

文章编号:1672-6561(2013)02-0019-13

鲁西地块济南辉长岩岩石学、地球化学和 Os-Nd-Sr 同位素研究

高 林, 陈 斌

(1. 北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要: 对华北克拉通东部陆块鲁西地块济南辉长岩进行了详细的岩石学、地球化学和 Os-Nd-Sr 同位素研究, 探讨了该岩体的成岩过程、地幔源区特征以及地壳混染在幔源岩浆演化过程中的作用。济南辉长岩在地球化学上富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损重稀土元素以及高场强元素; 它们具有高放射性成因的 Os 同位素组成, Sr-Nd 同位素组成具有 EM1 型特征。岩石学和元素地球化学研究表明, 该岩体在成岩过程中经历了显著的橄榄岩+辉石+斜长石的分离结晶。岩石学、地球化学和 Sr-Nd 同位素特征研究表明, 济南辉长岩的母岩浆应该是含水的岩浆体系, 且起源于一个古老的富集岩石圈地幔。岩体所具有的高放射性成因的初始 Os 同位素组成以及呈反相关关系的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和初始 Sr 同位素比值表明, 其母岩浆在深部地壳位置侵位过程中遭受了古老的前寒武纪基性下地壳的混染。

关键词: 岩石学; 地球化学; 济南辉长岩; Os-Nd-Sr 同位素; 岩石成因; 地壳混染; 华北克拉通

中图分类号: P581.1

文献标志码: A

Study on Petrology, Geochemistry and Os-Nd-Sr Isotopes of Jinan Gabbro in Luxi Block

GAO Lin, CHEN Bin

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Petrology, geochemistry and Os-Nd-Sr isotopes of Jinan gabbro in Luxi block of eastern block of North China Craton were studied in detail, and diagenetic process, characteristic of mantle source and the role of crustal contamination on evolution process of mantle-derived magma were discussed. Jinan gabbro was rich in LREE and LILE, depleted in HREE and HFSE; radiogenic Os isotopic composition was high for Jinan gabbro, the characteristic of Sr-Nd isotopic composition was EM1-like. The results of petrology and element geochemistry suggested a significant fractional crystallization of olivine + pyroxene + plagioclase in forming the mafic pluton. The characteristics of petrology, geochemistry and Os-Nd-Sr isotopes showed that the parental magmas of Jinan gabbro was hydrous magma system, which originated from an old enriched lithospheric mantle. High radiogenic initial Os isotopic composition and inverse relationship between value of ϵ_{Nd} and ratio of initial Sr isotopic compositions of the mafic pluton suggested that parental magmas were contaminated by Precambrian mafic lower crust during

收稿日期: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(90914001, 41121062)

作者简介: 高 林(1986-), 男, 河北石家庄人, 理学硕士研究生, E-mail: yxpkugl@gmail.com。

magma emplacement at a deep crustal level.

Key words: petrology; geochemistry; Jinan gabbro; Os-Nd-Sr isotopes; petrogenesis; crustal contamination; North China Craton

0 引言

华北克拉通下伏岩石圈地幔的同位素性质一直引起众多研究者的兴趣。这些同位素性质的确定对理解岩石圈形成和演化以及壳幔的相互作用具有非常重要的科学意义。中生代时期,华北克拉通上形成了许多基性侵入岩^[1-10],这些基性侵入体已被很多学者广泛用来研究华北克拉通中生代岩石圈地幔的成分和结构,并确定华北克拉通下的中生代岩石圈在物理和化学性质上发生了显著的演化和转变^[11]。许多学者直接使用基性岩的 Nd-Sr 同位素代表地幔源区真实的同位素特征^[1,4,7],理由是这些基性岩浆在岩浆演化过程中所遭受的地壳混染程度低到可以忽略。然而,在基性岩浆由地幔上升到地壳位置的过程中,由于其本身所具有的高温特性,会与陆壳物质发生显著混染。在此情况下,很难通过 Nd 和 Sr 同位素来区分富集地幔来源的岩浆和地壳混染物质。为此,笔者借助于 Re-Os 同位素体系,更好地评估地壳混染在幔源岩浆演化过程中的作用,并进一步理解壳幔相互作用的过程。

Re-Os 同位素体系与传统的亲石元素同位素体系(如 Sr-Nd-Pb)不同,Re 是中等不相容元素,Os 是相容元素。在地幔部分熔融过程中,Re 优先进入熔体相,而 Os 则主要残留在地幔岩中^[12],最终导致壳幔中 Re 与 Os 含量(质量分数,后文同)之比 $w(\text{Re})/w(\text{Os})$ 差异很大。随着时间的流逝,地壳放射性成因的 Os 同位素含量增长很快,尤其前寒武纪的古老基性地壳,其 $N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})$ 值可超过 50^[13],即使是英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩(TTG)片麻岩,其 $N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})$ 值也可达 5~10^[13]。而地幔的 $N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})$ 值增长很慢,通常不会超过 0.129^[14-15]。重要的是,由于地幔橄榄岩具有极高的 Os 含量(平均 3.2×10^{-9} ^[12]),其 Os 同位素组成几乎不受后期交代作用的影响^[16],被交代地幔的 $N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})$ 值很少超过 0.15^[17]。因此,地幔和大陆地壳储库在 Os 同位素上的巨大差异使得 Re-Os 同位素体系成为示踪壳幔物质来源的有力工具。

笔者选择位于华北克拉通东部鲁西地块济南辉长岩(药山和华山岩体)作为研究对象,通过对该基

性岩体的岩石学、地球化学以及 Rb-Sr、Sm-Nd 和 Re-Os 同位素的详细研究,探讨岩浆的起源和演化、壳幔相互作用以及地壳混染物质的性质,从而对华北克拉通减薄过程提供进一步的证据和限定。

1 地质背景和岩相学观察

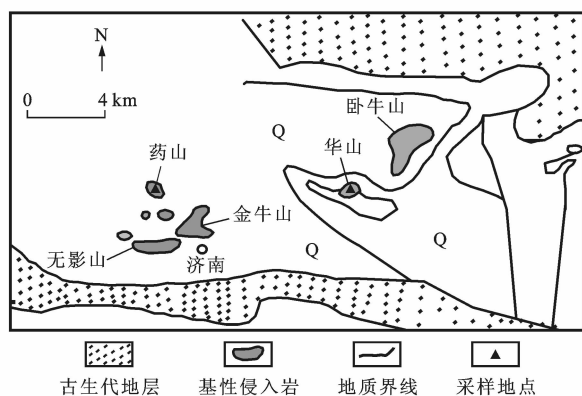
1.1 地质背景

作为地球上最为古老的克拉通之一,华北克拉通上保存有 3 800 Ma 的古老陆壳残余^[18]。基于基底岩石的同位素年龄和岩石组合、构造演化以及变质 P-T-t 轨迹的研究,华北克拉通可以化分为 3 部分:东部陆块、西部陆块和中央造山带^[19]。东部陆块和西部陆块在古元古代(1.85 Ga)碰撞缝合,形成了中央造山带。华北克拉通的基底主要由晚太古代到古元古代的 TTG 片麻岩和基性麻粒岩、角闪岩组成^[19-20]。

华北克拉通发育有厚层的中晚元古代到晚元古代的石英岩和灰岩,表明其自中晚元古代起一直保持很稳定的状态^[2]。然而自早中生代以来,华北克拉通重新活化,发育了一系列的伸展盆地,并伴随有岩石圈地幔减薄和化学性质的巨大变化以及大规模的中生代岩浆活动和成矿作用^[2,21]。

鲁西地块位于华北克拉通东部板块^[1],晚中生代时期在济南、邹平和莱芜等地区发育有若干基性侵入体。与此同时,同期的粗安岩和高钾煌斑岩与这些基性侵入岩相伴生^[22-23]。本文所研究的华山和药山岩体属于济南基性和超基性侵入体^[24](图 1),而后者属于鲁西地块晚中生代最大的侵入体。济南辉长岩作为中国东部中生代基性侵入岩体的典型代表,前人已经进行了一定的研究,但对于岩浆的源区性质还没有达到较为统一的认识。Guo 等认为鲁西中基性岩来自于富集的岩石圈地幔,具有类似于 EM1 地幔端元的 Sr-Nd 同位素特征^[1,25]。闫峻等根据济南辉长岩 Sr-Nd 同位素特征,认为该源区可能由 DMM、EM1 和 EM2 三端元混合组成^[26]。Zhang 等认为邹平、济南、莱芜等地的辉长岩表现出轻微的 EM1 特征,不及太行山辉长岩 EM1 特征显著^[3]。笔者对华北克拉通东部陆块鲁西地块济南辉长岩进行了详细的岩石学、地球化学和 Os-Nd-Sr 同位素研究,探讨了该岩体的成岩过程、地幔源区特征以及地壳混染在幔源岩浆演化过程中的作用。杨承海等报道济

南辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (130.8 ± 1.5) Ma 和 (127 ± 2) Ma, 指示济南辉长岩形成于早白垩纪^[24]。为计算方便, 本文取年龄为 130 Ma。



来自文献[24,27]

图1 济南辉长岩的地质图及采样地点

Fig. 1 Geological Map of Jinan Gabbro and Sampling Sites

1.2 岩相学观察

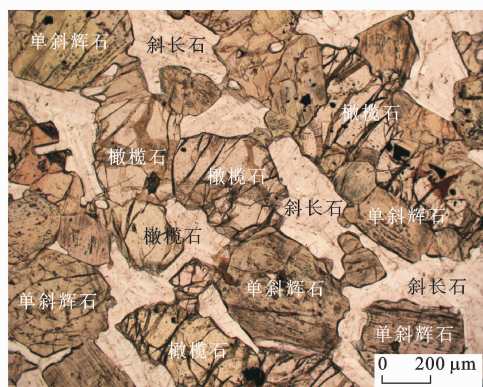
在华山和药山岩体共采集 5 个样品。其中, 2 个角闪辉长岩(样品 HS-2 和 HS-4), 3 个辉长岩(样品 YS-2, HS-1 和 HS-3)。角闪辉长岩主要由单斜辉

石(含量为 40%~50%)、斜长石(含量为 20%)、角闪石(含量为 15%~20%)以及少量的斜方辉石、黑云母和橄榄石组成[图 2(a)、(b)]。辉长岩主要由斜长石(含量为 40%~50%)、单斜辉石(含量为 25%~50%)以及少量的斜方辉石、黑云母、角闪石和橄榄石组成, 都具有典型的辉长结构。其中, 样品 HS-2 和 HS-4 明显受到后期流体的交代, 表现为发育有大量的单斜辉石向角闪石转化的现象[图 2(b)]。从岩相学的观察来看(图 2), 早期自形的橄榄石和单斜辉石被后期结晶的斜长石所包裹, 表现出典型的堆晶结构。有时, 可观察到橄榄石被半自形的单斜辉石所包裹[图 2(a)、(c)]; 含有磁铁矿等副矿物, 暗示富水的岩浆体系环境[图 2(d)]。

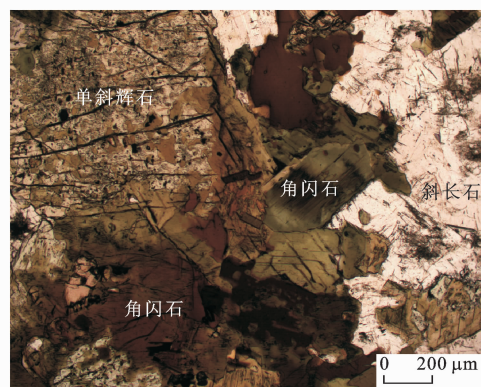
2 试验方法

2.1 全岩主量和微量元素分析

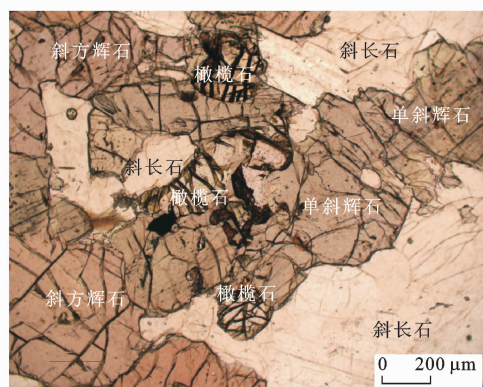
样品全岩化学成分分析由中国地质大学(北京)完成。主量元素采用玻璃熔结法熔样, 以 XRF 仪器进行测试, 测试误差小于 5%。微量元素采用两酸($\text{HNO}_3 + \text{HF}$)高压反应釜溶样方法对样品粉末进



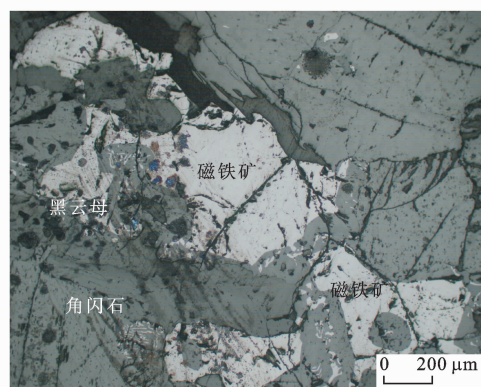
(a) 橄榄辉长岩, 显示出橄榄石、单斜辉石, 最后斜长石的结晶顺序



(b) 角闪辉长岩、自形角闪石斑晶以及后期交代形成的角闪石, 显示富水环境



(c) 单斜辉石和斜方辉石半自形接触, 无明显先后顺序



(d) 镜下富磁铁矿等副矿物, 暗示富水的岩浆体系环境

图2 济南辉长岩的典型结构显微照片

Fig. 2 Microphotographs Showing Typical Textures of Jinan Gabbro

行溶解。采用 ICP-MS (Agilent 7500a) 来测定元素含量。元素含量小于 10×10^{-6} 的测试误差为 10%，元素含量大于 10×10^{-6} 的测试误差为 5% 左右。

2.2 全岩 Sr-Nd 同位素分析

Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。粉末样品在强酸 (HF + HClO₄) 中加热溶解 7 d, 之后用树脂离子交换柱分离 Rb、Sr 和轻稀土元素 (LREE)。Sm 和 Nd 用离子交换柱进行二次纯化。同位素测试在热电离子质谱仪 Finnigan MAT 262 上完成。Sm、Nd 全流程本底小于 100 pg, Rb、Sr 小于 500 pg。N(¹⁴³Nd)/N(¹⁴⁴Nd) 和 N(⁸⁷Sr)/N(⁸⁶Sr) 的原始测量值分别对 N(¹⁴⁶Nd)/N(¹⁴⁴Nd)=0.721 9 和 N(⁸⁶Sr)/N(⁸⁸Sr)=0.119 4 进行校正。在样品测试过程中, 所测定的 ndi-1 Nd 标样和 NBS-987 Sr 标样的 Nd-Sr 同位素比值分别为 N(¹⁴³Nd)/N(¹⁴⁴Nd)=0.512 102 ± 0.000 011, N(⁸⁷Sr)/N(⁸⁶Sr)=0.710 257 ± 0.000 012。

2.3 全岩 Re-Os 同位素分析

Re-Os 同位素分析在日本海洋研究开发机构 (JAMSTEC) 地球内部变动研究实验室 (IFREE) 完成。称取全岩粉末样 1~3 g, 加入富集 ¹⁹⁰Os 和 ¹⁸⁵Re 的稀释剂。在 Carius 管中^[28]以逆王水约 10 mL (HNO₃ 与 HCl 体积比为 3:1) 在 230 °C 加热 24 h 进行溶样。待冷却后, 小心打开 Carius 管, 并将溶液转移到 30 mL PFA 容器中, 加入 4 mL CCl₄ 将 Os 从王水层中萃取出来^[29], 萃取过程重复 3 次。随后在含 Os 的 CCl₄ 萃取液中再加入 4 mL HBr, 在灯下加热 1 h。提取出含 Os 的 HBr 层溶液, 进行温和的蒸发和纯化。然后进一步滴加铬酸通过微蒸馏进行纯化^[30]。残余王水相中的 Re 则通过阴离子交换树脂 AG1-X8 (孔径为 0.154~0.071 mm) 进行 2 次过柱分离和纯化。同位素组成以 OsO₃⁻ 和 ReO₄⁻ 形式通过负热电离子质谱法 (N-TIMS) 在 TRITON 上进行测定。随后对原始测量值进行氧化物干扰和仪器质量分馏校正以及扣除稀释剂和流程本底的贡献。氧化物校正采用 N(¹⁷O)/N(¹⁶O)=0.000 370 8 和 N(¹⁸O)/N(¹⁶O)=0.002 045。Os 测量中, 通过将 N(¹⁹²Os)/N(¹⁸⁸Os) 测量值标准化至 3.082 71^[31]。按指数法则进行质量分馏校正。Re 的测定采用“全蒸发法”^[32], 该方法相比于传统的 N-TIMS 方法, 样品用量更少, 准确度、精度更高, 而且无需进行质量分馏校正。Re 全流程本底为 8~10 pg, Os 为 2~3 pg, N(¹⁸⁷Os)/N(¹⁸⁸Os) 平均值为 0.164 3 ± 0.002 5。内部 JMC^[33] Os 标样溶液的 N(¹⁸⁷Os)/N(¹⁸⁸Os)

长期测试精度优于 0.4%。

3 结果分析

3.1 主量和微量元素

主量和微量元素分析结果见表 1、2。从表 1、2 以及图 3、4 可以看出, 研究样品的化学成分表现出较大的变化, SiO₂ 含量为 48.6%~52.3%, Al₂O₃ 为 10.8%~13.5%, TiO₂ 为 0.37%~0.75%, TFe₂O₃ 为 10.1%~13.3%, CaO 为 9.1%~11.9%, MgO 为 9.0%~14.5%, Cr 为 (420.6~1 033.0) × 10⁻⁶, Ni 为 (87.0~294.0) × 10⁻⁶。这种化学成分较大的差异与不同样品中橄榄石、辉石和角闪石的含量差异有关。此外, 本文还引用前人已发表的济南辉长岩数据^[1,34]。从图 3、4 主量和微量元素与 Mg[#] 值的图解中可以看出, 济南辉长岩与邹平基性岩都表现出很明显的岩浆分离结晶的演化趋势。与邹平基性岩相比, 济南辉长岩化学成分更为原始, 整体上表现为较低的 SiO₂、Al₂O₃、TiO₂、Sr、La 含量和较高的 TFe₂O₃、CaO、Cr 含量等。其中, 伴随 Mg[#] 值的降低, SiO₂ 含量急剧增加以及 Mg[#] 值与 TFe₂O₃ 含量正相关关系均表明橄榄石的分离结晶。此外, 随着 Mg[#] 值的降低, CaO 和 Cr 含量随之降低, 表明单斜辉石的分离结晶在该过程中起到了主要作用。另外, Al₂O₃ 和 Sr 含量与 Mg[#] 值负相关, 表明斜长石不是主要的分离相。

表 1 济南辉长岩主量元素组成

Tab. 1 Major Element Composition of Jinan Gabbro

样品编号	HS-1	HS-2	HS-3	HS-4	YS-2
岩石类型	辉长岩	角闪辉长岩	辉长岩	角闪辉长岩	辉长岩
w(SiO ₂)/%	49.12	50.84	52.24	48.59	48.95
w(TiO ₂)/%	0.37	0.67	0.75	0.53	0.55
w(Al ₂ O ₃)/%	12.86	8.45	13.52	10.83	12.17
w(TFe ₂ O ₃)/%	10.16	10.62	10.49	11.54	13.34
w(MnO)/%	0.15	0.16	0.15	0.17	0.20
w(MgO)/%	14.52	13.15	8.96	14.07	12.49
w(CaO)/%	10.03	11.95	9.08	11.20	9.94
w(Na ₂ O)/%	1.95	1.61	2.78	1.70	1.90
w(K ₂ O)/%	0.56	0.69	1.56	0.91	0.86
w(P ₂ O ₅)/%	0.08	0.24	0.21	0.12	0.09
烧失量(LOI)/%	-0.15	0.69	-0.18	0.41	-0.39
总含量/%	99.65	99.08	99.57	100.06	100.12
Mg [#] 值	74.09	71.25	63.06	70.92	65.20

注: w(·) 为元素或化合物含量。

表 2 济南辉长岩微量元素组成

样品编号	HS-1	HS-2	HS-3	HS-4	YS-2
岩石类型	辉长岩	角闪辉长岩	辉长岩	角闪辉长岩	辉长岩
$w(\text{Li})$	7.840	12.216	11.148	9.774	7.556
$w(\text{Sc})$	28.380	54.160	34.520	46.640	45.780
$w(\text{Ti})$	2 262.000	4 060.000	4 268.000	3 090.000	3 302.000
$w(\text{V})$	161.240	273.000	235.800	215.600	327.800
$w(\text{Cr})$	1 033.000	895.000	422.400	724.600	420.600
$w(\text{Mn})$	1 207.600	1 261.000	1 177.400	1 360.800	1 535.600
$w(\text{Co})$	55.300	51.660	44.980	63.060	63.880
$w(\text{Ni})$	294.000	132.500	87.020	159.280	105.000
$w(\text{Cu})$	28.160	55.360	70.700	49.560	28.040
$w(\text{Zn})$	107.800	79.700	86.880	83.140	101.720
$w(\text{Ga})$	14.128	12.400	17.690	13.268	14.208
$w(\text{Rb})$	6.382	16.670	30.360	13.956	8.408
$w(\text{Sr})$	544.000	247.600	452.200	398.000	415.400
$w(\text{Y})$	8.896	16.388	15.594	11.132	10.200
$w(\text{Zr})$	27.700	71.320	80.520	41.940	34.800
$w(\text{Nb})$	0.910	3.666	3.754	2.152	1.265
$w(\text{Cs})$	0.222	1.071	1.642	0.597	0.363
$w(\text{Ba})$	236.000	290.600	483.800	285.400	230.200
$w(\text{La})$	4.904	14.784	14.050	7.246	5.516
$w(\text{Ce})$	11.082	32.320	29.620	16.714	12.088
$w(\text{Pr})$	1.554	4.192	3.750	2.270	1.668
$w(\text{Nd})$	7.488	18.236	16.338	10.522	7.720
$w(\text{Sm})$	1.961	4.120	3.658	2.600	2.012
$w(\text{Eu})$	0.808	1.119	1.085	0.849	0.716
$w(\text{Gd})$	2.006	3.972	3.414	2.502	2.018
$w(\text{Tb})$	0.287	0.555	0.479	0.359	0.298
$w(\text{Dy})$	1.766	3.350	2.924	2.154	1.829
$w(\text{Ho})$	0.341	0.655	0.578	0.412	0.379
$w(\text{Er})$	0.958	1.853	1.601	1.163	1.077
$w(\text{Tm})$	0.128	0.249	0.227	0.159	0.146
$w(\text{Yb})$	0.804	1.599	1.464	0.997	0.964
$w(\text{Lu})$	0.120	0.234	0.209	0.146	0.140
$w(\text{Hf})$	0.760	2.210	1.987	1.105	0.859
$w(\text{Ta})$	0.064	0.252	0.214	0.196	0.099
$w(\text{Pb})$	1.994	4.846	7.180	3.398	2.852
$w(\text{Th})$	0.353	1.931	1.826	0.673	0.537
$w(\text{U})$	0.086	0.501	0.503	0.177	0.138

在球粒陨石标准化的稀土元素配分图解^[35]上[图 5(a)],济南辉长岩表现出富集 LREE($w(\text{La})_{\text{N}}/$

$w(\text{Yb})_{\text{N}}=4.11\sim 6.89$)、亏损重稀土元素(HREE)以及微弱的 Eu 正异常($\delta(\text{Eu})=0.83\sim 1.23$)的特征。在原始地幔标准化的蛛网图解^[36]中[图 5(b)],所有样品表现出大离子亲石元素(LILE)富集(如 Ba 含量为 $(230\sim 484)\times 10^{-6}$,Sr 为 $(247\sim 544)\times 10^{-6}$),而亏损高场强元素(HFSE)(如 Nb 含量为 $(0.91\sim 3.75)\times 10^{-6}$,Ta 为 $(0.064\sim 0.253)\times 10^{-6}$,Hf 为 $(0.76\sim 2.21)\times 10^{-6}$),与岛弧玄武岩具有相似的变化特征。

3.2 Sr 和 Nd 同位素

Sr 和 Nd 同位素分析结果列于表 3、4。济南辉长岩表现出类似陆壳的 Sr-Nd 同位素特征, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-8.1\sim -10.3$,初始 Sr 同位素比值(I_{Sr})为 0.705 0~0.706 4。华北克拉通其他地区同时代的基性岩浆(比如胶东基性岩脉^[4]、方城玄武岩^[37])表现出类似 EM2 型富集地幔源区的特点(图 6)。而济南辉长岩的 I_{Sr} 值要低于这些基性岩浆岩,与紫荆关、太行山以及邹平的基性岩体相似,具有典型的 EM1 型 Sr-Nd 同位素特征。

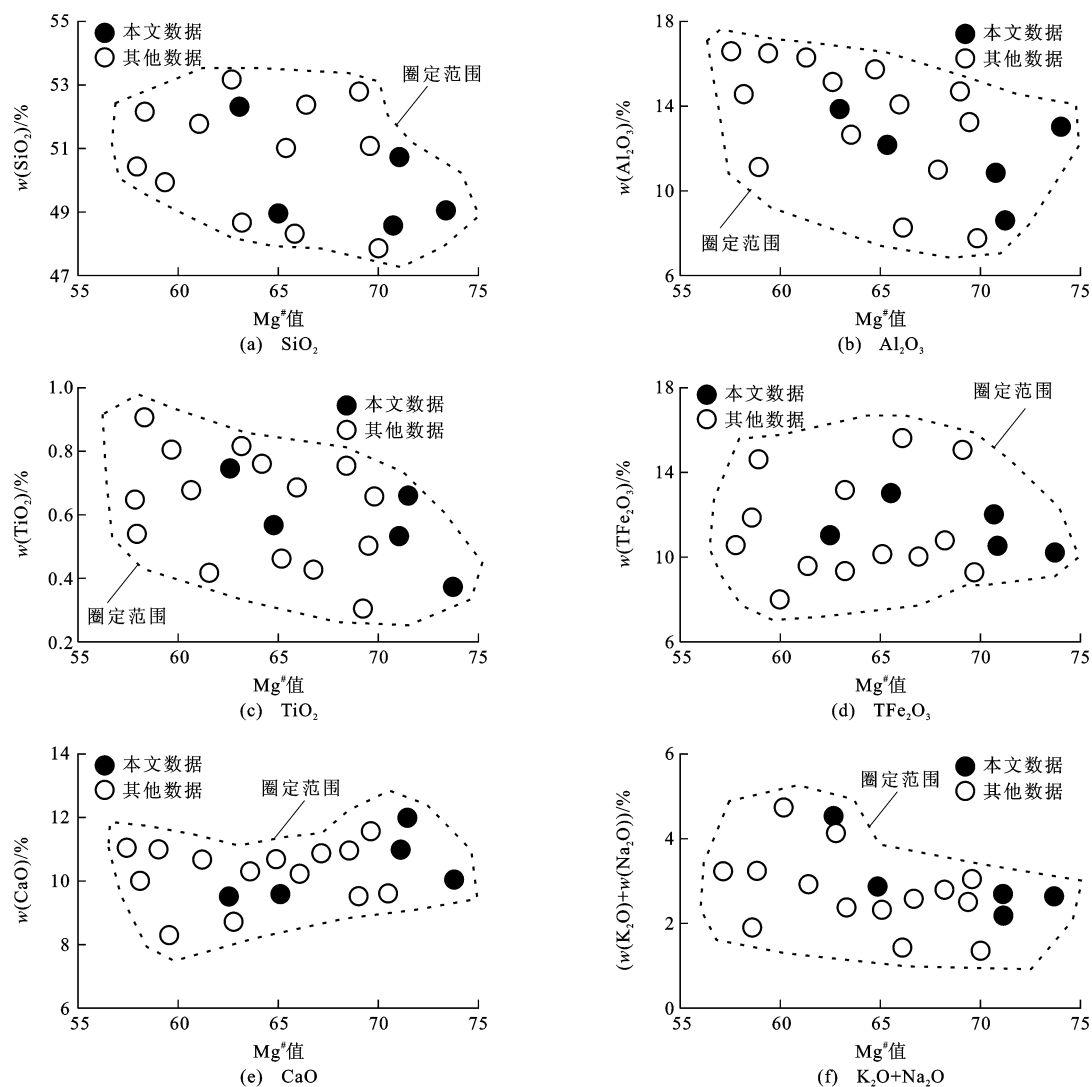
3.3 Re-Os 同位素

Re-Os 同位素列于表 5。本文取得的 5 个济南辉长岩样品都具有很高的放射性成因初始 $N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})$ 值($0.174\sim 0.557$),与太行山基性岩体(如紫荆关岩体)的同位素特征相似($0.187\sim 0.586$)^[6]。这样的 Os 同位素组成既明显不同于华北克拉通下大陆岩石圈地幔包体的非放射性成因 Os 同位素特征($N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})=0.1\sim 0.128$)^[5,38-39],也与地球上其他任何地幔橄榄岩 Os 同位素特征(<0.13)有很大差异^[12-13]。除了样品 HSH-2 之外(失败),其他 4 个样品的 Os 含量为 $(5\sim 186)\times 10^{-6}$,Os 同位素初始值为 $0.174\sim 0.557$ 。

4 讨 论

4.1 岩石成因

济南辉长岩具有典型的堆晶结构[图 2(a)],早期自形的橄榄石和单斜辉石被后期具间粒特征的斜长石所包围。岩体在形成过程中曾明显受到后期富水流体交代,表现为发育有大量单斜辉石向角闪石转换的现象[图 2(b)]。从岩相学来看[图 2(a)],早期自形的橄榄石和单斜辉石被后期结晶的斜长石所包裹;有时,可观察到橄榄石被半自形单斜辉石所包裹[图 2(c)]。以上均表明济南辉长岩中的矿物分离结晶先后顺序依次为橄榄石、辉石,最后为间隙的斜长石。在镜下可观察到少量原生的黑云母和角闪



其他数据来自文献[1,13]

图 3 济南辉长岩主量元素与 $Mg^\#$ 值的关系

Fig. 3 Relationships Between Major Elements and Values of $Mg^\#$ for Jinan Gabbro

表 3 济南辉长岩 Rb-Sr 同位素组成

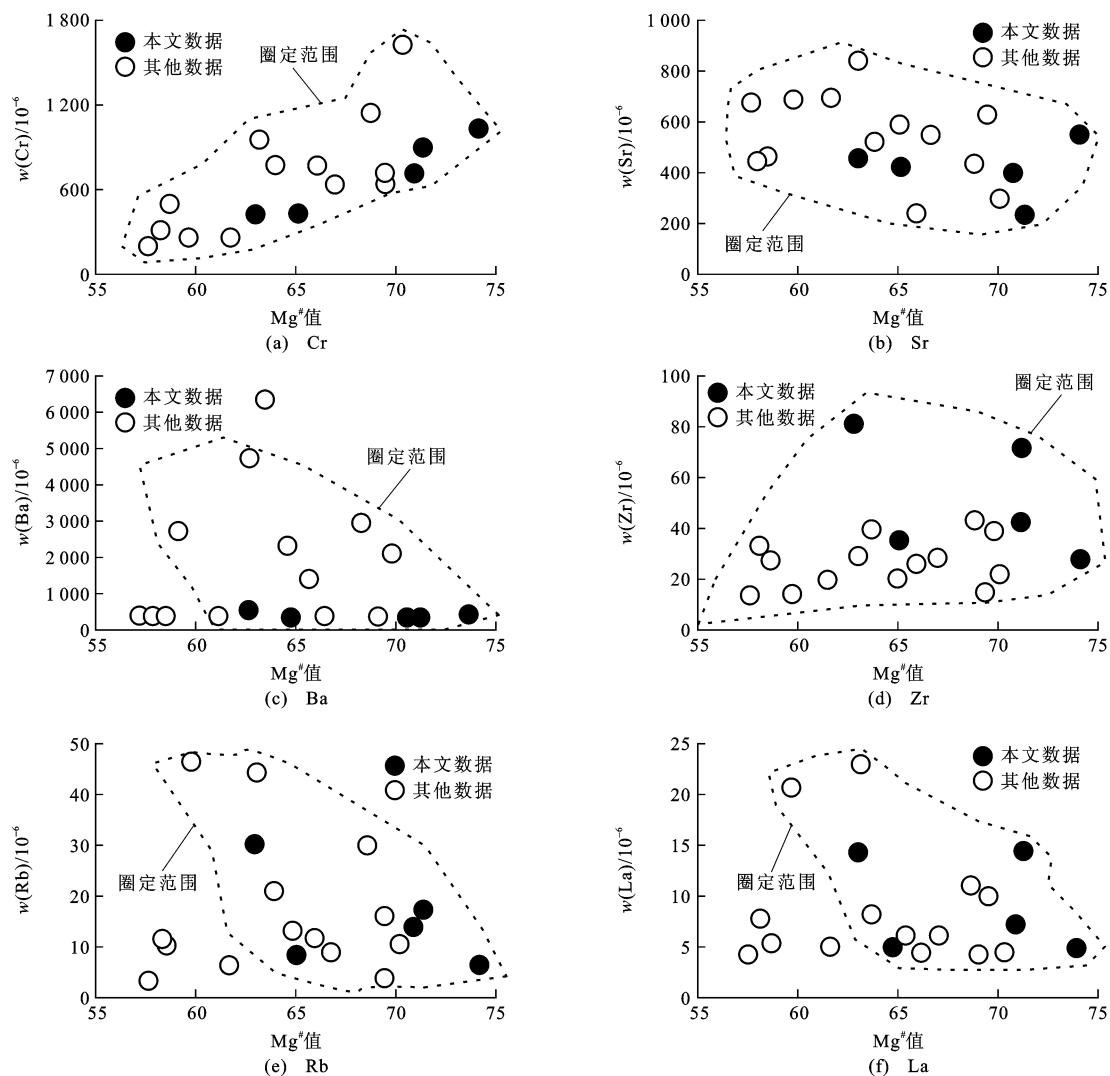
Tab. 3 Rb-Sr Isotopic Composition of Jinan Gabbro

样品编号	YS-2	HS-1	HS-2	HS-3	HS-4
$w(Rb)/10^{-6}$	7.915 748 00	6.129 587 80	15.874 262 00	29.288 294 51	13.391 197 70
$w(Sr)/10^{-6}$	416.780 000 0	627.779 740 0	249.559 260 0	441.028 885 6	436.030 580 0
$n(^{87}Rb)/n(^{86}Sr)$	0.053 645 500	0.027 578 600	0.179 666 900	0.187 575 163	0.086 746 260
$N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$	0.706 015 500± 0.000 025 000	0.705 043 200± 0.000 005 000	0.706 769 500± 0.000 013 000	0.705 755 792± 0.000 006 000	0.705 742 480± 0.000 007 000
130 Ma 时 I_{Sr}	0.705 916 400	0.704 992 300	0.706 437 500	0.705 409 208	0.705 582 200
$w(Rb)/w(Sr)$	0.018 992 600	0.009 763 900	0.063 609 200	0.066 409 016	0.030 711 600

注： $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值， $N(\cdot)$ 为该元素的原子数； $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素同位素比值， $n(\cdot)$ 为元素的物质的量。

石,这可能是残余岩浆水含量增加所导致。此外,镜下大量发育磁铁矿等副矿物[图 2(d)],也表明在岩浆演化过程中水也起到了重要作用。在全岩地球化

学数据上,随着 $Mg^\#$ 值降低,辉长岩中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 $K_2O + Na_2O$ 、Sr、Ba、Zr 含量都随之上升,而CaO、 TFe_2O_3 、Cr则相应的随之下



其他数据来自文献[1,34]

图 4 济南辉长岩的微量元素与 $Mg^\#$ 值的关系

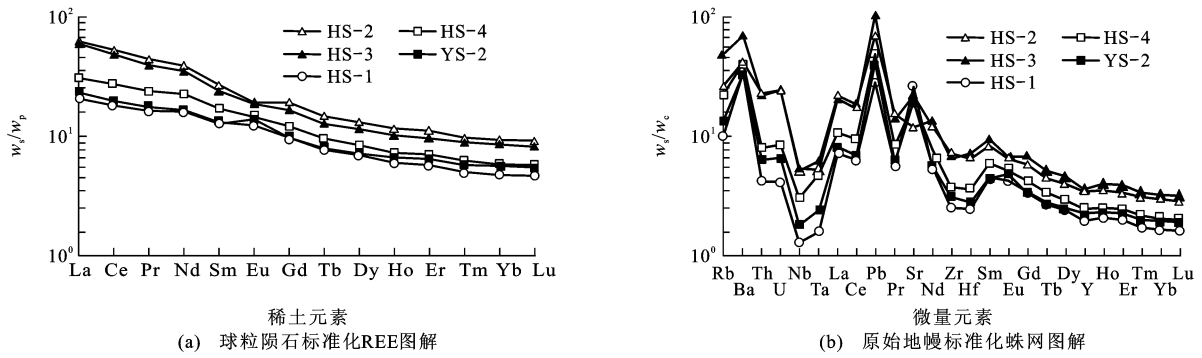
Fig. 4 Relationships Between Trace Elements and Values of $Mg^\#$ for Jinan Gabbro

表 4 济南辉长岩 Sm-Nd 同位素组成

Tab. 4 Sm-Nd Isotopic Composition of Jinan Gabbro

样品编号	YS-2	HS-1	HS-2	HS-3	HS-4
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	2.413 448 30	2.760 716 30	4.296 949 90	3.722 722 43	3.244 283 40
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	9.290 701 900	10.407 652	18.868 199	16.743 915 740	13.120 427 500
$n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})$	0.164 812 200	0.168 294 100	0.144 487 400	0.141 059 915	0.156 881 160
$N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})$	0.512 081 400± 0.000 009 000	0.512 110 500± 0.000 012 000	0.512 151 300± 0.000 018 000	0.512 176 167± 0.000 013 000	0.512 156 970± 0.000 007 000
ϵ_{Nd}	-10.857 120 0	-10.289 390 0	-9.494 070 0	-9.008 955 8	-9.383 366 5
$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	-0.162 114 00	-0.144 412 00	-0.265 443 00	-0.282 867 74	-0.202 434 40
$[N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})]_t$	0.511 941 200	0.511 967 400	0.512 028 400	0.512 056 187	0.512 023 540
$\epsilon_{\text{Nd}}(130 \text{ Ma})$	-10.337 370 00	-9.827 248 00	-8.636 538 00	-8.094 378 89	-8.731 500 90
TDM 值/Ma	3 306.163 900	3 460.982 500	2 190.575 000	2 036.270 762	2 649.251 550

注: $\epsilon_{\text{Nd}} = \{ [N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})]_i / [N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})]_{\text{CHUR}} - 1 \} \times 10^4$, 下标 i 表示初始比值, 下标 CHUR 表示球粒陨石均一源与样品同时的比值; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为年龄 t 对应的 ϵ_{Nd} 值; $[N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})]_t$ 为年龄 t 对应的 $N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})$ 值; $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 为稀土元素分离指数; TDM 值为同位素模式年龄。



w_s 为样品含量; w_p 为原始地幔含量; w_c 为球粒陨石含量;图(a)引自文献[35];图(b)引自文献[36]

图 5 济南辉长岩球粒陨石标准化 REE 图解和原始地幔标准化蛛网图解

Fig. 5 Chondrite-normalized REE Pattern and Primitive Mantle-normalized Spider Diagram for Jinan Gabbro

表 5 济南辉长岩 Re-Os 同位素组成

Tab. 5 Re-Os Isotopic Composition of Jinan Gabbro

样品编号	YS-2	HS-1	HS-2	HS-3	HS-4
$w(\text{Re})/10^{-12}$	62.05 ± 0.06	19.90 ± 0.02	246.68 ± 0.33	78.63 ± 0.08	97.79 ± 0.10
$w(\text{Os})/10^{-12}$	7.348 ± 0.023	186.385 ± 2.061		5.614 ± 0.009	12.317 ± 0.019
$w(\text{Os})$ 相对误差/ 10^{-3}	3.15	11.06		1.69	1.53
$N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})$	$0.644\ 04 \pm 0.003\ 93$	$0.174\ 92 \pm 0.001\ 02$		$0.596\ 84 \pm 0.002\ 01$	$0.416\ 68 \pm 0.001\ 37$
$N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})$ 相对误差/ 10^{-3}	6.10	5.86		3.37	3.28
$n(^{187}\text{Re})/n(^{188}\text{Os})$	43.401 ± 0.143	0.517 ± 0.006		71.580 ± 0.140	39.673 ± 0.072
年龄/Ma	120	120	120	120	120
$[N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})]_t$	$0.557\ 2 \pm 0.003\ 9$	$0.173\ 9 \pm 0.001\ 0$	$0.000\ 0 \pm 0.000\ 0$	$0.453\ 6 \pm 0.002\ 0$	$0.337\ 3 \pm 0.001\ 4$
$[N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})]_t$ 相对误差/ 10^{-3}	7.06	5.89		4.48	4.07
$\gamma_{\text{Os}}(t)$	341.5 ± 3.1	37.8 ± 0.8		259.4 ± 1.6	167.3 ± 1.1
$\gamma_{\text{Os}}(t)$ 相对误差/ 10^{-3}	9.13	21.49		6.21	6.51

注: $\gamma_{\text{Os}}(t)=100\{[N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})]_t/[N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}}-1\}$, 其中, $[N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})]_t$ 为年龄 t 对应的 $N(^{187}\text{Os})/$
 $N(^{188}\text{Os})$ 值,下标 CHUR 表示球粒陨石均一源与样品同时的比值。

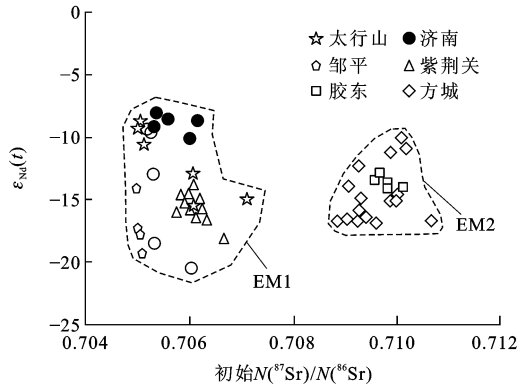
降(图 3、4),这种变化反映了岩浆分离结晶中矿物的演化顺序,即橄榄石、辉石减少以及斜长石、角闪石、黑云母增加。因为单斜辉石比较富集 CaO 和 Cr 等,而斜长石则是碱金属、Sr 元素的载体。橄榄石和辉石的分离结晶导致 Mg、 TFe_2O_3 含量降低。这些地球化学数据上的变化也支持了以上解释。

4.2 地幔源区特征

从所采集样品的镜下观察中可看出,造岩矿物中普遍出现富水矿物黑云母和角闪石,暗示其原始的母岩浆是含水的湿岩浆体系[图 2(b)、(d)]。前人对玄武质岩浆的试验岩石学研究结果表明,在含水的湿岩浆体系下,斜长石的结晶稳定域会缩小,橄榄石、单斜辉石和角闪石的首晶区将会扩大,因此,橄榄石和单斜辉石会先于斜长石达到饱和、结出晶体之前结晶^[40]。岩相学上观察到的橄榄石和辉石

自形、半自形产出以及斜长石在间隙中的结晶顺序[图 2(a)、(c)]进一步支持了这一论断。

济南辉长岩所具有的类似地壳的微量元素和 Sr-Nd 同位素特征暗示了大陆地壳在其成岩过程中起到了至关重要的作用。它们具有初始的 $N(^{87}\text{Sr})/$
 $N(^{88}\text{Sr})$ 值($0.705\ 0 \sim 0.706\ 4$)和负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-8.1 \sim -10.3$,表 4),富集 LREE(La 与 Yb 含量球粒陨石标准化后的比值 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}=4.11 \sim 6.89$)和 LILE(如 Ba 含量为 $(230.2 \sim 483.8) \times 10^{-6}$,Sr 为 $(247.6 \sim 544.0) \times 10^{-6}$),亏损 HREE 以及 HFSE(如 Nb 含量为 $(0.910 \sim 3.754) \times 10^{-6}$,Ta 为 $(0.064 \sim 0.253) \times 10^{-6}$,Hf 为 $(0.760 \sim 2.210) \times 10^{-6}$,图 5)。因此,济南辉长岩的地幔源区应该是华北克拉通下富集的岩石圈地幔。这种富集地幔可能在前寒武纪时期通过俯冲相关的交代作用而形成^[2],并致使幔源富集 LILE 和 LREE。



紫荆关基性岩脉^[6]年龄为 138 Ma; 方城玄武岩^[34]为 125 Ma;
胶东基性岩脉^[4]为 133~120 Ma; 太行山基性岩^[2]为
120 Ma; 邹平基性岩和部分济南辉长岩^[1]为 130 Ma

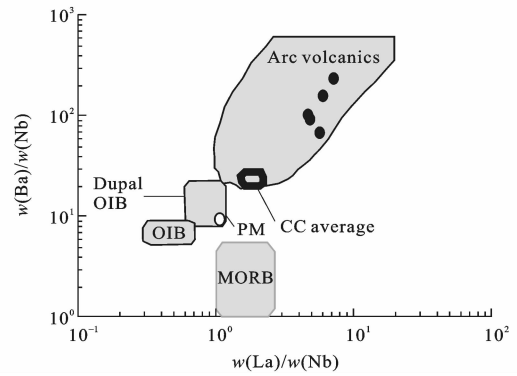
图 6 济南辉长岩 Sr-Nd 同位素与华北克拉通
其他地区中生代基性岩浆的对比

Fig. 6 Comparisons of Sr-Nd Isotopes of Jinan Gabbro
with Other Mesozoic Mafic Rocks from North China Craton

4.3 地壳混染

由于基性侵入体形成于大陆环境下, 所以该基性岩体很容易受到大陆地壳的混染。从图 7 可以看出, 样品分布在远离大陆上地壳与任何地幔储库的混合趋势之上, 因此该岩体没有明显的大陆上地壳的混染。此外, 蛛网图[图 5(b)]中放射性元素 U 和 Th 的明显亏损, 也排除了大陆上地壳明显参与的可能性。济南辉长岩体的 Sr-Nd 同位素数据为地壳混染提供了有力依据。从图 8 可以看出, 济南辉长岩的初始 Nd 同位素成分与 $Mg^\#$ 值呈现正相关的变化趋势, 初始的 Sr 同位素比值与 $Mg^\#$ 值呈现负相关关系, 这都表明华北大地下壳岩石(具有很负的 ϵ_{Nd} 值和高的 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$ 值^[18,41])对济南辉长岩的混染是很明显的。

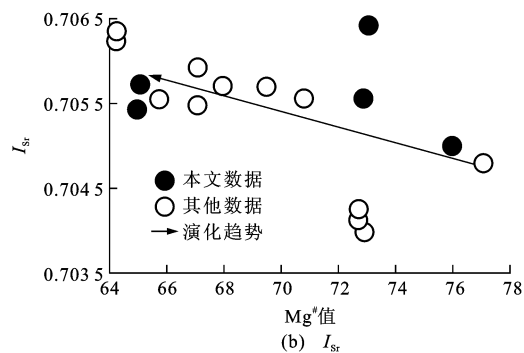
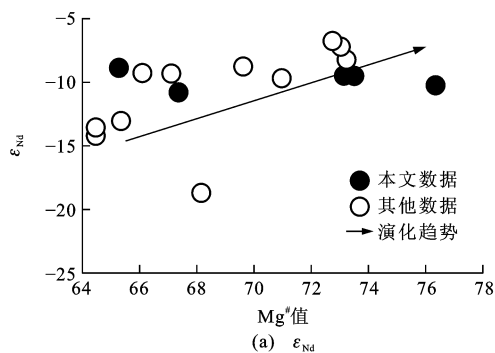
另外, 济南辉长岩基性岩体具有很高且变化范围很大的放射性成因的初始 $N(^{187}Os)/N(^{188}Os)$ 值



大洋中脊玄武岩(MORB), 原始地幔(PM), 洋岛玄武岩(OIB),
平均大陆地壳(CC average)和弧火山岩(Arc volcanics)
来自文献^[41]; Dupal OIB 为异常洋岛玄武岩

图 7 济南辉长岩 $w(Ba)/w(Nb)$ - $w(La)/w(Nb)$ 图解

Fig. 7 Plot of $w(Ba)/w(Nb)$ - $w(La)/w(Nb)$ of Jinan Gabbro (0.174~0.557) (表 3), 这样的 $N(^{187}Os)/N(^{188}Os)$ 值要显著高于任何地幔储库的比值(<0.15)^[17]。由于地幔岩石 Os 含量比任何交代介质的都要高出很多^[17,42], 所以地幔岩石 Os 同位素对交代作用并不敏感, 即使被交代的地幔岩, 其 Os 同位素比值也在 0.15 以下, 这得到全球地幔橄榄岩 Os 同位素数据的支持。首先, 在华北克拉通内部, 由古生代金伯利岩和新生代玄武岩所携带上来的、受过交代的岩石圈地幔橄榄岩包体的 $N(^{187}Os)/N(^{188}Os)$ 值几乎没有高于 0.13 的^[5,11,39,43]; 其次, 地幔来源原始岩浆的 $N(^{187}Os)/N(^{188}Os)$ 值表现出非放射性成因的特点^[44] ($N(^{187}Os)/N(^{188}Os) = 0.1230 \sim 0.1322$)。此外, 无论是大洋还是大陆来源的地幔橄榄岩都表现出非放射性成因的 $N(^{187}Os)/N(^{188}Os)$ 值(0.1089~0.1287)^[9,13]。与此同时, 地壳储库 $N(^{187}Os)/N(^{188}Os)$ 值总是十分富集, 通常它比地幔岩石以及幔源原始岩浆的 Os 同位素比值要高出 2 个数量级^[13,45]。综上所述, 济南辉长岩基性岩体所具有的高放射性成



其他数据来自于文献^[1,34,46]

图 8 Nd-Sr 同位素成分与 $Mg^\#$ 值的关系

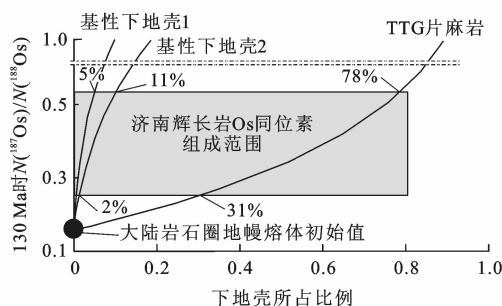
Fig. 8 Relationships of Nd-Sr Isotopic Ratios to Values of $Mg^\#$

因 Os 同位素比值特征应该与基性岩浆在陆壳位置侵位过程中发生的地壳混染有关。

4.4 地壳混染物质的性质

华北克拉通主要基底岩石为前寒武纪 TTG 片麻岩和基性斜长角闪岩或麻粒岩^[20,47],因此它们是可能的地壳混染物质。要将济南辉长岩的初始 Os 同位素比值从最初幔源的球粒陨石比值 (<0.13)^[38] 升高到 $0.174\sim0.557$ (表 3),地壳混染物质应当具有非常高的放射性成因的 Os 同位素比值。与古老的 TTG 片麻岩相比,基性斜长角闪岩或麻粒岩具有更高的 Os 含量和 Os 同位素比值^[13,48]。因此,笔者所研究岩体的 Os 同位素组成变化很有可能与这些前寒武纪基性下地壳岩石(斜长角闪岩或麻粒岩)的混染相关。

SCLM 熔体 $N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})=0.126\ 1$,Os 含量为 250×10^{-12} ;基性下地壳 $N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})=20\sim40$,Os 含量为 50×10^{-12} ;TTG 片麻岩 $N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})=5$,Os 含量为 7×10^{-12} ^[46,49];济南辉长岩的 Os 同位素组成如图 9 阴影区所示^[6]。



下地壳所占比例为 0,则 SCLM 熔体所占比例为 1.0;下地壳所占比例为 0.2,则 SCLM 熔体所占比例为 0.8,依次类推

图 9 Os 同位素二元模拟

Fig. 9 Os Isotopic Binary Mixing Model

为验证上述观点,笔者基于简单的二元混合模型^[50]对 Os 同位素进行了模拟计算。地幔起源的母岩浆被 2%~11% 前寒武纪斜长角闪岩或麻粒岩的混染可以很好地解释济南辉长岩高放射性成因的初始 Os 同位素组成(图 9)。而 TTG 片麻岩的混染比例高达 31%~78%,如此高的混染比例是不大可能的,因为这样会显著改变母岩浆的主量和微量元素成分组成,并大幅降低岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值,这与济南辉长岩低硅、高 $\text{Mg}^\#$ 值(表 1)的特征相违背,且与镜下出现的橄榄石斑晶不相符合。因此,笔者认为由于 TTG 片麻岩极低的 Os 含量^[49],济南辉长岩的初始 Os 同位素变化不太可能是由 TTG 片麻岩的混染所致。此外,笔者认为混染物质主要来源于下地

壳,而不可能有上地壳的参与,因为上地壳 Os 同位素比值相对较低 ($N(^{187}\text{Os})/N(^{188}\text{Os})=1.32$,Os 含量为 31×10^{-12}),模拟计算的混染比例将高达 32%~79%(与图 9 计算方法相同)。因此,济南辉长岩中 Os 同位素变化应该是由古老的下地壳中基性斜长角闪岩或麻粒岩小部分混染所致。假定这些基性下地壳混染物的 $n(^{187}\text{Re})/n(^{188}\text{Os})=750$ ^[49],那么可以计算出其年龄为 1.7~3.3 Ga。这个年龄范围与华北克拉通太古代地体上的基性麻粒岩和斜长角闪岩的锆石年龄相一致^[19];同时也与古代金伯利岩和新生代玄武岩中基性麻粒岩和斜长角闪岩包体中的古老锆石年龄相一致(1.9~2.6 Ga)^[51]。

混染物质的性质还可以从济南辉长岩的 Nd-Sr 同位素数据上进一步进行限制。前人研究表明,华北克拉通太古代地体中的基性麻粒岩或斜长角闪岩具有较高且变化范围很大的 ϵ_{Nd} 值 ($-2\sim-20$),Sr 同位素比值为 $0.705\ 5\sim0.715\ 0$;然而地体中的 TTG 片麻岩则具有异常低的 ϵ_{Nd} 值 ($-25\sim-44$)和异常高的 Sr 同位素比值 ($0.710\sim0.780$)^[18,51-53]。根据晚古生代金伯利岩^[54]和中生代煌斑岩^[2]研究结果,已报道的太行山下“原始”幔源岩浆的 Sr-Nd 同位素特征为 $\epsilon_{\text{Nd}}=-8\sim-10$ 和 $I_{\text{Sr}}=0.705\ 5$,接近济南辉长岩母岩浆的 Sr-Nd 同位素组成。济南辉长岩具有较低的、相对稳定的初始 ϵ_{Nd} 值 ($-8\sim-10$),这样的组成不大可能由前寒武纪酸性 TTG 片麻岩混染所致,因为后者的 ϵ_{Nd} 值 ($-25\sim-44$)要远低于济南辉长岩的值 ($-8.1\sim-10.3$) (表 4)。因此,济南辉长岩 Sr-Nd 同位素的微弱变化也指示其由少量的前寒武纪基性麻粒岩或斜长角闪岩的混染所致。

5 结 语

(1)在济南辉长岩形成过程中,橄榄石+辉石+斜长石的分离结晶起到了重要作用。较为丰富的角闪石、零星分布的黑云母、单斜辉石早于斜长石结晶的岩石学特征以及全岩所具有的类似地壳的地球化学和 Sr-Nd 同位素特征,暗示了济南辉长岩的母岩浆应当为含水的湿岩浆体系,并起源于一个受过古俯冲流体或熔体交代(晚太古代到早元古代)的富集岩石圈地幔。

(2)济南辉长岩高放射性成因的初始 Os 同位素组成表明,岩浆在侵位过程中受到古老陆壳物质的混染。Os-Nd 同位素模拟计算表明,岩体 Os-Nd-Sr 同位素的变化主要由晚太古代到早元古代的基

性下地壳混染所致。济南辉长岩由于受到下地壳物质的混染,其 Nd-Sr 同位素成分不能直接反映其地幔源区的同位素特征。

参考文献:

References:

- [1] GUO F, FAN W M, WANG Y J, et al. Late Mesozoic Mafic Intrusive Complexes in North China Block: Constraints on the Nature of Subcontinental Lithospheric Mantle [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(9/10): 759-771.
- [2] CHEN B, ZHAI M. Geochemistry of Late Mesozoic Lamprophyre Dykes from the Taihang Mountains, North China, and Implications for the Sub-continental Lithospheric Mantle [J]. *Geological Magazine*, 2003, 140(1): 87-93.
- [3] ZHANG H F, SUN M, ZHOU M F, et al. Highly Heterogeneous Late Mesozoic Lithospheric Mantle Beneath the North China Craton: Evidence from Sr-Nd-Pb Isotopic Systematics of Mafic Igneous Rocks [J]. *Geological Magazine*, 2004, 141(1): 55-62.
- [4] YANG J H, CHUNG S L, ZHAI M G, et al. 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.
- [5] WU F Y, WALKER R J, YANG Y H, et al. The Chemical-temporal Evolution of Lithospheric Mantle Underlying the North China Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(19): 5013-5034.
- [6] LIU A K, CHEN B, SUZUKI K, et al. Petrogenesis of the Mesozoic Zijinguan Mafic Pluton from the Taihang Mountains, North China Craton: Petrological and Os-Nd-Sr Isotopic Constraints [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39(4): 294-308.
- [7] YANG D B, XU W L, PEI F P, et al. Spatial Extent of the Influence of the Deeply Subducted South China Block on the Southeastern North China Block: Constraints from Sr-Nd-Pb Isotopes in Mesozoic Mafic Igneous Rocks [J]. *Lithos*, 2012, 136(1): 246-260.
- [8] GUO J T, GUO F, WANG C Y, et al. Crustal Recycling Processes in Generating the Early Cretaceous Fangcheng Basalts, North China Craton: New Constraints from Mineral Chemistry, Oxygen Isotopes of Olivine and Whole-rock Geochemistry [J]. *Lithos*, 2013, 170/171(1): 1-16.
- [9] XU Z, ZHAO Z F, ZHENG Y F. Slab-mantle Interaction for Thinning of Cratonic Lithospheric Mantle in North China: Geochemical Evidence from Cenozoic Continental Basalts in Central Shandong [J]. *Lithos*, 2012, 146/147(1): 202-217.
- [10] XU H J, SONG Y R, YE K, et al. Petrogenesis of Mafic Dykes and High-Mg Adakitic Enclaves in the Late Mesozoic Fangshan Low-Mg Adakitic Pluton, North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 54/55(1): 143-161.
- [11] ZHANG H F, GOLDSTEIN S L, ZHOU X H, et al. Comprehensive Refertilization of Lithospheric Mantle Beneath the North China Craton: Further Os-Sr-Nd Isotopic Constraints [J]. *Journal of the Geological Society*, 2009, 166(2): 249-259.
- [12] SHIREY S B, WALKER R J. The Re-Os Isotope System in Cosmochemistry and High-temperature Geochemistry [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1998, 26: 423-500.
- [13] CHEN B, SUZUKI K, TIAN W, et al. Geochemistry and Os-Nd-Sr Isotopes of the Gaositai Alaskan-type Ultramafic Complex from Northern North China Craton: Implications for Mantle-crust Interaction [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2009, 158(5): 683-702.
- [14] REISBERG L, LORAND J P. Longevity of Sub-continental Mantle Lithosphere from Osmium Isotope Systematics in Orogenic Peridotite Massifs [J]. *Nature*, 1995, 376: 159-162.
- [15] WIDOM E, SHIREY S B. Os Isotope Systematics in the Azores: Implications for Mantle Plume Sources [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142(3/4): 451-465.
- [16] HARVEY J, GANNOUN A, BURTON K W, et al. Ancient Melt Extraction from the Oceanic Upper Mantle Revealed by Re-Os Isotopes in Abyssal Peridotites from the Mid-Atlantic Ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244(3/4): 606-621.
- [17] CHESLEY J, RIGHTER K, RUIZ J. Large-scale Mantle Metasomatism: A Re-Os Perspective [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(1/2): 49-60.
- [18] JAHN B M, AUVRAY B, CORNICHE J, et al. 3.5 Ga Old Amphibolites from Eastern Hebei Province, China: Field Occurrence, Petrography, Sm-Nd Isochron Age and REE Geochemistry [J]. *Precambrian Research*, 1987, 34(3/4): 311-346.
- [19] ZHAO G C, SUN M, WILDE S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited [J]. *Precambrian Research*,

- 2005, 136(2): 177-202.
- [20] JAHN B M, AUVRAY B, SHEN Q H, et al. Archean Crustal Evolution in China: The Taishan Complex, and Evidence for Juvenile Crustal Addition from Long-term Depleted Mantle [J]. *Precambrian Research*, 1988, 38(4): 381-403.
- [21] 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 379-388. WU Fu-yuan, SUN De-you, ZHANG Guang-liang, et al. Deep Geodynamics of Yanshan Movement [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(3): 379-388.
- [22] 邱检生, 王德滋, 周金城, 等. 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, et al. Geology, Geochemistry and Genesis of the Mesozoic Shoshonitic Volcanic Rocks in Shandong Province [J]. *Earth Science*, 1996, 21(5): 546-552.
- [23] 邱检生, 王德滋, 曾家湖, 等. 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, et al. Study on Trace Element and Nd-Sr Isotopic Geochemistry of Mesozoic Potash-rich Volcanic Rocks and Lamprophyres in Western Shandong Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1997, 3(4): 384-395.
- [24] 杨承海, 许文良, 杨德彬, 等. 鲁西济南辉长岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据[J]. *地球学报*, 2005, 26(4): 321-325. YANG Cheng-hai, XU Wen-liang, YANG De-bin, et al. Chronology of the Jinan Gabbro in Western Shandong: Evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(4): 321-325.
- [25] GUO F, FAN W M, WANG Y J, et al. Geochemistry of Late Mesozoic Mafic Magmatism in West Shandong Province, Eastern China: Characterizing the Lost Lithospheric Mantle Beneath the North China Block [J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37(1): 63-77.
- [26] 闫峻, 张巽, 陈江峰, 等. 济南辉长岩体的铈、钕同位素特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 302-305. YAN Jun, ZHANG Xun, CHEN Jiang-feng, et al. Sr, Nd Isotopic Characteristics of the Jinan Gabbro Intrusion [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 302-305.
- [27] 陈斌, 田伟, 刘安坤. 冀北小张家口基性—超基性杂岩的成因: 岩石学、地球化学和 Nd-Sr 同位素证据[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(3): 295-303. CHEN Bin, TIAN Wei, LIU An-kun. Petrogenesis of the Xiaozhangjiakou Mafic-ultramafic Complex, North Hebei: Constraints from Petrological, Geochemical and Nd-Sr Isotopic Data [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(3): 295-303.
- [28] SHIREY S B, WALKER R J. Carius Tube Digestion for Low-blank Rhenium-osmium Analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 1995, 67(13): 2136-2141.
- [29] PEARSON D G, WOODLAND S J. Solvent Extraction/Anion Exchange Separation and Determination of PGEs (Os, Ir, Pt, Pd, Ru) and Re-Os Isotopes in Geological Samples by Isotope Dilution ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 2000, 165(1): 87-107.
- [30] ROY-BARMAN M. Measure du Rapport $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ dans les Basaltes et les Peridotites; Contribution a la Systematique ^{187}Re - ^{187}Os dans le Manteau [D]. Paris: Universite de Paris VII, 1993.
- [31] NIER A O. The Isotopic Constitution of Osmium [J]. *Physical Review*, 1937, 52: 885.
- [32] SUZUKI K, MIYATA Y, KANAZAWA N. Precise Re Isotope Ratio Measurements by Negative Thermal Ionization Mass Spectrometry (NTI-MS) Using Total Evaporation Technique [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2004, 235(1): 97-101.
- [33] JOHNSON M C, RUTHERFORD M J. Experimental Calibration of the Aluminum-in-hornblende Geobarometer with Application to Long Valley Caldera (California) Volcanic Rocks [J]. *Geology*, 1989, 17(9): 837-841.
- [34] 李全忠, 谢智, 陈江峰, 等. 济南和邹平辉长岩的 Pb-Sr-Nd 同位素特征和岩浆源区中下地壳物质贡献[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(2): 297-310. LI Quan-zhong, XIE Zhi, CHEN Jiang-feng, et al. Pb-Sr-Nd Isotopic Characteristics of the Gabbros from Jinan and Zouping and the Contribution of the Lower Crust to the Magma Source [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(2): 297-310.
- [35] MASUDA A, NAKAMURA N, TANAKA T. Fine Structures of Mutually Normalized Rare-earth Patterns of Chondrites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37(2): 239-248.
- [36] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [37] ZHANG H F, SUN M, ZHOU X H, et al. Mesozoic

- Lithosphere Destruction Beneath the North China Craton: Evidence from Major-, Trace-element and Sr-Nd-Pb Isotope Studies of Fangcheng Basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144(2): 241-254.
- [38] GAO S, RUDNICK R L, CARLSON R W, et al. Re-Os Evidence for Replacement of Ancient Mantle Lithosphere Beneath the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(3/4): 307-322.
- [39] ZHANG H F, GOLDSTEIN S L, ZHOU X H, et al. Evolution of Subcontinental Lithospheric Mantle Beneath Eastern China: Re-Os Isotopic Evidence from Mantle Xenoliths in Paleozoic Kimberlites and Mesozoic Basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, 155(3): 271-293.
- [40] PICHAVANT M, MACDONALD R. Crystallization of Primitive Basaltic Magmas at Crustal Pressures and Genesis of the Calc-alkaline Igneous Suite: Experimental Evidence from St Vincent, Lesser Antilles Arc[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 154(5): 535-558.
- [41] JAHN B M, WU F, LO C H, et al. 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 [J]. *Chemical Geology*, 1999, 157(1): 119-146.
- [42] DALE C W, GANNOUN A, BURTON K W, et al. Rhenium-osmium Isotope and Elemental Behaviour During Subduction of Oceanic Crust and the Implications for Mantle Recycling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 253(1/2): 211-225.
- [43] XU Y G, BLUSZTAJN J S, MA J L, et al. Late Archean to Early Proterozoic Lithospheric Mantle Beneath the Western North China Craton: Sr-Nd-Os Isotopes of Peridotite Xenoliths from Yangyuan and Fansi [J]. *Lithos*, 2008, 102(1/2): 25-42.
- [44] GANNOUN A, BURTON K W, PARKINSON I J, et al. The Scale and Origin of the Osmium Isotope Variations in Mid-ocean Ridge Basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259(3/4): 541-556.
- [45] HANSKI E, WALKER R J, HUHMA H, et al. The Os and Nd Isotopic Systematics of c. 2.44 Ga Akaavaara and Koitelainen Mafic Layered Intrusions in Northern Finland [J]. *Precambrian Research*, 2001, 109(1/2): 73-102.
- [46] HUANG X L, ZHONG J W, XU Y G. Two Tales of the Continental Lithospheric Mantle Prior to the Destruction of the North China Craton: Insights from Early Cretaceous Mafic Intrusions in Western Shandong, East China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 96(1): 193-214.
- [47] ZHAO G C, WILDE S A, CAWOOD P A, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Ages of the Fuping Complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic Accretion and Assembly of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 2002, 302(3): 191-226.
- [48] MCBRIDE J S, LAMBERT D D, NICHOLLS I A, et al. Osmium Isotopic Evidence for Crust-mantle Interaction in the Genesis of Continental Intraplate Basalts from the Newer Volcanics Province, South-eastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(6): 1197-1218.
- [49] BURTON K W, CAPMAS F, BIRCK J L, et al. Resolving Crystallisation Ages of Archean Mafic-ultramafic Rocks Using the Re-Os Isotope System [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(3/4): 453-467.
- [50] LANGMUIR C H, VOCKE J R D, HANSON G N, et al. A General Mixing Equation with Applications to Icelandic Basalts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 37(3): 380-392.
- [51] LIU Y S, GAO S, YUAN H L, et al. U-Pb Zircon Ages and Nd, Sr, and Pb Isotopes of Lower Crustal Xenoliths from North China Craton: Insights on Evolution of Lower Continental Crust [J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1/2): 87-109.
- [52] JIANG N, LIU Y S, ZHOU W G, et al. Derivation of Mesozoic Adakitic Magmas from Ancient Lower Crust in the North China Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(10): 2591-2608.
- [53] 沈保丰, 李俊建, 林源贤, 等. 阜平岩群下部 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 784-789.
- SHEN Bao-feng, LI Jun-jian, LIN Yuan-xian, et al. Sm-Nd Isotope Age of the Lower Fuping Group Complex and Its Geological Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 784-789.
- [54] 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 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- CHI Ji-shang, LU Feng-xiang. The Paleozoic Kimberlites from the North China Craton and Implications for the Lithospheric Mantle Characteristics [M]. Beijing: Science Press, 1996.