 据此可以推断青山群四个喷发期次的火山岩岩浆极有可能来自于下地壳, 可能与扬子板块的俯冲作用有关。

3.4 稀土元素特征

研究区青山群石前庄组与方戈庄组稀土元素分析结果见表 3, 火山岩稀土元素总量(Σ REE)介于 $217.88 \times 10^{-6} \sim 330.09 \times 10^{-6}$ 范围之间, LREE 在

表 2 胶莱盆地南缘青山群火山岩微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace element ($\times 10^{-6}$) analyzing result of volcanic rocks in Jiaolai Basin southern margin

样号	时代	Rb	Ba	Th	Nb	La	Ce	Sr	P	Nd	Zr	Hf	Ti	Y
K ₁ qh	PJ06-5-1	120	925	16.8	13.8	90.2	142.6	171.2	277	50.5	238	6.6	1606	19.8
	PJ06-5-2	148	998	19.7	16.9	96.4	156.5	217.0	231	59.2	258	6.8	1745	23.1
	PJ08-2	166	1227	17.5	15.5	72.9	119.9	173.1	368	43.8	290	8.1	1826	19.5
	PJ09-01	121	1083	17.6	15.7	77.5	129.7	145.5	338	50.8	261	6.9	1780	18.8
	PJ11-03-1	90	759	13.8	20.1	95.0	143.0	232.1	579	56.7	311	8.8	3155	26.4
	PJ12-03	78	1053	14.5	13.2	96.6	155.6	280.5	536	62.5	308	8.5	3067	19.9
K ₁ qb	PJ04-13	105	1977	8.4	13.2	60.8	83.4	385.6	693	35.7	246	5.2	2381	17.6
	PJ08-5-2	148	1878	4.8	17.2	63.8	103.5	591.4	1995	43.6	317	6.1	5029	21.3
	PJ08-6	82	1566	5.2	13.5	55.5	101.9	451.2	1637	44.0	287	6.2	4417	20.2
	PJ08-8	48	1593	2.0	12.4	60.3	97.2	732.5	2124	45.5	240	5.2	6482	21.3
	PJ11-03-2	138	1418	8.6	13.9	67.1	118.2	518.1	2157	45.1	310	7.6	5115	19.6
	PJ11-05	89.8	1713	9.3	9.8	58.6	104	493.3	1244.3	38.5	256.6	5.5	3121.1	16.5
	PJ16-2	102	1448	6.1	14.3	68.4	118.3	696.4	2410	47.2	293	7.3	5686	22.7
PJ16-3	93.9	1591.2	3.9	16.6	71.1	111.3	575.3	2389.4	52.3	292.8	6.3	6070.6	20.8	
K ₁ qs	P6B1	165	616	22.4	29.3	72.3	112.8	72.7	247	40.3	197	5.9	1584	21.3
	P6B2	156	707	18.8	22.3	40.3	70.1	55.2	99	28.5	155	4.3	1071	15.8
	P6B3	121	749	15.5	21.0	67.5	102.7	89.2	333	41.9	251	6.8	1660	21.0
	P6B4	161	618	19.2	30.4	91.1	159.9	131.4	247	63.9	409	12.1	2221	28.9
	P6B5	156	536	17.7	30.6	50.5	89.2	42.8	107	36.2	261	8.1	1345	28.7
	P6B6	130	422	16.8	25.2	49.0	90.0	46.9	119	34.8	221	7.3	1163	27.0
	P6B8	208	219	20.7	47.3	39.9	71.7	38.3	112	38.8	315	10.6	1200	37.2
	P6B9	234	158	21.8	45.6	45.5	84.5	25.8	84	39.4	301	10.0	1092	43.5
	P6B10	210	294	19.0	45.5	35.4	66.4	25.4	63	30.0	306	10.3	1072	34.1
	K ₁ qf	P6B11	113	2077	4.7	20.5	62.0	96.5	228.5	480	37.6	371	7.8	2751
P6B12		113	2004	7.2	18.8	93.5	151.8	276.9	947	55.8	346	7.5	3517	26.4
P6B13		103	2219	7.7	19.4	80.0	133.5	395.1	968	47.7	325	6.4	3305	24.1
P6B15		131	2409	8.0	20.2	79.6	127.0	544.9	1419	51.8	379	7.5	4429	25.6

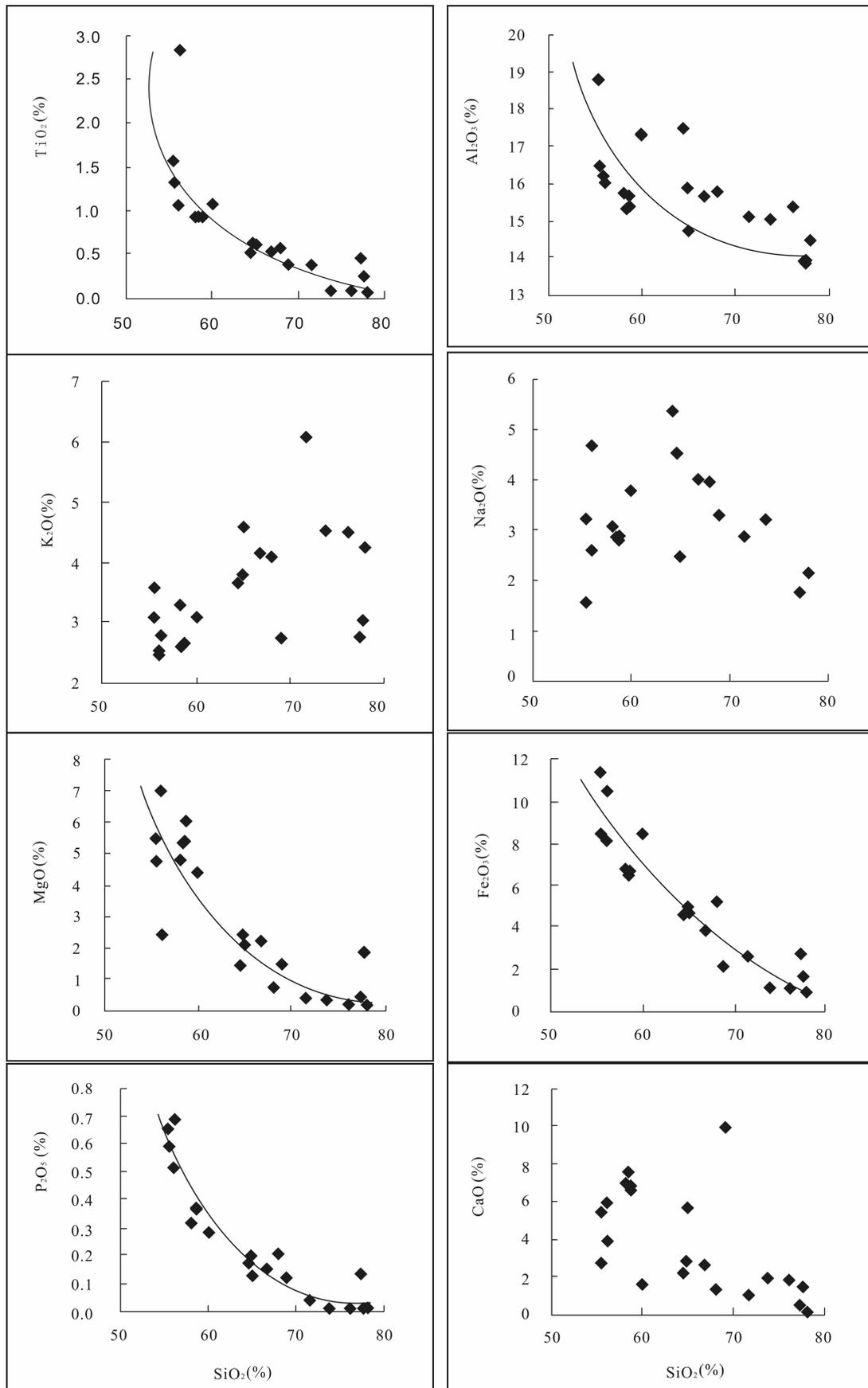


图 10 胶莱盆地南缘青山群火山岩 Hark 图解(路远发, 2004)

Fig. 10 Hark diagram for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin(Lu Yuanfa, 2004)

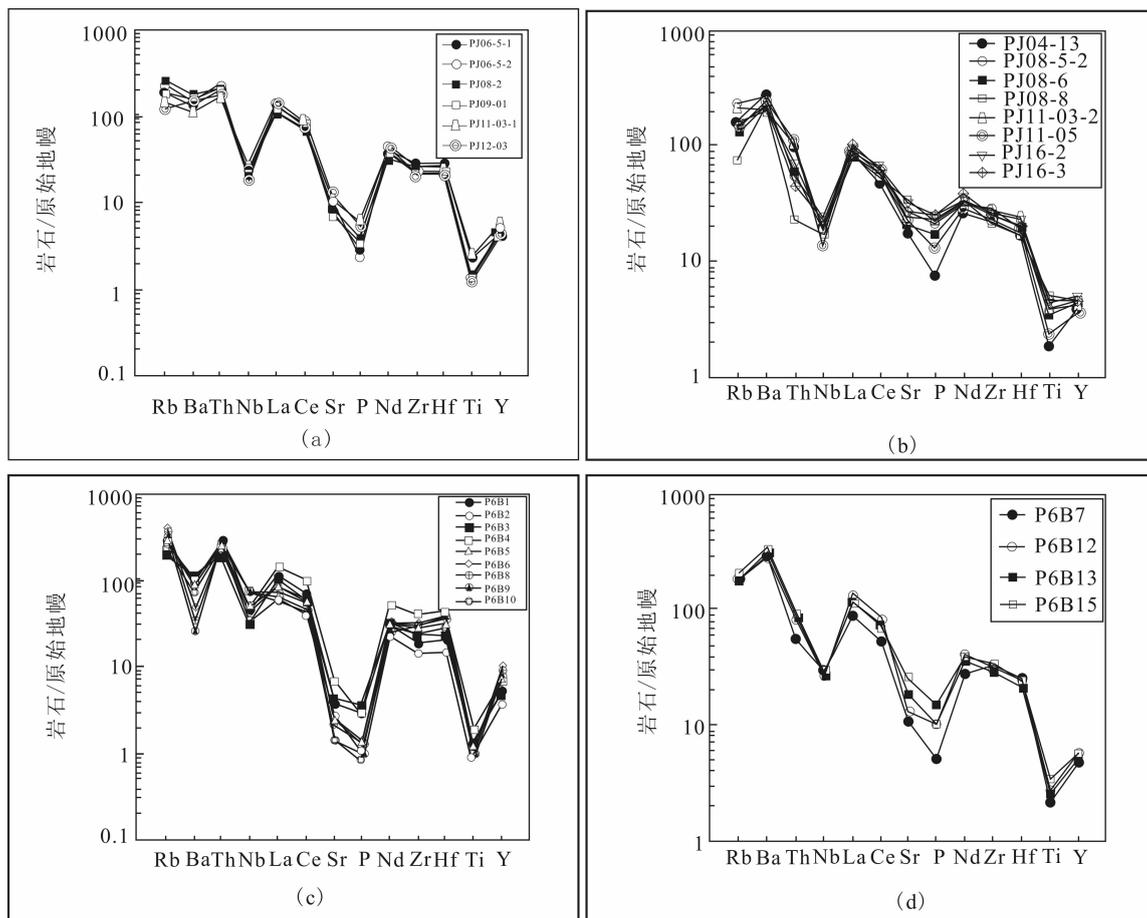


图 11 胶莱盆地南缘青山群火山岩微量元素原始地幔标准化配分曲线(路远发, 2004)

Fig. 11 Primitive mantle-normalized trace element spider patterns for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin(LU Yuanfa, 2004)

(a) 一后夼组; (b) 一八亩地组; (c) 一石前庄组; (d) 一方戈庄组

(a)—Houkuang Formation; (b)—Bamudi Formation; (c)—Shiqianzhuang Formation; (d)—Fanggezhuang Formation)

$198.975 \times 10^{-6} \sim 309.87 \times 10^{-6}$ 之间, HREE 在 $12.84 \times 10^{-6} \sim 21.19 \times 10^{-6}$ 之间, LREE/HREE 为 $10.52 \sim 19.92$, $(La/Yb)_N$ 为 $14.23 \sim 27.55$ 。在稀土元素标准化配分曲线图上(图 12), 石前庄组样品的 Σ REE 明显低于方戈庄组, 而且方戈庄组的 LREE 和 HREE 均高于石前庄组, 表明随着时间的演化, 岩浆成分逐渐富含 REE(主要为 LREE), 这很可能与岩浆源区的性质和结晶分异的程度有关。配分曲线呈现明显的右倾趋势, 轻重稀土分馏明显, 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损, 轻稀土元素的分馏程度高于重稀土元素分馏程度, 这些特征同样可以推断出石前庄组与方戈庄组火山岩岩浆极有可能来源于下地壳。

δEu 在 $0.51 \sim 0.82$ 之间, 均表现了 Eu 负异常, 但除了一个样品 $\delta Eu = 0.51$ 表现了较强的负 Eu 异常外, 其余样品均表现不太明显。岩浆岩中 δEu 值

能很好地反应岩浆的分异程度, 斜长石对 Eu 的分配系数明显大于其它的 REE, 各类岩浆岩中 Eu 异常的发生常与斜长石的结晶有重要关系。青山群石前庄组和方戈庄组火山岩中 δEu 表明, 火山岩中斜长石含量较高, 与主量元素分析结果中火山岩系列为中酸性的结论相符。在火山岩岩浆分离结晶作用差别图解上(图 13), 青山群石前庄组与方戈庄组样品呈现出直线的趋势, 表明其岩浆演化以结晶分异为主。

3.5 过渡金属元素特征

过渡金属元素 Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn 的价态和地球化学行为均是变化的。4 价的 Ti 是高场强不相容元素, 而 2 价的 Mn、Co、Ni、Cu、Zn 以及 3 价的 V 和 Cr 则是相容元素, 这些元素在地幔岩石中具有较大的丰度, 分配系数较大, 在熔融作用过程中更趋向于残留在熔融之后的熔体中, 对它们进

表 3 胶莱盆地南缘青山群火山岩稀土元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 Rare earth element ($\times 10^{-6}$) analyzing result of volcanic rocks in Jiaolai Basin southern margin

样号	P6B1	P6B3	P6B5	P6B11	P6B13	P6B15
时代	$K_1 q_s$			$K_1 q_f$		
La	72.30	67.5	50.5	62.0	80.0	79.6
Ce	112.8	102.7	89.20	96.5	133.5	127.0
Pr	8.71	14.57	10.91	10.91	18.79	18.12
Nd	25.86	50.27	39.76	36.68	65.64	64.61
Sm	3.88	7.78	6.99	5.39	9.84	10.13
Eu	0.64	1.63	1.61	1.40	2.10	2.45
Gd	3.70	6.86	6.45	4.90	8.37	8.65
Tb	0.43	0.73	0.89	0.53	0.88	0.92
Dy	2.44	3.76	4.60	2.82	4.35	4.70
Ho	0.55	0.76	0.98	0.59	0.92	0.96
Er	1.67	2.16	2.67	1.74	2.56	2.74
Tm	0.29	0.32	0.41	0.27	0.38	0.40
Yb	1.88	1.95	2.55	1.72	2.36	2.45
Lu	0.30	0.29	0.37	0.27	0.36	0.37
Σ REE	235.45	261.28	217.88	225.72	330.05	323.09
LREE	224.20	244.45	198.97	212.88	309.87	301.90
HREE	11.25	16.83	18.92	12.84	20.19	21.19
LREE/HREE	19.92	14.53	18.92	16.58	15.35	14.25
LaN/YbN	27.55	24.77	10.52	25.92	24.31	23.35
δ Eu	0.51	0.67	0.72	0.82	0.69	0.78
δ Ce	0.93	0.77	0.89	0.84	0.81	0.79

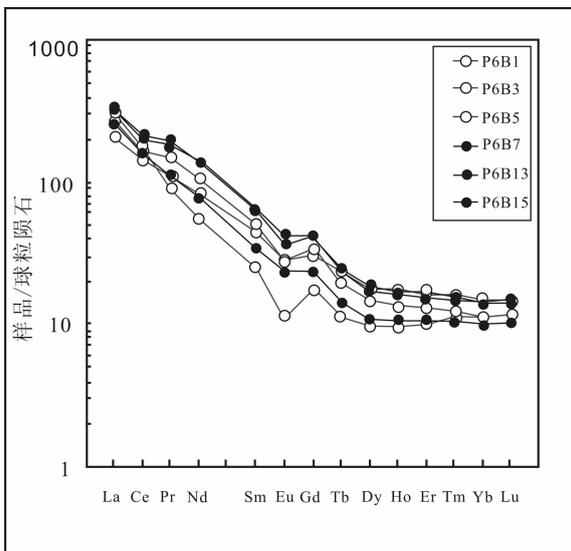


图 12 胶莱盆地南缘青山群火山岩稀土元素球粒陨石标准化分配曲线(路远发, 2004)

Fig. 12 Chondrite-normalized REE distribution patterns for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin(Lu Yuanfa, 2004)

行标准化后,可以反应岩浆的源区性质和岩浆的演化过程。

在研究区火山岩过渡金属元素原始地幔标准化

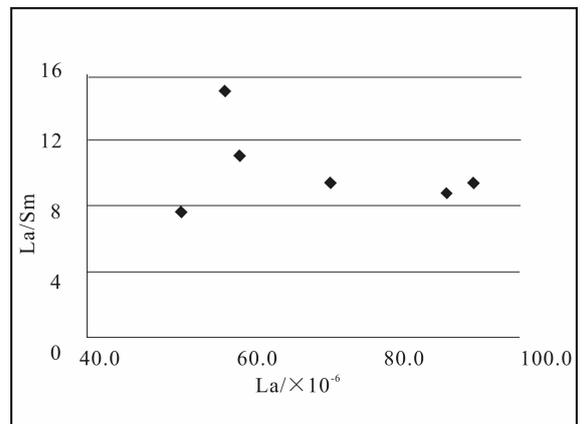


图 13 胶莱盆地南缘青山群火山岩岩浆分离结晶作用判别图解(路远发, 2004)

Fig. 13 Discrimination diagram of fractional crystallization for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin(Lu Yuanfa, 2004)

蛛网图上(图 14),青山群各组火山岩的岩石分配形式基本相同,相对于原始地幔,Cr 和 Ni 表现出了强烈的亏损的特征,Ti、Mn 表现为相对富集。Cr、Ni 的强烈亏损与 Ti 的相对富集反映岩浆区缺少橄榄石、单斜辉石与尖晶石等基性成分,肯定了岩浆源以中酸性为主的结果。

表 4 胶莱盆地南缘青山群火山岩过渡金属元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)

Table 4 Transitional metallic element ($\times 10^{-6}$) analyzing result of volcanic rocks in Jiaolai Basin southern margin

时代	样号	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	
K ₁ qh	PJ06-5-1	4.3	1606	49.6	9.0	184.9	3.0	8.9	14.4	55.3	
	PJ06-5-2	4.8	1745	29.2	8.7	105.0	1.4	6.7	6.2	22.6	
	PJ08-2	5.1	1826	22.3	10.0	236.5	3.6	6.8	7.0	36.5	
	PJ09-01	3.7	1780	21.8	13.0	426.7	2.5	9.9	14.2	35.2	
	PJ11-3-1	9.8	3155	51.8	54.0	1051.7	11.4	25.7	54.8	77.2	
K ₁ qb	PJ16-3	1.3	1199	14.4	10.4	341.5	2.0	9.0	9.6	20.1	
	PJ04-13	5.3	2381	37.4	14.1	423.4	6.3	10.2	13.9	52.2	
	PJ08-6	12.9	4417	86.2	59.6	463.2	12.6	25.5	23.0	72.1	
	PJ11-3-2	14.8	5115	124.6	101.6	414.8	16.9	48.6	589.5	60.2	
	PJ11-05	6.9	3121.1	52.5	15.2	259.5	5	7.4	73.7	32.7	
	PJ16-2	13.9	6070.6	121.4	70.2	666.2	19	41.5	26.2	83.5	
K ₁ qs	P6B1	3.2	1584	22.8	15.8	95.2	5.4	12.7	11.4	52.0	
	P6B2	2.3	1071	15.1	4.8	636.9	0.8	5.2	180.4	30.4	
	P6B3	4.6	1660	28.1	9.2	898.4	5.0	8.8	64.4	44.2	
	P6B5	2.3	1345	26.9	5.5	64.8	1.1	6.0	16.2	19.0	
	P6B6	3.8	1163	37.1	15.6	77.7	0.9	6.9	17.7	16.9	
	P6B8	0.4	1200	11.5	4.2	277.9	1.5	5.1	2.8	70.1	
	P6B9	1.0	1092	9.4	3.6	397.9	0.8	5.1	8.2	68.2	
	P6B10	1.3	1072	7.7	3.3	352.3	1.4	4.7	1.6	58.1	
	K ₁ qf	P6B11	5.0	2751	32.4	5.9	488.3	2.6	5.5	38.0	39.9
		P6B12	6.4	3517	39.0	3.9	347.6	4.2	5.2	7.1	49.8
P6B13		4.5	3305	39.5	4.0	328.0	3.4	6.3	19.7	37.7	
P6B15		7.9	4429	63.4	14.0	425.9	7.9	11.3	14.7	66.9	

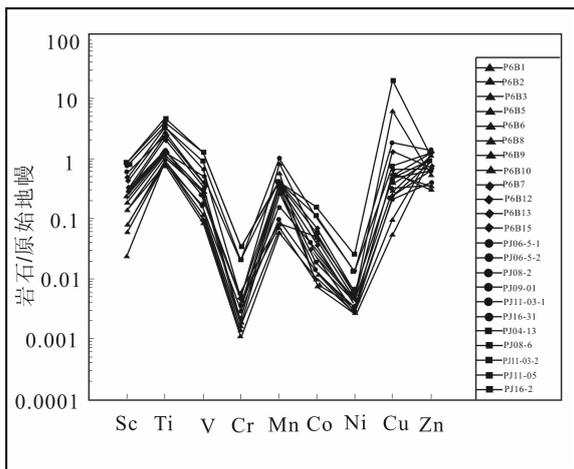


图 14 胶莱盆地南缘青山群火山岩过渡金属元素原始地幔标准化配分图(路远发,2004)

Fig. 14 Primitive mantle-normalized transitional metallic element spider patterns for volcanic rocks of Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin(Lu Yuanfa, 2004)

4 讨论

白垩纪在地史研究中具有重要的地位,每年涉

及白垩纪的科学论著数以百计(王成善等,2009),白垩纪时全球气温处于极端温室状态,在土伦阶(Turonian)时期全球平均表面温度比现今高 10℃(Huber et al.,1995;Wilson et al.,2002),同时是洋中脊生产率极高时期和大型火成岩省(LIPs)大规模形成时期(Larson,1991;Jones et al.,2001;王成善等,2005)。胶莱盆地白垩纪火山岩具有喷发期次多、岩性变化大的特征,理清胶莱盆地白垩纪时期火山岩的喷发期次、主要成分及其主要的地球化学特征具有重要的理论意义;胶莱盆地白垩系青山群火山岩在层位上夹于莱阳群陆相杂色碎屑沉积岩与王氏群红色河流相碎屑沉积岩之间,特别是莱阳群的某些层位具有产油潜力(吴智平等,2004;刘洪营等,2007),后期青山群火山岩对其的影响较大,所以,青山群火山岩的地球化学特征研究对油气资源的勘探与开发具有一定的应用价值。

凌文黎等(2006)曾在胶州河西郭冷家村剖面采集了 3 件样品(后乔组底部的紫红色流纹岩、石前庄组底部的褐红色流纹岩和石前庄组顶部的灰褐色英

安岩)进行定年及地球化学分析,认为青山群后乔组底部火山岩的形成年龄为 $106 \pm 2\text{Ma}$,石前庄底部和顶部火山岩的形成年龄分别为 $105 \pm 4\text{Ma}$ 和 $98 \pm 1\text{Ma}$ (95%置信度),酸性火山岩沿剖面自下向上显示出其 SiO_2 含量降低、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量升高的趋势,然而并未就八亩地组、方戈庄组火山岩开展讨论;闫峻等(2007)在胶州和青岛之间的杨河镇和河套镇采集了一系列样品,经 TAS 图解认为其主要属于粗面英安岩系列,然而其也未就火山岩的地层归属进行讨论;邱检生等(2001a, 2012)对鲁东地区的火山岩进行了岩石定年及地球化学特征分析,指出青山群火山岩喷发分为两个期次,但也并没有指出火山岩地层的分组;唐嘉锋等(2008)通过大量岩石样品的定年基本确定了后乔组、八亩地组、石前庄组和方戈组的喷发期限,但其所测样品多数为安山(玢)岩,且并未就样品的差异性进行探讨;匡永生等(2012b)通过胶东不同地区样品的 Ar-Ar 定年确定青山群基性火山岩喷发年龄为 $122 \sim 113\text{Ma}$,也并未指出基性岩的岩石地层层位归属。

本次研究在前人所做工作的基础上,通过连续采样及大量的岩石地球化学分析,丰富了各岩石地层的地球化学特征,认为胶莱盆地西南缘中生代青山群喷发分为四个喷发期次,分别对应后乔组、八亩地组、石前庄组与方戈庄组四个组别,其中,后乔组与石前庄组火山岩的地球化学特征较相似,其微量元素配分曲线特征走势基本一致(图 11),以酸性火山岩为主要特征(图 4),后乔组样品的 SiO_2 含量在 70% 以上,石前庄组样品为 62% 以上;八亩地组和方戈庄组火山岩的地球化学特征较相似,以中性、中偏基性火山岩为主,八亩地组样品的 SiO_2 含量为 52%~58% 之间,方戈庄组样品为 53%~67% 之间(表 1);后期喷发的石前庄组与方戈庄组火山岩较前期的后乔组、八亩地组火山岩碱性物质含量增加,后乔组与八亩地组样品的 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量基本在 6% 以下,而石前庄组与方戈庄组样品基本在 6% 之上(表 1)。研究结果显示胶莱盆地西南缘白垩系青山群火山岩中存在大量的中性火山岩,且推测四个喷发期次的火山岩具有同一岩浆来源,认为胶莱盆地青山群火山岩应该不是典型的双峰式火山岩。综合以上,认为青山群火山岩是一套中一酸性过铝质、富钾钙碱性为主的火山岩,推测其岩浆来源极有可能为下地壳,其岩浆演化过程以结晶分异为主,这与闫峻等(2007)所得结论基本一致。

5 结论

(1)胶莱盆地南缘白垩系青山群火山岩是一套中一酸性过铝质、富钾钙碱性为主的火山岩,其喷发过程分为四个喷发期次,分别对应后乔组、八亩地组、石前庄组与方戈庄组;后乔组与石前庄组火山岩的地球化学特征较相似,以酸性火山岩为主,八亩地组和方戈庄组火山岩的地球化学特征较相似,以中性、中偏基性火山岩为主;后期喷发的石前庄组与方戈庄组较早期的后乔组、八亩地组火山岩碱性物质含量增加。

(2)青山群火山岩来源于同一岩浆源——下地壳,可能与扬子板块的俯冲作用有关;岩浆形成演化过程中表现出强烈的结晶分异作用,不是典型的双峰式火山岩。

致谢:山东省地质调查院王来明研究员、宋志勇研究员和许克民高级工程师在野外区域地质调查过程中给予了指导与帮助;山东省第四地质矿产勘查院实验测试中心和青岛中国科学院海洋研究所帮助完成了样品的分析测试,笔者在此一并表示衷心感谢!

注 释

① 山东省地质矿产局区域地质调查队. 1991. 区域地质调查报告——青岛、灵山卫幅,高密幅.

参 考 文 献

- 邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 莫宣学, 肖庆辉, 周肃, 刘翠, 赵国春. 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程, 地学前缘, 10(3):41~50.
- Hugh R R 著. 2000. 岩石地球化学. 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜, 译. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 112~124.
- 韩宗珠, 武心尧, 张继武. 1993. 胶莱盆地火山岩系的地球化学特征. 青岛海洋大学学报, 23(4): 98~108.
- 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. 山东地质, 10(1): 40~51.
- 匡永生, 庞崇进, 洪路兵, 钟玉婷, 徐义刚. 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.
- 李金良, 张岳桥, 柳宗泉, 任凤楼, 袁嘉音. 2007. 胶莱盆地沉积—沉积史分析与构造演化. 中国地质, 34(2): 240~250.
- 李守军, 洪铭, 徐永梅. 2007. 关于鲁西侏罗纪—白垩纪岩石地层单位使用之我见. 地质论评, 53(1):6~10.
- 凌文黎, 谢先军, 柳小明, 程建萍. 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.
- 刘洪营, 刘德汉, 肖贤明. 2007. 胶莱盆地莱阳凹陷莱阳组烃源岩生烃史研究. 天然气地球科学, 18(5): 750~755.
- 刘进, 吴冲龙. 2007. 胶莱盆地岩浆活动特征及其油气地质意义. 大庆石油地质与开发, 26(5):36~40.
- 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.
- 刘攀, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞. 2003. 鲁西青山组火山岩形成的构造背景及其成因探讨: 主量元素和微量元素证据. 地球化学, 32(4):306~316.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. 地球化学, 33(5): 459~464.
- 孟繁聪, 李天福, 薛怀民, 刘福来, 许志琴. 2006. 胶莱盆地晚白垩世不同地幔源区的两种基性岩浆——诸城玄武岩和胶州玄武岩的对比. 岩石学报, 22(6):1644~1656.
- 牛漫兰, 朱光, 刘国生, 王道轩, 宋传中. 2002. 郯庐断裂中—南段中生代岩浆活动的构造背景与深部过程. 地质科学, 37(4): 393~404.
- 裴福萍, 许文良, 王清海, 王冬艳, 林景任. 2004. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约. 高校地质学报, 10(1):88~97.
- 邱检生, 王德滋, 罗清华, 刘洪. 2001a. 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, 徐夕生, 罗清华. 2001b. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的 Ar-Ar 定年及源区示踪. 科学通报, 46:1500~1508.
- 邱检生, 蒋少涌, 张晓琳, 胡建. 2004. 大别—苏鲁造山带南北两侧晚中生代富钾火山岩的成因: 微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素制约. 地球学报, 25:255~262.
- 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.
- 任凤楼, 张岳桥, 邱连贵. 2007. 胶莱盆地白垩纪构造应力场与转换机制. 大地构造与成矿学, 31(2):157~167.
- 任凤楼, 柳忠泉, 邱连贵, 韩立国, 张岳桥, 曹忠祥. 2008. 胶莱盆地莱阳期原型盆地恢复. 沉积学报, 26(2): 221~233.
- 施炜, 张岳桥, 董树文, 武丽, 杜丽林. 2003. 山东胶莱盆地构造变形及形成演化——以王氏群和大盛群变形分析为例. 地质通报, 22(5):325~334.
- 唐华风, 程日辉, 白云凤, 孔庆莹. 2003. 胶莱盆地构造演化规律. 世界地质, 22(3):246~251.
- 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.
- 王成善, 胡修棉. 2005. 白垩纪世界与大洋红层. 地学前缘, 12(2): 11~21.
- 王成善, 曹珂, 黄永建. 2009. 沉积记录与白垩纪地球表层系统变化. 地学前缘, 16(5): 1~14.
- 吴智平, 李凌, 李伟, 周瑶琪. 2004. 胶莱盆地莱阳群原型盆地的沉积格局及有利油气勘探区选择. 大地构造与成矿学, 28(3): 330~337.
- 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. 地球化学, 36(1):1~10.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 任泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学, D 辑, 33(10):913~920.
- 翟慎德. 2003. 胶莱盆地莱阳凹陷构造特征及演化. 石油实验地质, 25(2): 137~142.
- 张岳桥, 李金良, 张田, 董树文, 袁嘉音. 2008. 胶莱盆地及其邻区白垩纪—古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义. 地质学报, 82(9): 1229~1257.
- 张增奇, 刘明渭. 1996. 山东省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 207~254.
- Condie K C. 2001. Mantle plume and their record in earth history. London: Cambridge University Press.
- HuBer B T, Hodell D A, Hamilton C P. 1995. Middle Late Cretaceous climate of the southern high latitudes: Stable isotopic evidence for minimal equator-to-pole thermal gradients. Geol Soc Amer Bull, 107: 1164~1191.
- Irvine T N and Barager W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, 8: 523~548.
- Jones C E, Jenkyns H C. 2001. Seawater strontium isotopes, oceanic anoxic events, and seafloor hydrothermal activity in the Jurassic and Cretaceous. Am J Sci, 301: 112~149.
- Larson R L. 1991. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous super plume. Geology, 19: 963~966.
- Le Maitre R. W., 1981, GENMIX—a generalized petrological mixing model program. Computer Geosci., 7, 229~247.
- Menzies M, Xu Y, Zhang H. 2007. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. Lithos, 96:1~21.
- Middlemost E A K. 1985. Magmas and Magmatic Rocks. London: Longman, 1~266.
- Middlemost E. A. K., 1975, The basalt clan. Earth Sci. Rev., 11, 337~364.
- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contrib. Mineral Petrol. 58:63~81.
- Qiu J S, Xu X S, Luo Q H. 2002. Potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province: ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating and source tracing. Chinese Science Bulletin, 47(2):91~99.
- Wilson P A, Norris R D, Cooper M J. 2002. Testing the mid-Cretaceous greenhouse hypothesis using “glassy” foraminiferal calcite from the core of the Truonian tropics on Demerara Rise. Geology, 30: 607~610.
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH, Fan WM, Zhai MG, Yin JF. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China: evidence from major, trace element, and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. Contrib. Mineral. Petrol., 144: 241~253.

Geochemical Characteristics of Volcanic Rocks in Cretaceous Qingshan Group from Southern Margin of Jiaolai Basin, Shandong Province

FU Wenzhao¹⁾, YANG Fengjie^{1,2)}, ZHOU Xinyu¹⁾, MAO Guangzhou^{1,2)}, JIN Aiwen^{1,2)},
CHEN Qiao^{1,2)}, JIANG Nan¹⁾, GUO Bangjie¹⁾

1) *College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong, 266590*; 2) *Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Qingdao, Shandong, 266590*

Abstract

On the basis of the work that the regional geological survey of Jiaolai Basin southern margin was carried, the stratotype section for the volcanic rocks of Cretaceous Qingshan Group in study area was measured with system sampling. It was showed that the content of SiO_2 in the volcanic rocks of Cretaceous Qingshan Group is about 51.08%~74.86%, total alkalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) is about 3.2%~8.8%, Al_2O_3 is about 13.18%~17.3%, and TFe_2O_3 is about 0.86%~10.48%, after chemical analysis and data processing. The character of trace and rare earth element is that La and Nd which are LILE and LREE are relatively enriched, while Nb, P and Ti which are HFSE and HREE are relatively loss. Houkuang and Shiqianzhuang Formation have the similar geochemical characteristics that the volcanic rocks are mainly composed of acidic rocks, while Bamudi and Fanggezhuang Formation have the similar geochemical characteristics that the volcanic rocks are mainly composed of intermediate rocks. The volcanic rocks of Bamudi and Fanggezhuang Formation that erupted lately have more total alkalis than that of Houkuang and Shiqianzhuang Formation. The result of comprehensive analysis was that the volcanic rocks of Cretaceous Qingshan Group in Jiaolai Basin southern margin were intermediate-acidic rocks with peraluminous, K-rich and calc-alkaline characteristic. The magma source of the volcanic rocks that erupted in four different episodes was the same—the lower crust, the reason of which may be related with subduction of Yangtze plate. Magma evolution process of the volcanic rocks showed strong crystal fractionation. Combined with the lithological character and magma source analysis, volcanic rocks of Qingshan Group were not typical bimodal volcanic eruption.

Key words: Jiaolai Basin; Cretaceous; volcanic rocks; geochemistry; major element characteristics; trace element characteristics