

古亚洲洋对华北陆缘岩石圈的改造作用：来自于西山南大岭组中基性火山岩的地球化学证据*

李晓勇¹ 范蔚茗^{1,2} 郭锋¹ 王岳军¹ 李超文¹

LI XiaoYong¹, FAN WeiMing^{1,2}, GUO Feng¹, WANG YueJun¹ and LI ChaoWen¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国科学院资源环境科学与技术局, 北京 100864

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Resource and Environmental Bureau of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China

2003-02-27 收稿, 2004-02-11 改回.

LI XY, Fan WM, Guo F, Wang YJ and Li CW. 2004. Modification of the lithospheric mantle beneath the northern North China Block by the Paleo-Asian Ocean: geochemical evidence from mafic volcanic rocks of the Nandaling Formation in the Xishan area, Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):557-566

Abstract Early Mesozoic mafic volcanic rocks of the Nandaling Formation (NFV) occurring in the Xishan area of Beijing all show right-oriented linear REE patterns with LREE enrichment, and are characterized by LILE (*e. g.*, Ba, K), LREE enrichment and negative Nb-Ta anomalies as well as moderately enriched Sr isotopic compositions and obviously varied Nd isotopic compositions. According to differences of elemental geochemistry and isotopic component characteristics, the NFV can be divided into two types of rocks: Group I mainly is composed of subalkaline basalt with high-Ti ($\text{TiO}_2 > 1.75\%$) and P ($\text{P}_2\text{O}_5 > 0.75\%$), Group II mainly is composed of andesites and subalkaline basalts with low-Ti ($\text{TiO}_2 < 1.25\%$) and P ($\text{P}_2\text{O}_5 < 0.50\%$); and Group I has relatively high contents of comparative elements (Cr, Ni), REE and HFSE than group II, two group volcanic rocks do not exhibit gradient correlation of magma evolution in chemical components. Moreover, Group I has different Sr-Nd isotopic compositions ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.705939 \sim 0.706057$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.4 \sim -7.5$) from Group II ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.705822 \sim 0.706697$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -12.0 \sim -13.5$). All these indicate that the two group volcanic rocks of the NFV may have been derived from different mantle sources. Comparing with the Mesozoic mafic volcanic rocks in adjacent regions, Sr-Nd isotopic compositions and ratios of $(\text{Nb}/\text{La})_N$ and $(\text{Hf}/\text{Sm})_N$ of the NFV are all located between volcanic rocks within the North China Block (NCB) and volcanic rocks from Hinggan-Mongolian Orogen (HMO), suggesting that the mantle sources of the NFV had undergone subduction-related metasomatism except inheriting the mantle source characteristics of the NCB. And this indicates an important role of the subducted slab in the modification of the lithospheric mantle beneath the northern margin of North China Block during the closure of Paleo-Asian Ocean. All volcanic rocks of the NFV have distinctive characteristics of significant depletion of Th and U relative to Ba and La, suggesting the early ancient lower crust of North China Craton recycling into the mantle source. Combined with the volcanic distribution along major faults and regional early Mesozoic tectonic-thermal history, the NFV were formed under extension regime as a consequence of post-collisional stress relaxation, which led to the reactivation of deep faults and triggered upwelling of asthenosphere and decompressional melting of early enriched continental lithospheric mantle.

Key words Subduction-related metasomatism, Ancient lithospheric mantle, Geochemistry, Mafic volcanics, Early Mesozoic, Beijing Xishan

摘要 北京西山南大岭组中基性火山岩都表现出 LREE 富集的右倾平滑稀土配分模式, 具有富集 LILE (如 Ba, K), 亏损 Nb-Ta 和 Th-U 的微量元素特征, Sr 同位素组成中等富集, Nd 同位素组成变化较大。根据其元素地球化学和同位素特征可以划分两组岩石: I 组火山岩主要为亚碱性玄武岩, 高 Ti ($\text{TiO}_2 > 1.7\%$)、P ($\text{P}_2\text{O}_5 > 0.7\%$), II 组火山岩主要由安山岩和亚碱性玄武岩组成, 低 Ti ($\text{TiO}_2 < 1.3\%$)、P ($\text{P}_2\text{O}_5 < 0.5\%$); I 组火山岩总体上较 II 组火山岩高相容元素 (如 Cr, Ni)、REE 和 HFSE,

* 本文得到中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-107) 和国家科学技术部 973 项目 (G1999043202) 的共同资助。

第一作者简介: 李晓勇, 男, 1973 年 12 月生, 博士后, 岩石地球化学专业, E-mail: simon_lxy@gig.ac.cn

二者化学成分上渐变演化趋势不明显; I组火山岩 Sr-Nd 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.705939 \sim 0.706057, \epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.4 \sim -7.5$) 与 II组火山岩 Sr-Nd 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.705822 \sim 0.706697, \epsilon_{\text{Nd}}(t) = -12.0 \sim -13.5$) 有明显的差别, 以上事实说明两组岩石可能来源于不同的地幔源区。对比于周缘地区中生代基性火山岩特征, 西山地区南大岭组两组火山岩的 Sr-Nd 同位素组成和 Nb/La、Hf/Sm 比值都介于华北陆块内部和兴蒙造山带之间, 反映了其熔融地幔源区继承了华北陆块内部的 EMI 型地幔特征外, 还很可能受到俯冲板片交代作用的影响, 暗示了古亚洲洋板块消减过程对华北陆缘岩石圈地幔的改造作用。其相对 Ba-La 明显的 Th-U 亏损, 可能暗示早期有古老下地壳组分再循环到地幔源区。结合南大岭组中基性火山岩沿断裂带局限分布特点和区域早中生代构造-热年代学格架, 我们认为南大岭组中基性火山岩形成于陆内伸展环境, 即深大断裂带再次活动, 导致软流圈上隆, 从而诱发俯冲交代改造的古老岩石圈地幔减压熔融而成。

关键词 俯冲交代作用; 古老岩石圈地幔; 地球化学; 中基性火山岩; 早中生代; 北京西山

中图分类号 P588.145

1 前言

大陆造山带火山岩是了解大陆岩石圈深部演化热-应力异常形成机制、幔-壳相互作用和物质交换以及深部地质过程的窗口 (Menzies & Kyle, 1990)。燕山地区位于华北陆块的北部, 北与兴蒙造山带毗邻, 南接华北陆块内部, 其独特的构造位置已成为探索古亚洲洋板块与华北陆块相互作用深部动力学的极佳场所。前人陆续对该区中生代火山岩进行了报道 (北京市区域地质志, 1991; 河北省北京市天津市区域地质志, 1989; 鲍亦冈, 1995; 李伍平等, 2001, 2002), 但对于其岩石成因和深部动力学过程仍存在分歧。一些学者认为这些火山岩形成背景为大陆边缘, 与古太平洋板块俯冲作用有关 (邓晋福等, 1994; 陈义贤等, 1997)。而来自构造地质学和热年代学的研究则认为该区为典型的板内造山带,

与大洋板块俯冲无直接的动力学联系 (张长厚等, 1997, 1999); Davis 等人的研究表明燕山地区中生代各期次构造活动与相应的岩浆活动关系密切 (Davis *et al.*, 2001; 郑亚东等, 2000), 其动力学来源与蒙古-鄂霍茨克海的闭合以及华北-蒙古与西伯利亚板块碰撞作用有关。无疑地, 早中生代燕山地区岩石圈地幔性质的厘定将为解决这些问题提供重要的深部动力学信息。为此, 我们选择北京西山地区早中生代南大岭组中基性火山岩典型剖面开展了详细的元素-同位素地球化学研究, 其目的之一是了解早中生代岩浆熔融源区性质, 通过对比邻区 (华北陆块内部及兴蒙造山带) 基性火山岩的特征来探讨古亚洲洋消减过程是否对华北陆缘岩石圈地幔存在改造作用; 同时结合区域构造地质学和火山岩分布特点来揭示燕山地区早中生代构造-岩浆事件的可能动力学背景。

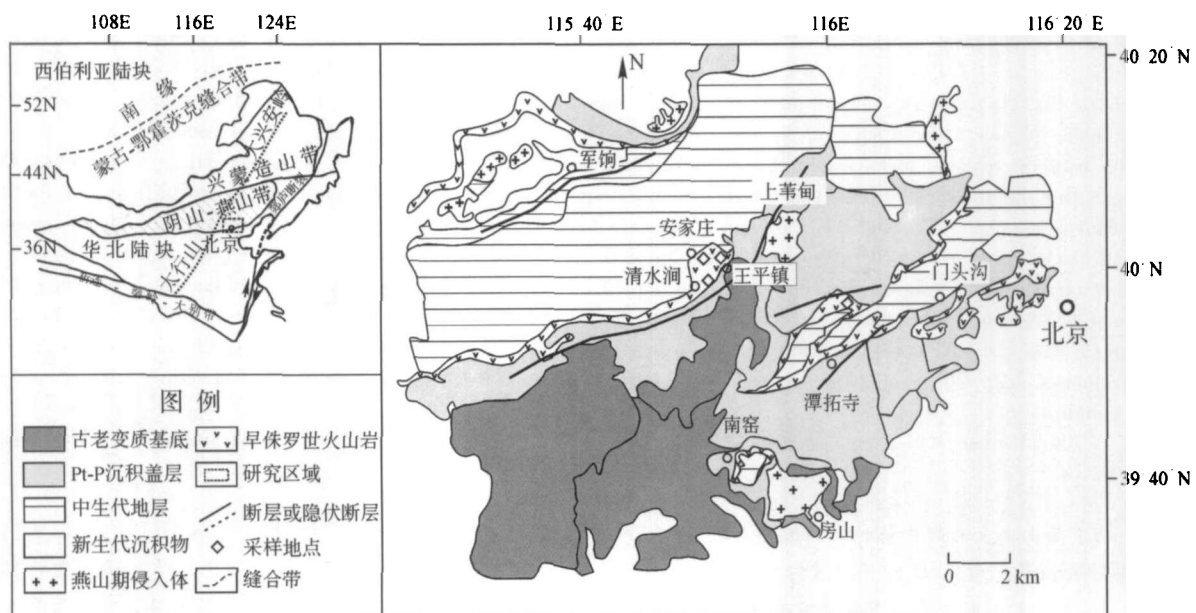


图1 北京地区区域地质简图和南大岭组中基性火山岩分布图

(此原图据北京市地质矿产局和河北省地质矿产局资料改编)

Fig. 1 A simplified geological map and distribution of the Nandaling Formation volcanic rocks in Beijing area

2 区域地质背景与火山岩岩相学特征

北京西山处于燕山造山带中部, 位于华北陆块北部, 北邻兴蒙造山带, 南接华北陆块内部(图1)。区内太古代结晶基底广泛出露, 主要由麻粒岩、片麻岩、斜长角闪岩组成(北京市区域地质志, 1991); 中元古代由于经历了坳拉槽发育阶段, 发育了一套以碳酸岩和碎屑岩为主的半深海-浅海相沉积组合。晚元古代至古生代, 华南北缘长期处于稳定的克拉通盖层发育阶段。经历了多期次的洋壳扩张与俯冲、碰撞造山作用, 古亚洲洋发生消减直至在二叠纪最后封闭(Zonenshain *et al.*, 1985; Tang, 1990), 导致华北陆块与兴蒙-吉黑造山带拼合为一个大陆块体, 成为华北陆块的组成部分(李春昱, 1980)。其中发育于华南北缘 260-205 Ma 的碱性火成岩组合则标志着燕山地区与古亚洲洋演化相关的造山作用的结束(阎国翰等, 2000)。中生代以来本区进入强烈的活化阶段, 具有陆内造山作用的特点(Davis *et al.*, 2001; 张长厚等, 1997)。

北京西山南大岭组中基性火山岩主要沿着断裂带局限分布(见图1), 其中军响地区火山岩层厚度最大(475m), 岩性主要为粗面玄武岩、玄武质粗面安山岩和粗安岩。早期以大规模的溢流相基性玄武岩岩为主, 夹少量凝灰质砂岩、页岩; 晚期以爆发相的火山碎屑岩为主, 主要为安山质成分, 其次为熔岩及集块角砾熔岩。本文研究的南大岭组中基性火山岩样品根据其主、微量元素地球化学和同位素组成特征可分为两组岩石: 其中 I 组火山岩样品(20XSH-40~45) 采自于门头沟区王平镇北 800 米处公路边采石场南大岭组(J_{1n})玄武岩层, 倾向 NW, 下伏地层为杏石口组(T_{3x}), 上覆地层为窑坡组(J_{1y})地层; II 组火山岩样品(20XSH-52~62) 采自于门头沟区清水涧去安家庄公路旁, 距清水涧北约 1km, 岩层倾向 SSW, 下伏地层为石炭纪, 与上覆地层窑坡组(J_{1y})假整合接触。

北京西山南大岭组中基性火山岩中 I 组火山岩主要为玄武岩, 呈暗绿-灰黑色, 斑状结构和块状构造, 其中斑晶含量为 10~25%, 主要为斜长石(粒径为 3~5 mm)、单斜辉石(3~4 mm)和少量角闪石(2~3 mm), 斑晶中见轻微的绿泥石化和碳酸盐化; 基质含量变化在 75~90% 之间, 间隐结构, 主要由隐晶质和细晶长石、辉石和少量的不透明金属矿物组成。II 组火山岩主要为玄武安山岩, 呈深绿-暗绿色, 斑状结构和块状构造, 部分样品表现出由岩浆流动导致的定向构造; 斑晶含量为 15~30%, 主要由斜长石(少量钾长石, 0.5~2 mm)、单斜辉石(0.5~1 mm)和角闪石(2~4 mm)组成, 其中角闪石斑晶含量较玄武岩明显增高。基质含量 70%~85%, 间隐-间粒结构, 主要由隐晶质和细晶的长石、辉石和角闪石以及少量不透明金属矿物组成。

3 分析方法

所有样品粉碎到 1~2cm 大小, 经过超声波清洗再晾干后在放大镜下将风化和蚀变的岩屑挑走; 剩余的新鲜岩屑在玛瑙颚式破碎机中粉碎到 20 目以下, 从中缩分出一半样品作为副样, 另一部分在玛瑙球磨滚筒机中研磨到小于 180 目, 这些粉末样品用来进行主量和微量元素的测试。主量元素测试是在国土资源部湖北地质矿产研究所中利用 X 射线荧光光谱(XRF)测试的, 测试误差小于 2%, FeO 用湿化学法测得。微量元素在中国科学院贵阳地球化学所利用等离子光谱质谱法(ICP-MS)测定, 测定精度优于 5%。

Sr 和 Nd 同位素比值在中国科学院广州地球化学研究所用 MC-ICP-MS 仪器上测定。样品采用小于 20 目的岩屑, 在室温下用浓度为 6N 的盐酸浸 24 小时。样品用 HF + HClO₄ 在 Teflon 容器中低温溶解, 采用 AG50W × 8(H⁺) 阳离子交换柱和 P507 萃淋树脂分离出纯净的 Rb、Sr、Sm 和 Nd。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值分别用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 进行标准化, 分析误差用 2σ 给出。BCR-1 标准样品 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512626 ± 9, NBS987 多次测定平均值为 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710265 ± 12。整个实验流程本底 Sr 为 2~5 × 10⁻¹⁰ g, Nd 小于 5 × 10⁻¹¹ g。Rb、Sr、Sm 和 Nd 含量通过 ICP-MS 分析测得。

4 地球化学特征

4.1 主、微量元素地球化学特征

本区南大岭组中基性火山岩的主、微量元素分析数据见表 1。I 组火山岩相对低 SiO₂ 含量(47.64%~50.19%), 高 MgO(3.35%~6.44%)、FeO* (9.63%~11.54%) 和 TiO₂(1.92%~2.14%) 含量。II 组火山岩相对高 SiO₂ 含量(51.68%~56.43%), MgO 含量变化较大(2.68%~5.75%), 低 FeO* (6.07%~7.82%) 和 TiO₂(0.85%~1.24%) 含量。由于样品蚀变较强, K、Na 等活泼性元素很有可能迁移, 故本文采用不活泼元素进行岩石类型划分。在 Zr/TiO₂ × 0.0001-Nb/Y (图 2), 南大岭组中基性火山岩都落在亚碱性系列区域, 其中 I 组火山岩主要由亚碱性玄武岩组成, II 组火山岩主要由安山岩和亚碱性玄武岩组成。

在元素-SiO₂ 相关变化图上(图 3), I、II 两组火山岩之间在化学成分上渐变演化关系不明显, 暗示两组岩石可能不是同一源区不同阶段的分异产物。I 组火山岩主、微量元素与 SiO₂ 关系变化不明显, 暗示该组岩石结晶分异作用不强。II 组火山岩 MgO、FeO + Fe₂O₃、TiO₂、P₂O₅ 的含量随 SiO₂ 的增加而减少, 微量元素 Cr、Ni 总体上与 SiO₂ 呈负相关关系, Zr、Nb 和 Th 与 SiO₂ 变化关系不明显。

表1 南大岭组中基性火山岩的主量(%)、微量元素(ppm)化学组成分析结果

Table1 Major and trace elements analysis for mafic volcanic rocks of Nandaling Formation

样号	20XSH-40	20XSH-41	20XSH-42	20XSH-43	20XSH-44	20XSH-45
SiO ₂	49.24	49.24	48.33	48.40	47.64	50.19
Al ₂ O ₃	15.58	15.37	17.61	16.48	16.98	17.41
Fe ₂ O ₃	3.01	1.88	7.71	6.49	3.96	6.07
FeO	7.22	8.00	3.47	5.7	6.85	5.1
MgO	5.62	6.44	3.51	4.71	5.17	3.35
CaO	7.73	6.44	6.36	5.11	6.28	3.94
Na ₂ O	3.11	3.82	3.47	4.14	4.12	5.37
K ₂ O	1.63	1.47	2.75	1.57	1.51	1.88
MnO	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.14
TiO ₂	1.92	2.11	2.08	2.14	2.03	2.14
P ₂ O ₅	0.76	0.81	0.77	0.81	0.81	0.81
LOI	3.64	3.88	3.35	3.92	4.13	3.21
Total	99.61	99.62	99.57	99.63	99.64	99.61
La	46.9	49.1	50.5	54.5	50.5	56.3
Ce	104	109	106	118	110	122
Pr	12.4	12.5	12.8	14.1	13.2	14.7
Nd	51.8	52.2	51.3	57.8	55.3	59.6
Sm	9.40	9.84	9.22	10.8	10.6	11.1
Eu	2.64	2.47	2.58	2.83	2.72	2.77
Gd	8.15	8.43	7.91	8.95	8.79	9.25
Tb	1.21	1.27	1.21	1.32	1.24	1.37
Dy	6.57	7.27	6.65	7.53	7.06	7.44
Ho	1.27	1.35	1.26	1.46	1.35	1.45
Er	3.45	3.80	3.69	3.92	3.66	3.96
Tm	0.51	0.56	0.54	0.57	0.52	0.54
Yb	3.21	3.38	3.22	3.62	3.34	3.58
Lu	0.44	0.48	0.44	0.54	0.44	0.51
Rb	24.1	19.9	46.6	26.8	22.1	30.5
Ba	978	1390	1585	950	932	1330
Th	2.30	2.40	2.54	2.70	2.49	2.75
U	0.37	0.44	0.91	0.70	0.39	0.76
Nb	17.2	18.7	18.4	19.8	18.3	20.7
Ta	0.78	0.91	0.91	0.96	0.84	1.00
Sr	1243	541	1173	702	966	548
Zr	274	286	294	310	290	322
Hf	6.43	6.96	7.23	7.60	6.73	7.58
Sc	23.8	25.3	24.7	25.4	24.1	26.3
V	200	202	156	177	174	168
Cr	113	119	107	119	132	118
Co	38.5	34.9	33.6	47.4	39.1	41.7
Ni	61.1	52.1	52.0	71.4	69.5	68.4
Y	35.7	38.5	35.2	39.3	38.1	40.3
(La/Yb) _N	10.5	10.4	11.2	10.8	10.8	11.3
ΣREE	252	262	258	286	269	295
Eu/Eu*	0.90	0.81	0.90	0.86	0.84	0.81

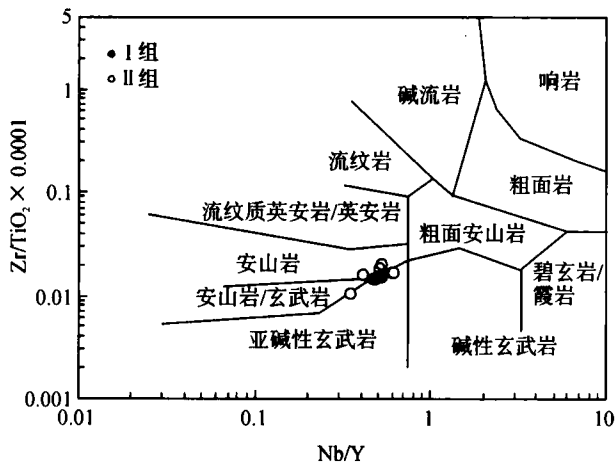


图2 南大岭组中基性火山岩 Zr/TiO₂-Nb/Y 岩石分类图 (此原图据 Peace *et al.*, 1979)

Fig. 2 Zr/TiO₂ vs. Nb/Y discrimination diagram of the Nandaling Formation mafic volcanic rocks.

在稀土分配模式图上南大岭组中基性火山岩都表现出 LREE 富集的右倾平滑型 (图 4a), 总体上类似于兴蒙造山带基性火山岩的稀土分配模式 (Fan *et al.*, 2003), 不同于

鲁西基性火山岩具有明显的 Eu 正异常的稀土分配模式 (郭锋, 1999)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上 (图 4b), 南大岭组中基性火山岩表现出相似分布型式: 富集 LILE (如 Ba, K)、LREE 和亏损 Nb-Ta, U-Th 相对 Ba, La 亏损, 相对兴蒙带和鲁西基性火山岩, 其微量元素分布特征总体上类似于兴蒙带基性火山岩, 但其亏损 U-Th 的特征则与鲁西基性火山岩相似。其中 I、II 两组火山岩在稀土和微量元素特征存在差别: I 组火山岩 (La/Yb)_N = 10.4 ~ 11.3, 有 Eu 弱负异常 (Eu/Eu* = 0.81 ~ 0.90), Sr 从负异常到正异常变化; II 组火山岩轻重稀土分异相对较大, (La/Yb)_N = 10.4 ~ 21.28, 有微弱的 Eu 负异常或异常不明显 (Eu/Eu* = 0.85 ~ 0.99), Sr 从异常不明显到弱的正异常变化。总体上, II 组火山岩稀土和 HFSE 含量相对 I 组火山岩整体降低, 这很难用磷灰石、金红石和角闪石等矿物的分离结晶作用来解释。

在 Ba/Nb-La/Nb 关系图中 (图 5), 南大岭组中基性火山岩样品投点落于岛弧火山岩区域内, 介于鲁西地区和兴蒙造山带的晚中生代基性火山岩之间 (郭锋, 1999; Fan *et al.*, 2003)。Ba/Nb > 30, 远离 MORB、OIB 和原始地幔区域 (Sun and McDonough, 1989), 暗示了源区与 MORB、OIB 和原始地幔不同。其中 I 组火山岩相对 II 组火山岩低 Ba/Nb 和 La/Nb 比值, 暗示了两者源区性质可能不同。

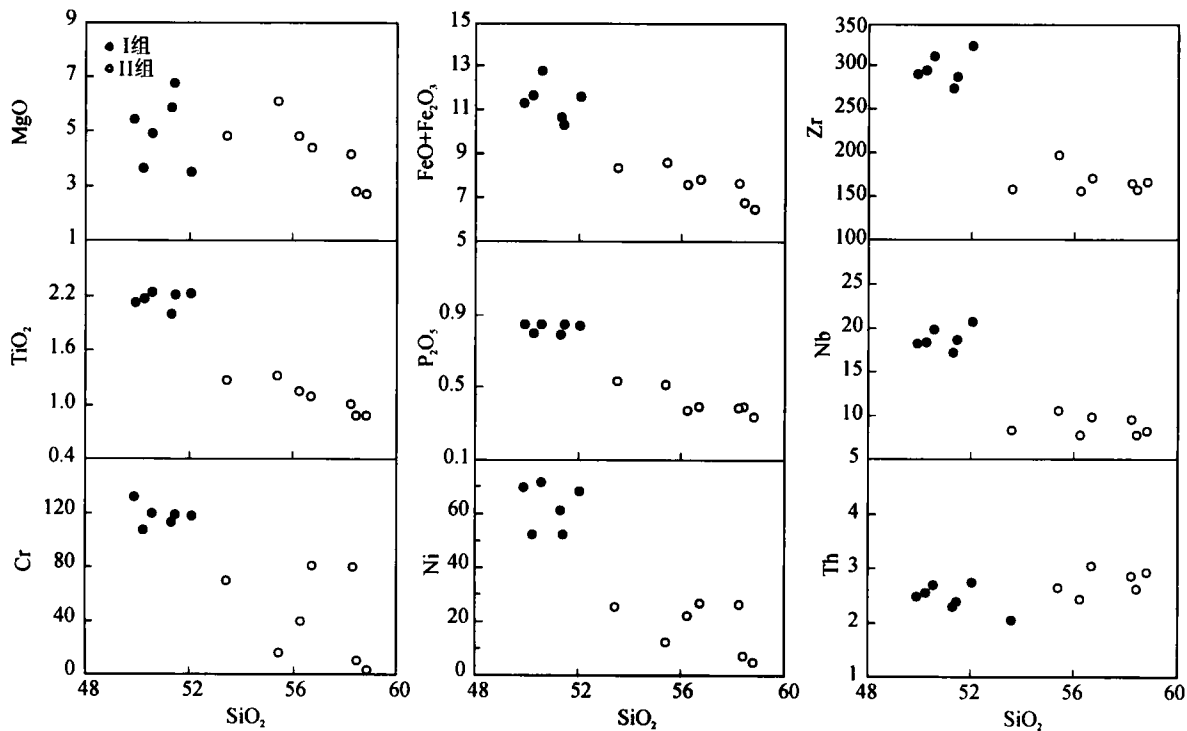


图3 南大岭组中基性火山岩 Harker 图解

Fig. 3 Harker diagrams of the Nandaling Formation mafic volcanic rocks

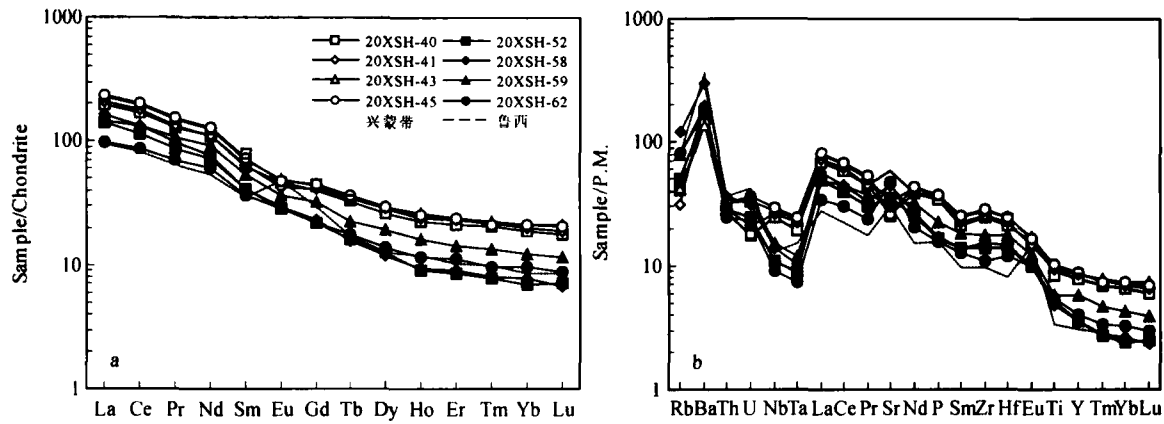


图4 南大岭组中基性火山岩的稀土和微量元素分布图 (粒陨石数据参考 Taylor and McLennan, 1985; 原始地幔数值参考 Sun & McDonough, 1989)
 Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) of the Nandaling Formation mafic volcanic rocks

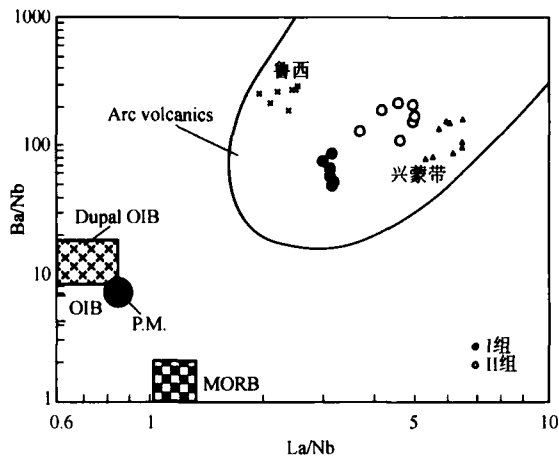


图5 南大岭组中基性火山岩的 La/Nb-Ba/Nb 图解 (此原图据郭锋博士论文, 所有样品具有高 La/Nb 和 Ba/Nb 比值, 可能暗示熔融源区不同于 MORB 和 OIB. 其中 MORB, OIB, P. M. 数据来自于 Sun & McDough, 1989)
 Fig.5 La/Nb vs. Ba/Nb variation diagrams of the Nandaling Formation mafic volcanic rocks

4.2 Sr-Nd 同位素组成特征

北京西山南大岭组中基性火山岩的 Sr-Nd 同位素分析数据见表 2。根据前人对南大岭组中基性火山岩的年代学资料及其与沉积地层接触关系 (北京区域地质志, 1991; 陈义贤等, 1997; 鲍亦冈等, 1995; Davis *et al.*, 2001), 我们选定 190 Ma 作为南大岭组中基性火山岩计算初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 比值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的年龄。I 组火山岩所测的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.706091 ~ 0.706374, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.511961 ~ 0.512152; 其初始比值 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 为 0.705939 ~ 0.706057, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -7.4 ~ -7.5。II 组火山岩所测的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为

0.706383 ~ 0.707029, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.511845 ~ 0.511907; 其初始比值 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 为 0.705822 ~ 0.706697, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -12.0 ~ -13.5, 相对 I 组火山岩明显低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 可能暗示两组火山岩来自于不同的地幔源区。在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的协变图上 (图 6), 南大岭组中基性火山岩样品落在鲁西和兴蒙带基性火山岩之间, 相对鲁西区基性火山岩高初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (Guo *et al.*, 2003), 因此暗示了熔融源区除了华北陆块内部古老富集型 EMI 源区的贡献, 还有外来放射成因 Sr 的加入。

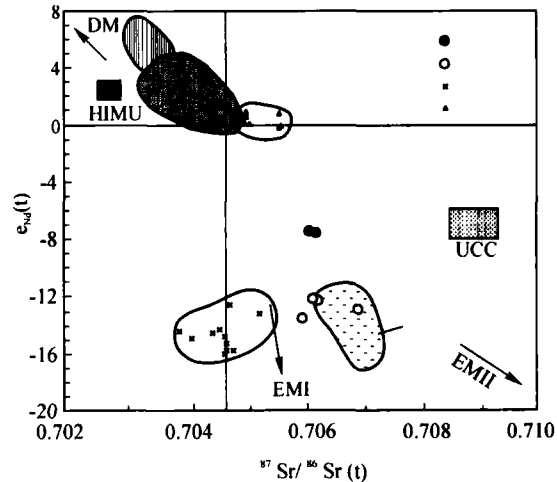


图6 南大岭组中基性火山岩 Sr-Nd 同位素协变图 (此原图据郭锋博士论文, 1999 和陈义贤等, 1997. 岩石相对鲁西火山岩表现出中等富集的 Sr 同位素组成, 可能暗示了熔融源区除了华北陆块内部古老富集型 EMI 源区的贡献, 还有外来放射成因 Sr 的加入. 鲁西火山岩数据引自郭锋等, 1999, 兴蒙造山带数据引自 Fan *et al.*, 2003)
 Fig.6 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ plots of the Nandaling Formation mafic volcanic rocks

表2 北京西山南大岭组中基性火山岩 Sr-Nd 同位素组成分析结果

Table 2 Sr-Nd isotope analysis of Nandaling Formation mafic volcanic rocks in Xishan, Beijing

Sample No.	20xsh-40	20xsh-41	20xsh-52	20xsh-57	20xsh-58	20xsh-59
Rb (ppm)	24.1	20.0	31.9	28.5	77.9	49.7
Sr (ppm)	1243	541	750	709	958	668
$^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$	0.056	0.107	0.123	0.116	0.235	0.215
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.706091	0.706346	0.707029	0.706383	0.706629	0.706404
$\pm 2\sigma$	14	16	17	13	17	17
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$	0.705939	0.706057	0.706697	0.706068	0.705993	0.705822
$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	23.6	25.3	34.4	25.4	24.4	21.9
Sm (ppm)	9.40	9.84	6.16	6.02	6.19	8.08
Nd (ppm)	51.8	52.2	34.4	34.8	36.0	43.0
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.110	0.114	0.108	0.104	0.104	0.114
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512149	0.512152	0.511871	0.511896	0.511907	0.511845
$\pm 2\sigma$	11	13	13	13	12	11
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-7.4	-7.5	-12.8	-12.2	-12.0	-13.5
$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$	1.46	1.52	1.85	1.75	1.72	1.98

5 岩石成因讨论

根据前面分析可知,南大岭组的 I 组和 II 组火山岩的主微量元素和同位素地球化学特征表现出明显差异,这难以通过不同程度的部分熔融作用,结晶分异或地壳混染作用等过程来解释,更可能反映两组火山岩来源于不同的地幔源区,是地幔不均一性所致。I 组火山岩具有较高的 MgO 和 Cr (107 ~ 1132 ppm)、Ni (52.0 ~ 71 ppm), 其主微量元素随 SiO₂ 变化不大,说明这些岩石可能代表了原始地幔岩浆; 而 II 组火山岩较低的 MgO 和 Cr (10.7 ~ 80.6 ppm)、Ni (7.1 ~ 26.5 ppm) 含量反映这些岩石不能代表原始幔源岩浆,应经历了较强的岩浆演化过程。下文我们通过分析岩浆过程和源区特征来约束该火山岩的成因。

5.1 岩浆过程

地壳混染作用可能是导致岩浆中 Ba/Nb、La/Nb 和 Sr 同位素比值增高与 Nd 同位素比值的降低的因素。由于中上地壳物质具有高的 U、Th 含量 (Taylor and McLennan, 1985), 因此这些物质的加入势必引起岩浆中 U-Th 含量的迅速升高; 然而南大岭组中基性火山岩表现出的 U-Th 相对亏损说明中上地壳物质混染的可能性可以忽略。而且,在 ϵ_{Nd} 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 对 SiO₂ 图解上 (图 7a, b), 南大岭组的 I、II 组火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 ϵ_{Nd} 随着 SiO₂ 变化不大,也说明两组火山岩受地壳物质影响不大。

从前面描述可知,南大岭组中 II 组火山岩具有低 MgO 和 Cr、Ni 含量的特征,说明它们在深部岩浆房可能经历了

富镁铁矿物的分离结晶作用,并在岩浆上升过程中经历了橄榄石、单斜辉石和钛铁矿、磷灰石的结晶作用,如 MgO、FeO + Fe₂O₃、TiO₂、P₂O₅ 的含量随 SiO₂ 的增加而减少。

5.2 地幔源区特征

通过讨论我们排除了亏损地幔、原始地幔作为南大岭组中基性火山岩的熔融源区的可能性,也排除了地壳混染作用的贡献,因此这些岩石所表现出的 LREE 和 LILE 富集和中等富集的 Sr-Nd 同位素组成反映它们源于富集的岩石圈地幔。南大岭组中基性火山岩所显示出的微量元素特征如高 LILE/HFSE 和 LREE/HFSE 比兴蒙带基性火山岩非常相似,其 Th-U 的相对亏损则相似于鲁西基性火山岩; 同样地,其 Sr-Nd 同位素组成也介于兴蒙带和鲁西之间。所有这些元素-同位素特征很可能反映其源区也介于前两者之间。

由于 Nb、La、Hf、Sm 等元素在地表蚀变/风化过程中表现出值都与的不容易迁移的地球化学行为,且在玄武岩浆体系中分配系数相近,因此这些元素比值主要反映了源区的特征。一般地,与大洋俯冲冲相关的交代作用主要表现出 Nb、Ta 的亏损而 Zr、Hf 则相对 REE 亏损不明显。而由板内富 CO₂ 流体/熔体交代的富集地幔则表现出 Zr/Hf 分馏且 Zr、Hf 相对 REE 亏损的特征 (LaFlèche *et al.*, 1998)。

南大岭组中基性火山岩较低的 (Nb/La)_N 比值 (0.22 ~ 0.37) 和较高的 (Hf/Sm)_N 比值 (0.91 ~ 1.16), 接近于兴蒙带基性火山岩平均值 ((Nb/La)_N = 0.20, (Hf/Sm)_N = 1.10), 但相对鲁西基性火山岩低 (Nb/La)_N 平均值 (0.45), 高 (Hf/Sm)_N 平均值 (0.77) (图 8), 反映了岩浆源区可能受到了与俯冲相关的交代作用的影响。来自兴蒙造山带中生代

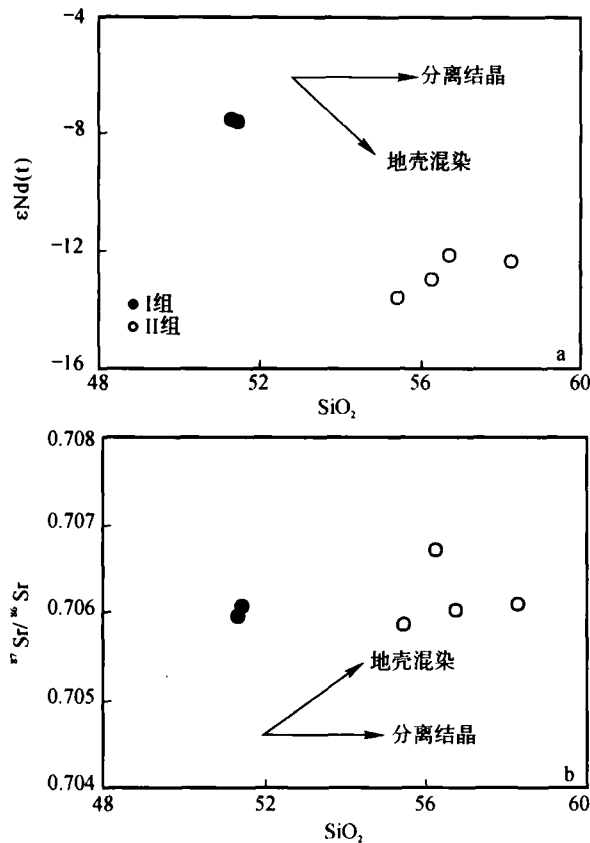


图7 南大岭组火山岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ε_{Nd}对 SiO₂关系图
Fig.7 Variation diagrams of initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr isotopic ratio and ε_{Nd} vs. SiO₂ for the Nandaling Formation volcanic rocks

基性火山岩的地球化学证据反映其熔融源区为受到俯冲古亚洲洋板片交代的岩石圈地幔 (Fan *et al.*, 2003)。因此我们认为南大岭组中基性火山岩所表现出的介于华北陆块内部与兴蒙造山带基性火山岩的 (Nb/La)_N, (Hf/Sm)_N 比值和同位素组成特征反映了其地幔源区主要继承了华北陆块内部 EMI 型地幔, 并且很可能受到了古亚洲洋俯冲交代作用的改造。这一认识与北京西山地区独特的大地构造位置是吻合的。

所有南大岭组中基性火山岩样品都表现出 Th-U 相对 Ba、La 强烈亏损。Blundy 和 Wood (1991) 和 Reagan *et al.* (1992) 的实验岩石学研究表明 Th-U 在斜长石中的分配系数远低于 Ba、La, 可导致富斜长石源区 Th-U 含量强烈亏损, 因此, Hoffmann (1996) 和 Sovelev *et al.* (2000) 认为 Hawaii 玄武岩的 Th-U 的亏损与早期富斜长石堆晶的大洋辉长岩熔体的参与有关。Xu *et al.* (2001) 在解释峨眉山 HT2 系列溢流玄武岩的 Th-U 亏损时认为是地幔岩浆在地壳底部受到层状富斜长石辉长岩派生流体的混染所致。但富斜长石源区熔融而成的岩浆常具有 Sr、Eu 正异常, 而南大岭组中基性火山岩并没有表现出上述地球化学特征。Zhai *et al.* (2001)

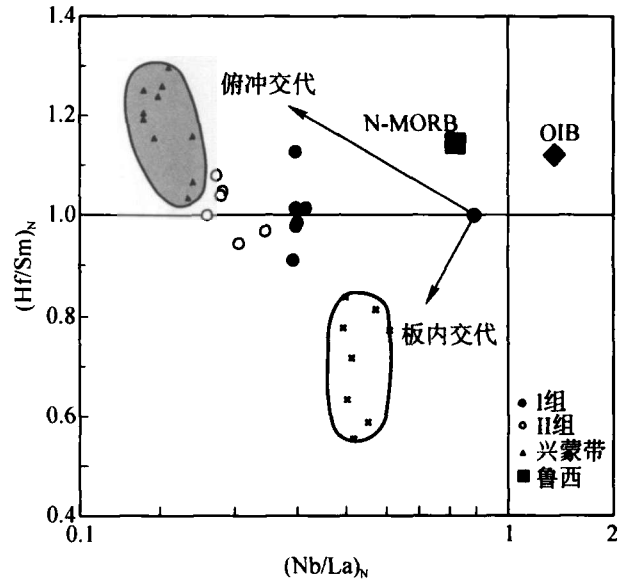


图8 南大岭组中基性火山岩 (Nb/La)_N-(Hf/Sm)_N 关系图解
(所有样品 (Nb/La)_N 和 (Hf/Sm)_N 比值落在兴蒙带和鲁西基性火山岩之间, 暗示岩浆源区可能受到与俯冲相关的交代作用的影响。鲁西火山岩数据引自郭锋等, 1999; 兴蒙带火山岩数据引自 Fan *et al.*, 2003; N-MORB, OIB 和 P. M. 数据引自 Sun & McDonough, 1989)
Fig.8 Variation diagrams of (Nb/La)_N vs. (Hf/Sm)_N for the Nandaling Formation mafic volcanic rocks

研究表明代表华北克拉通下地壳的麻粒岩有着高 Sr 低 Nd 同位素特征, 且表现出明显的 Th-U 亏损 (Th = 1.22ppm, U = 0.4ppm), 考虑到后期地壳混染不明显及燕山地区的区域构造背景, 我们倾向于认为南大岭组中基性火山岩的 Th-U 亏损是其源区属性, 暗示早期古亚洲洋向华北陆块俯冲碰撞过程中, 可能有部分相当于华北下地壳组分的物质被俯冲到地幔源区。

5.3 岩石成因

大陆造山带火山岩的岩石成因与造山带岩石圈伸展-减薄作用有关, 如板片断离作用 (Davis and Blackenburg, 1995)、对流减薄作用 (England and Houseman, 1989)、重力垮塌作用 (Ruppel, 1995; Liu, 2001) 和沿深大断裂带的走滑导致拉分作用 (Fan *et al.*, 2001) 等等。其中最为典型的地区包括青藏高原 (Turner *et al.*, 1996; Miller *et al.*, 1999)、美国盆岭省 (Hawkesworth *et al.*, 1995) 和中国东北造山带 (Fan *et al.*, 2003) 等地, 其基性火山岩主要来源于先期俯冲交代的岩石圈地幔和/或对流地幔的减压部分熔融作用, 因此它们的共同特点是具有岛弧火山岩的微量元素地球化学特征, 如高的 LILE/HFSE 和 LREE/HFSE 比值。

南大岭组中基性火山岩强烈富集 Ba、K 和 LREE, 亏损 Nb、Ta 等 HFSE 和中等富集的 Sr 和低 Nd 同位素组成。因此, 这些岩石的可能成因包括: (1) 俯冲动力学背景下交代地幔楔的部分熔融产物 (Gill, 1981; Arculus, 1994); (2) 大陆岩石圈伸展背景下富集岩石圈地幔减压部分熔融形成 (Hawkesworth *et al.*, 1995; Fan *et al.*, 2001, 2003)。

前人对贺根山-锡林浩特-索伦山缝合带两侧的不同成因类型花岗岩的年代学和地球化学研究认为古亚洲洋的闭合时间为 280 ~ 310 Ma (Chen *et al.*, 2000; 陈斌等, 2001), 近年来在燕山及其以北地区发现的一套三叠纪 (260 ~ 208 Ma) 的碱性侵入岩则标志着与古亚洲洋消减闭合的造山作用的结束 (阎国翰等, 2000)。这些事实说明南大岭组中基性火山岩形成于陆内环境, 其表现出的微量元素地球化学特征主要是继承了富集地幔源区的特点。

根据近年来构造几何学和热年代学的研究结果, 燕山地区在 180Ma 前发育大型向南的强烈逆冲推覆作用 (郑亚东等, 2000), 西山地区 J_1 地层底部的玄武岩发生了低级变质作用 (硬绿泥石化变质作用) 以及煤变质作用都反映了早侏罗世早期区域上强烈挤压应力场的存在, 这一挤压作用的动力来源可能与同时代的蒙古-鄂霍茨克海的消减、闭合作用相关 (Davis *et al.*, 2001)。结合南大岭组中基性火山岩沿深断裂局限分布的特点, 我们认为南大岭组火山岩的形成成为挤压后应力松弛引起局部伸展作用所致, 即由于应力松弛诱发先存的深大断裂活动导致岩石圈深部局部伸展和软流圈地幔上涌和地温梯度增高, 当软流圈潜能温度与含水橄榄岩的固相线相交, 从而引起受俯冲作用改造的岩石圈地幔减压部分熔融作用形成初始幔源岩浆喷溢形成 I 组火山岩, 而 II 组火山岩形成前经历了一定的结晶作用。

6 初步结论

北京西山南大岭组中基性火山岩中 I 组火山岩主要为亚碱性玄武岩, II 组火山岩主要由安山岩和亚碱性玄武岩组成; 两组岩石都表现出 LREE 富集的右倾平滑型稀土配分模式, 富集 LILE (如 Ba、K)、LREE 和亏损 Nb-Ta 的微量元素特征, I 组火山岩总体上较 II 组火山岩高 Ti、P、相容元素 (如 Gr、Ni)、REE 和 HFSE, 二者之间不存在岩浆演化趋势。I 组火山岩 Sr-Nd 同位素组成变化小, 富集程度相对较低, II 组火山岩 Sr-Nd 同位素相当富集。两组岩石的元素地球化学特征总体上介于兴蒙带和华北陆块内部基性火山岩之间。

北京西山南大岭组中基性火山岩的熔融地幔源区主要继承了华北陆块内部 EMI 型地幔源区, 并且受到了早期古亚洲洋消减板片的交代富集作用。I、II 组火山岩的源区性质不同, 可能是地幔不均一性所致。

早中生代构造-岩浆活动的动力来源可能来自于蒙古-鄂霍茨克海俯冲消减作用的远程效应, 即挤压后应力松弛诱发先存的深大断裂活动导致岩石圈深部局部伸展和软流圈地

幔上涌, 从而引起早期交代富集的岩石圈地幔减压部分熔融作用而成。

致谢 本文得到中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-107) 和国家科学技术部 973 项目 (G1999043202) 的共同资助。

References

- Arculus RJ. 1994. Aspects of magma genesis in arcs. *Lithos*, 33: 189 - 208
- Bao YG, Bai ZM, Ge SWi. 1995. *Yanshanian volcanic geology and its volcanic rocks in Beijing*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Blundy JD and Wood BJ. 1991. Crystal-chemical controls on the partitioning of Sr and Ba between plagioclase feldspar, silicate melts and hydrothermal solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 55: 193 - 209
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Beijing Municipality. 1991. *Regional Geology of Beijing Municipality*. Beijing: Geological Publishing House, 243 - 301 (in Chinese)
- Chen B, Jahn BM, Wilde S, Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 157 - 182
- Chen B, Zhao GC, Wilde S. 2001. Subductional and collision-related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic ages and tectonic implications. *Geological Review*, 47 (4): 361 - 367 (in Chinese)
- Chen, YX, Chen, WJ, Zhou, XH *et al.* 1997. Mesozoic volcanic rocks in west Liaoning Province and the surrounding regions: geochronology, geochemistry and tectonic setting. Beijing: the Seismological Press, 1 - 279 (in Chinese)
- Davis GA, Zheng YD, Wang C and Brian J D. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. *Geol. Soc. Am. Memoir.*, 194: 171 - 197
- Davis JH, Blackenour von F. 1995. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogenics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 129: 327 - 343
- Deng JF, Mo XX, Zhao HL *et al.* 1994. Lithospheric root/de-rooting and activation of the East China continent. *Geoscience*, 8(3): 349 - 356 (in Chinese)
- DePaolo DJ. 1985. Sm-Nd, Rb-Sr and U-Th-Pb systematics of granulite facies rocks from Fyfe Hills, Ederby Land, Antarctica. *Nature*, 298: 14 - 618
- England C, Houseman GA. 1989. Extension during continental convergence with application to the Tibetan plateau. *J. Geophys. Res.*, 94: 17561 - 17579
- Fan WM, Guo F, Wang YJ, Lin G and Zhang M. 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26: 733 - 746
- Fan WM, Guo F, Wang YJ, Lin G. 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1-2): 115 - 135
- Gill JB. 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. New York: Springer-Verlag, 390
- Goldstein SL, O'Nions RK and Hamilton PJ. 1984. A Sm-Nd study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70: 221 - 236
- Guo F, Fan WM, Wang YJ and Lin G. 2001. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China Block: constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26: 759 - 771
- Guo F. 1999. Petrogenesis of Mesozoic volcanic rocks in Shandong province, eastern China and their constraints on the lithospheric

- thinning process. Doctor degree thesis, Changsha: Changsha Institute of geotectonic (in Chinese)
- Hawkesworth CJ, Turner S, Gallagher K *et al.* 1995. Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the basin and range. *J. Geophys. Res.*, 100 (B7): 10271 - 10286
- Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources (HBBGMR). 1989. Regional Geology of Hebei Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 741 (in Chinese)
- Hofmann AW and Jochum KP. 1996. Source characteristics derived from very incompatible trace elements in Mauna Loa and Mauna Kea basalts, Hawaii Scientific Drilling Project. *J. Geophys. Res.*, 101 (B5): 11831 - 11839
- Hofmann AW, Hemond C, Raczek I, Lehnert K, Rhodes JM and Garcia MO. 1993. Source compositions of Kilauea and Mauna Loa, *Eos*, 74 (43), Full Meet, Suppl., 630
- Kuno H. 1966. Lateral variation of basalt magma types across continental margins and island arcs. *Bull. Volcanol.*, 29: 195 - 222
- LaBas M, Le Maitre RW, Streckeis A and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total-silica diagram. *J. Petrol.*, 27: 745 - 750
- LaFlèche MR, Camire G and Tenner GA. 1998. Geochemistry of post-Acadian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Marimes Basin, Magdalen Islands, Quebec, Canada. *Chemical Geology*, 148 (3 - 4): 115 - 136
- Li WP, Li XH, Lu FX *et al.* 2002. Geological characteristics and its setting for volcanic rocks of early Cretaceous Yixian formation in western Liaoni province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (2): 193 - 204 (in Chinese)
- Li WP, Lu FX, Li XH *et al.* 2001. Geochemical features and origin of volcanic rocks of Tiaojishan formation in Western Hills of Beijing. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(2): 123 - 133 (in Chinese)
- Liu M. 2001. Cenozoic extension and magmatism in the North American Cordillera: the role of gravitational collapse. *Tectonophysics*, 342 (3 - 4): 407 - 433
- Liu YS, Gao S, Luo TC. 1999. Geochemistry of granulites in North China Craton: implications for the composition of archaic lower crust. *Geology-Geochemistry*, 27(3): 40 - 46 (in Chinese)
- Menzies MA & Kyle PR. 1990. Continental volcanism: A crust-mantle probe. In: Menzies M A (ed.). *Continental Mantle*, Oxford Science Publication, 157 - 177
- Menzies MA, Fan WM and Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of > 120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. In: Pichand HM, Alabster T, Harris NBW *et al.* (eds.). *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. *Geol. Soc. Spel. Pub.*, 76: 71 - 78
- Miller C, Schuster R, Klotzli U *et al.* 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *J. Petrol.*, 40(9): 1399 - 1424
- Reagan MK, Volpe AM and Cashman KV. 1992. ²³⁸U and ²³²Th series chronology of phonolite fractionation at Mount Erebus, Antarctica. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 56: 1401 - 1407
- Ruppel C. 1995. Extensional processes in continental lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 100: 24187 - 24215
- Sobolev AV, Hofmann AW, Nikogosian K. 2000. Recycled oceanic crust observed in ghost plagioclase within the source of Mauna Loa lavas. *Nature*, 404: 986 - 990
- Sun S-S, MacDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry MJ. (eds.). *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society Special Publication, 313 - 345
- Tang KD. 1990. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korean Craton. *Tectonics*, 9(2): 249 - 260
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford Press, pp. 312
- Turner S, Arnaud N, Liu J *et al.* 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibet Plateau: implication for convective thinning of the lithosphere and the source of oceanic basalts. *J. Petrol.*, 37: 45 - 71
- Xu YG, Chung SL, Jahn BM, Wu GY. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southern China. *Lithos*, 58: 145 - 168
- Yan GH, Mou BL, Xu BL, He GQ, Tan LK, Zhao H, He ZF, Qiao GS. 2000. Chronology, Sr, Nd and Pb isotopic compositions of Triassic alkaline intrusions in the Yanliao-Yinshan and tectonic implications. *Science in China (Series D)*, 30: 383 - 387 (in Chinese)
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2001. An exposed cross-section of Early Precambrian continental lower crust in North China Craton. *Phys. Chem. Earth*, 26 (9 - 10): 781 - 792
- Zhang CH. 1999. A primary discussion on the intraplate orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 295 - 308 (in Chinese)
- Zhang, CH, Song, HL. 1997. A comparative study between Mesozoic intraplate thrust faulting nappes in the Yanshan Orogen and foreland thrust-fold belt. *China University Geosciences Journal*, 22(1), 33 - 36 (in Chinese)
- Zheng YD, Davis GA, Wang C, Darby BJ, Zhang CH. 2000. Major Mesozoic tectonic events in the Yanshan Belt and the plate tectonic setting. *Acta Geologica Sinica*, 74 (4): 289 - 302 (in Chinese)
- Zonenshain LP, Kuzmin MI, Kononov MV. 1985. Absolute reconstructions of the Paleozoic oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 74: 103 - 116

附中文参考文献

- 鲍义冈, 白志民, 葛世炜等. 1995. 北京燕山期火山地质及火山岩. 北京: 地质出版社
- 北京市地质矿产局编. 1991. 北京市区域地质志. 北京: 地质出版社
- 陈斌, 赵国春, WILDE S. 2001. 内蒙古苏尼左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义. *地质论评*, 47(4): 361 - 367
- 陈义贤, 陈文奇, 周新华等. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩. 北京: 地质出版社
- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲等. 1994. 中国东部岩石圈根/去根作用于大陆活化. *现代地质*, 8(3): 349 - 356
- 河北省地质矿产局编. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社
- 郭锋. 1999. 山东中生代火山岩成因及其对岩石圈减薄过程的制约. 博士学位论文. 长沙: 长沙大地构造研究所
- 李伍平, 路凤香, 李献华等. 2001. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源. *岩石矿物杂志*, 20(2): 123 - 133
- 李伍平, 李献华, 路凤香等. 2002. 辽西早白垩世义县组火山岩的地质特征及其构造背景. *岩石学报*, 18(2): 193 - 204
- 刘勇胜, 高山, 骆庭川. 1999. 华北克拉通麻粒岩的地球化学特征及其对太古宙下地壳组成的指示意义. *地质地球化学*, 27(3): 40 - 46
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良等. 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义. *中国科学(D辑)*, 30(4): 383 - 387
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华等. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. *中国科学(B辑)*, 22(12): 1325 - 1330
- 张长厚, 宋鸿林. 1997. 燕山板内造山带中生代逆冲推覆构造及其与前陆褶冲带的对比研究. *地球科学*, 22(1): 33 - 36
- 张长厚. 1999. 初论板内造山带. *地学前缘*, 6(4): 295 - 308
- 郑亚东, G A Davis, 王琮等. 2000. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题. *地质学报*, 74 (4): 289 - 302