

文章编号: 0379-1726(2003)04-0306-11

鲁西青山组火山岩形成的构造背景及其成因探讨: 主元素和微量元素证据

刘 燊^{1,2}, 胡瑞忠¹, 赵军红^{1,2}, 冯彩霞^{1,2}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 研究区内火山岩从基性—中性—酸性都有出露, 包括橄榄玄武岩、安山岩和英安岩, 且都属于非碱性系列。通过对主元素和微量元素的研究, 认为本区火山岩为滞后型弧(陆缘弧)火山作用的产物。源区由于存在大量的因俯冲作用进入地幔的陆壳物质以及流体的交代作用, 从而出现富含金云母和不相容元素的交代富集型地幔源, 并具有壳源的元素组成特征。火山岩的形成是富集地幔部分熔融的结果, 但在成岩过程中可能存在单斜辉石、斜长石、橄榄石和 Ti-Fe 氧化物等矿物的分离结晶作用, 以及橄榄石的堆晶作用。

关键词: 构造背景; 火山岩; 岩石成因论; 交代作用; 部分熔融; 分离结晶; 山东省

中图分类号: P581; P595 **文献标识码:** A

0 引 言

鲁西地区中生代富钾火山岩广泛分布于邹平、临朐、沂源、蒙阴和平邑-费县等断陷型陆相火山盆地中, 明显受断裂(深)构造控制^[1], 形成年龄为 124.3 ~ 114.7 Ma^[2]。研究区位于蒙阴盆地内, 出露一套以中性岩(安山岩)为主、含少量基性(橄榄玄武岩)和酸性岩(英安岩)、缺乏酸性成分的火山岩。该套火山岩在地层层序上被归为青山组^[1], 为一套白垩纪火山岩系, 但具体形成年龄还有待确定。本文拟主要从主元素和微量元素方面进行研究, 以期对其成岩环境、成岩方式和源区性质加以探讨。

1 地质概况、样品采集及分析

火山岩出露于方城朱岭庄以南(图 1)。从野外地质产状看, 火山岩为裂隙性喷溢的产物, 岩相上为溢流相, 以小岩被的形式出露, 在构造上受控于 NW 向断裂, 呈近南北向展布, 总体呈透镜状, 出露面积约为 1.5 km²(图 1)。其中夹有黄绿色、紫红色和杂色凝灰质砾岩及安山质火山角砾岩。本次沿火山岩

四周采样 9 个, 排除风化较强的 1 个, 共测定了其他 8 个具有代表性的样品。主元素在中国科学院地球化学研究所采用常规湿法分析, 分析者李荪蓉; 微量元素在中国科学院地球化学研究所用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析, 分析者漆亮, 稀土元素的分析精度优于 5%, 微量元素分析精度优于 10%。

2 岩相学特征

据 1:5 万区测报告^[1], 该套火山岩在岩性上为单峰式的基性橄榄玄武岩。但与野外观察和镜下鉴定结果不符。实际上区内火山岩在岩性上从基性—中性—酸性都有出露, 包括橄榄玄武岩、安山岩和英安岩, 都为块状构造, 斑状结构。在区域分布上安山岩占绝大部分(80%以上), 只有少部分的玄武岩和酸性岩类(<15%), 未见酸性岩类出露。

橄榄玄武岩: 斑晶主要由辉石(8%~10%)和基性斜长石组成, 含少量(5%~7%)具暗化边的角闪石和黑云母以及少量橄榄石(5%), 斑晶粒径 0.5~2.0 mm。基质大小 0.03~0.05 mm, 主要为斜长石(培长石), 副矿物(2%)为磁铁矿、磷灰石和钛铁矿。有绿泥石化和伊丁石化(橄榄石)现象。

收稿日期: 2002-09-02; 接受日期: 2003-04-07

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-102); 国家杰出青年科学基金(49925309)

作者简介: 刘燊(1974-), 男, 博士研究生, 岩石学和地球化学专业。

1) 山东地质矿产局第七地质队, 方城幅区域地质调查报告(1:50 000), 1990。

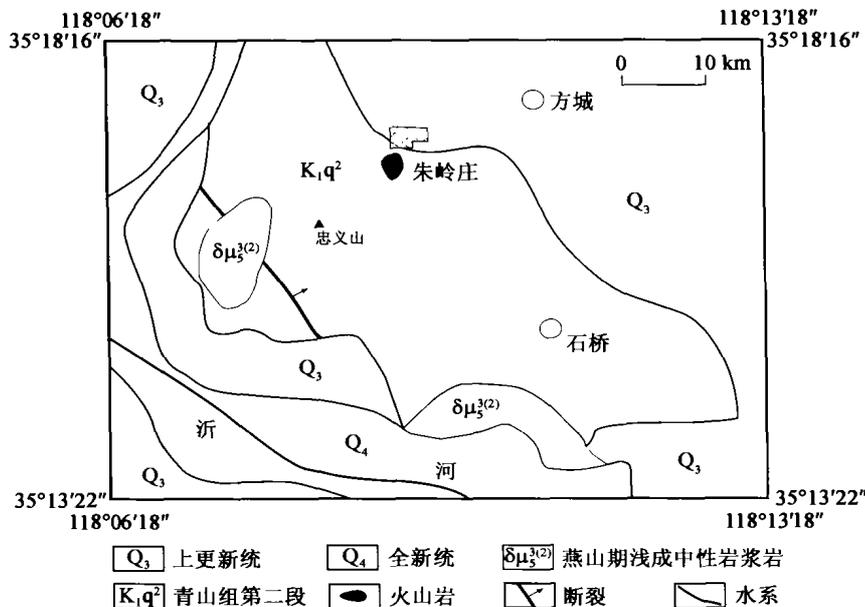


图 1 研究区火山岩分布略图

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of the volcanic rocks in the study area

3 地球化学特征

3.1 岩石化学特征

本区火山岩主元素分析结果见表 1。SiO₂ 范围为 49.50% ~ 69.91%，平均 60.39%，为中性安山岩类。各样品含量在扣除烧失量后换算成 100%，在全碱 -SiO₂ (TAS) 图上^[3](图 2a)(其中碱性系列与非碱性系列分界线据文献 [4])，分别投于玄武岩、安山岩和英安岩范围内，且都属于非碱性系列。考虑到 K、Na 较为活泼，在蚀变过程中易发生迁移，故采用 TiO₂-Zr/P₂O₅^[5](图 2b)和 SiO₂-Nb/Y^[6](略) 判别图来指示岩石系列，本区火山岩也均落于非碱性系列之内。对于非碱性系列火

山岩可进一步用 K₂O-SiO₂ 图解^[7](图 3) 分类，图中 FC8、FC5 和 FC3 落入钙碱性系列内，其他样品都属高钾钙碱性系列。同时用 AFM 图对火山岩进行投点(图 4)，除玄武岩位于拉斑系列外，火山岩总体按钙碱性系列趋势演化。在岩石学中，里特曼指数(σ) 用来判断岩石的含碱度^[8]，σ < 4 的岩石为钙碱质的，反之为碱质的。本区火山岩 σ 在 0.88 ~ 1.91 之间，属钙碱质岩石。由此可见，本区火山岩为非碱性系列，玄武岩为拉斑系列，其余为钙碱性系列。在以 MgO 为横坐标的 Harker 图解中(略)，除玄武岩外，所有样品的 TiO₂、ΣFe₂O₃、CaO、P₂O₅ 与 MgO 呈良好的正相关关系，SiO₂ 与 MgO 呈负相关关系，表现出

安山岩：斑晶大小为 0.5 ~ 2.0 mm，主要为斜长石(中长石)(20% ~ 30%)和辉石(5% ~ 15%)，含少量具暗化边的角闪石和黑云母(3%)，斜长石斑晶有时具环带结构。基质大小为 0.03 ~ 0.06 mm，主要由拉长石组成。副矿物为磁铁矿和钛铁矿等(1% ~ 2%)。岩石中多见钠长石化和绿泥石化。

英安岩：斑晶粒径为 0.5 ~ 2.0 mm，以斜长石(奥—中长石)和石英为主(35%)，含少量具暗化边的黑云母(3%)和角闪石(2%)。基质大小 0.03 ~ 0.05 mm，主要由奥长石、透长石和石英微晶组成。副矿物主要为少量磁铁矿(1%)。岩石具强烈的钠长石化和少量绿泥石化。

表 1 火山岩的岩石化学分析结果(%)

Table 1 Analysis of the chemical compositions (%) of the volcanic rocks

样号	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	烧失	Mg [#]	σ
FC2	安山岩	61.85	0.74	17.79	1.93	2.20	0.12	1.21	6.37	2.61	3.28	0.35		1.08	19	1.84
FC3	英安岩	69.91	0.73	14.92	2.42	0.60	0.10	0.96	3.77	2.49	2.38	0.27		0.83	21	0.88
FC4	安山岩	62.43	0.98	19.02	3.43	0.70	0.14	1.31	4.06	2.59	3.21	0.40		1.46	21	1.73
FC5	英安岩	63.54	0.95	15.95	3.90	0.85	0.11	1.54	4.82	2.34	2.26	0.50		2.69	21	1.03
FC6	安山岩	57.65	1.11	15.97	4.72	1.70	0.13	2.74	6.04	2.13	2.56	0.55	0.70	3.40	26	1.50
FC7	安山岩	58.40	0.80	19.02	4.37	1.05	0.09	2.01	4.94	2.31	3.12	0.32		3.23	24	1.91
FC8	橄榄玄武岩	49.50	0.77	15.34	3.88	5.10	0.18	7.78	9.76	1.67	0.89	0.47	1.52	2.88	41	1.01
FC9	安山岩	59.81	0.80	18.40	3.58	1.30	0.17	1.92	5.30	2.51	2.52	0.48		2.66	25	1.51

注：Mg[#] = 100 × [Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)]。

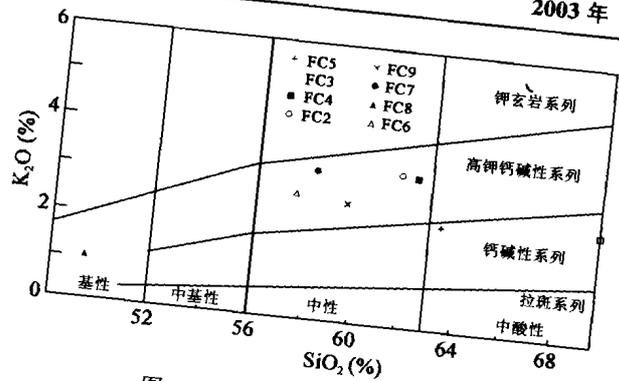
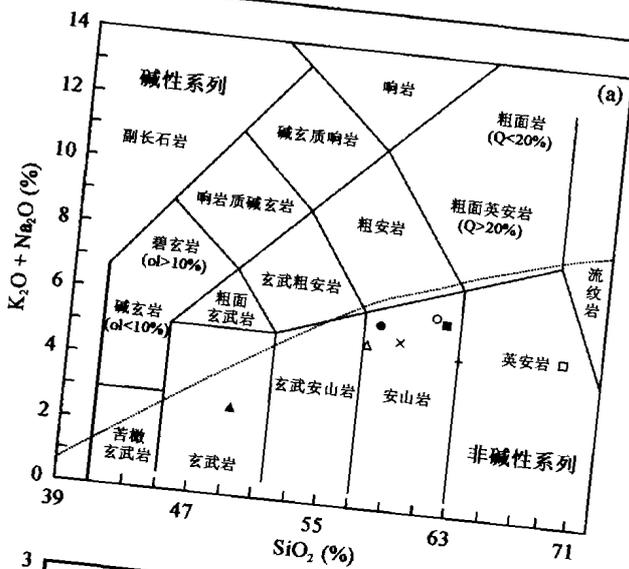


图3 火山岩 K₂O-SiO₂ 相关图
Fig. 3 K₂O-SiO₂ correlative diagram of the volcanic rocks

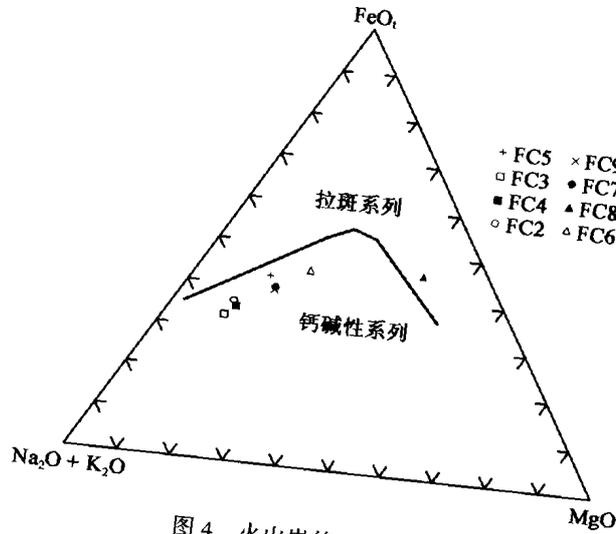
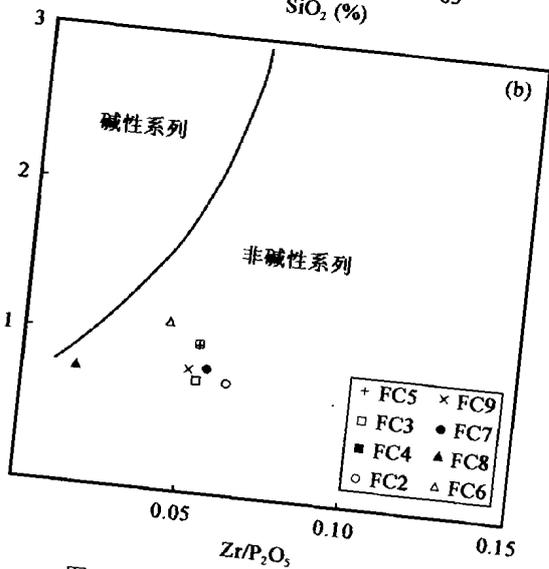


图4 火山岩的 AFM 图解
Fig. 4 AFM diagram of the volcanic rocks

图2 火山岩的岩石化学分类图解

2 Petrochemistry classification diagram of the volcanic rocks
a. 全碱-SiO₂ 图解; b. TiO₂-Zr/P₂O₅ 图解。

过程存在单斜辉石、磷灰石和 Ti-Fe 氧化物的结晶作用^[9]。Al₂O₃ 与 SiO₂ 具有一定的负相关示存在一定的斜长石分离结晶作用^[9]。它们的 Mg[#] 值为 2.75%，Mg[#] 值相对较低 (19~26)，暗示原始深部可能发生了富铁镁矿物(橄榄石)的堆积而岩浆在上升过程中则发生了以单斜辉石为分离结晶作用。固结指数 SI 也较低 (10.77~40.27)，同样反映了岩浆的分异作用比较明显。而所有岩石的 TiO₂ 皆小于 1.2%。

元素特征

元素分析结果见表 2。火山岩中 Cr、Ni 含量分别为 67.59~432.7 μg/g 和 31.51~

102.9 μg/g，平均分别为 153 μg/g 和 56 μg/g。远低于原始岩浆值 (Cr > 1 000 μg/g, Ni > 400~500 μg/g)^[10]。总体上与火山弧钙碱性玄武岩 (Cr 160 μg/g, Ni 50 μg/g)^[11] 相近，而与 MORB 和板内玄武岩存在明显的差别^[11]。表明岩浆上涌过程中经历了单斜辉石和 Ti-Fe 氧化物等矿物的分离结晶作用^[12]。在 MORB 标准化图解中^[13](图 5a)，研究区火山岩总体反映出 Th、K、Ba、Sr、Rb、Ce 和 Sm 的富集以及 Nb、Ta、Ti、P、Zr 和 Hf 的负异常特征，除 FC8 和其他样品具有一些差异外，总体与图 5b 中大陆弧钙碱性玄武岩的 MORB 标准化曲线^[13] 特征一致，表明本区火山岩具有明显的大陆边缘弧特性。Nb、Ta、Ti、P、Zr 和 Hf 的负异常与 Th 富集现象暗示了火山岩源区与俯冲岩石圈板片派生流体交代岩石圈地幔楔有关^[14]，也可能与存在角闪石、黑云母、钛铁矿和磷灰石等矿物分异结晶作用有关^[15]。

表 2 火山岩的微量元素和稀土元素分析结果($\mu\text{g/g}$)Table 2 Analysis of trace element and rare element composition ($\mu\text{g/g}$) of volcanic rocks

样品号	FC9	FC8	FC7	FC6	FC5	FC4	FC3	FC2
岩石名称	安山岩	橄榄玄武岩	安山岩	安山岩	英安岩	安山岩	英安岩	安山岩
Sc	13.73	44.68	14.79	17.65	17.93	12.35	9.13	12.55
V	108.3	242.6	107.4	167.3	159.1	107.0	70.70	113.4
Cr	229.6	432.7	155.7	77.84	103.1	76.31	83.36	67.59
Co	19.21	47.71	15.94	22.82	18.05	16.12	9.62	14.86
Ni	102.9	86.70	43.07	57.07	54.53	36.90	35.34	31.51
Cu	27.23	99.75	29.31	36.58	37.50	39.17	22.12	26.66
Ga	20.58	17.85	20.11	26.23	29.24	22.06	21.11	22.15
Rb	138.8	28.88	65.64	96.61	96.28	153.3	112.1	142.7
Sr	1 080	633.3	884.1	1 848	1 448	961.6	1 018	980.5
Y	21.50	19.39	20.91	20.90	31.23	14.92	11.57	15.39
Zr	242.9	79.34	178.8	241.4	268.9	213.6	143.8	218.7
Nb	12.58	4.72	9.35	19.94	14.42	10.58	5.96	10.47
Mo	1.70	1.18	1.00	1.20	1.08	1.72	1.88	1.48
Sn	0.90	1.24	3.76	1.48	1.54	1.19	1.20	1.80
Sb	1.50	0.89	0.48	2.23	3.62	1.22	1.17	0.76
Ba	1 516	588.0	1 312	1 120	1 426	1 507	1 378	1 456
Cs	1.72	2.45	0.38	0.59	0.62	1.59	2.56	1.25
Hf	5.87	2.27	4.84	6.76	7.24	5.38	3.89	5.44
Ta	0.57	0.18	0.46	0.96	0.69	0.50	0.32	0.52
Pb	18.38	4.37	19.36	9.19	16.99	19.91	28.74	21.25
Th	8.66	1.36	6.95	8.31	9.11	8.73	5.39	8.92
U	1.67	0.42	1.79	1.21	2.10	1.63	1.52	1.65
La	102.1	20.10	67.42	70.23	108.5	61.54	38.19	64.39
Ce	167.1	47.91	102.4	137.5	160.3	118.5	70.19	121.2
Pr	20.30	6.00	14.80	15.67	22.85	12.40	7.48	12.95
Nd	75.27	26.76	55.39	57.57	87.72	45.60	27.75	47.17
Sm	11.36	5.77	9.12	9.40	13.91	7.14	4.53	7.23
Eu	2.78	1.37	1.95	2.21	3.04	1.59	1.02	1.58
Gd	8.08	4.76	6.44	6.84	10.11	4.73	3.23	4.81
Tb	0.96	0.67	0.82	0.84	1.22	0.56	0.39	0.59
Dy	4.58	3.72	4.18	4.11	6.11	2.67	2.06	2.98
Ho	0.78	0.73	0.75	0.75	1.06	0.48	0.38	0.55
Er	2.03	1.87	2.00	1.91	2.70	1.37	0.97	1.47
Tm	0.25	0.25	0.26	0.23	0.33	0.18	0.12	0.19
Yb	1.65	1.68	1.61	1.73	2.24	1.13	0.84	1.26
Lu	0.23	0.24	0.26	0.25	0.30	0.16	0.13	0.20
Σ REE	397.4	121.8	267.4	309.2	420.3	258.1	157.3	266.5
LREE/HREE	20.41	7.76	15.37	17.57	16.46	21.92	18.37	21.14
(La/Yb) _n	44.32	8.57	29.96	29.12	34.79	39.13	32.65	36.69
(Ce/Yb) _n	20.44	5.76	12.82	16.06	14.49	21.24	16.91	19.45
δ Eu	0.89	0.80	0.78	0.84	0.78	0.84	0.81	0.82

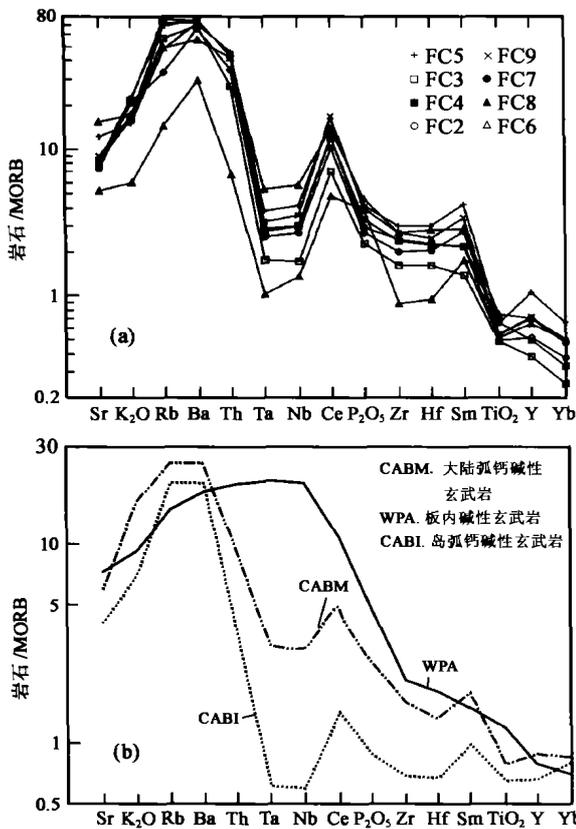


图 5 研究区火山岩(a)与三类不同玄武岩(b)的微量元素 MORB 标准化图解

Fig. 5 MORB-normalized trace elements diagram of the volcanic rocks in study area (a) and three different types basalt (b)

3.3 稀土元素特征

除 FC8 和 FC3 的 Σ REE 较低 ($121.8 \mu\text{g/g}$ 和 $157.3 \mu\text{g/g}$) 外(表 2), 其他样品的 Σ REE 相对较高 ($258.1 \sim 420.3 \mu\text{g/g}$), 平均为 $319.8 \mu\text{g/g}$ 。英安岩和安山岩的轻重稀土分异较强, LREE/HREE 在 $15.37 \sim 21.92$ 之间, 平均为 18.75 ; $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 介于 $29.19 \sim 44.32$ 之间, 平均 35.24 ; $(\text{Ce}/\text{Yb})_n$ 大多在 $12.82 \sim 20.44$ 之间变化, 平均为 17.34 。各类火山岩的 δEu 值变化不大 ($0.78 \sim 0.89$)。火山岩球粒陨石标准化^[16]稀土分布曲线(图 6)与大陆边缘弧火山岩相似, 总体显示火山弧的特性。区别是本区火山岩的 Σ REE 相对较高, LREE 更富集, 轻重稀土分馏较强, 同时具有弱的 Eu 负异常。图中玄武岩样品曲线相对较平缓, 与其他样品曲线相交。而英安岩和安山岩样品曲线都呈近平行分布。可能反映玄武岩在源区上与后两者不同^[17]。另外, 分布曲线中个别样品表现出弱的 Ce 负异常, 可能是由几方面因素引起的: 地壳物质的混入^[18]、高的氧化条件^[19]、俯

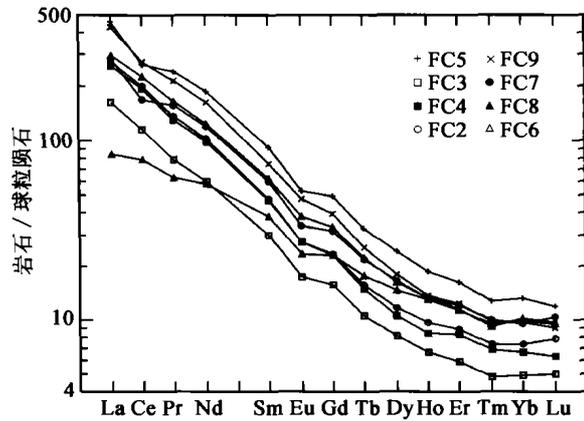


图 6 研究区火山岩稀土元素球粒陨石标准化图解
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of the volcanic rocks in the study area

冲流体的交代作用^[20]、继承了源区的固有特征^[21]。从岩石化学分析结果看, 本区火山岩中多数 Fe_2O_3 含量明显高于 FeO , 全部火山岩显示 Nb、Ta 负异常, 暗示地幔源区氧逸度较高^[22]。可见 Ce 负异常与高的氧化条件有直接关系, 但不排除其他几方面的影响。

4 构造环境分析

从元素特征分析来看, 火山岩贫重稀土元素和高场强元素 (Ti、Nb、Ta、P、Zr 和 Hf), 而富集大离子亲石元素 (K、Rb、Ba 和 Th 等) 和轻稀土元素。且 Th/Ta 范围为 $7.37 \sim 17.5$; $\text{La}/\text{Ta} > 73$; $\text{Th}/\text{Yb} > 0.8$; Nb/La 较小 ($0.12 \sim 0.28$), 均小于 0.3 。均显示了板块会聚边缘弧火山岩的地球化学特征^[23,24]。所有样品 Zr/Y 比值 ($4 \sim 15$) 均大于 3 , 证明研究区属大陆边缘弧而非岛弧^[25]; 另外, 稀土元素球粒陨石标准化曲线和微量元素 MORB 标准化曲线也都明显表现出火山岩与大陆边缘弧有关的成因特征; 同样, 在 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ 图^[26] 中(图 7), 火山岩都位于大陆边缘弧内。大量地球化学证据表明, 研究区火山岩总体具有大陆边缘弧的特性。

Zr、Y 和 Nb 等为不活动元素, 在岩浆演化过程中能保持一定的连续性, 不易受后期地质作用的干扰。因此用它们来判断火山岩产出的大地构造背景是比较有效的方法。在图 $\text{Zr}/\text{Y}-\text{Zr}$ ^[27] 和 $2 \times \text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$ ^[28] 中(图 8), 火山岩都位于大陆板内玄武岩、火山弧玄武岩范围内或其附近。

钙碱性火山岩可以出现在不同的构造环境 (岛弧、陆缘弧和大陆板内等)^[29]。研究区总体出露一套

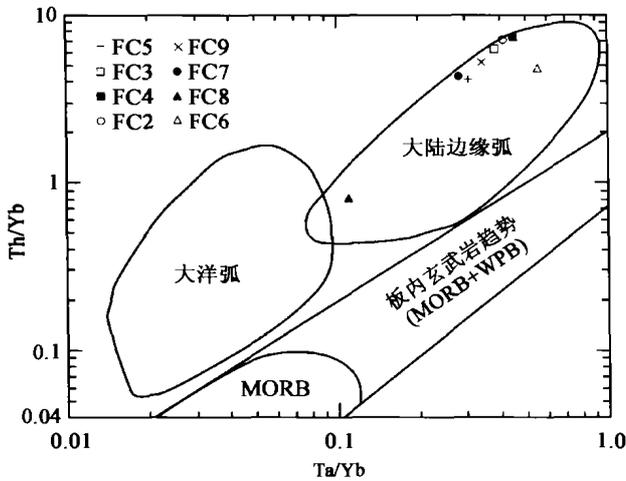


图 7 Ta/Yb-Th/Yb 图解
Fig. 7 Diagram of Ta/Yb-Th/Yb
MORB. 洋中脊玄武岩; WPB. 板内玄武岩。

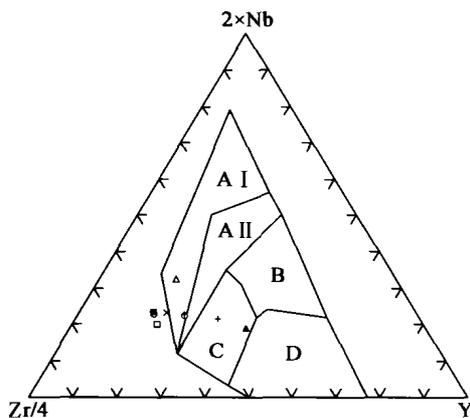
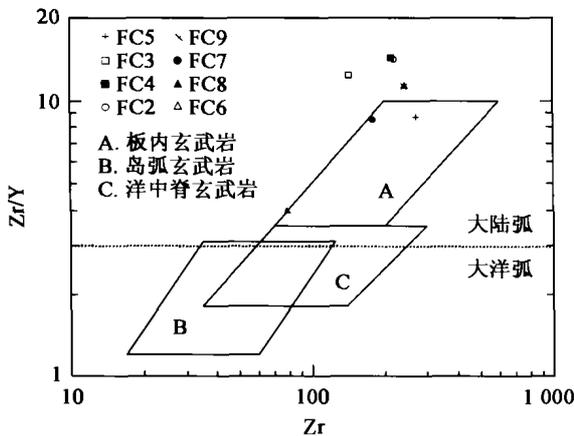


图 8 Zr/Y-Zr 和 2 × Nb-Zr/4-Y 图解
Fig. 8 Diagrams of Zr/Y-Zr and 2 × Nb-Zr/4-Y
A I. 板内钙碱性玄武岩; A II. 板内拉斑和碱性玄武岩;
B. P 型洋中脊玄武岩; C. 板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩;
D. 火山弧玄武岩和 N 型洋中脊玄武岩。

钙碱性火山岩, 结合中国东部地质演化历史, 它形成于大陆板内环境, 与大洋俯冲没有直接关系。但由

于火山作用之前存在大洋的俯冲作用、大陆岩石圈内部的壳幔相互作用以及地壳或岩石圈的伸展作用, 从而导致了火山岩与所处构造环境 (大陆板内) 不一致的特征。

5 成因讨论

本区火山岩 Nb/Ta 比值较高 (18.63 ~ 25.67), 平均为 21.20, 普遍高于球粒陨石^[30], 这可能是由于俯冲岩片熔化后产生的硅质熔融体混染改造弧下地幔源 (交代作用) 而造成的。本区火山岩明显富集大离子亲石元素和轻稀土元素; 明显亏损 Nb、Ta、Ti、P、Zr 和 Hf 等元素, 以及具有较低的 Nb/La 比值 (0.12 ~ 0.28, 平均 0.18), 因此, 它们不可能直接来自软流圈的部分熔融^[31], 而源区可能存在于地壳物质的参与。Zr 和 Y 是蚀变及变质过程中十分稳定的不活动元素, 火山岩中 Ti 的丰度与源区物质组成及形成环境有着十分密切的关系。在 Ti/Y-Ti/Zr 相关图解中^[32] (略), 本区火山岩除玄武岩投点于壳源与 MORB 型源区之间, 为典型的壳幔混合型外, 其他样品皆位于壳源或其附近, 表现出源区的壳源特征。但所有岩石的 TiO₂ 皆小于 1.2%, 具有典型的会聚边缘幔源岩浆的特征^[23]。这种双重性暗示了岩浆源区可能是由大量陆壳物质俯冲进入地幔并与地幔发生混合交代作用引起的富集地幔^[2]。此信息很明显地反映在 Ba/Yb-Ti/(10⁴ × Yb) 判别图^[10] (图 9) 中, 即火山岩全位于富集地幔源区内。

同位素和岩石学研究表明^[1, 2], 鲁西中生代富钾火山岩也具有地壳和地幔源的双重特征, 对其成因也曾存在不同的假说^[1]。但目前普遍认为富钾火山

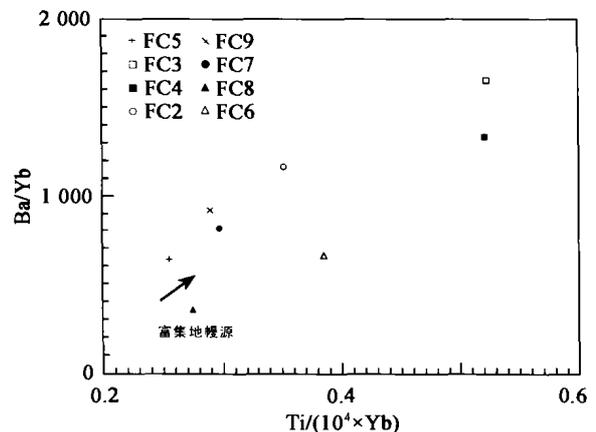


图 9 火山岩的 Ba/Yb-Ti/(10⁴ × Yb) 图解
Fig. 9 Ba/Yb-Ti/(10⁴ × Yb) diagram of the volcanic rocks

岩是由前富集的含金云母橄榄岩源区的部分熔融形成的^[33, 34]。研究区火山岩在 Rb/Sr-Sr 相关图解中(图 10a)显示出良好的双曲线关系,揭示其为地幔源不同程度的平衡部分熔融的产物^[18]。因为 Rb(强不相容元素)、Sr(弱不相容元素)在结晶相和液相中分配系数不同,当发生低程度部分熔融时, Rb 优先进入熔体,岩浆中 Rb/Sr 比值相对较大,随熔融程度的加大,熔体中 Sr 的丰度不断变大,而 Rb 丰度的增大速率变慢,且前者的增大速率大于后者,故不同程度的部分熔融在图中反映为双曲线形式;同样,在微量元素共分子比值图 Rb/Nb-Rb/Zr 中(图 10b),数据点也表现为直线型的平衡部分熔融或批式熔融(Equilibrium fusion 或 Batch melting)演化趋势^[35]。火山岩中过渡元素 Sc、Ni、Co 和 Cr 与 MgO 呈明显的正相关关系(图略),说明成岩过程中存在单斜辉石和橄榄石等矿物的分离结晶作用。本区为一套以大陆边缘弧安山岩为主的火山岩系,在安山岩形成时,原生玄武岩物质的深部分异是毫无疑问的。原生碱性玄武岩浆的深部分离过程,不可避免地会形成大

量的地幔-地壳过渡区(壳幔混合物)和大陆弧底下的地壳构造中起显著作用的堆积岩。在分离结晶早期阶段,是以大量橄榄石为主的堆积岩;在比较晚期阶段(地壳的上层)则为各种各样的辉长岩。另外,在图 10 中(图 9 中也存在)可看出,演化趋势大致是由 SiO₂ 低的岩石向高的岩石呈直线演化,按道理 FC5 应位于 FC4 与 FC3 之间,但图中 FC5 的位置却比较特殊,这可能是由部分熔融程度和分离结晶程度的不同引起的。从元素组成来看,FC5 中 Cr、Ni、Co、Sc、V、Sr、Yb、Nb 和 Zr 的含量明显高于 FC4 和 FC3;而 Rb 的含量低于后两者。反映出前者的部分熔融程度较高,而分离结晶(橄榄石、单斜辉石和斜长石等)程度较弱。

山东境内中生代地层分布主要受基底断裂控制,在所有断裂中,又以沂沭断裂带(郯庐断裂山东段)对山东中生界的影响最大,由于晚白垩世以前是郯庐断裂左行平移时期,而晚白垩世—第三纪为右旋平移阶段^[36]。因此山东境内的不同地区的地层发育各具特色。由于断裂带平移幅度中段较大及鲁西和鲁东古隆起的制约,使断裂带两侧受不同构造应力作用,形成不同岩石组合和成因类型的火山岩。断裂西已发现的中生代地层较全(自三叠纪至白垩纪各个时期的地层都有出露),分布在一些北断南超的箕状盆地内;而以东迄今尚未发现侏罗纪及更早的中生代地层(仅见白垩纪地层)^[37],盆地呈南断北超状。鲁西(郯庐断裂以西)火山岩可能为碱性玄武岩岩浆演化的产物¹⁾,主要发育中基性—中性火山岩(SiO₂ 平均为 58.57%^[38]);而鲁东(断裂以东)火山岩为花岗质岩浆及其派生物¹⁾,主要发育酸性—中酸性火山岩(SiO₂ 平均为 66.63%^[38])。但是,鲁东和鲁西有大致相似的基底胶东群和泰山群,何以鲁东发育酸性、中酸性火山岩,而鲁西发育中基性火山岩呢?邱家骧等¹⁾曾指出隆起区多发育酸性、中酸性火山岩,沉降区多发育中基性火山岩,但研究表明不尽如此。火山活动是深部地壳及其上下地幔物质运动的表现形式之一,与地质构造和构造运动密切相关。实验研究和地质资料表明,在拉张构造环境或断裂附近有利于基性岩石的产生,而在挤压构造环境的高荷压下有利于酸性岩浆的形成和喷出。郯庐断裂带左行剪切运动使鲁东隆起向北滑动,滑动过程中自身受到挤压,加上来自太平洋板块的西向压力以及形成沂沭裂谷时侧向压力,使该地处于较强

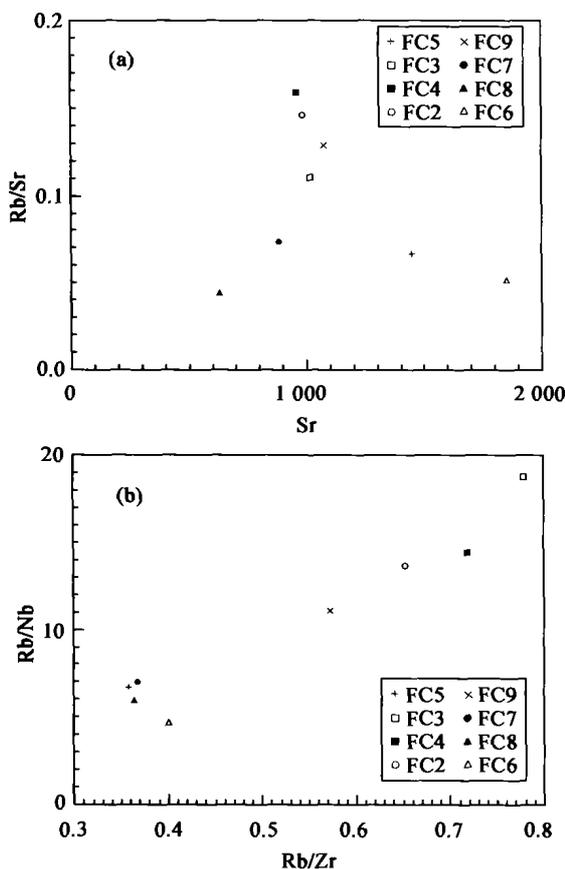


图 10 火山岩的 Rb/Sr-Sr(a) 和 Rb/Nb-Rb/Zr(b) 图解

Fig. 10 Rb/Sr-Sr (a) and Rb/Nb-Rb/Zr (b) diagrams of the volcanic rocks

1) 邱家骧, 黄家厅, 山东地区中生代火山岩及岩石化学某些特征, 火山岩地区铁铜矿工作经验交流会资料选编(上册)。

构造挤压应力场作用下,遂由下地壳局部熔融形成酸性、中酸性岩浆喷发。而南断北超型盆地系由断块北部较南部有较大的滑移幅度所致。郯庐断裂带西侧诸火山岩盆地发育在太古宇隆起背景之上NW向古生代小拗陷基底上,系在鲁西断块向南滑移过程中,南部小断块滑移幅度较北部者大,于北部小断块南缘发生张性断裂所成;形成沂沭裂谷时的西向压力使这些盆地引张更强烈,特别是靠近裂谷带平邑、蒙阴盆地,发育幔缘型中基性火山岩。北断南超型盆地的出现正是因为断块南部滑移幅度较北部大的缘故^[39]。

中晚侏罗世到白垩纪初,为古太平洋动力演化时期,中国东部处于以挤压和挤压-剪切为主的动力学状态中,白垩纪中期[约(110±5)Ma]以来为太平洋动力演化阶段(今太平洋体系演化阶段),中国东部转入拉张为主的背景中^[40]。以中性火山岩为主的岩石组合,常产于大陆活动带继承性断陷盆地中;也常分布在大型走滑断裂附近的拉伸盆地中;部分见于成熟岛弧的晚期和期后阶段^[38]。本区火山岩分布在郯庐断裂带附近的拉张盆地中,为一套早白垩世晚期火山岩系。它的形成与郯庐断裂的左行平移有直接关系,因为许志琴认为郯庐断裂带在印支期可能是一条陆内俯冲型左行转换韧性剪切带^[41];陈丕基认为郯庐断裂于白垩纪中期(110Ma左右)发生过一次重要的左行走滑剪切运动^[42]。徐嘉炜等^[43]和Xu^[44]将郯庐断裂带的左行平移时间定为145~110Ma;朱光等认为郯庐断裂带大规模左行平移发生在早白垩纪末期,推测为110~130Ma以前^[45]。

研究区火山岩形成于大陆板内环境。根据火山岩具有大陆边缘弧火山岩的特征,但又与所处构造环境不一致的特点,作者认为它应属一种新的火山作用成因类型——滞后型弧(陆缘弧)火山作用。该类型的火山岩产于古太平洋构造演化(俯冲、碰撞造山作用)之后,是所谓的滞后型钙碱性火山岩^[29]。在火山喷发时并无同期的俯冲作用。岩浆作用之前的俯冲作用形成了由下插的大洋板块、上覆的楔型地幔及再生地壳组成的类似弧火山岩的源区。因此,这种类型的火山岩具有大陆边缘弧的特征。火山岩源区的出现与俯冲作用有关,随着俯冲作用的进行,大量的壳源沉积物进入地幔楔,地壳物质析出的流体和深部上升流体对楔型地幔产生交代作用,形成富含金云母和不相容元素的富集地幔源^[46]。但诱发岩浆熔融作用并未在俯冲作用的同时,而是在相当

一段时间之后,在交代流体以及超壳断裂的共同作用下,地幔岩石熔点降低。当郯庐断裂系在岩石圈内部强烈剪切使应力聚集转化为足够热能时,地幔岩石发生了部分熔融,进而引发岩浆活动。但关于本区火山岩源区组成特征还有待同位素(Sr、Nd、Pb和O)方面的研究论证。

6 结 论

(1)研究区为一套以中性安山岩为主,含少量玄武岩和英安岩的非碱性火山岩系。玄武岩为拉斑系列,安山岩和英安岩属于钙碱性系列。

(2)火山岩为滞后型弧(陆缘弧)火山作用的产物,成因上为富集地幔部分熔融作用的结果,但在成岩过程中也可能存在单斜辉石、斜长石、橄榄石和Ti-Fe氧化物等矿物的分离结晶作用,以及橄榄石的堆晶作用。

山东地质矿产局提供了部分资料;战新志研究员在薄片鉴定中给予了指导;成文过程中徐志刚研究员和邱检生副教授给予了指导;国家地震局地质研究所张广良博士给予了帮助,在此一并致谢!

参考文献(References):

- [1] 邱检生,王德滋,曾家湖.鲁西中生代富钾火山岩及煌斑岩微量元素和Nd-Sr同位素地球化学[J].高校地质学报,1997,3(4):384~395.
Qiu Jian-sheng, Wang De-zi, Zeng Jia-hu. Study on trace element and Nd-Sr isotopic geochemistry of Mesozoic potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province[J]. Geol J China Univ, 1997, 3(4): 384~395 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邱检生,徐夕生,罗清华.鲁西富钾火山岩和煌斑岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar定年及源区示踪[J].科学通报,2001,46(18):1500~1508.
Qiu Jian-sheng, Xu Xi-sheng, Luo Qing-hua. The ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating and resource denoting of the potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province[J]. Chinese Sci Bull, 2001, 46(18): 1500~1508 (in Chinese).
- [3] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. J Petrol, 1986, 27: 745~750.
- [4] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Can J Earth Sci, 1971, 8: 532~548.
- [5] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magmas series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chem Geol, 1977, 20: 325~343.

- [6] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1976, 28: 459 ~ 469.
- [7] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22: 247 ~ 263.
- [8] 邱家骧. 岩浆岩岩石学 (第二版) [M]. 北京: 地质出版社, 1990. 207 ~ 220.
Qiu Jia-xiang. *Magmatic Petrology* (2nd ed) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. 207 ~ 220 (in Chinese).
- [9] 李献华, 李奇岷, 刘颖, 等. 华夏古陆元古代变质火山岩的地球化学特征及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 1999, 15(3): 364 ~ 371.
Li Xian-hua, Li Ji-yu, Liu Ying, *et al.* Geochemistry characteristics of the Paleoproterozoic meta-volcanics in the Cathaysia block and its tectonic significance [J]. *Acta Petrol Sinica*, 1999, 15(3): 364 ~ 371 (in Chinese with English abstract).
- [10] Wilson M. *Igneous Petrogenesis* [M]. London: Unwin Hyman, 1989. 1 ~ 466.
- [11] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1973, 19(2): 290 ~ 300.
- [12] Francalanci L, Peccerillo A, Poli G. Partition coefficients for minerals in potassium-alkaline rocks: Data from Roman province (Central Italy) [J]. *Geochem J*, 1987, 21(1): 1 ~ 10.
- [13] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. Thorpe R S. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks* [C]. New York: John Wiley and Sons, 1982. 525 ~ 548.
- [14] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学 [M]. *地球化学*, 1997, 26(2): 14 ~ 31.
Li Xian-hua, Hu Rui-zhong, Rao Bing. Geochronology and Geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China [J]. *Geochimica*, 1997, 26(2): 14 ~ 31 (in Chinese with English abstract).
- [15] 吴福元, S Wilde, 孙德有. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 443 ~ 452.
Wu Fu-yuan, Wilde S, Sun De-you. Zircon SHRIMP U-Pb ages of gneissic granites in Jiamusi block massif, northeastern China [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2001, 17(3): 443 ~ 452 (in Chinese with English abstract).
- [16] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geol Soc London Spec Publ* 42, 1989. 313 ~ 347.
- [17] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992. 79 ~ 89.
Li Chang-nian. *Igneous Rocks' Trace Element Petrology* [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1992. 79 ~ 89 (in Chinese).
- [18] 赵振华. 微量元素地球化学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1997. 1 ~ 169.
Zhao Zhen-hua. *The Principle of Trace Elements Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1997. 1 ~ 169 (in Chinese).
- [19] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989. 133 ~ 190.
Wang Zhong-gang, Yu Xue-yuan, Zhao Zhen-hua, *et al.* *Rare Earth Element Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1989. 133 ~ 190 (in Chinese).
- [20] 叶瑛, 蓝玉琦. 浙江晚元古代火山岩系形成环境的稀土元素证据 [J]. *地球化学*, 1993, 22(3): 269 ~ 274.
Ye Ying, Lan Yu-qi. Rare evidence of formation environments of late Proterozoic volcanic rocks in Zhejiang Province [J]. *Geochimica*, 1993, 22(3): 269 ~ 274 (in Chinese with English abstract).
- [21] 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 81 ~ 83; 144 ~ 151.
Chen De-qian, Chen Gang. *Practical REE Geochemistry* [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1990. 81 ~ 83; 144 ~ 151 (in Chinese).
- [22] 余金杰, 徐志刚, 徐凤山. 小兴安岭西北部奥陶系火山岩形成环境 [J]. *地球学报*, 1996, 17(1): 54 ~ 64.
Yu Jin-jie, Xu Zhi-gang, Xu Feng-shan. Tectonic setting of Ordovician volcanic rocks in Northwestern Xiaoxing'anling, Heilongjiang Province [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1996, 17(1): 54 ~ 64 (in Chinese with English abstract).
- [23] Gill J B. Early geochemical evolution of an oceanic island arc and back arc: Fiji and the south Fiji basin [J]. *J Geol*, 1987, 95: 589 ~ 615.
- [24] Francalanci L, Taylor S R, McCulloch M T, *et al.* Geochemical and isotopic variations in the calc-alkaline rocks of Aeolian arc, southern Tyrrhenian sea, Italy: Constraints on magma genesis [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1993, 113: 300 ~ 313.
- [25] Ujike O, Tsuchiya N. Geochemistry of Miocene basaltic rocks temporally straddling the rifting of lithosphere at the Akita-Yamagata area, northeast Japan [J]. *Chem Geol*, 1993, 104: 61 ~ 74.
- [26] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [A]. Hawkesworth C J, Norry M J. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* [C]. Nantwich: Shiva Publishing Ltd, 1983. 230 ~ 249.
- [27] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1979, 69: 33 ~ 47.
- [28] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chem Geol*, 1986, 56: 207 ~ 218.
- [29] 李伍平, 路凤香. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展 [J]. *地质科技情报*, 1999, 18(2): 15 ~ 18.
Li Wu-ping, Lu Feng-xiang. New progress of the study of tectonic setting for calc-alkaline volcanic rocks [J]. *Geol Sci Techn Inform*, 1999, 18(2): 15 ~ 18 (in Chinese with English abstract).
- [30] Stolz A J, Jochum K P, Spettel R, *et al.* Fluid and melt-related enrichment in the subarc mantle: Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts [J]. *Geology*, 1996, 24(7): 587 ~ 590.
- [31] Miller C, Schuster R, Klötzli U, *et al.* Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and

- Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. *J Petrol*, 1999, 40(9): 1 399 ~ 1 424.
- [32] Hergt J M, Peate D W, Hawkesworth C J. The petrogenesis of Mesozoic Gondwana low-Ti flood basalts[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 105: 134 ~ 148.
- [33] Vollmer R, Norry M J. Possible origin of K-rich volcanic rocks from Virunga, East Africa, by metasomatism of continental crustal material: Pb, Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1983, 64: 374 ~ 386.
- [34] Beccaluva L, Di Girolamo P, Serri G. Petrogenesis and tectonic setting of the Roman Volcanic Province, Italy[J]. *Lithos*. 1991, 26: 191 ~ 221.
- [35] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 38 ~ 48.
Ma Chang-qian, Yang Kun-guang, Tang Zhong-hua, *et al.* Magma Dynamics of Granitoids: Theory, Method and a Case Study of the Eastern Hubei Granitoids[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1994, 38 ~ 48 (in Chinese).
- [36] 陈宣华, 王小凤, 张青, 等. 郟庐断裂带形成演化的年代学研究[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(3): 215 ~ 220.
Chen Xuan-hua, Wang Xiao-feng, Zhang Qing, *et al.* Geochronology study on the formation and evolution of Tan-Lu fault [J]. *J Changchun Univ Sci Techn*, 2000, 30(3): 215 ~ 220 (in Chinese with English abstract).
- [37] 李守军, 何文渊. 山东省中生代地层划分与对比 [J]. 高校地质学报, 1997, 3(1): 87 ~ 93.
Li Shou-jun, He Wen-yuan. Stratigraphic division and correlation of the Mesozoic strata in Shandong[J]. *Geol J China Univ*, 1997, 3(1): 87 ~ 93 (in Chinese with English abstract).
- [38] 徐志刚, 盛继福, 孙善平. 关于“橄辉玄武岩系列(组合)”特征及某些问题的讨论 [J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 43 ~ 62.
Xu Zhi-gang, Sheng Ji-fu, Sun Shan-ping. A discussion on characteristics of shoshonite rock series (association) and some problems [J]. *Geol Rev*, 1999, 45(suppl): 43 ~ 62 (in Chinese with English abstract).
- [39] 徐志刚. 从构造应力场特征探讨中国东部中生代火山岩成因 [J]. 地质学报, 1985, 59(2): 109 ~ 126.
Xu Zhi-gang. Genesis of Mesozoic volcanic rocks in eastern China as discussed in the light of the characteristics of the structural stress field[J]. *Acta Geol Sinica*, 1985, 59(2): 109 ~ 126 (in Chinese with English abstract).
- [40] 任纪舜. 中国及邻区大地构造图(1:5 000 000). 北京: 地质出版社, 1999.
Ren Ji-shui. The Map of Geo-Structure of China and Its Adjacent Areas (1:5000 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999 (in Chinese).
- [41] 许志琴. 扬子板块北缘的大型深层滑脱构造及动力学分析 [J]. 中国区域地质, 1987, 6(4): 289 ~ 300.
Xu Zhi-qin. Large deep surge structure and dynamic analysis of the north margin of Yangtze plate[J]. *Regional Geology of China*, 1987, 6(4): 289 ~ 300 (in Chinese).
- [42] 陈丕基. 郟庐断裂巨大平移的时代和格局 [J]. 科学通报, 1988, 33(4): 289 ~ 293.
Chen Pi-ji. Time and pattern of the enormous parallel move of Tan-Lu fault[J]. *Chinese Sci Bull*, 1989, 33(4): 289 ~ 293 (in Chinese).
- [43] 徐嘉伟, 马国锋. 郟庐断裂带研究的十年回顾 [J]. 地质论评, 1992, 38(4): 316 ~ 324.
Xu Jia-wei, Ma Guo-feng. Review of ten years(1981 ~ 1991) of research on the Tancheng-Lujiang fault zone[J]. *Geol Rev*, 1992, 38(4): 316 ~ 324 (in Chinese with English abstract).
- [44] Xu Jia-wei. The Tancheng-Lujiang Fault System[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1993. 17 ~ 50.
- [45] 朱光, 徐嘉伟, 孙世群. 郟庐断裂带平移时代的同位素年龄证据 [J]. 地质论评, 1995, 41(5): 452 ~ 456.
Zhu Guang, Xu Jia-wei, Sun Shi-qun. Isotopic age evidence for the timing of strike-slip movement of the Tan-Lu fault zone[J]. *Geol Rev*, 1995, 41(5): 452 ~ 456 (in Chinese with English abstract).
- [46] Esperanca S, Holloway J R. On the origin of some mica-lamprophyres: Experimental evidence from a mafic minette [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95: 207 ~ 216.

Tectonic setting and petrogenesis of Qingshan Formation volcanic rocks in western Shandong Province: Evidence from major elements and trace elements

LIU Shen^{1,2}, HU Rui-zhong¹, ZHAO Jun-hong^{1,2}, FENG Cai-xia^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The volcanic rocks in the study area all belong to sub-alkaline series including olivine basalt, andesite and dacite, from basic to intermediate, and to acid. By studying the characteristics of major and trace elements, we think it is the result of post collision arc (continental margin arc) volcanism, with the characteristics of within-plate basalt. Because there are many continental-crust minerals and the fluids coming from subducted sediments and lower mantle in upper mantle, contamination and metasomatism can take place in upper mantle, forming the enriched mantle source, which is enriched in phlogopite and incompatible elements, and possesses the elemental characteristics of crustal source. The forming of the volcanic rocks is the result of the partial melting of the enriched mantle, however, there can exist fractional crystallization of clinopyroxene, plagioclase, olivine, Ti-Fe oxide and other minerals and cumulation of olivine in the magma reservoir during the course of cooling.

Key words: tectonic setting; volcanic rocks; petrogenesis; metasomatism; partial melting; fractional crystallization; Shandong Province