

文章编号: 0379-1726(2005)04-0339-12

山东中生代基性脉岩的元素地球化学及其成因

刘 燊¹, 胡瑞忠¹, 赵军红², 冯彩霞¹, 曹建劲³

(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. 香港大学 地球科学系, 香港; 3. 中山大学 地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 研究区脉岩 SiO₂ 含量变化范围为 48.63% ~ 56.02%, 岩性上以煌斑岩、辉绿岩和辉长岩为主, 以富集轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素(LILE)、亏损重稀土元素(HREE)和高场强元素(HFSE)为特征。主元素和微量元素研究表明, 基性脉岩源区存在明显的地壳混染作用和少量富碳酸岩交代作用, 该交代作用可能与扬子下地壳物质的参与有关。

关键词: 基性脉岩; 元素地球化学; 岩石成因论; 山东省

中图分类号: P595 **文献标识码:** A

0 引 言

山东地区中生代基性脉岩分布广泛, 对这些脉岩的研究, 可以了解中生代岩石圈地幔特性(岩石圈减薄和拉张)提供很好的途径。目前, 关于山东中生代基性脉岩的研究已取得了部分成果^[1~16]。人们普遍认为脉岩的源区是富集岩石圈地幔(EM I 或 EM II)。关于山东地区燕山期火成岩的构造背景和成因, 存在着两种不同的认识: 一种观点认为它们具有活动大陆边缘弧特征, 说明它们与中生代环太平洋板块俯冲作用有关, 与伊泽奈崎洋向中国东部大陆下的俯冲作用有成因联系^[5~7]; 另一种观点则认为大别山北麓和山东地区富集地幔源区的形成主要与扬子板块和华北板块的碰撞及其后续的伸展引张机制有关^[17, 18]。由此看来, 非常有必要对山东地区幔源岩石做进一步的研究。因此, 本文拟以山东部分地区中生代基性脉岩为研究对象, 以期从主元素和微量元素方面对脉岩的地球化学特征及其成因做出合理解释。

1 地质概况和岩石学

华北太古宙地台被一条 1.8 Ga 前的元古宙造

山带分割成东西两部分^[19]。基底主要由太古宙一元古宙 TTG 片麻岩和绿片岩-麻粒岩相变质岩组成。上覆志留纪-震旦纪海相碳酸盐岩和页岩、二叠纪陆缘碎屑岩和中生代沉积物。在造山带以西, 古老克拉通岩石圈仍然比较稳定, 没有火山活动发育; 相反, 造山带以东, 自古生代以来火山活动相当频繁, 特别是在山东省地区(图 1)。山东省被郯庐断裂带(山东部分称为沂沭断裂带)分为东西两部分, 该断裂带以西称为鲁西, 以东为鲁东(包括胶东地块和胶南地块), 广泛发育中生代基性侵入岩和火山岩^[14~16, 20]。本研究对象为分布于胶东地区(龙口、烟台和威海)和鲁西地区(淄川^[21]和蒙阴)的基性脉岩(图 1), 主要分布在燕山早期花岗岩和中生代火山岩盆地中。通过 K-Ar 同位素年龄测定, 研究区基性脉岩年龄分布范围为 72 ~ 170 Ma^[22], 且大多数处在 90 ~ 140 Ma 之间, 属中生代岩浆作用的产物。在岩性上, 来自胶东地区的基性脉岩主要以煌斑岩(斜煌岩)为主, 并含少量辉长岩; 而鲁西地区主要出露辉长岩和辉绿岩。斜煌岩的斑晶由 > 30% 的自形角闪石(粒径 0.3 ~ 1.0 mm)和少量(5%)辉石和斜长石组成, 基质包括细粒角闪石(粒径 0.02 ~ 0.06 mm)、斜长石(粒径 0.02 ~ 0.05 mm)和磁铁矿组成。辉长岩呈辉长结构, 主要由同等自形程度的单斜辉石和斜长石(粒径约 1.0 ~ 2.0 mm)组成。辉绿岩主要由斜

收稿日期: 2004-09-01; 改回日期: 2004-11-30; 接受日期: 2005-04-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-125)

作者简介: 刘燊(1974-), 男, 副研究员, 岩石学和地球化学专业。E-mail: liushen@vip.gyig.ac.cn

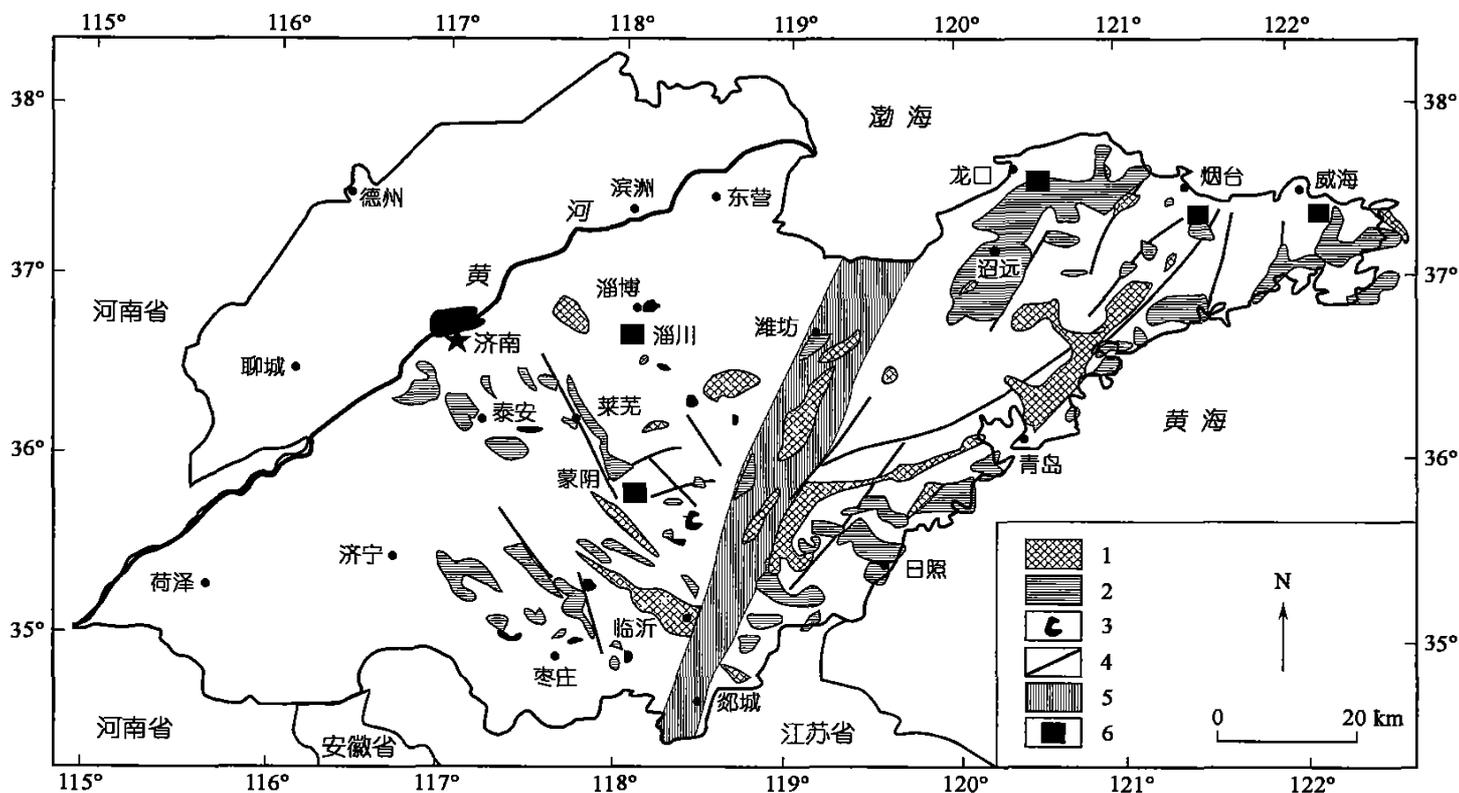


图 1 山东省中生代地质略图(引自 Zhang *et al.* [14])

Fig. 1 Mesozoic geological sketch map of Shandong Province (after Zhang *et al.* [14])

1. 中生代火山岩; 2. 中生代中酸性侵入岩; 3. 中生代基性侵入岩; 4. 断层(包括推测的断层); 5. 郯庐断裂带; 6. 研究区。
1. Mesozoic volcanic rocks; 2. Mesozoic intermediate-acid intrusive rocks; 3. Mesozoic basic intrusive rocks; 4. fault (including inferred fault); 5. Tan-lu fault; 6. study area.

长石、单斜辉石和少量磁铁矿组成。

2 分析方法

主元素在中国科学院地球化学研究所采用常规湿化学法分析,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体质谱(ICP-MS)分析,分析者漆亮,所有元素分析的重现性(准确度)优于5%。稀土元素的分析精度优于5%,微量元素分析精度优于10%。

3 主元素和微量元素地球化学

主元素分析结果见表1。 SiO_2 含量变化范围为48.63%~56.02%, TiO_2 为0.15%~1.12%, P_2O_5 为0.07%~0.52%。 MgO 含量变化较大(4.81%~10.01%), $\text{Mg}^\#$ 值 $[\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ 普遍较高(0.56~0.74)(氧化物为总量-LOI后归一化数据)。 MgO 与 CaO 、 FeO^* 、 TiO_2 、 Cr 和 Ni 之间具有明显的正相关关系;与 K_2O 和 Zr 呈负相关关系;而与 Al_2O_3 、 Sr 、 SiO_2 、 Th 和 P_2O_5 之间不具有明显的相关

关系(图2)。暗示在成岩过程存在着橄榄石、单斜辉石和Ti-Fe氧化物的分离结晶作用[23,24]。

稀土元素(REE)和其他微量元素分析结果见表2。表中所有样品都表现为轻稀土元素(LREE)富集和重稀土元素(HREE)亏损[LREE 75.1~309 $\mu\text{g/g}$ 、 $\sum\text{REE}$ 86.5~328 $\mu\text{g/g}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 6.0~23.7]的特征,表明在源区可能存在石榴子石残留[25], δEu 为0.72~0.93。另外,从表中可看出,鲁西地区基性脉岩的LREE和 $\sum\text{REE}$ 含量都明显低于胶东地区,这可能是部分熔融程度不同导致的。在球粒陨石[26]标准化的REE分布模式(图3)中,两地区样品都表现出近平行的右倾分布特征,表明它们在源区上存在相似性。所有曲线都具有弱的Eu负异常,暗示存在一定的斜长石分离结晶作用,这与岩相学观察(岩石中普遍存在斜长石斑晶)一致。但都不具有Ce的负异常,表明岩石没有受到低温蚀变作用影响[27]。在原始地幔[24]标准化蛛网图(图3)中,所有样品都表现出大离子亲石元素(LILE,如Ba、Sr、Pb和K)富集和高场强元素(HFSE,如Nb、Ti和P)亏损的特征,与弧火山岩和大陆地壳岩石的特征相似,而与洋岛玄武岩(OIB)以及大洋中脊玄武岩(MORB)存在

表 1 山东中生代基性脉岩主元素分析结果(%)

Table 1 Major element analysis (%) for the Mesozoic mafic dikes from Shandong Province

样品号	岩性	采样区	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	LOI	Total	Mg [#]
CZ6-1	斜煌岩	威海	53.98	0.15	18.71	2.79	3.55	0.11	5.30	5.55	3.29	2.58	0.35	3.23	99.59	0.64
CZ3	斜煌岩	威海	54.20	0.31	14.42	3.31	3.85	0.14	8.55	7.97	2.74	1.55	0.16	2.20	99.40	0.72
GZ5	斜煌岩	威海	48.05	0.25	21.47	3.06	4.05	0.14	6.39	6.86	3.29	2.33	0.50	3.10	99.49	0.66
WF4	斜煌岩	威海	53.68	0.23	15.95	2.94	3.57	0.15	6.50	7.64	3.32	2.09	0.25	3.04	99.36	0.68
WF4-1	斜煌岩	威海	51.83	0.20	19.94	2.65	4.09	0.16	4.64	7.50	2.89	2.27	0.25	2.90	99.28	0.60
DK2	斜煌岩	烟台	52.72	0.15	17.49	2.94	3.90	0.16	7.31	6.73	2.92	2.34	0.37	2.46	99.49	0.70
CG4	辉长岩	龙口	47.75	0.36	16.26	2.27	5.37	0.18	9.64	10.96	1.53	1.78	0.22	3.65	99.94	0.72
LCH4	辉长岩	龙口	47.04	0.40	17.10	3.59	3.85	0.19	8.98	10.31	3.07	1.96	0.25	3.10	99.84	0.73
LCH7	辉长岩	龙口	48.76	0.58	16.07	2.80	4.10	0.14	7.55	11.50	3.21	1.84	0.25	3.00	99.80	0.70
LM4	斜煌岩	龙口	47.62	0.31	17.49	3.36	4.30	0.18	9.35	9.23	2.92	1.67	0.26	2.98	99.67	0.73
LM6	斜煌岩	龙口	50.02	0.24	18.55	3.12	4.05	0.14	7.39	8.62	3.27	1.87	0.30	2.25	99.82	0.69
CH2	辉长岩	龙口	50.00	0.68	13.19	2.53	4.50	0.15	9.46	12.33	2.00	1.34	0.10	3.70	99.98	0.74
CH4	辉长岩	龙口	50.06	0.61	16.79	2.90	4.35	0.16	9.09	9.08	1.86	1.59	0.07	2.90	99.46	0.73
NSC2	辉长岩	淄川	52.02	0.34	18.55	3.88	4.10	0.18	4.72	7.44	3.20	2.29	0.37	2.64	99.73	0.56
MSZ5	辉绿岩	淄川	53.45	0.31	18.63	3.71	4.10	0.22	5.28	6.27	2.69	2.06	0.16	2.85	99.73	0.60
MSZ8	辉绿岩	淄川	52.51	0.23	17.79	3.67	5.01	0.17	5.18	6.12	4.12	1.33	0.17	3.20	99.50	0.56
SW2	辉绿岩	淄川	50.57	0.24	17.79	3.84	4.90	0.17	7.00	7.80	2.97	1.31	0.27	2.70	99.56	0.63
GCH2	辉长岩	蒙阴	49.80	1.08	14.90	4.47	5.22	0.16	8.98	9.16	1.58	0.75	0.35	2.90	99.35	0.67
GCH4	辉长岩	蒙阴	52.75	0.95	14.42	3.79	5.30	0.18	7.67	8.83	1.91	0.49	0.25	2.94	99.48	0.65

明显差别^[26,28,29]。与胶东地区相比(表 2、图 3),鲁西地区(特别是蒙阴地区)脉岩具有较低的 U、Th 含量,可能与碳酸盐化有关^[30],同时也表现出华北早期岩石圈地幔和地壳组成的特征^[19]。所有样品的 Nb/Ta、Zr/Hf 和 Th/U 比值范围分别为 18.0~24.1、27.3~41.3 和 3.0~7.7。

4 讨 论

4.1 地壳混染

研究区脉岩具有明显的 Nb 负异常(图 3)以及变化较大的 Th/U 比值,都暗示了地壳混染的存在^[31]。地壳混染可以发生在岩浆上升的过程中,同样可由地壳物质通过俯冲进入地幔源区(源区混合)引起。那么,地壳混染是以何种方式发生的呢?从元素地球化学特征来看,脉岩具有高的 Mg[#]值(0.56~0.74)、Th/U 比值(3.0~7.7)、Nb/U 比值(3.2~20.4)和 Ce/Pb 比值(2.9~23.0),低的 Nb/La 比值(0.12~0.27),反映研究区内基性脉岩的源区可能因受俯冲作用的影响而混合了部分地壳物质,而岩浆在上升过程中受地壳物质混染的可能性不大^[32]。同

时, Mg[#]、Na₂O 和 K₂O(特别是后者)与 SiO₂ 之间(图略)和 Sr 与 MgO 之间(图 2)不存在明显的正相关关系、Nb 与 Th 之间具有正相关关系(图略)以及 Nb/Ta 与 La/Yb 之间不具有负相关关系,都表明岩浆在上升过程中不存在地壳混染作用^[33,34]。另外,近年来在华北板块中生代玄武岩和侵入岩中相继发现地幔包体^[14,35,36],说明母岩浆上升侵位的速度非常快,没有受到地壳物质的混染。如此看来,脉岩富集 LILE 和 LREE 的特征只能由源区继承而来。原始地幔标准化蛛网图中鲁西地区脉岩 Th 相对于 La 普遍具有亏损特征,从而排除了上一中地壳混染的可能性^[37]。可见地壳成分更可能来自下地壳。

4.2 岩石成因

La/Sm-La 相关图(图 4)显示研究区基性脉岩为地幔岩部分熔融作用的产物,而且鲁西地区具有比胶东地区更高的熔融程度。主元素和微量元素研究表明,岩浆在上升侵位过程中同时经历了橄榄石、单斜辉石和 Ti-Fe 氧化物以及斜长石的分离结晶作用。

综上所述,脉岩只能来自富 LILE 和 LREE 的地幔源区。研究认为,金云母和角闪石是含 LILE 的主

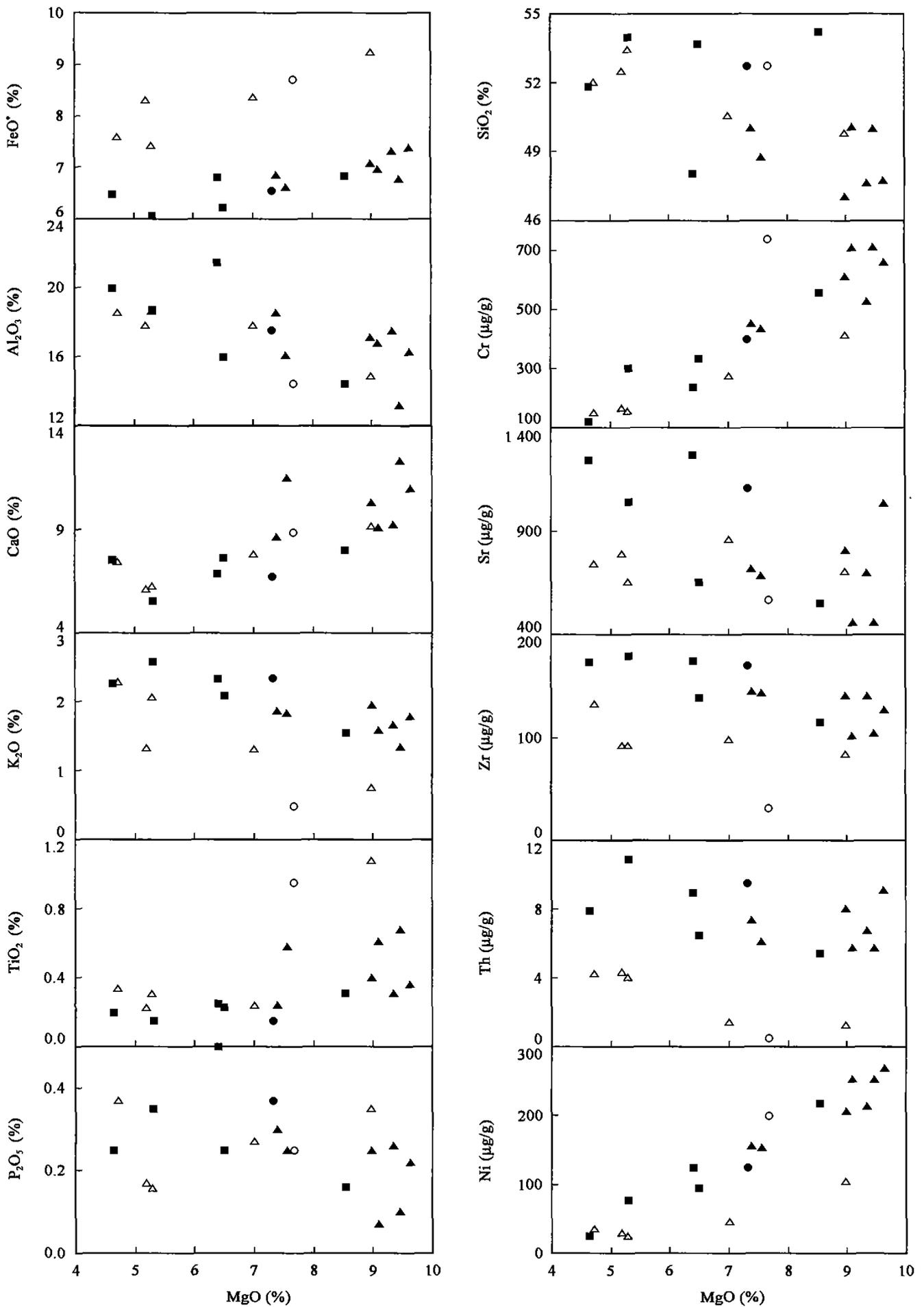


图 2 山东中生代基性脉岩主元素和微量元素相对 MgO 变异图

Fig. 2 Diagrams of major and trace elements vs. MgO for the Mesozoic mafic dikes from Shandong Province

○. 蒙阴; △. 淄川; ▲. 龙口; ●. 烟台; ■. 威海。○ = Mengyin; △ = Zichuan; ▲ = Longkou; ● = Yantai; ■ = Weihai.

表 2 山东中生代碱性脉岩的微量元素分析结果(μg/g)
Table 2 Trace element analysis (μg/g) of the Mesozoic mafic dikes from Shandong Province

样品号	CZ6-1	CZ3	GZ5	WF4	WF4-1	DK2	CG4	LCII4	LCII7	LM4	LM6	CH2	CH4	NSC2	MSZ5	MSZ8	SW2	GCH2	GCH4
岩性	斜煌岩	斜煌岩	斜煌岩	斜煌岩	斜煌岩	斜煌岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	斜煌岩	斜煌岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉长岩	辉长岩
采样区	威海	威海	威海	威海	威海	烟台	龙口	龙口	龙口	龙口	龙口	龙口	龙口	淄川	淄川	淄川	淄川	蒙阴	蒙阴
Ba	1 667	906	1 684	1 576	1 615	2 276	1 777	1 563	1 782	1 365	1 222	1 228	809	1 446	1 105	575	1 162	589	577
Rb	65.4	38.5	51.6	66.0	63.9	54.1	63.0	39.1	38.3	31.8	41.2	39.3	46.0	58.8	62.0	38.6	40.8	26.3	15.5
Sr	1 037	553	1 267	650	1 243	1 106	1 036	807	683	699	717	460	457	742	655	791	859	705	565
Y	19.4	16.9	25.7	33.1	21.9	20.1	21.4	25.1	18.1	21.4	23.7	15.8	16.3	19.2	17.0	17.4	18.9	17.6	16.3
Zr	179	114	174	139	174	170	127	140	143	140	145	104	102	133	92.6	92.8	98.0	84.2	31.7
Nb	9.88	7.87	13.5	6.97	7.86	9.16	7.18	6.98	7.18	7.77	7.97	4.46	4.42	7.73	4.53	4.69	5.00	4.73	2.97
Th	10.9	5.41	8.92	6.43	7.87	9.48	9.06	7.98	6.11	6.75	7.35	5.72	5.77	4.25	4.04	4.34	1.49	1.30	0.48
Ni	77.4	218	125	94.9	25.4	125	269	207	154	213	156	252	253	36.2	25.1	28.7	46.0	106	199
V	133	187	167	154	174	158	191	178	157	187	172	178	176	224	219	271	229	220	266
Cr	301	556	237	333	120	399	659	612	433	526	452	710	708	151	155	165	278	414	738
Hf	4.63	3.16	4.21	3.81	4.71	4.43	3.38	3.82	3.64	3.88	3.68	2.90	2.93	3.52	2.62	2.83	2.65	2.30	1.16
Sc	17.8	26.0	21.1	13.2	20.7	21.8	29.2	24.4	22.1	26.5	22.6	27.5	27.7	25.7	28.3	33.2	33.3	39.3	37.0
Ta	0.48	0.40	0.63	0.35	0.39	0.43	0.32	0.29	0.34	0.35	0.35	0.22	0.22	0.33	0.25	0.26	0.21	0.20	0.14
Co	26.2	38.2	32.2	34.1	26.5	33.6	48.0	41.1	33.7	41.4	34.0	43.1	43.1	31.4	34.6	40.8	35.0	49.6	48.1
U	1.73	1.42	1.47	1.37	1.68	1.38	1.29	1.14	1.02	0.88	1.04	1.16	1.15	1.29	1.33	1.45	0.48	0.40	0.15
W	0.31	0.33	0.37	0.32	0.60	0.29	0.42	0.47	0.39	0.35	0.37	0.44	0.50	0.69	0.52	0.61	0.39	0.53	0.49
Pb	12.2	17.6	12.5	6.35	11.4	9.91	11.7	4.28	6.54	8.85	9.40	13.4	13.2	10.7	7.12	7.79	6.21	6.49	7.63
Th/U	6.3	3.8	6.1	4.7	4.7	6.9	7.0	7.0	6.0	7.7	7.1	4.9	5.0	3.3	3.0	3.0	3.1	3.3	3.2
Nb/Ta	20.6	19.7	21.4	19.9	20.2	21.3	22.4	24.1	21.1	22.2	22.8	20.3	20.1	23.4	18.1	18.0	23.8	23.7	21.2
Zr/Hf	38.7	36.1	41.3	36.5	36.9	38.4	37.6	36.6	39.3	36.1	39.4	35.9	34.8	37.8	35.3	32.8	37.0	36.6	27.3
La	68.4	29.7	73.0	60.0	56.9	72.5	58.9	55.0	43.1	49.1	50.7	30.9	30.1	30.3	18.9	18.8	29.1	19.2	15.1
Ce	123	51.8	146	93.0	106	133	115	98.6	87.9	92.0	89.3	59.5	60.0	64.6	40.7	40.8	50.3	44.1	32.7
Pr	13.7	5.90	16.3	12.4	12.2	14.4	12.6	11.3	9.62	10.7	10.5	6.69	6.62	7.47	4.75	5.03	6.16	5.62	4.06
Nd	54.0	23.8	61.8	48.2	48.4	52.2	50.7	44.6	37.0	40.9	38.9	25.1	26.0	31.7	19.8	20.1	26.4	23.8	17.9
Sm	8.12	5.11	10.1	8.78	8.39	8.27	8.5	7.88	6.56	7.48	6.60	4.61	4.58	6.19	4.26	4.48	5.39	4.88	4.12
Eu	1.66	1.15	2.13	1.84	1.82	1.69	1.96	1.76	1.44	1.51	1.54	1.06	1.15	1.36	1.04	1.13	1.38	1.31	1.17
Gd	5.15	3.94	6.93	6.95	5.80	5.72	6.21	5.99	4.80	5.61	5.22	3.54	3.60	4.66	3.68	3.85	4.66	4.37	3.62
Tb	0.69	0.56	0.89	0.95	0.74	0.72	0.79	0.79	0.62	0.77	0.67	0.49	0.51	0.64	0.53	0.58	0.61	0.59	0.54
Dy	3.47	3.03	4.73	5.34	3.83	3.69	4.18	4.21	3.44	4.13	3.77	2.86	2.92	3.49	3.05	3.23	3.43	3.20	3.21
Ho	0.59	0.60	0.88	1.07	0.73	0.71	0.81	0.84	0.66	0.78	0.74	0.57	0.58	0.69	0.61	0.65	0.68	0.65	0.61
Er	1.76	1.60	2.28	2.86	1.98	2.02	1.95	2.21	1.82	2.07	2.04	1.56	1.58	2.00	1.65	1.82	1.80	1.59	1.62
Tm	0.23	0.23	0.30	0.39	0.26	0.25	0.27	0.26	0.24	0.28	0.27	0.22	0.21	0.24	0.21	0.25	0.23	0.20	0.22
Yb	1.72	1.68	2.01	2.65	1.73	1.72	1.84	1.99	1.58	1.93	1.81	1.48	1.46	1.69	1.45	1.57	1.51	1.43	1.50
Lu	0.25	0.22	0.29	0.41	0.26	0.26	2.78	0.29	0.23	0.30	0.26	0.23	0.20	0.25	0.23	0.23	0.24	0.20	0.22
LREE	269	117	309	224	234	282	248	219	186	202	198	128	128	142	89.5	90.3	119	98.9	75.1
ΣREE	283	129	328	245	249	297	265	236	199	218	212	139	140	155	101	103	132	111	86.5
(La/Yb) _N	23.7	10.5	21.6	13.4	19.6	25.1	19.1	16.5	16.2	15.1	16.6	12.4	12.3	10.6	7.7	7.1	11.4	8.0	6.0
δEu	0.78	0.78	0.78	0.72	0.80	0.75	0.83	0.78	0.78	0.78	0.80	0.80	0.87	0.77	0.80	0.83	0.84	0.87	0.93

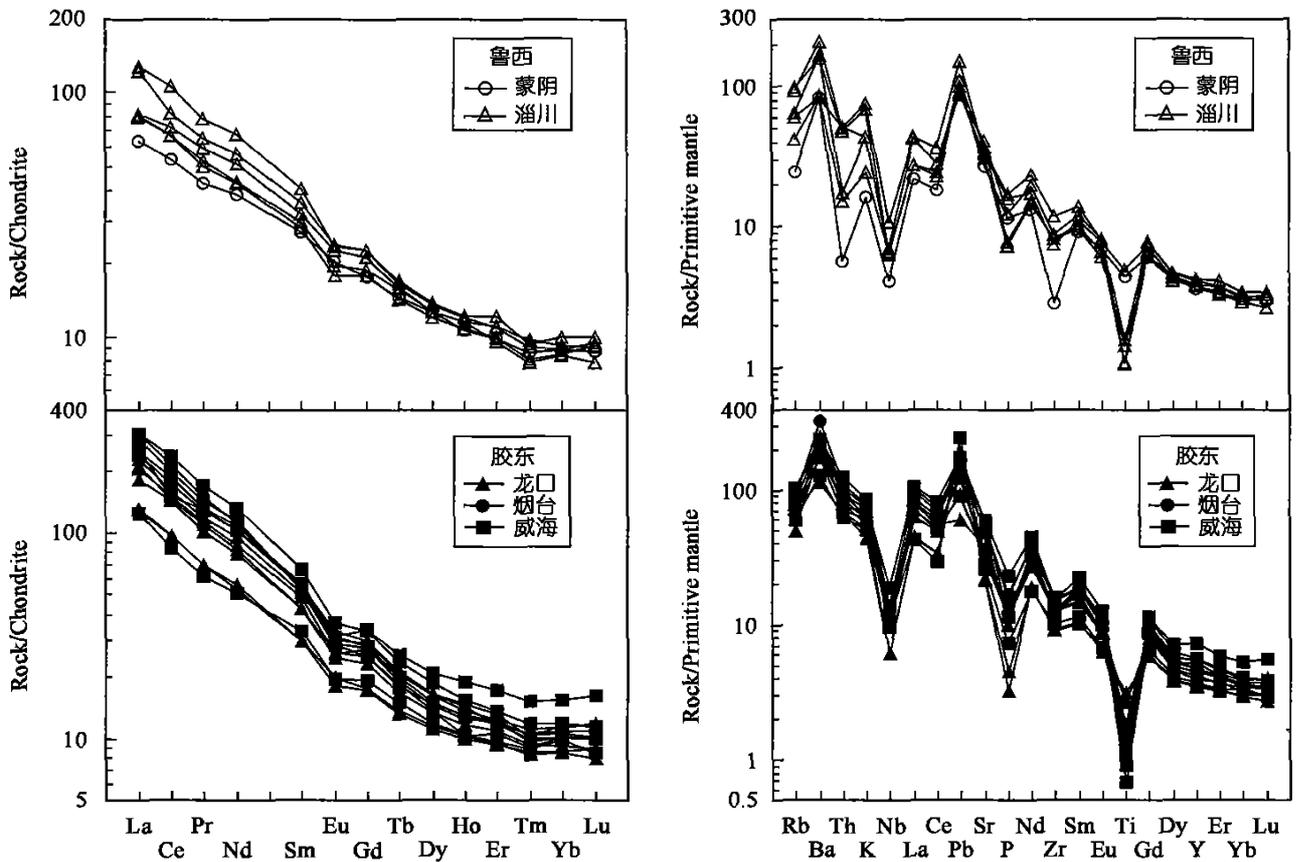


图 3 山东中生代基性脉岩 REE 分布模式和原始地幔标准化蛛网图

Fig. 3 Chondrite-normalized rare earth element patterns and primitive mantle-normalized spider diagrams of the Mesozoic mafic dikes from Shandong Province

要矿物^[38-40]。相对于角闪石, Rb 和 Ba 在金云母中具有更高的分配系数, 而 Sr 具有相对低的分配系数。因此, 脉岩高的 Rb/Sr 比值, 低的 Ba/Rb 比值以及两元素对的负相关性(图 5)表明源区中包含的最可能是金云母矿物。这类矿物的出现提供了岩浆源区曾经历过交代富集事件的矿物学证据, 暗示上述脉岩源区可能主要为含金云母石榴石地幔橄榄岩。

由于地幔条件下的金云母被认为主要与俯冲沉积物析出流体或深部来源流体交代作用有关^[41, 42], 这表明其源区可能曾经历过俯冲交代事件。

由于具有几乎相似的离子半径和电荷, Nb 和

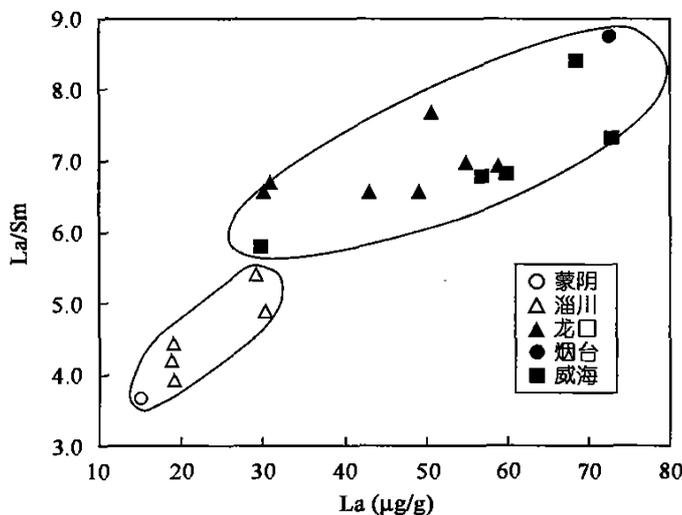


图 4 山东中生代基性脉岩 La/Sm-La 相关图
Fig. 4 La/Sm vs. La diagram of the Mesozoic dikes from Shandong Province

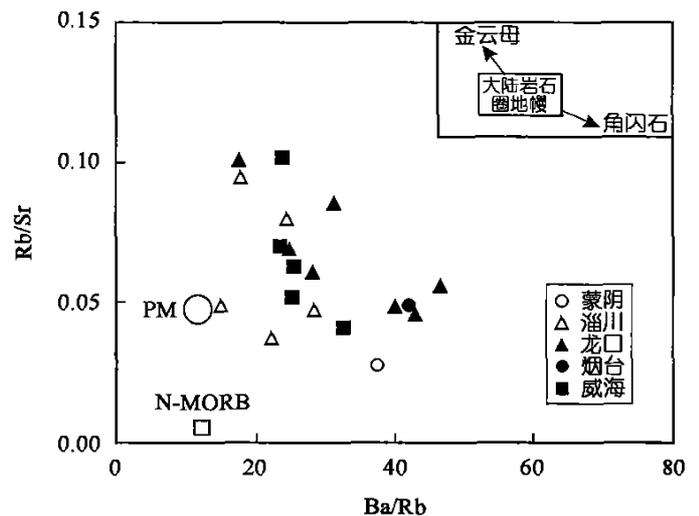


图 5 山东中生代基性脉岩 Rb/Sr-Ba/Rb 相关图
Fig. 5 Rb/Sr vs. Ba/Rb diagram of the Mesozoic dikes from Shandong Province

PM(原始地幔)和 N-MORB(正常大洋中脊玄武岩)引自文献[26]。

PM (primitive mantle) and N-MORB (normal mid-ocean ridge basalt) are from reference [26].

Ta 表现出相似的地球化学行为^[43, 44], 因此 Nb/Ta 比值几乎不受分离结晶和部分熔融作用的影响, 除非源区含有一定量的金红石或低 Mg[#] 角闪石^[39, 45-47]。实验研究表明, 金红石的存在能引起 Nb、Ta 的分馏, 从而导致 Nb/Ta 比值的增大^[44, 46]。从质量方面考虑, 如果有 0.1% 的金红石进入地幔发生交代作用, Nb/Ta 比值就会增大 40% ~ 60%^[48]。另一方面, 低 Mg[#] 角闪石同样可以引起 Nb、Ta 的分馏^[40, 45, 47-49]。地幔橄榄岩中的角闪石通常为高 Mg[#] (> 0.7) 角闪石, 因此含角闪石地幔橄榄岩的熔融不能产生文中 Nb/Ta 比值的熔体^[45]。另外, 低的 Ba/Rb 比值和高 Rb/Sr 比值 (图 5), 也排除了源区存在大量角闪石的可能性。在 Nb/Ta-Zr/Hf 相关图^[48] (图 6) 中, 研究区内基性脉岩几乎沿富金红石交代作用的方向分布, 进一步表明金红石交代作用影响。因此, 研究区基性脉岩中的 Nb、Ta 分馏应归因于富金红石的交代作用。同样地, 除非受到流体和碳酸盐交代作用影响, 成岩过程中的 Zr/Hf 比值通常不变^[51, 52]。在胶东和淄川地区, 基性脉岩的 Zr/Hf 比值变化较小 (36.8 ± 3.1), 与原始地幔 (36) 一致^[27]。而蒙阴地区基性脉岩的 Zr/Hf 比值相对较小 (27.3)。由于碳酸盐交代作用是引起 Zr/Hf 比值增大的主因^[52], 而且 Guo *et al.*^[48] 认为胶东地区其他地区 (三甲、垭子和王格庄) 煌斑岩的 Zr/Hf 比值

(40 ~ 51) 是由较强的碳酸盐交代作用引起的。因此胶东和淄川地区基性脉岩源区可能受到了轻微的碳酸盐交代作用影响。

以上研究显示地壳混染是由地壳物质通过俯冲作用引起的。另外, 源区存在金云母和金红石的交代, 进一步表明俯冲的地壳物质为下地壳成分。然而, 下地壳的归属如何呢? 目前普遍认为崆岭群是扬子下地壳的典型代表^[53-55], 在图 7^[14] 中基性脉岩基本上落入崆岭群范围之内, 暗示在熔体中包含扬子下地壳物质。然而, 扬子下地壳是如何进入华北板块内部并与古老的岩石圈地幔发生交代作用形成富 LILE 和 LREE 的地幔源区呢? Chemenda *et al.*^[57] 为解释大陆俯冲作用提出了一个二维热机制实验模型, 并用来解释印度 - 欧亚板块碰撞的演化历史。他们指出, 如果俯冲作用迅速 (在高度挤压区), 或俯冲的岩石圈具有一个厚的下地壳, 俯冲的大陆地壳将会与下伏的岩石圈地幔分离。为此借助于该模型来重建扬子板块与华北板块的碰撞历史, 以及反演华北中生代富集岩石圈地幔的形成过程。

近年来, 几乎所有的研究者都承认扬子板块与华北板块碰撞前存在苏 - 鲁洋^[58], 并认为苏 - 鲁洋在三叠纪时发生了大规模的消减并闭合。伴随古特提斯洋 (苏 - 鲁洋) 的闭合, 在约 240 Ma 时扬子板块与华北板块发生了挤压碰撞造山作用 (大别造山带的产生)。扬子岩石圈被重的大洋岩石圈拽入华北大块岩石圈地幔中^[14], 而扬子上/中地壳由于大洋板块的拆离, 快速在两板块之间上升, 上推前期底侵的地壳物质和片麻岩, 形成大别超高压造山带。

在 220 Ma 时, 扬子板块俯冲作用转变成高度挤压态^[57], 导致了壳幔的分离。扬子岩石圈地幔继续向下俯冲, 但扬子地壳由于自身密度比周围地幔小, 从而由于浮力作用上升至华北板块岩石圈底部 (形成加厚的大陆根)。加厚的大陆根在软流圈底侵作用下可能发生榴辉岩化^[59]或熔融作用^[60]。随后, 由扬子下地壳物质发生熔融产生的硅酸盐熔体迁移上升至上覆的华北大块岩石圈, 并与地幔橄榄岩发生交代作用。连续不断的交代作用将会完全破坏掉古老的华北岩石圈组成, 最终形成富 LILE 和 LREE 的中生代岩石圈地幔。另外, 对山东中生代基性脉岩的元素地球化学研究显示, 脉岩的 Zr/Nb、Ba/Th 和 Th/U 比值多处于 10 ~ 20、132 ~ 245 和 3 ~ 7 之间, 与 EM I 型富集地幔相似, 而明显高于 EM II 型富集地幔^[61], 当然, 这还需要来自同位素方面的证据。

以上模式合理地解释了富集岩石圈地幔的形

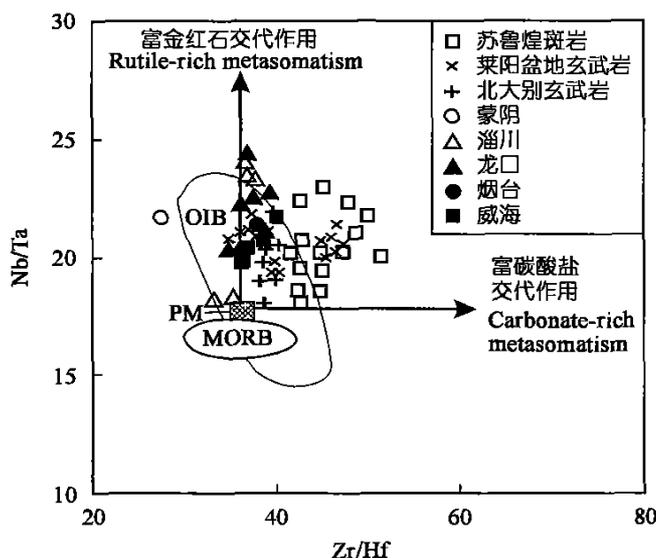


图 6 山东中生代基性脉岩 Nb/Ta-Zr/Hf 相关图

Fig. 6 Nb/Ta vs. Zr/Hf plot of the Mesozoic dikes from Shandong Province

苏鲁煌斑岩和莱阳盆地玄武岩引自文献[48]; 北大别玄武岩引自文献[50]; PM 和 MORB 引自文献[26]; OIB (洋岛玄武岩) 引自文献[45]。

Sulu lamprophyres and Laiyang basin basalts are from reference [48], the north Dabie basalts from reference [50], PM and MORB from reference [26], OIB (oceanic island basalt) from reference [45].

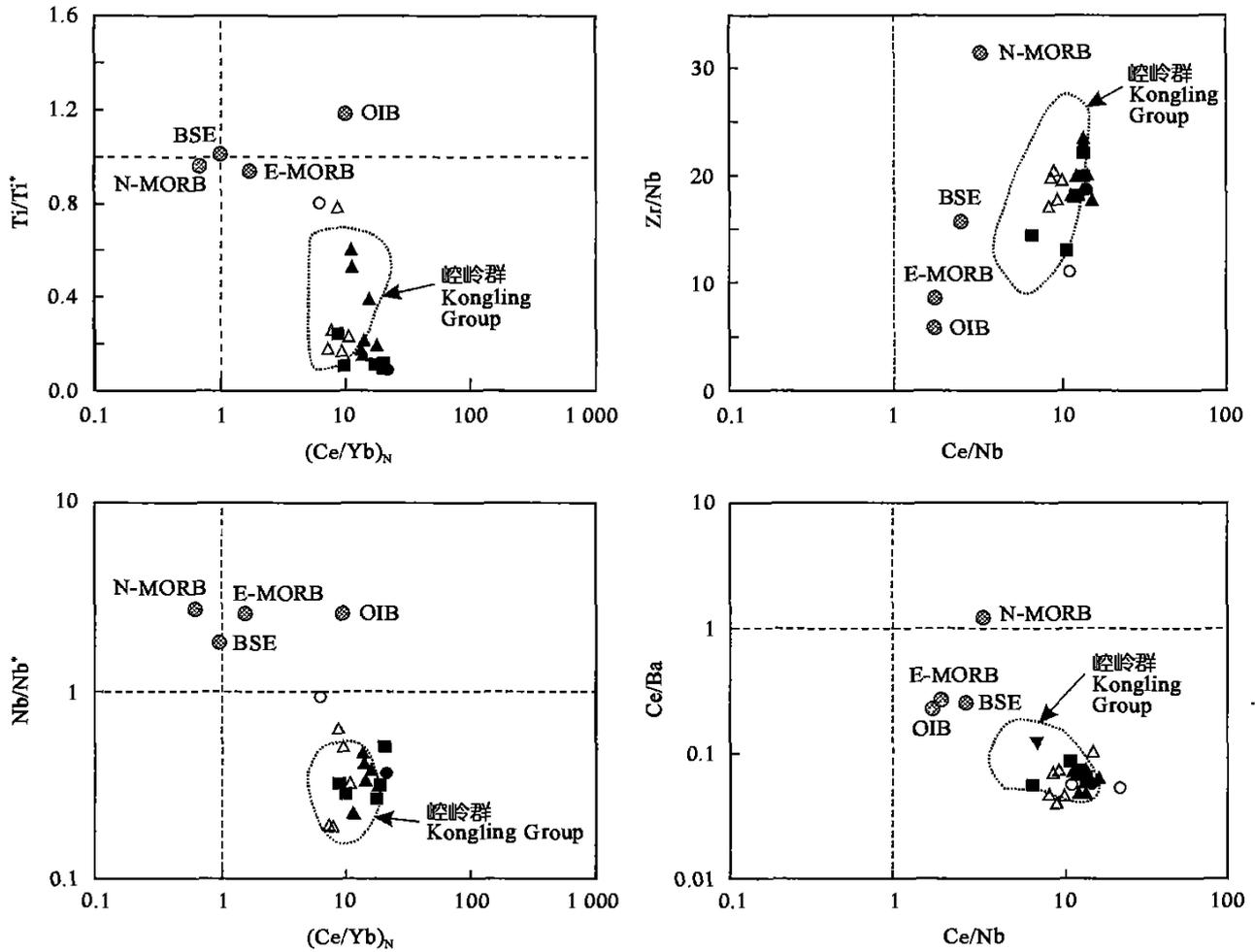


图 7 山东中生代基性脉岩微量元素比值相关图

Fig. 7 Variations in trace element ratios of the Mesozoic dikes from Shandong Province

崆岭群范围引自文献[14]; BSE(平均地球成分)、OIB、E-MORB(富集的 MORB)和 N-MORB 资料引自文献[26]。

Fields of Kongling Group are from reference [14], and data of BSE (bulk silicate earth), OIB, E-MORB (enriched MORB) and N-MORB from reference [26].

$Ti^* = (Gd_N + Tb_N) / 2$, $Nb^* = (U_N + K_N) / 2$, 其中 Gd_N 、 Tb_N 、 U_N 和 K_N 分别为其球粒隕石标准化值。该计算方法引自文献[56]。

成。但是，笔者近来通过对鲁西地区方城玄武岩和基性脉岩的研究^[20-22]，认为它们虽然都产自大陆板内，但却表现出活动大陆边缘弧的地球化学特性，暗示它们可能也与中生代环太平洋板块(伊泽奈崎洋)向中国东部大陆下的俯冲作用有成因联系。因此，笔者认为陆下岩石圈地幔的富集或许是多种动力因素综合作用的结果。

5 结 论

(1) 研究区脉岩 SiO_2 含量变化范围为 48.63% ~ 56.02%。以富集 LREE 和 LILE、亏损 HREE 和 HFSE 为特征,类似于弧火山岩和大陆地壳岩石。

(2) 岩浆在上升侵位过程中不发生明显的地壳混染,但存在着橄榄石、单斜辉石、斜长石和 Ti-Fe 氧化物的分离结晶作用。

(3) 基性脉岩来自富集岩石圈地幔(金云母石

榴石橄榄岩地幔)(EM I)的部分熔融,源区的形成主要归因于扬子下地壳物质与华北古老岩石圈地幔的连续交代作用、广泛的富金红石交代作用和少量富碳酸盐交代作用。但陆下富集岩石圈地幔的形成可能与古太平洋板块相对欧亚板块碰撞俯冲有着成因上的联系。

参考文献(References):

- [1] 罗天明. 脉岩与热液脉状金矿化的时空伴生及其地质意义[J]. 矿产与地质, 1992, 6(2): 118 ~ 125.
Luo Tian-ming. Temporal-spatial association between dyke rock and hydrothermal vein gold mineralization and its implication [J]. Mineral Res Geol, 1992, 6(2): 118 ~ 125 (in Chinese with English abstract).
- [2] 徐红. 胶东乳山金矿床及有关黑色脉岩的氧同位素研究: 壳幔演化与成岩成矿同位素地球化学[M]. 北京: 地震出版社, 1993. 157 ~ 158.
Xu Hong. Research on the Oxygen Isotope of Rushan Gold Deposit and Related Black Dikes in Jiaodong: Crust-Mantle Evolution

- and Isotopic Geochemistry during Diagenetic and Mineralization Processes [M]. Beijing: Seismological Press, 1993. 157 ~ 158 (in Chinese).
- [3] 应汉龙. 胶东邓格庄和金青顶金矿区煌斑岩特征及其与金成矿关系[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(3): 221 ~ 227.
Ying Han-long. Lamprophyre in the Denggezhuang and Jinqingding mining areas of Jiaodong: Its characteristics and relationship to gold mineralization [J]. Acta Petrol Mineral, 1996, 15(3): 221 ~ 227 (in Chinese with English abstract).
- [4] 邱检生, 王德滋, 曾家湖, McInnes B I A. 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, McInnes B I A. 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).
- [5] 程小久, 程景平, 王江海. 胶东蓬家乔金矿区钾玄质煌斑岩的元素地球化学研究[J]. 地球化学, 1998, 27(1): 91 ~ 100.
Cheng Xiao-jiu, Cheng Jing-ping, Wang Jiang-hai. Element geochemistry of shoshonitic lamprophyres in the Pengjiakuang gold district, Shandong Province [J]. Geochimica, 1998, 27(1): 91 ~ 100 (in Chinese with English abstract).
- [6] 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞. 胶东金矿区高钾-钾质脉岩地球化学与俯冲-壳幔作用的研究[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 401 ~ 412.
Sun Jing-gui, Hu Shou-xi, Ling Hong-fei. Study on the geochemistry and subduction-crust mantle interaction of the high potassium-potassium dike rocks in gold deposits concentration zone of east Shandong, China [J]. Acta Petrol Sinica, 2000, 16(3): 401 ~ 412 (in Chinese with English abstract).
- [7] 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞, 叶瑛. 胶西北两类金矿田的高钾-钾质脉岩元素地球化学与成岩作用研究[J]. 地球化学, 2000, 29(2): 143 ~ 152.
Sun Jing-gui, Hu Shou-xi, Ling Hong-fei, Ye Ying. Element geochemistry and origin of high potassic-potassic dike rocks in two types of goldfields in Northwest Jiaodong, Shandong, China [J]. Geochimica, 2000, 29(2): 143 ~ 152 (in Chinese with English abstract).
- [8] 孙景贵, 胡受奚, 沈昆, 姚凤良. 胶东金矿区矿田体系中基性-中酸性脉岩的碳、氧同位素地球化学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(1): 47 ~ 56.
Sun Jing-gui, Hu Shou-xi, Shen Kun, Yao Feng-liang. Research on C, O isotopic geochemistry of intermediate-basic and intermediate-acid dykes in goldfields of Jiaodong peninsula [J]. Acta Petrol Mineral, 2001, 20(1): 47 ~ 56 (in Chinese with English abstract).
- [9] 杨进辉. 中国东部胶东半岛金成矿的年代学和成矿学——对壳幔相互作用和岩石圈演化与成矿学相互作用的制约(博士学位论文)[D]. 中国科学院地质与地球物理研究所, 2000.
Yang Jin-hui. Chronology and metallogeny of gold mineralization of Jiaodong peninsula in eastern China—Constraint on crust-mantle interaction and the interaction between lithospheric evolutions and metallogeny (PhD thesis) [D]. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2000 (in Chinese with English abstract).
- [10] Fan W M, Guo F, Wang Y J, Lin G, Zhang M. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China [J]. Phys Chem Earth (A), 2001, 26(9-10): 733 ~ 746.
- [11] Zhang H F, Sun, M, Zhou, X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts [J]. Contrib Mineral Petrol, 2002, 144(2): 241 ~ 253.
- [12] 刘洪文, 邢树文, 孙景贵. 胶西北两类金矿床暗色脉岩的碳、氧同位素地球化学研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(1): 11 ~ 15.
Liu Hong-wen, Xiang Shu-wen, Sun Jing-gui. Oxygen and carbon isotope geochemistry of dark dikes in two types of gold deposits of northwest Jiaodong peninsula [J]. J Jilin Univ (Earth Sci ed), 2002, 32(1): 11 ~ 15 (in Chinese with English abstract).
- [13] 邱检生, 徐夕生, 罗清华. 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, 2001, 46(18): 1 500 ~ 1 508.
Qiu Jian-sheng, Xu Xi-sheng, Luo Ching-hua. Potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province: ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and source tracing [J]. Chinese Sci Bull, 2002, 47(2): 91 ~ 99.
- [14] Zhang H F, Sun M. Geochemistry of Mesozoic basalts and mafic dikes, Southeastern North China Craton, and tectonic implications [J]. Int Geol Rev, 2002, 44(4): 370 ~ 382.
- [15] Guo F, Fan W M, Wang Y J, Lin G. Geochemistry of late Mesozoic mafic magmatism in west Shandong Province, eastern China: Characterizing the lost lithospheric mantle beneath the North China Block [J]. Geochim J, 2003, 37(1): 63 ~ 77.
- [16] Yang J H, Chung S L, Zhai M G, Zhou X H. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle [J]. Lithos, 2004, 73(3-4): 145 ~ 160.
- [17] 邱检生, 王德滋, 周金城, 曾家湖. 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, 1996, 21(5): 546 ~ 552.
Qiu Jian-sheng, Wang De-zi, Zhou Jin-cheng, Zeng Jia-hu. Geology, geochemistry and genesis of Mesozoic shoshonitic volcanic rocks in Shandong Province [J]. Earth Sci, 1996, 21(5): 546 ~ 552 (in Chinese with English abstract).
- [18] 胡受奚, 王鹤年, 王德滋. 中国东部金矿地质学及地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 343p.
Hu Shou-xi, Wang He-nian, Wang De-zi. Geology and Geochemistry of the Gold Deposits in Eastern China [M]. Beijing: Science Press, 1998. 343p (in Chinese).
- [19] Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, Guo F, Zhang H F, Peng T P. Geochemical, ^{40}Ar / ^{39}Ar geochronological and Sr-Nd isotopic constraints on the origin of Paleoproterozoic mafic dikes from the southern Taihang Mountains and implications for the ca. 1800 Ma event of the North China Craton [J]. Precamb Res, 2004, 135

- (1-2): 55~77.
- [20] 刘荣, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞. 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[J]. 地球化学, 2003, 32(4): 306~316.
- Liu Shen, Hu Rui-zhong, Zhao Jun-hong, Feng Cai-xia. Tectonic setting and petrogenesis of Qingshan formation volcanic rocks in western Shandong Province: Evidence from major elements and trace elements [J]. *Geochimica*, 2003, 32(4): 306~316 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘荣, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞. 鲁西晚中生代基性脉岩的成因和源区性质: 岩石学和地球化学[J]. 地质论评, 2004, 50(6): 577~586.
- Liu Shen, Hu Rui-zhong, Zhao Jun-hong, Feng Cai-xia. Genesis and source characteristics of the mafic-ultramafic dikes in West Shandong Province: Evidence from petrology and geochemistry [J]. *Geol Rev*, 2004, 50(6): 577~586 (in Chinese with English abstract).
- [22] Liu Shen, Hu Rui-zhong, Zhao Jun-hong, Feng Cai-xia. K-Ar geochronology of Mesozoic mafic dikes in Shandong Province, Eastern China: Implications for crustal extension [J]. *Acta Geol Sinica*, 2005, 78(6): 1 207~1 213.
- [23] 李献华, 李寄嶠, 刘颖, 陈多福, 王一先, 赵振华. 华夏古陆古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, Lee Chi-yu, Liu Ying, Chen Duo-fu, Wang Yi-xian, Zhao Zhen-hua. 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).
- [24] Zhou X H, Sun M, Zhang G H, Chen S H. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton [J]. *Lithos*, 2002, 62(1-4): 111~124.
- [25] McKenzie D, O'Nions R K. Partial melt distributions from rare earth element concentrations [J]. *J Petrol*, 1991, 32(5): 1 021~1 091.
- [26] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saundern A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geol Soc Spec Publ* 42, 1989. 313~347.
- [27] Zou H B, Zindler A, Xu X S, Qi Q. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations, and tectonic significance [J]. *Chem Geol*, 2000, 171(1-2): 33~47.
- [28] Hofmann A W. Nb in Hawaiian magmas: Constraints on source composition and evolution [J]. *Chem Geol*, 1986, 57(1-2): 17~30.
- [29] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and the oceanic crust [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90(3): 297~314.
- [30] 温孝胜, 刘韶, 张惠玲, 秦佩玲, 赵焕庭. 南海沉积物中 U, Th 分布特征及其古环境意义[J]. 热带海洋, 1997, 16(3): 32~40.
- Wen Xiao-sheng, Liu Shao, Zhang Hui-ling, Qin Pei-ling, Zhao Huan-ting. Distributive characteristics and paleo-environmental significance of U and Th in sediments of South China Sea [J]. *Trop Oceanol*, 1997, 16(3): 32~40 (in Chinese with English abstract).
- [31] Zou H B, Zindler A. Theoretical studies of ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra and ^{231}U - ^{235}Pa disequilibria in young lavas produced during mantle melting [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(10): 1 809~1 817.
- [32] Miller C, Schuster R, Klötzi U, Frank W, Purtscheller F. 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.
- [33] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. *Rev Geophys*, 1995, 33(3): 267~310.
- [34] Münker C. Nb/Ta fractionation in a Cambrian arc/back system, New Zealand: Source constraints and application of refined ICPMS techniques [J]. *Chem Geol*, 1998, 144(1-2): 23~45.
- [35] 邱检生, 王德滋, 任启江. 郯庐断裂及其邻区中生代地幔交代作用与钾质岩浆成因 [A]. IGCP 第 321 项中国工作组. 亚洲的增生 [C]. 北京: 地震出版社, 1993. 139~142.
- Qiu Jian-sheng, Wang De-zi, Ren Qi-jiang. Mesozoic mantle metasomatism and potash magmatic genesis of Tanlu fault and adjacent regions [A]. China Working Group 321 Projects in IGCP. Asian Accretion [C]. Beijing: Seismological Press, 1993. 139~142 (in Chinese with English abstract).
- [36] 许文良, 郑常青, 王冬艳. 辽西中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及其地质意义[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 444~449.
- Xu Wen-liang, Zheng Chang-qing, Wang Dong-yan. The discovery of mantle- and crust-derived xenoliths in Mesozoic trachybasalts from western Liaoning and their geological implications [J]. *Geol Rev*, 1999, 45(suppl): 444~449 (in Chinese with English abstract).
- [37] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. London: Blackwell, 1985. 1~312.
- [38] Foley S F, Jackson S E, Fryer B J, Greenough J D, Jenner G A. Trace element partition coefficients for clinopyroxene and phlogopite in an alkaline lamprophyre from Newfoundland by LAM-ICP-MS [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60(4): 629~638.
- [39] Ionov D A, Griffin W L, O'Reilly S Y. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle [J]. *Chem Geol*, 1997, 141(3-4): 153~184.
- [40] Grégoire M, Lorand J P, O'Reilly S Y, Cottin J Y. Armalcolite-bearing, Ti-rich metasomatic assemblages in harzburgitic xenoliths from the Kerguelen Islands: Implications from the oceanic mantle budget of high-field strength elements [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(4): 673~694.
- [41] Esperança S, Holloway J R. On the origin of some mica-lamprophyres: Experimental evidence from a mafic minette [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95(2): 207~216.

- [42] Green D H, Wallace M E. Mantle metasomatism by ephemeral carbonatite melts [J]. *Nature*, 1988, 336(6198): 459 ~ 462.
- [43] Jochum K P, Seufert H M, Spettel B, Palme H. The solar-system abundances of Nb, Ta, and Y, and the relative abundances of refractory lithophile elements in differentiated planetary bodies [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1986, 50(6): 1 173 ~ 1 183.
- [44] Jochum K P, McDonough W F, Palme H, Spettel B. Compositional constraints on the continental lithospheric mantle from trace elements in spinel peridotite xenoliths [J]. *Nature*, 1989, 340(6234): 548 ~ 550.
- [45] Foley S, Tiepolo M, Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones [J]. *Nature*, 2002, 417(6891): 837 ~ 840.
- [46] Foley S F, Barth M G, Jenner G A. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(5): 933 ~ 938.
- [47] Tiepolo M, Bottazzi P, Foley S F, Oberti R, Vannucci R, Zanetti A. Fractionation of Nb and Ta from Zr and Hf at mantle depths: The role of titanite paragonite and kaersutite [J]. *J Petrol*, 2001, 42(1): 221 ~ 232.
- [48] Guo F, Fan W M, Wang Y J, Zhang M. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: Implications for enrichment processes beneath continental collisional belt [J]. *Lithos*, 2004, 78(3): 291 ~ 305.
- [49] Grégoire M, Moine B N, O'Reilly S Y, Cottin J Y, Giret A. Trace element residence and partitioning in mantle xenoliths metasomatized by highly alkaline, silicate- and carbonate-rich melts (Kerguelen Islands, Indian Ocean) [J]. *J Petrol*, 2000, 41(4): 477 ~ 509.
- [50] Fan W M, Guo F, Wang Y J, Zhang M. Late Mesozoic volcanism in the northern Huaiyang tectono-magmatic belt, central China: Partial melts from a lithospheric mantle with subducted continental crust relicts beneath the Dabie orogen? [J]. *Chem Geol*, 2004, 209(1-2): 27 ~ 48.
- [51] Dupuy C, Liotard J M, Dostal J. Zr/Hf fractionation in intraplate basaltic rocks: carbonate metasomatism in the mantle source [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56(6): 2 417 ~ 2 423.
- [52] Rudnick R L, McDonough W F, Chapell B W. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: Petrographic and geochemical characteristics [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 114(4): 463 ~ 475.
- [53] Gao S, Ling W L, Qiu Y M, Zhou L, Hartmann G, Simon K. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(13-14): 2 071 ~ 2 088.
- [54] Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, Han Y W, Zhao Z D, Hu Y K. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62(11): 1 959 ~ 1 975.
- [55] Ma C Q, Ehlers C, Xu C H, Li Z C, Yang K G. The roots of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics [J]. *Precamb Res*, 2000, 102(3-4): 279 ~ 301.
- [56] Salters V J M, Shimizu N. World-wide occurrence of HFSE-depleted mantle [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1988, 52(8): 2 177 ~ 2 182.
- [57] Chemenda A I, Burg J P, Mattauer M. Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system: Geopem based on new modelling, geological, and geophysical data [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 174(3-4): 397 ~ 409.
- [58] 吴根耀, 陈焕疆, 马力, 徐克定. 苏皖地块——特提斯演化阶段独立的构造单元 [J]. *古地理学报*, 2002, 4(2): 77 ~ 87. Wu Gen-yao, Chen Huan-jiang, Ma Li, Xu Ke-ding. Su-Wan Block: An independent tectonic unit during period of Tethyan evolution [J]. *J Palaeogeogr*, 2002, 4(2): 77 ~ 87 (in Chinese with English abstract).
- [59] Leech M L. Arrested orogenic development: Eclogitization, delamination, and tectonic collapse [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 185(1-2): 149 ~ 159.
- [60] Skjerlie K P, Douce A E P. The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa: Implications for melting in thickened continental crust and for subduction-zone processes [J]. *J Petrol*, 2002, 43(2): 291 ~ 314.
- [61] Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 104(2-4): 381 ~ 397.

Geochemistry and petrogenesis of the Mesozoic mafic dikes from Shandong Province

LIU Shen¹, HU Rui-zhong¹, ZHAO Jun-hong², FENG Cai-xia¹, CAO Jian-jin³

1. Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. Department of Earth Sciences, the University of Hong Kong, Hong Kong, China;
3. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: The tectonics of Shandong Province is divided into two parts by a long-lived wrench fault zone—Tancheng-Lujiang Fault. The eastern part is named Jiaodong and the western part is called Luxi. Mesozoic mafic dikes are widely distributed in Luxi (Mengyin and Zichuan) and Jiaodong regions of Shandong Province, China, providing an opportunity of investigating the nature of Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton (NCC). This paper presents major and trace elements for some newly reported mafic dikes from Shandong to decipher the geochemistry and petrogenesis of these mafic dikes. The major elements were analyzed by wet chemical analysis at the Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (IGCAS). Analytical uncertainties are from $\pm 1\%$ to 3% for major elements. The rare earth elements and other trace elements were analyzed by ICP-MS at the Isotope Analysis Center of IGCAS. The analytical accuracy is better than 5% for REE, and 10% for other trace elements. The mafic dikes from the Jiaodong region are mainly lamprophyres (spessartites) and gabbros, and the dikes from the Luxi region are gabbros and diabases. The SiO_2 contents of the dikes range from 48.63% to 56.02% . Based on the evidence from major and trace elements, the mafic dikes are characterized by enrichment in LREE and LILE (such as Ba, Sr, Pb and K), and depletion in HREE and HFSE (such as Nb, Ti and P). The dikes were derived from partial melting of metasomatized portions of the subcontinental lithospheric mantle (EM I), followed by fractionation of olivine, clinopyroxenes, plagioclase and Ti-Fe oxide. The mafic dikes are characterized by high Rb/Sr and Nb/Ta and normal Zr/Hf ratios, which indicate an early-stage rutile-rich and phlogopite-rich metasomatism and few carbonatite-rich metasomatism affected the source rocks for the mafic dikes. Moreover, in the sources, there exists evident crustal contamination due to the subduction of Yangtze lower crust.

Key words: mafic dikes; elemental geochemistry; petrogenesis; Shandong Province

Received September 1, 2004; revised November 30, 2004; accepted April 19, 2005; published July, 2005

Foundation item: Project of Major Orientations of the Knowledge Innovation Program, Chinese Academy of Sciences (KZCX3-SW-125)

About the first author: LIU Shen (1974 -), male, Associate Research Professor, engaged in the research on petrology and geochemistry.

E-mail: liushen@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-13368610221