

鲁西中、新生代镁铁质岩浆作用与地幔化学演化

邱检生, 胡建, 蒋少涌, 王汝成, 徐夕生

南京大学成矿作用国家重点实验室, 江苏南京 210093

摘要: 镁铁质火成岩作为分布最为广泛的典型幔源岩石, 已成为探索地幔化学性状及示踪岩石圈深部过程的主要研究对象。通过对典型样品元素—同位素组成的系统测定, 并结合前人已有资料, 综合研究了鲁西中生代和新生代镁铁质岩石的地质与地球化学特征。研究结果表明, 中生代镁铁质火成岩总体具有富轻稀土和大离子亲石元素、贫高场强元素、 I_{Sr} 值变化范围大(0.703 96~0.712 47)、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值显著偏低(-9.20~-21.21)的地球化学特征, 但该区南部和北部的中生代镁铁质岩石在元素—同位素组成上仍存在一定差别, 主要表现在南部较之北部镁铁质岩石具有更高的稀土总量(ΣREE 为 $325.52 \times 10^{-6} \sim 555.75 \times 10^{-6}$)和轻、重稀土比值($\text{LREE}/\text{HREE}=17.75 \sim 25.97$), 以及更高的 LILE/HFSE 比值(如 $\text{La}/\text{Nb}=6.37 \sim 13.85$, $\text{Th}/\text{Nb}=0.52 \sim 1.53$)。南部镁铁质岩石较之北部镁铁质岩石也更富放射成因锶, I_{Sr} 值分别为 0.708 44~0.712 47 和 0.703 96~0.705 98。元素—同位素综合示踪指示鲁西中生代地幔总体具有因岩石圈大规模拆沉作用形成的 EM I 型富集地幔特征, 但其南部叠加了因深俯冲而进入地幔的扬子陆壳的影响, 因而表现出 EM I 和 EM II 组分混合的富集地幔特征。新生代玄武岩具有类似于大洋玄武岩的地球化学特征, 其源区应为亏损的软流圈地幔, 但在部分熔融形成岩浆之前遭受了近期的交代作用。自中生代至新生代, 华北克拉通地幔具有由富集向亏损演变的趋势, 这一化学性状的演变最可能是中生代以来岩石圈大规模拆沉作用, 导致软流圈地幔上涌并对原有岩石圈地幔再改造所致。

关键词: 镁铁质火成岩; 地球化学; 源区示踪; 地幔化学演化; 鲁西。

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2005)06-0646-13

收稿日期: 2005-05-23

Mesozoic-Cenozoic Mafic Magmatism in Western Shandong Province and Its Implication for the Chemical Evolution of the Mantle

QIU Jian-sheng, HU Jian, JIANG Shao-yong, WANG Ru-cheng, XU Xi-sheng

State Key Laboratory of Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Mafic igneous rock, a widely distributed and typical mantle-derived rock, has become a major research source for revealing possible mechanisms for the chemical evolution of the mantle. Combined geological and geochemical studies have been carried out on the Mesozoic and Cenozoic mafic igneous rocks in western Shandong Province, determining the elemental and isotopic compositions of typical samples. Generally, the Mesozoic mafic igneous rocks have enriched LREE and LILE concentrations, low HFSE abundance, and display highly variable I_{Sr} ratios (0.703 96–0.712 47) and distinctly negative $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (-9.20 to -21.21). Compared to the north of western Shandong Province, the Mesozoic mafic rocks in the south have higher total REE contents ($\Sigma \text{REE} = 325.52 \times 10^{-6} \sim 555.75 \times 10^{-6}$), higher LREE/HREE ratios (17.75–25.97), and higher LILE/HFSE ratios (e. g., $\text{La}/\text{Nb}=6.37 \sim 13.85$, $\text{Th}/\text{Nb}=0.52 \sim 1.53$). They also have more radiogenic Sr isotopic compositions, with I_{Sr} values of 0.708 44–0.712 47 and 0.703 96–0.705 98, respectively. Integrated elemental and isotopic tracing suggest that the Mesozoic mantle of western Shandong Province is generally characterized by the EM I component, which was probably formed by large-scale lithospheric delamination, whereas the mantle source in the south part has been superimposed by the influence of the deep subducted Yangtze continental materials, and thus displays the mixed features of EM I and EM II components. The geochemical characteristics of the Cenozoic basalts are

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40272035); 国家创新研究群体科学基金项目(No. 40221301); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0459)。

作者简介: 邱检生(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事壳幔演化与成岩成矿关系研究。E-mail: jsqiuwyh@public1.ptt.js.cn

similar to those of the oceanic basalts. It is likely that the rocks were derived from a depleted asthenosphere source but underwent metasomatism shortly before partial melting. From the Mesozoic to the Cenozoic, the nature of the mantle beneath the North China craton evolved from an enriched one to a depleted one. This chemical evolution most likely resulted from an asthenosphere upwelling, which was induced by large-scale lithospheric delamination and thus replaced the original lithospheric mantle with a newly created one.

Key words: mafic igneous rock; geochemistry; source tracing; mantle chemical evolution; western Shandong Province.

0 引言

地幔的化学性状及其随时间的演化是当前固体地球科学领域倍受关注的前沿和热点,“岩石探针”(lithoprobe)被视为解决这一问题的最有效手段(邓晋福等,1996). 镁铁质火成岩(玄武岩及相关侵入岩)作为分布最为广泛的典型幔源岩石,已成为探索地幔化学性状及示踪岩石圈深部过程的主要研究对象.

鲁西中、新生代镁铁质岩浆作用广泛发育,中生代镁铁质火成岩较集中的分布区有2个:其一位于鲁西地块南部的费县—蒙阴一带,包括费县方城含辉石岩捕虏体的玄武岩和蒙阴钾玄质火山岩;另一位于鲁西地块北部的济南—邹平一带,包括济南辉长质杂岩体、邹平辉长质杂岩体及相关的玄武质火山岩. 新生代镁铁质火成岩主要分布在临朐—昌乐一带,为碱性玄武岩(图1). 前人对上述岩石进行过不同程度的研究,并据此探讨了源区地幔的性状与演化(陈道公,1992;支霞臣等,1990, 1994; Guo *et al.*, 2001, 2003; Qiu *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002, 2004; 裴福萍等,2004; Zheng *et al.*, 2005), 但以往的工作主要是针对局部地段或局部时段的岩石开展的,对源区地幔性质及其富集机制的认识存在分歧. 本次研究将区内中、新生代镁铁质火成岩置身于一个统一的整体来考虑,通过对典型样品元素—同位素组成的系统测定,并结合前人已有资料,对鲁西乃至整个华北克拉通中、新生代地幔的化学性状和演化及其形成机制进行了全面探讨.

1 地质概况及岩石学特征

鲁西位于华北板块东南部,处于沂沭断裂带西侧,构造上紧邻大别—苏鲁聚合带(图1). 其基底地层主要由太古界泰山群中高级变质岩组成,基底之上为寒武—奥陶系碳酸盐岩地层,石炭—二叠纪出现沉积间断. 中、新生代火山岩多分布于断陷型火山盆地中,主要为中、新生代火山喷发的产物. 辉长质杂岩

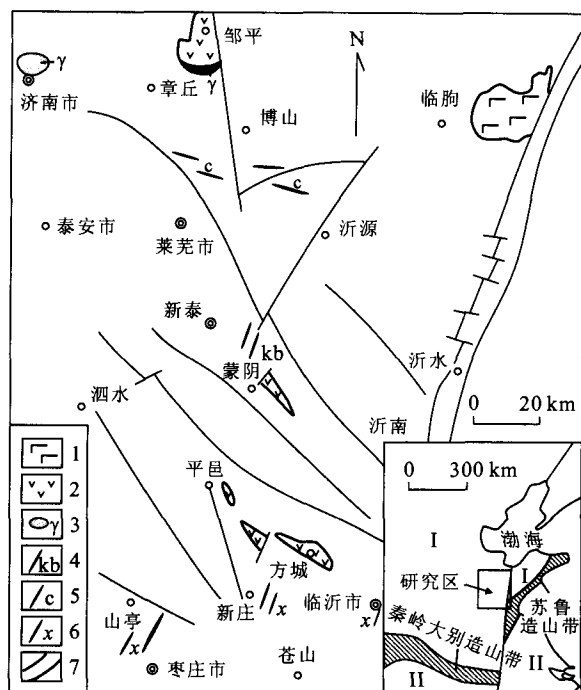


图1 鲁西中、新生代镁铁质岩石分布

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of the Mesozoic and Cenozoic mafic igneous rocks in western Shandong Province

1. 新生代碱性玄武岩; 2. 中生代火山岩; 3. 辉长质杂岩体; 4. 金伯利岩; 5. 碳酸岩; 6. 镁铁—超镁铁质煌斑岩; 7. 断裂; I. 华北板块; II. 扬子板块

体分布于鲁西地块北部的济南—邹平一带,呈岩镰或岩墙状产出,其中以济南杂岩体规模最大,出露面积达400 km²(李昶绩,1992). 除中、新生代镁铁质火成岩外,鲁西地块内还分布有金伯利岩、碳酸岩和镁铁—超镁铁质煌斑岩(图1).

临朐—昌乐一带新生代玄武岩主要形成于中新世, K-Ar 年龄介于 10.6~18.9 Ma 之间(金隆裕, 1985), 主要岩性为碱性橄榄玄武岩. 岩石多呈细粒斑状或显微斑状结构、致密块状或气孔—杏仁构造, 斑晶矿物主要为橄榄石(Fo=80~100)和钛普通辉石, 基质由钛普通辉石、斜长石和少量橄榄石及磁铁矿组成. 岩石中普遍含二辉橄榄岩包体及铝质辉石和蓝刚玉等矿物巨晶.

表 1 鲁西中、新生代镁铁质火成岩代表性样品主量和微量元素含量及 Sr-Nd 同位素组成

Table 1 Major, trace element contents and Sr-Nd isotopic compositions of the typical mafic igneous rocks in western Shandong Province

时代	新生代					中生代					
产地	临朐—昌乐					方城		蒙阴			济南
岩性	橄榄玄武岩		碧玄岩	橄榄玄武岩		橄榄玄武岩		玄武粗安岩	粗面玄武岩		苏长辉长岩
样号	B-1	B-4	B-5	B-7	B-9	FC-2	FC-5	MY-1	MY-6	M-2	JN-1
SiO ₂	44.01	47.60	46.05	42.53	46.05	47.24	47.75	53.54	54.40	50.69	47.04
TiO ₂	2.49	1.83	1.79	2.68	2.16	1.11	1.13	1.26	0.91	1.09	0.43
Al ₂ O ₃	13.52	15.25	13.01	12.75	13.87	13.00	13.91	16.84	15.48	14.99	8.09
Fe ₂ O ₃ *	13.71	12.27	13.19	13.98	13.14	9.47	9.53	7.21	7.17	8.11	16.09
MnO	0.18	0.16	0.17	0.20	0.16	0.14	0.14	0.08	0.12	0.12	0.25
MgO	10.23	8.82	12.17	10.70	10.79	10.78	10.66	3.71	5.37	6.35	17.78
CaO	9.10	8.89	8.29	9.81	9.14	9.38	9.46	6.31	7.38	7.76	10.59
Na ₂ O	3.42	2.69	2.37	3.99	2.03	3.12	3.14	3.98	3.35	3.08	1.04
K ₂ O	2.19	1.31	1.31	1.88	1.42	1.13	1.06	3.09	2.90	3.17	0.32
P ₂ O ₅	0.70	0.40	0.38	0.86	0.39	0.81	0.87	0.73	0.50	0.85	0.05
LOI	1.24	2.29	2.23	1.88	2.25	3.41	3.21	3.77	2.58	3.67	—
Total	100.79	101.51	100.96	101.26	101.40	99.59	100.86	100.52	100.16	99.88	101.68
ALK	5.61	4.00	3.68	5.87	3.45	4.25	4.20	7.07	6.25	6.25	1.36
Mg [#]	0.60	0.59	0.65	0.60	0.62	0.69	0.69	0.51	0.60	0.61	0.69
La	37.88	21.17	21.15	51.46	22.29	124.36	124.98	101.30	78.78	117.94	4.45
Ce	79.80	46.42	47.26	103.18	48.81	248.80	250.96	177.20	142.30	231.74	11.40
Pr	8.76	5.40	5.45	11.21	5.54	28.62	28.86	20.58	17.48	27.06	1.58
Nd	36.01	23.28	22.79	44.68	23.88	108.45	108.15	71.84	61.68	102.40	7.98
Sm	7.03	4.80	4.82	7.89	4.98	14.89	15.27	9.94	9.02	14.14	2.16
Eu	2.26	1.73	1.64	2.65	1.79	3.89	3.79	2.41	2.10	3.66	0.66
Gd	6.59	4.68	4.64	7.44	4.94	11.45	11.57	6.54	5.87	10.68	2.12
Tb	0.92	0.69	0.70	1.03	0.75	1.24	1.23	0.79	0.74	1.16	0.34
Dy	4.68	3.66	3.65	5.11	3.84	5.77	5.70	3.69	3.53	5.24	1.90
Ho	0.78	0.63	0.66	0.81	0.67	0.84	0.83	0.70	0.69	0.78	0.38
Er	1.97	1.69	1.75	2.12	1.77	2.23	2.27	1.49	1.58	2.16	1.00
Tm	0.24	0.22	0.23	0.25	0.23	0.28	0.28	0.22	0.21	0.28	0.15
Yb	1.42	1.30	1.35	1.34	1.33	1.79	1.69	1.16	1.21	1.61	0.88
Lu	0.20	0.19	0.20	0.20	0.19	0.26	0.26	0.17	0.20	0.24	0.15
ΣREE	188.55	115.86	116.27	239.36	121.00	552.87	555.85	398.03	325.52	519.10	35.14
LR/HR	10.22	7.87	7.82	12.08	7.82	22.17	22.32	25.97	21.99	22.43	4.08
(La/Yb) _N	18.02	10.94	10.57	25.83	11.30	46.78	49.78	58.88	40.54	49.27	3.40
(La/Sm) _N	3.39	2.77	2.76	4.10	2.82	5.25	5.15	6.41	5.49	5.24	1.30
(Gd/Yb) _N	3.76	2.89	2.78	4.47	3.00	5.16	5.51	4.55	3.62	5.34	1.94
δEu	1.00	1.10	1.04	1.04	1.09	0.88	0.84	0.86	0.83	0.88	0.93
Rb	21.48	12.76	11.12	32.72	17.33	14.68	14.12	61.70	57.90	68.32	6.17
Sr	799	585	518	880	720	1374	1408	1436	1096	4482	230
Ba	286	319	248	414	949	1525	1554	1191	1438	2597	145
U	1.32	0.57	0.65	1.62	0.53	1.73	1.75	1.60	2.10	2.11	0.13
Th	4.68	2.15	2.33	6.28	2.78	12.00	11.83	8.30	4.60	13.86	0.49
Pb	3.77	2.60	5.46	7.84	2.54	11.35	11.51	13.00	12.90	14.51	2.36
Ga	21.48	19.09	18.09	19.83	17.85	17.52	17.45	17.70	16.70	17.38	7.87
Y	19.21	16.24	16.34	20.71	17.45	23.31	23.32	18.15	17.73	21.70	9.66
Sc	21.55	21.78	22.78	21.98	23.81	22.10	21.41	15.90	15.60	19.69	56.73
Nb	51.96	23.90	24.97	63.97	29.06	13.63	13.82	15.90	7.00	16.92	0.94
Ta	3.44	1.68	1.65	4.15	1.95	0.87	0.72	1.75	1.22	0.83	0.13
Zr	241.2	148.6	153.0	251.2	153.8	283.6	286.2	287.0	237.0	298.9	25.4
Hf	5.60	3.86	3.80	5.90	3.93	6.54	6.79	5.30	4.80	7.14	0.86

续表 1

时代	新生代					中生代					
产地	临朐—昌乐					方城		蒙阴		济南	
岩性	橄榄玄武岩		碧玄岩		橄榄玄武岩	橄榄玄武岩		玄武粗安岩		粗面玄武岩	苏长辉长岩
样号	B-1	B-4	B-5	B-7	B-9	FC-2	FC-5	MY-1	MY-6	M-2	JN-1
V	230.8	203.8	208.7	257.6	243.4	180.9	178.8	142.0	122.0	170.7	243.7
Cr	142.2	161.2	201.7	167.9	208.5	287.9	271.1	122.0	189.0	120.0	403.8
Co	64.2	54.7	72.4	67.6	66.9	45.8	43.9	20.3	24.9	34.4	100.5
Ni	109.8	74.7	143.0	124.0	118.2	102.3	90.7	126.0	90.2	43.7	81.3
La/Nb	0.73	0.89	0.85	0.80	0.77	9.12	9.04	6.37	11.25	6.97	4.73
Ba/Nb	5.50	13.33	9.95	6.46	32.66	111.86	112.45	74.91	205.43	153.50	154.39
Th/Nb	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.88	0.86	0.52	0.66	0.82	0.52
Nb/U	39.31	41.78	38.31	39.57	54.65	7.86	7.90	9.94	3.33	8.00	7.38
Zr/Ba	0.84	0.47	0.62	0.61	0.16	0.19	0.18	0.24	0.16	0.12	0.17
t/Ma	14.9 ^①		14.9 ^①	14.9 ^①		124.9 ^②		114.8 ^③	118.2 ^④		115.0 ^⑤
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.079 45		0.063 38	0.109 7		0.031 63		0.123 58	0.174		0.079 24
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.703 133		0.703 517	0.703 219		0.709 234		0.712 66	0.711 58		0.705 556
2σ	12		9	13		15		8	11		12
I _{Sr}	0.703 116		0.703 504	0.703 196		0.709 178		0.712 458	0.711 288		0.705 426
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.118 6		0.118 5	0.107		0.083 51		0.087 52	0.092 31		0.164
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512 898		0.512 615	0.512 823		0.511 884		0.512 073	0.511 769		0.512 100
2σ	8		6	7		9		9	8		10
ε _{Nd} (t)	5.22		-0.30	3.78		-12.91		-9.42	-15.38		-14.94

主量元素单位%, 稀土和微量元素单位 10^{-6} ; Fe_2O_3^* 代表全铁; $\text{ALK} = \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$; $\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg} + \sum \text{Fe})$, 原子比。主量元素在南京大学现代分析中心用 XRF 方法测定, 相对标准样品的偏差, 高含量氧化物小于 2%, 低含量氧化物小于 10%。微量元素(包括稀土元素)在南京大学成矿作用国家重点实验室用 ICP-MS 方法分析, 精度优于 10%。Sr、Nd 同位素组成在南京大学现代分析中心用 VG354 质谱测定, 详细的分析方法见王银喜等(1988)。表中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 所示的 2σ 误差为小数点后的最后位数, 在本文样品分析过程中, 该仪器测定的 NBS-987 标样的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710 314±8(2σ), La Jolla 标样的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.511 871±8(2σ), Sr 和 Nd 同位素比值分别采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.119 4 和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 9 进行质量分馏校正, 实验室全流程本底: Rb、Sr 为 $1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9}$ g, Sm、Nd 为 $5 \times 10^{-11} \sim 7 \times 10^{-11}$ g。初始值计算中的年龄①为金隆裕(1985)报道的 K-Ar 年龄的平均值; ②为 K-Ar 年龄, 据 Zhang *et al.* (2002); ③和④为⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄, 据 Qiu *et al.* (2002); ⑤为⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄, 据谭东娟和林景仟(1994)。

中生代典型玄武岩见于费县方城一带, K-Ar 年龄为 119~125 Ma (Zhang *et al.*, 2002; 裴福萍等, 2004)。按化学成分可分为碱性玄武岩和拉斑玄武岩两类, 其中含有辉石岩捕虏体, 最近还发现有橄榄石捕虏晶 (Zhang *et al.*, 2004)。但鲁西中生代火山岩的主体为钾玄质火山岩, 主要岩性包括粗面玄武岩、玄武粗安岩及偏中性的粗安岩、安粗岩等。蒙阴盆地钾玄质火山岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄变化于 114.8~124.3 Ma 之间 (Qiu *et al.*, 2002), 这套岩石中未发现深源岩石包体。

济南—邹平一带辉长质杂岩体报道的年龄较多, 但数据较分散 (李昶绩, 1992)。谭东娟和林景仟 (1994) 测得济南辉长质杂岩体的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄为 115 Ma, 这一年龄与邹平盆地辉长质岩体侵入青山组火山岩 (K-Ar 年龄为 128~130 Ma, 山东省地质矿产局, 1991) 的地质事实较为吻合, 因此, 它们应属于燕山晚期岩浆活动的产物。杂岩体的主体岩性为

橄榄苏长辉长岩, 组成矿物为基性斜长石、普通辉石、紫苏辉石和少量橄榄石、黑云母等, 其中济南杂岩体分异良好, 可区分为基性程度渐次降低的中心相、过渡相和边缘相, 而邹平辉长质杂岩体的分异程度较差。

2 中、新生代镁铁质火成岩地球化学对比

表 1 列出了鲁西中、新生代镁铁质火成岩代表性岩石样品的主量、微量和稀土元素含量及 Sr-Nd 同位素组成, 结合前人已有资料, 区内中、新生代镁铁质火成岩在地球化学上具有以下显著差别:

(1) 新生代玄武岩明显富钛, 其 TiO_2 含量普遍高于 2.00%, 平均为 2.61% (据 52 件样品资料统计), 与洋岛玄武岩相近, 而中生代镁铁质岩石的 TiO_2 含量一般均低于 1.30% (图 2a)。(2) 除济南辉

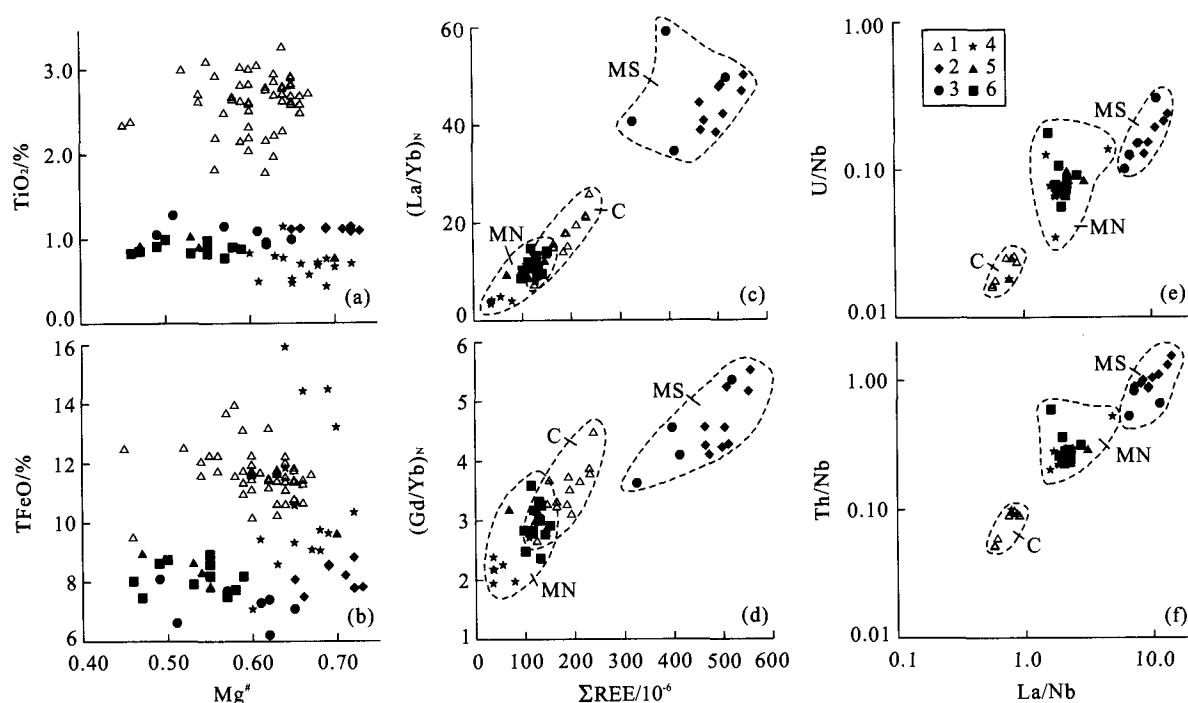


图 2 鲁西中、新生代镁铁质岩石地球化学对比

Fig. 2 Geochemical comparison diagrams of the Mesozoic and Cenozoic mafic igneous rocks in western Shandong Province
1. 新生代玄武岩; 2. 方城中生代玄武岩; 3. 蒙阴中生代钾质火山岩; 4. 济南辉长岩; 5. 邹平辉长岩; 6. 邹平中生代玄武质火山岩. C. 新生代玄武岩; MS. 鲁西地块南部中生代镁铁质火成岩; MN. 鲁西地块北部中生代镁铁质火成岩. 图中除本文资料外, 其余资料引自: 新生代玄武岩据金隆裕(1989)、支霞臣(1990)、陈道公(1992)和牛漫兰等(2001); 中生代镁铁质岩石据邱检生等(1997)、Guo *et al.* (2001)、Zhang *et al.* (2002)、Guo *et al.* (2003)和裴福萍等(2004)

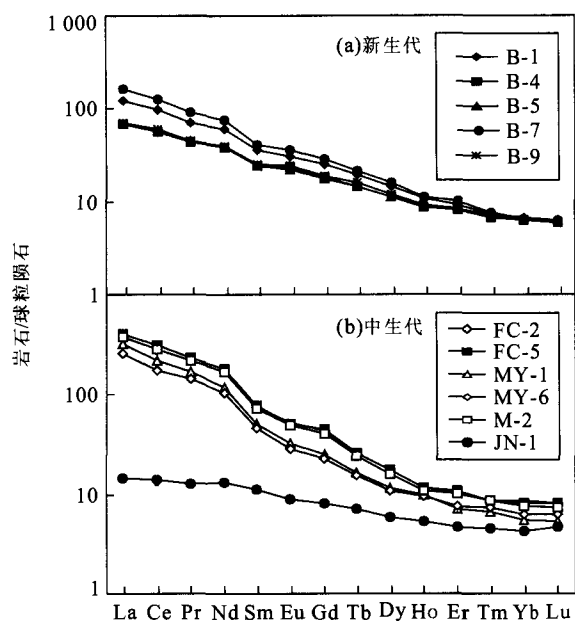


图 3 鲁西中、新生代镁铁质岩石稀土元素球粒陨石标准化配分型式(球粒陨石值据 Boynton, 1984)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the Mesozoic and Cenozoic mafic igneous rocks in western Shandong Province

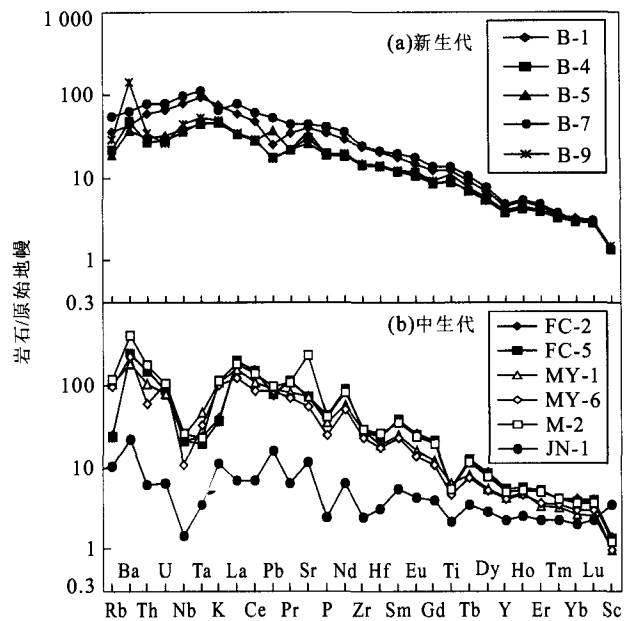


图 4 鲁西中、新生代镁铁质岩石微量元素相对于原始地幔标准化蛛网图(原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Primitive mantle-normalized spidergrams of trace elements for the Mesozoic and Cenozoic mafic igneous rocks in western Shandong Province

表 2 鲁西中、新生代镁铁质火成岩不相容元素比值及与各主要地球化学储库的对比

Table 2 Incompatible element ratios of the Mesozoic and Cenozoic mafic igneous rocks in western Shandong Province and comparison with those of the other geochemical reservoirs

比值	新生代(N=8)	中生代		各主要地球化学储库					
		北部(N=23)	南部(N=12)	PM	N-MORB	CC	HIMU-OIB	EM I -OIB	EM II -OIB
Zr/Nb	3.2~6.2	1.7~26.9	14.5~33.9	14.8	30	16.2	2.7~5.5	3.5~13.1	4.4~7.8
La/Nb	0.57~0.89	1.54~4.73	6.37~13.85	0.94	1.07	2.20	0.64~0.82	0.78~1.32	0.79~1.19
Ba/Nb	4.6~32.7	146.0~1265.4	59.4~205.4	9.0	4.3	54.0	4.7~6.9	9.1~23.4	6.4~13.3
Ba/Th	61~341	248~4532	67~313	77	60	124	39~85	80~204	57~105
Rb/Nb	0.28~0.60	3.07~7.88	0.75~8.27	0.91	0.36	4.70	0.30~0.43	0.69~1.41	0.58~0.85
Th/Nb	0.052~0.098	0.201~0.590	0.522~1.529	0.117	0.071	0.440	0.071~0.123	0.094~0.130	0.105~0.168
Th/La	0.092~0.125	0.095~0.373	0.058~0.126	0.125	0.067	0.204	0.099~0.164	0.089~0.147	0.108~0.183
Ba/La	7.5~42.6	85.0~766.2	8.3~22.0	9.6	4.0	25.0	6.2~9.3	11.3~19.1	7.3~13.5

PM. 原始地幔; N-MORB. 洋脊玄武岩; CC. 大陆地壳; HIMU-OIB. HIMU 型洋岛玄武岩; EM I -OIB. EM I 型洋岛玄武岩; EM II -OIB. EM II 型洋岛玄武岩. 括号中的数字为统计样品数, 其中除本文资料外, 还引用了牛漫兰等(2001)、Guo *et al.* (2001, 2003)、Zhang *et al.* (2002) 的资料; 各主要地球化学储库资料据 Weaver (1991) 综合.

长质杂岩体因分异良好而样品的 TFeO 有较大的变化范围外, 其余中生代镁铁质岩石的 TFeO 含量较新生代玄武岩普遍偏低(图 2b), 指示后者有较深的岩浆源区(Lassiter and Depaolo, 2000). (3) 中、新生代镁铁质火成岩均富轻稀土, 但济南辉长质杂岩体具有最低的稀土总量 [$\Sigma \text{REE} = (35.15 \sim 127.88) \times 10^{-6}$] 和轻、重稀土比值 [$\text{LREE}/\text{HREE} = 3.83 \sim 8.07$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.41 \sim 11.40$, 图 2c 及图 3b], 这主要是由于该杂岩体含有较多的斜方辉石所致, 因为斜方辉石的稀土含量显著低于单斜辉石, 但又较单斜辉石相对富重稀土(Henderson, 1982). 此外, 鲁西地块南部费县—蒙阴一带镁铁质岩石与北部济南—邹平一带镁铁质岩石具有明显不同的稀土元素组成特征, 前者的稀土总量和轻、重稀土比值显著高于后者(图 2c, 2d), 说明二者的源区组成或成岩过程存在差异. 新生代玄武岩的稀土元素特征总体较接近北部济南—邹平一带的镁铁质岩石. (4) 中、新生代镁铁质岩石 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素均较富集, 但新生代玄武岩的微量元素分布模式相似于洋岛玄武岩, 缺乏高场强元素的亏损(图 4a), 同样指示其来自较深的地幔源区, 而中生代镁铁质岩石均表现出 Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti 等高场强元素的亏损(图 4b), 具有与俯冲作用有关岩浆岩的典型特征(Kelemen *et al.*, 1990; Stolz *et al.*, 1996). (5) 与缺乏高场强元素亏损的特点相对应, 新生代玄武岩的 LILE/Nb 比值显著低于中生代镁铁质岩石, 如样品的 La/Nb、Ba/Nb、Th/Nb 比值分别为 0.57~0.89、4.6~32.7 和 0.052~0.098, 而中生代岩石的相应值分别为 1.54~13.85、59.4~1265.4 和

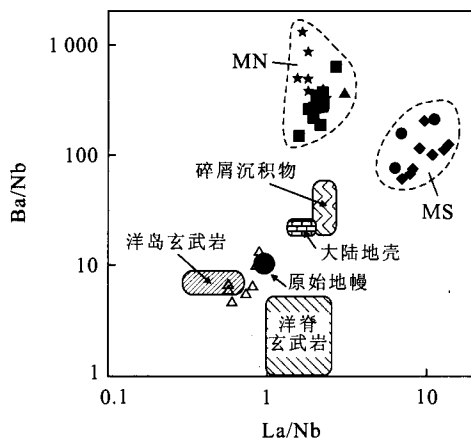


图 5 鲁西中、新生代镁铁质岩石 La/Nb—Ba/Nb 关系(图例及资料来源同图 2)

Fig. 5 La/Nb versus Ba/Nb diagram of the Mesozoic and Cenozoic mafic igneous rocks in western Shandong Province

0.201~1.529, 其中鲁西地块南部费县—蒙阴一带的中生代镁铁质岩石具有最高的 La/Nb、U/Nb 和 Th/Nb 比值(图 2e、2f, 表 2). 新生代玄武岩的 La/Nb、Ba/Nb 比值与洋脊、洋岛玄武岩及原始地幔较接近, 但中生代岩石的相应值(特别是 Ba/Nb 比值)明显偏高(表 2, 图 5), 充分说明区内中、新生代源区地幔性状存在差异. (6) 新生代玄武岩的 I_{Sr} 值普遍低于 0.704 5, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值多为正值, 与洋脊和洋岛玄武岩相似(图 6), 而中生代镁铁质岩石则具有迥然不同的 Sr-Nd 同位素组成特征, 其中最明显的差别体现在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值上, 中生代镁铁质岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为显著的负值(一般均低于 -10). 此外, 鲁西地块南部和北部中生代镁铁质岩石的 Sr-Nd 同位素组成也

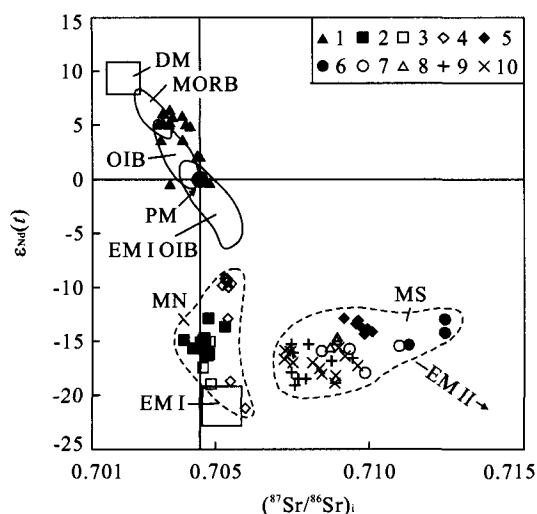


图 6 鲁西中、新生代镁铁质岩石 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系
Fig. 6. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ versus $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for the Mesozoic and Cenozoic mafic igneous rocks in western Shandong Province

1. 新生代玄武岩; 2. 邹平玄武质火山岩; 3. 邹平辉长岩; 4. 济南辉长岩; 5. 方城玄武岩; 6. 蒙阴钾玄质火山岩; 7. 鲁西地块南缘中生代镁铁—超镁铁质煌斑岩; 8. 北淮阳富钾火山岩; 9. 北大别镁铁—超镁铁岩; 10. 胶莱盆地钾玄质火山—侵入岩; DM. 亏损地幔; MORB. 洋脊玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩; PM. 原始地幔; EM I OIB. 具 EM I 型富集地幔特征的洋岛玄武岩; EM I. I 型富集地幔; EM II. II 型富集地幔; 其余代号同图 2. 除本文资料外, 新生代玄武岩据陈道公(1992)和支霞臣等(1994); 中生代镁铁质岩石据 Guo *et al.* (2001)、Qiu *et al.* (2002); Zhang *et al.* (2002) 和 Guo *et al.* (2003); 北大别镁铁—超镁铁岩据 Jahn *et al.* (1999); 北淮阳富钾火山岩据邱检生等(2002); 胶莱盆地钾玄质火山—侵入岩据邱检生和王德滋(1999)、Fan *et al.* (2001)

存在差别, 南部岩石较之北部岩石有明显偏高的 I_{Sr} 值. 大别—苏鲁聚合带北侧的中生代幔源岩石, 如北大别镁铁—超镁铁岩(Jahn *et al.*, 1999)、北淮阳富钾火山岩(邱检生等, 2002)、鲁西地块南缘镁铁—超镁铁质煌斑岩(Qiu *et al.*, 2002), 以及胶莱盆地钾玄质火山岩(Fan *et al.*, 2001)和侵入岩(邱检生和王德滋, 1999), 均具有与鲁西地块南部镁铁质岩石类似的 Sr-Nd 同位素组成(图 6), 指示这些岩石的岩浆源区性状相似.

3 讨论

由于所研究的镁铁质岩石产于大陆区, 其地球化学特征是源区地幔性状的反映, 还是浅部地壳物质混染的结果, 抑或是二者的叠加, 这是首先需要讨论的问题.

3.1 地壳混染

鲁西新生代玄武岩普遍含幔源捕虏体或捕虏晶, 说明岩浆上升速度较快, 在上升过程中与围岩地壳物质的相互作用不强(Glazaer and Farmer, 1992). 岩石中斑晶橄榄石的 Fo 值多大于 90, 全岩 MgO 含量普遍高于 8%, 指示它们应属于原始玄武岩浆(McKenzie and Bickle, 1988). 此外, 岩石的 LILE/HFSE 比值(如 La/Nb、Ba/Nb、Th/Nb、Th/Ta 等)和 Sr-Nd 同位素组成与大洋玄武岩相似, 上述特征均说明岩浆未遭受显著的地壳物质的混染作用.

对区内中生代镁铁质岩石而言, 方城玄武岩含有辉石岩捕虏体和橄榄石捕虏晶, 也指示其岩浆上升速度快, 不具备与陆壳物质发生强烈相互作用的地质前提. 蒙阴钾玄质火山岩尽管未发现幔源包体, 但岩石的 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 比值相对稳定, 全岩 Sr、Nd 同位素组成与从全岩中分离出的单斜辉石单矿物十分接近(Qiu *et al.*, 2002), 其元素一同位素组成特征基本可与方城玄武岩相对比. 济南辉长质杂岩低硅高镁, $\text{Mg}^\#$ 值普遍大于 0.65, 与原始玄武岩浆相似. 邹平一带镁铁质火山—侵入杂岩尽管分异演化程度略高, 但其微量元素分布模式及 Sr-Nd 同位素组成与济南杂岩体类似. 此外, 同一产地样品的 Sr 同位素组成相对均一, I_{Sr} 值不随相应样品 SiO_2 含量和 $\text{Mg}^\#$ 指数的变化而发生显著改变(图 7a), 上述特征均不支持区内镁铁质岩石成岩过程中存在强烈的浅部地壳物质混染作用, 其他学者的研究也得出类似的结论(Guo *et al.*, 2001, 2003; Zhang *et al.*, 2002). 因此, 我们可以有效地利用全岩地球化学特征反演源区地幔性状.

3.2 源区示踪

由于岩石的 LILE/HFSE 比值及 Sr-Nd 同位素组成一般不受部分熔融和分离结晶过程的影响, 因此是示踪源区化学性状的良好指示剂. 由图 6 可看出, 新生代玄武岩的 Sr、Nd 同位素组成落在大洋玄武岩范围内, 靠近亏损地幔(DM)端元, 指示鲁西地幔在新生代具亏损特征, 或具软流圈地幔的属性, 但岩石富轻稀土和大离子亲石元素的特征又与同位素示踪所得出的源区信息不吻合, 这一元素和同位素组成的解耦现象被认为是源区地幔在部分熔融形成岩浆之前遭受过近期交代作用所致, 因为交代作用发生的时间距今较近, 使得放射成因同位素的积累有限, 因而保留了亏损地幔的同位素印记(支霞臣, 1990).

中生代镁铁质岩石的 Sr、Nd 同位素组成明显

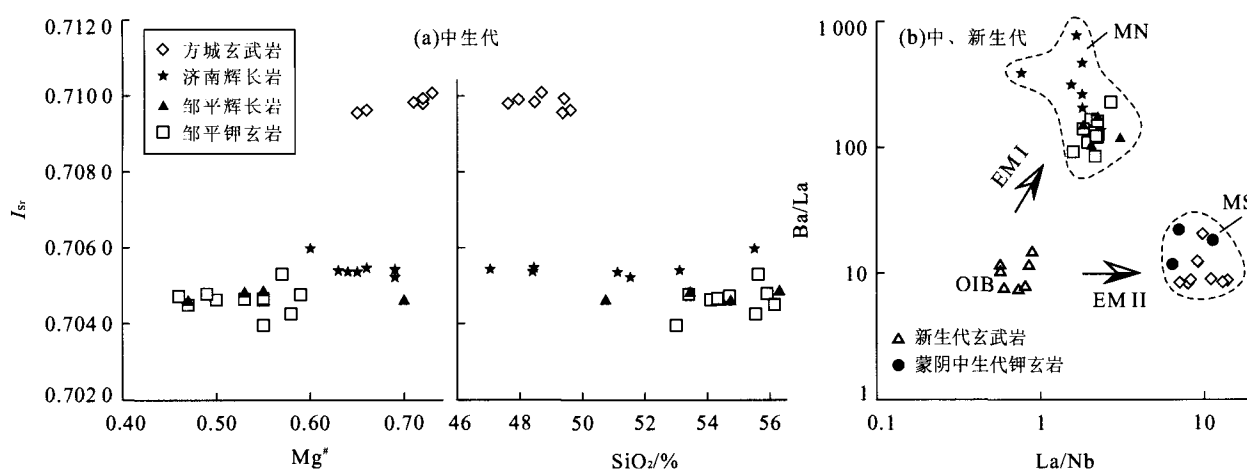


图 7 鲁西中、新生代镁铁质岩石 I_{Sr} — $Mg^\#$ 、 SiO_2 关系(a)和 La/Nb — Ba/La 关系(b)

Fig. 7 I_{Sr} versus $Mg^\#$ and SiO_2 diagrams (a) and La/Nb versus Ba/La diagram (b) for the Mesozoic and Cenozoic mafic igneous rocks in western Shandong Province

图 7a 除本文资料外,其余资料引自 Guo *et al.* (2001)、Zhang *et al.* (2002)和 Guo *et al.* (2003);图 7b 资料来源同图 2

有别于原始或亏损地幔,在 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - \epsilon_{Nd}(t)$ 关系图上,均显示出富集的岩石圈地幔的属性,其中鲁西地块北部济南—邹平一带镁铁质岩石的投影点靠近 EM I 端元,而地块南部费县—蒙阴一带镁铁质岩石的投影点则指示地幔源区中含有 EM II 组分(图 6). 利用不相容元素比值对岩浆源区性状反演也得出类似信息,如中生代镁铁质岩石的 La/Nb 、 Ba/Nb 、 Rb/Nb 和 Th/Nb 比值较之原始或亏损地幔显著偏高(表 2,图 5),北部济南—邹平一带镁铁质岩石的 Ba/Nb 、 Ba/La 和 Ba/Th 比值又明显高于南部费县—蒙阴一带的镁铁质岩石(表 2,图 7b),这一特征也指示北部镁铁质岩石的岩浆源区主要为 EM I 组分,而南部费县—蒙阴一带镁铁质岩石的岩浆源区则含有 EM II 组分,表现出 EM I 和 EM II 组分混合的富集地幔特征,因为与 EM II 组分相比,EM I 组分有更高的 Ba/Nb 、 Ba/La 和 Ba/Th 比值(Weaver, 1991; Tatsumoto *et al.*, 1992). 范蔚茗和郭锋(2005)进一步认为华北内部 EM I 型富集地幔的主要岩性为弥散状金云母相橄榄岩. 综上所述,鲁西地幔在中生代总体具有富集特征,但北部和南部富集地幔的端元组分存在差异.

3.3 鲁西地幔化学性状的演化及其形成机制

由前述元素—同位素的综合示踪可看出,自中生代至新生代,鲁西地幔具有由富集向亏损或由岩石圈地幔向软流圈地幔演变的趋势. 大量研究资料表明,这一演变趋势在整个华北板块具有普遍性(Fan *et al.*, 2000; Zhou *et al.*, 2002). 因此,正确

表 3 华北地块东部中生代镁铁质岩石 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值

Table 3 $\epsilon_{Nd}(t)$ values of the Mesozoic mafic igneous rocks in east part of the North China block

代号	岩性	年龄/Ma	$\epsilon_{Nd}(t)$
1	玄武岩	130~135	-6.8 ~ -11.0
2	橄榄粗玄岩	128	-8.5 ~ -13.9
3	辉长岩	140	-9.5
4	煌斑岩	120	-8.3 ~ -15.2
5	辉长岩	115	-8.3 ~ -21.2
6	辉石二长岩	116.5	-15.7 ~ -16.5
7	钾玄岩	114.8~124.3	-9.4 ~ -15.4
8	煌斑岩	119.6	-12.5 ~ -17.9
9	玄武岩	119~125	-12.9 ~ -14.4
10	玄武岩	120	-15.8 ~ -17.3

1. 辽西(义县组),周新华等,2001;2. 北京南口,邵济安等,2001;3. 太行山,Chen *et al.*, 2003;4. 太行山,Chen and Zhai, 2003;5. 山东济南—邹平,Guo *et al.*, 2001;6. 山东五莲,邱检生等,1999;7. 山东蒙阴,Qiu *et al.*, 2002;8. 山东费县,Qiu *et al.*, 2002;9. 山东费县(方城),Zhang *et al.*, 2002;10. 山东即墨,Fan *et al.*, 2001.

理解鲁西中、新生代地幔化学性状的演变,涉及到对整个华北板块富集地幔形成机制及岩石圈大规模减薄过程的认识.

华北富集地幔是早已有之,还是至中生代才形成,这是首先要探讨的问题. Guo *et al.* (2001)认为华北富集地幔在太古代时已存在,并对中生代镁铁质岩石的形成具有重要制约作用. 然而自太古代至早元古代,华北板块幔源岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值基本均为正值(李曙光和张宗清,1990;张宗清,1998),主要集中在+2~+3范围内(洪大卫等,2003),说明这一时段华北地幔应处于亏损状态. 早古生代蒙阴金伯利

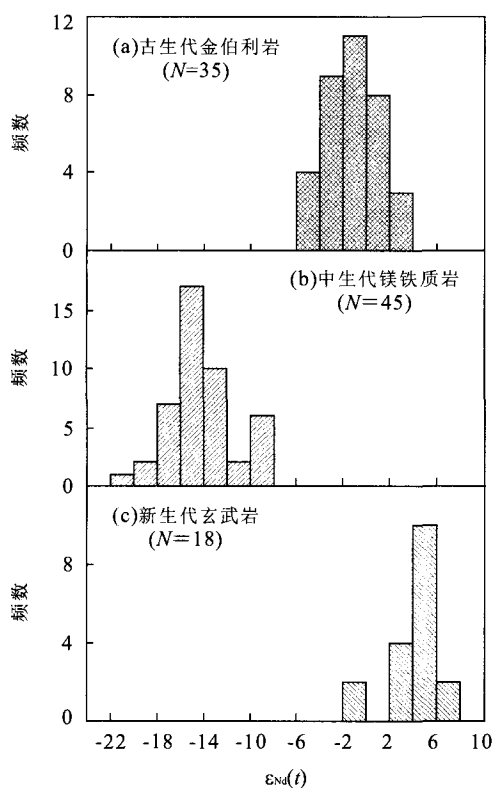
图 8 鲁西不同时代幔源岩石 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值频率分布

Fig. 8 Histogram of $\epsilon_{Nd}(t)$ values for mantle-derived rocks of different ages in western Shandong Province
古生代金伯利岩据路凤香和郑建平(1996);中、新生代岩石同图 6

岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化于 $-4.78 \sim +2.76$ (图 8a), 平均为 -1.10 , 其中镁铝榴石斑晶的 $\epsilon_{Nd}(t) = -1.21 \sim -4.78$, 平均为 -3.01 (路凤香和郑建平, 1996), 说明此时华北地幔已开始自亏损向弱富集状态转变. 至中生代, 华北幔源岩石普遍具有显著偏低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (表 3), 其中鲁西地块中生代镁铁质岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值介于 $-9.20 \sim -21.21$, 峰值变化于 $-12 \sim -18$ 之间 (图 8b), 说明华北地幔大规模的富集应发生在中生代.

对华北中生代大规模富集地幔的形成机制目前存在着不同的认识, 概括起来主要有 2 种观点: 一种观点认为华北中生代地幔的富集主要与扬子—华北板块碰撞及它们之间的大陆深俯冲作用有关, 深俯冲的扬子大陆地壳同软流圈地幔相互作用形成富集地幔 (Zhou *et al.*, 2002); 另一种观点认为华北中生代地幔的富集主要与岩石圈大规模拆沉作用有关, 太古代古老地壳物质被拆沉而重循环进入地幔, 导致地幔成分发生改变形成富集地幔 (洪大卫等, 2003; Gao *et al.*, 2004).

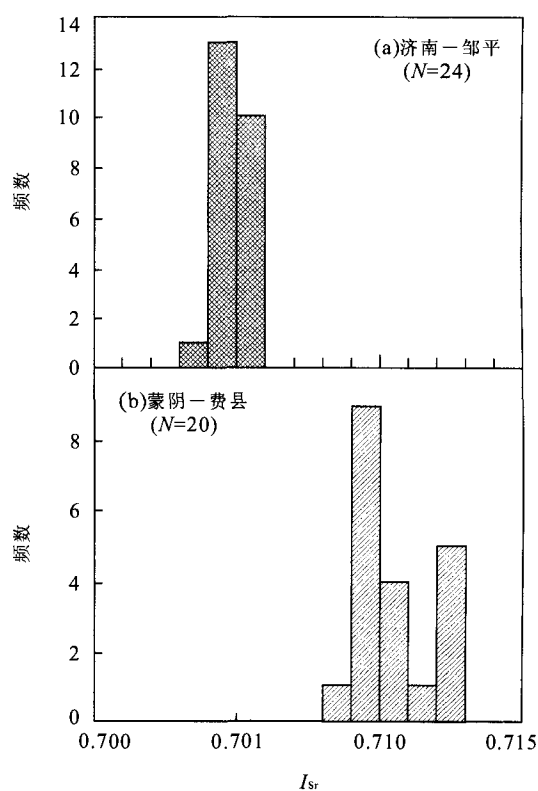
图 9 鲁西中生代镁铁质火成岩 I_{Sr} 频率分布 (资料来源同图 7a)

Fig. 9 Histogram of I_{Sr} values for the Mesozoic mafic igneous rocks in the north and south parts of western Shandong Province

由于深俯冲的扬子大陆地壳的影响难以波及到华北腹地和北缘, 而中生代镁铁质岩石具显著偏低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的特征在整个华北板块又具普遍性, 因此, 我们认为岩石圈大规模拆沉作用应该是导致华北中生代地幔富集的主控因素. 众多学者也从不同角度探讨了华北中生代大规模拆沉作用形成的可能机制, 如张旗等 (2001) 指出燕山中晚期中国东部 (主要为华北地块) 可能是一个高原, 其下地壳在分熔出埃达克质岩石后, 残余物转变成密度大的榴辉岩, 同时加厚的岩石圈地幔比软流圈地幔冷, 导致其密度也大, 因此, 岩石圈地幔和下地壳可以发生拆沉作用而进入软流圈地幔, 并促使软流圈地幔上涌. 洪大卫等 (2003) 认为华北中生代岩石圈大规模拆沉作用主要是由 Pangea 超大陆的裂解所致. 最近, Gao *et al.* (2004) 报道了华北北部侏罗纪火山岩起源于榴辉岩相下地壳拆沉进入上地幔后发生部分熔融的直接地球化学证据, 并认为发生于中国东部中—新生代克拉通内部的大陆岩石圈减薄及强烈的构造—岩浆作用, 均与岩石圈下部的拆沉作用和软流圈物质上涌

作用有关(Gao *et al.*, 1998, 2003). 因此, 中生代华北岩石圈大规模拆沉作用已得到多数学者的认同.

尽管华北中生代地幔普遍表现出因大规模拆沉作用而形成的 EM I 型富集地幔的特征, 但其南缘幔源岩石明显叠加有因深俯冲而进入地幔的扬子陆壳的印记, 突出表现在南缘幔源岩石的 I_{Sr} 值明显偏高. 以鲁西地块为例, 其北部济南—邹平一带镁铁质岩石的 I_{Sr} 值变化于 0.703 96~0.705 98, 而南部费县—蒙阴一带镁铁质岩石则变化于 0.708 44~0.712 47(图 9), 北大别及胶莱盆地中生代镁铁质岩石的 I_{Sr} 值均偏高(Jahn *et al.*, 1999; Fan *et al.*, 2001). 通过对大别造山带北缘磨子潭—晓天一带富钾火山岩 Nd、Sr 同位素组成的混合模拟计算, 表明其岩浆源区也存在有因俯冲而进入地幔的扬子古老基底——崆岭群的混染和交代作用(邱检生等, 2002). 因此, 华北中生代岩石圈地幔的富集总体受控于岩石圈的大规模拆沉作用, 但其南缘叠加了因深俯冲而进入地幔的扬子陆壳的影响. 正是由于深俯冲的陆壳物质对因岩石圈拆沉而形成的 EM I 型富集地幔的再改造, 使得地幔中放射性 Sr 同位素再次富集, 因此, 华北南缘富集地幔应为 EM I 和 EM II 的混合类型, 这也是导致鲁西地块北部和南部中生代镁铁质岩石地球化学特征存在差异的关键所在.

至新生代, 由于岩石圈的拆沉及引张作用的加剧, 促使软流圈地幔上涌, 并对原有岩石圈地幔改造或置换而使岩石圈发生大规模的减薄(郑建平, 2000, 2003; Zheng *et al.*, 2005). 鲁西地块新生代玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值普遍大于 +3, 峰值集中在 +4~+6(图 8c), 这一特征也佐证了其起源于软流圈地幔, 因为来源于岩石圈地幔玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值一般小于 +3(Livaceari and Perry, 1993). 因此, 由岩石圈大规模拆沉导致软流圈地幔上涌并对原有岩石圈地幔再改造, 应是鲁西乃至整个华北板块自中生代至新生代地幔化学性状由富集向亏损演变的主要原因.

4 结论

(1) 鲁西地块中生代镁铁质火成岩总体具有富轻稀土和大离子亲石元素、贫高场强元素、 I_{Sr} 值变化范围大、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值显著偏低的地球化学特征. 但南部和北部镁铁质岩石在微量和同位素组成上仍存在一定差别, 主要表现在南部较之北部镁铁质岩石具有更高的稀土总量和轻、重稀土比值, 以及更高的

LILE/HFSE 比值和 I_{Sr} 值. 元素—同位素综合示踪指示鲁西地块中生代地幔总体具有富集特征, 其中北侧富集地幔应为 EM I 型, 而南侧则为 EM I 和 EM II 的混合类型. (2) 新生代玄武岩具有类似于大洋玄武岩的地球化学特征, 其源区应为亏损的软流圈地幔, 但在部分熔融形成岩浆之前遭受了近期的交代作用. (3) 自中生代至新生代, 鲁西乃至整个华北克拉通地幔具有由富集向亏损演变的趋势, 这一化学性状的演变主要是中生代以来岩石圈大规模拆沉作用, 导致软流圈地幔上涌并对原有岩石圈地幔再改造所致.

References

- Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson, P., ed., Rare earth elements geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63—144.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, 1991. Regional geology of Shandong Province. Geological Publishing House, Beijing, 1—572 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Zhai, M., 2003. Geochemistry of Late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle. *Geol. Mag.*, 140(1): 87—93.
- Chen, B., Jahn, B., Zhai, M. G., 2003. Sr-Nd isotopic character of Mesozoic magmatism in the Taihang-Yanshan orogen, North China craton, and implications for Archean lithospheric thinning. *Journal of the Geological Society*, 160: 963—970.
- Chen, D. G., 1992. The geochemistry of Cenozoic basalt at the middle-south segment of Tanlu fault zone. In: Liu, R. X., ed., The age and geochemistry of Cenozoic volcanic rock in China. Seismological Press, Beijing, 1—43 (in Chinese).
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Mo, X. X., et al., 1996. Continental roots-plume tectonics of China—Key to the continental dynamics. Geological Publishing House, Beijing, 1—110 (in Chinese with English abstract).
- Fan, W. M., Zhang, H. F., Baker, J., et al., 2000. On-craton and off-craton Cenozoic spinel peridotites in eastern China: Similarity and difference. *J. Petrology*, 41: 933—950.
- Fan, W. M., Guo, F., Wang, Y. J., et al., 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26: 733—746.

- Fan, W. M., Guo, F., 2005. Late Mesozoic mafic magmatism from the eastern part of North China block and its adjacent regions; Magma genesis and geodynamic implications for lithospheric thinning. *Geotectonic et Metallogenia*, 29(1): 44—55 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Zhang, B. R., Jin, Z. M., et al., 1998. How mafic is the lower continental crust? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 106: 101—117.
- Gao, S., Kern, H., Jin, Z. M., et al., 2003. Poisson's ratio of eclogite; Implications for lower crustal delamination of orogens. *Science in China (Series D)*, 46(9): 909—918.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Carlson, R. W., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892—897.
- Glazaer, A. F., Farmer, G. L., 1992. Production of isotopic variability in continental basalt by cryptic crustal contamination. *Science*, 255: 72—74.
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2001. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26: 759—771.
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2003. Geochemistry of Late Mesozoic mafic magmatism in west Shandong Province, eastern China; Characterizing the lost lithospheric mantle beneath the North China block. *Geochem. J.*, 37: 63—77.
- Henderson, P., 1982. Inorganic geochemistry. Pergamon, Oxford, 1—353.
- Hong, D. W., Wang, T., Tong, Y., et al., 2003. Mesozoic granitoids from North China block and Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt and their deep dynamic process. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 231—256 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., 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. *Chem. Geol.*, 157(1—2): 119—146.
- Jin, L. Y., 1985. K-Ar ages of Cenozoic volcanic rocks in the middle segment of the Tancheng-Lujiang fault zone and stages of related volcanic activity. *Geological Review*, 31(4): 309—315 (in Chinese with English abstract).
- Jin, L. Y., 1989. Petrologic and geochemical characteristics of Cenozoic volcanic rocks in the middle segment of the Tancheng-Lujiang fault zone. *Acta Petrologica Sinica*, 5(4): 45—57 (in Chinese with English abstract).
- Kelemen, P. B., Kingler, R. J., Johnson, K. T. M., 1990. High field strength element depletions in arc basalt due to mantle-magma interaction. *Nature*, 345: 521—524.
- Lassiter, J. C., Depaolo, D. J., 2000. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts; Chemical and isotopic constraints. In: Mahoney, J., Coffin, M. F., eds., Large igneous provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism. American Geophysical Union Monograph, Washington, D. C., 100: 335—355.
- Li, C. J., 1992. Opinions on stage division of the intrusive rocks in Jinan-Zouping area. *Geology of Shandong*, 8(1): 68—79 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Zhang, Z. Q., 1990. Nd isotopic compositions and evolution of the upper mantle in the Archean of North China; Constraints on the mantle heterogeneity of the unmetasomatic continental lithosphere. *Geochimica*, 4: 277—285 (in Chinese with English abstract).
- Livaceari, R. F., Perry, F. V., 1993. Isotopic evidence for preservation of Cordilleran lithospheric mantle during the Sevier Laramide orogeny, west United States. *Geology*, 21: 719—722.
- Lu, F. X., Zheng, J. P., 1996. Palaeozoic nature and deep processes of lithospheric mantle beneath North China. In: Chi, J. S., Lu, F. X., eds., Kimberlites and Paleozoic mantle beneath North China platform. Science Press, Beijing, 215—274 (in Chinese).
- McKenzie, D., Bickle, M. J., 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *J. Petrol.*, 29: 625—679.
- Niu, M. L., Zhu, G., Song, C. Z., et al., 2001. Features and evolution of the mantle source area of Cenozoic basalts in the middle-south segment of the Tanlu fault zone. *Geoscience*, 15(4): 383—390 (in Chinese with English abstract).
- Pei, F. P., Xu, W. L., Wang, Q. H., 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. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 88—97 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., 1999. Geochemistry of pyroxene-monzonite at Qibaoshan caldera in Wulian County, Shandong Province and the nature of the magma source. *Geological Review*, 45(Suppl.): 612—617 (in Chinese with English abstract).

- Qiu, J. S., Wang, D. Z., Liu, H., et al., 2002. Post-collisional potash-rich volcanic rocks in the north margin of Dabie orogenic belt; Geochemistry and petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 319—330 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., Zeng, J. H., et al., 1997. Study on trace element and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province. *Geological Journal of China Universities*, 3(4): 384—395 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Xu, X. S., Lo, Q. H., 2002. Potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province; ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and source tracing. *Chinese Science Bulletin*, 47(2): 91—99.
- Shao, J. A., Li, X. H., Zhang, L. Q., et al., 2001. Geochemical condition for genetic mechanism of the Mesozoic bimodal dike swarms in Nankou-Guyaju. *Geochimica*, 30(6): 517—524 (in Chinese with English abstract).
- Stolz, A. J., Jochum, K. P., Spette, L. B., et al., 1996. Fluid and melt-related enrichment in the sub-arc mantle; Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts. *Geology*, 24: 587—590.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norrly, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. Spe. Publ.*, 42: 313—345.
- Tan, D. J., Lin, J. Q., 1994. The Mesozoic potassic igneous rock zones in North China platform. Seismological Press, Beijing, 1—184 (in Chinese).
- Tatsumoto, M., Basu, A. R., Huang, J. W., et al., 1992. Sr, Nd, and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of eastern China; Enriched components EM I and EM II in subcontinental lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 113: 107—128.
- Wang, Y. X., Yang, J. D., Tao, X. C., et al., 1988. A study of the Sm-Nd method for fossil, mineral and rock samples, and its application. *J. Nanjing Uni. (Natural Sciences Edition)*, 24(2): 297—308 (in Chinese with English abstract).
- Weaver, B. L., 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions; Trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 381—397.
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton; Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contrib. Min. Petrol.*, 144: 241—253.
- Zhang, H. F., Ying, J. F., Xu, P., et al., 2004. Mantle olivine xenocrysts entrained in Mesozoic basalts from the North China craton; Implication for replacement process of lithospheric mantle. *Chinese Science Bulletin*, 49(9): 961—966.
- Zhang, Q., Qian, Q., Wang, E. Q., et al., 2001. An east China plateau in Mid-Late Yanshanian period; Implication from adakites. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 248—255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Q., 1998. On the continental growth periods of North China craton based on Sm-Nd isotopic characteristics of the Early Precambrian metamorphic rocks. In: Chen, Y. Q., ed., *Contributions on the Early Precambrian geology in North China craton*. Geological Publishing House, Beijing, 133—136 (in Chinese).
- Zheng, J. P., Lu, F. X., O'Reilly, S. Y., et al., 2000. Mantle modification and replacement beneath east China; A study on clinopyroxenes of Laser ICPMS. *Sciences in China (Series D)*, 30(4): 373—382 (in Chinese).
- Zheng, J. P., Lu, F. X., Yu, C. M., et al., 2003. Mantle replacement; Evidence from comparison in trace elements between peridotite and diopside from refractory and fertile mantle, North China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(3): 235—240 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2005. Late Mesozoic-Cenozoic mantle replacement beneath the eastern North China craton; Evidence from the Paleozoic and Cenozoic peridotite xenoliths. *International Geology Review*, 47: 457—472.
- Zhi, X. C., 1990. Trace element geochemistry and petrogenesis of Cenozoic alkalic basalts from the Penglai and Linqu areas, Shandong Province. *Geological Review*, 36(5): 385—393 (in Chinese with English abstract).
- Zhi, X. C., Chen, D. G., Zhang, Z. Q., et al., 1994. The neodymium and strontium isotopic compositions of Cenozoic alkalic basalts from Penglai and Linqu, Shandong Province. *Geological Review*, 40(6): 526—533 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Yang, J. H., Zhang, L. C., 2002. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China craton in Mesozoic. *Science in China (Series D)*, 32(Suppl.), 46: 14—25.

- Zhou, X. H., Zhang, G. H., Yang, J. H., et al., 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China craton and implications to geodynamic processes. *Geochimica*, 30(1): 10—23 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈道公, 1992. 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩地球化学. 见: 刘若新, 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1—43.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等, 1996. 中国大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1—110.
- 范蔚茗, 郭锋, 2005. 华北地区晚中生代镁铁质岩浆作用及其地球动力学背景. *大地构造与成矿学*, 29(1): 44—55.
- 洪大卫, 王涛, 童英, 等, 2003. 华北地台和秦岭—大别—苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程. *地学前缘*, 10(3): 231—256.
- 金隆裕, 1985. 郯庐断裂带中段新生代火山岩的 K-Ar 年龄值和分期. *地质论评*, 31(4): 309—315.
- 金隆裕, 1989. 郯庐断裂带中段新生代火山岩的岩石学和地球化学特征. *岩石学报*, 5(4): 45—57.
- 李昶绩, 1992. 济南—邹平地区侵入岩期次划分之我见. *山东地质*, 8(1): 68—79.
- 李曙光, 张宗清, 1990. 华北太古代上地幔钨同位素组成、演化及对该区岩石圈地幔不均一性的制约. *地球化学*, 4: 277—285.
- 路凤香, 郑建平, 1996. 华北地台古生代岩石圈地幔特征及深部过程. 见: 池际尚, 路凤香. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社, 215—274.
- 牛漫兰, 朱光, 宋传中, 等, 2001. 郯庐断裂带中南段新生代玄武岩源区地幔特征及其演化. *现代地质*, 15(4): 383—390.
- 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, 1999. 山东五莲七宝山辉石二长岩的地球化学及岩浆源区性质. *地质论评*, 45(增刊): 612—617.
- 邱检生, 王德滋, 刘洪, 等, 2002. 大别造山带北缘后碰撞富钾火山岩: 地球化学与岩石成因. *岩石学报*, 18(3): 319—330.
- 邱检生, 王德滋, 曾家湖, 等, 1997. 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. *高校地质学报*, 3(4): 384—395.
- 山东省地质矿产局, 1991. 山东省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1—572.
- 邵济安, 李献华, 张履桥, 等, 2001. 南口—古崖居中生代双峰式岩墙群形成机制的地球化学制约. *地球化学*, 30(6): 517—524.
- 谭东娟, 林景仟, 1994. 华北地台中生代钾质岩浆岩区. 北京: 地震出版社, 1—184.
- 王银喜, 杨杰东, 陶仙聪, 等, 1988. 化石、矿物和岩石样品的 Sm-Nd 同位素实验方法及其应用. *南京大学学报(自然科学版)*, 24(2): 297—308.
- 张旗, 钱青, 王二七, 等, 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. *地质科学*, 36(2): 248—255.
- 张宗清, 1998. 从华北古陆早前寒武纪变质岩的 Sm-Nd 同位素特征论其地壳的主要生长时期. 见: 程裕淇. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 133—136.
- 郑建平, 路凤香, O'Reilly, S. Y., 等, 2000. 华北东部地幔改造作用和置换作用: 单斜辉石激光探针研究. *中国科学*, 30(4): 373—382.
- 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 等, 2003. 地幔置换作用: 华北两类橄榄岩及其透辉石微量元素对比证据. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(3): 235—240.
- 支霞臣, 1990. 山东蓬莱、临朐新生代碱性玄武岩的痕量元素和岩石成因. *地质论评*, 36(5): 385—393.
- 支霞臣, 陈道公, 张宗清, 等, 1994. 山东蓬莱、临朐新生代碱性玄武岩的钨、铈同位素组成. *地质论评*, 40(6): 526—533.
- 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等, 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其意义. *地球化学*, 30(1): 10—23.