

五大连池和宽甸地幔包体的惰性气体同位素特征 ——MORB 型地幔和交代型地幔*

赖勇 刘玉琳 黄宝玲 陈衍景

LAI Yong, LIU YuLin, HUANG BaoLing and CHEN YanJing

北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

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

2005-01-20 收稿 2005-08-01 改回

Lai Y, Liu YL, Huang BL and Chen YJ. 2005. The characteristics of noble gases in mantle-derived xenoliths in Wudalianchi and Kuandian, NE China: MORB-like mantle and metasomated mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1373–1381

Abstract Noble gas abundances and isotopic compositions in mantle-derived xenoliths were analyzed by crushing method, which from Keluo, Wudalianchi, Heilongjiang Province, Kuandian of Liaoning Province, Northeastern China. These results indicate the heterogeneity of subcontinental lithospheric mantle beneath northeastern China. $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in the samples from Wudalianchi vary between 4.5 ~ 5.3 R_A , obviously lower than that of the MORB, with the signature of metasomated mantle. And their $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios change from 557 to 4005. Comparing the characteristics of noble gases with evidences from published Sr-Nd-Pb isotope data and alkali basalt petrology, it was estimated that there was a palaeo-subduction event took place in Wudalianchi area, and the upper mantle was metasomated by subducted crustic components or $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ -rich fluid which derived from subducted slab, and caused forming phlogopite-bearing lherzolite. On the other hand, the samples from Kuandian show a depleted MORB-like $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio (7.30 ~ 7.52 R_A), with $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio of 1496 ~ 7677. It implies that there are at least two type mantles beneath Northeastern China, the one is a metasomated subcontinental lithospheric mantle, and the other is a MORB reservoir-like mantle. They reflect different mantle evolution processes.

Key words Mantle xenolith, Noble gas, MORB-like mantle, Metasomated mantle, Northeastern China

摘要 黑龙江五大连池科洛和辽宁宽甸的碱性玄武岩中地幔包体的惰性气体同位素的地球化学特征研究表明,东北地区表现了地幔的不均匀性。五大连池地区的地幔包体中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比为4.5 ~ 5.3 R_A ,明显低于MORB的值,具有被交代的大陆富集地幔特征。氩同位素 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比的变化在557 ~ 4005。结合玄武岩和地幔包体的矿物学特征和微量元素地球化学特征,显示五大连池地区的岩浆源区可能遭受过来自壳源物质或和古俯冲事件有关的富 $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ 流体的交代作用。辽宁宽甸黄椅山的样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比为7.30 ~ 7.52 R_A ,氩同位素 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比的范围在1496 ~ 7677。宽甸黄椅山地区的则显示了具亏损地幔MORB的特点,反映了未经地壳组分改造的大陆地幔的特征。本文通过对两种不同类型的地幔岩的研究,认为东北地区大陆地幔存在MORB型亏损地幔和交代型地幔两种类型,反映了各自不同的演化机理。

关键词 地幔包体;惰性气体;MORB型地幔;交代型地幔;中国东北地区

中图法分类号 P597

* 本项目得到日本学术振兴会(JSPS)的资助

第一作者简介:赖勇,男,1963年生,副教授,岩矿地球化学专业,E-mail: yonglai@pku.edu.cn

1 引言

自上世纪 50 年代开始对陨石等天体物质展开惰性气体的研究以来,经过半个世纪,惰性气体地球化学的研究领域已涵括天外行星物质、大气圈、水圈、岩石圈和地幔物质等,发展成为一门相对独立的学科体系。应用惰性气体同位素研究太阳系的形成和演化、地球的分层构造、地幔的性质、壳—幔演化、地球脱气、流体与岩石的交换作用均有丰硕的成果(Ozima and Kudo, 1972, Allegre, 1987, Honda, 1993, Kaneoka, 1998, Wieler, 2002, Graham, 2002)。尤其在研究壳—幔作用过程中,惰性气体同位素作为壳—幔物质混染作用的灵敏示踪剂被广泛应用(Kaneoka, 1983, Anderson, 1995, Hanyu, 1997, Farly 1998, Dunai, 2002)。一些学者根据惰性气体同位素的信息来解释壳幔结构(Allegre, 1983, Porcelli, 2001),以及通过夏威夷火山链研究地幔柱的演化(Kaneoka, 1987)。

相对于洋壳中的地幔岩捕虏体和幔源火山岩研究,大陆地幔的惰性气体同位素的工作相对较少,至 90 年代中期,还仅有数篇论文涉及大陆地幔岩的惰性气体同位素特征(Porcelli, 1986, 1987, Williams, 1992)。但近年来这方面的已逐渐引起人们重视,并陆续取得一些进展。在目前已取得的大陆地幔的地幔岩样品数据中,Dunai 等(1995)比较系统地分析了欧洲大陆 Massif Central(法国)、Eifel(德国)、Spitsbergen 和 Kapfensteir(奥地利)等地的新生代玄武岩中的斑晶和地幔包体中橄榄石、单斜辉石和斜方辉石的 He、Ne、Ar 的同位素组成。结果发现,几个地区的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比非常地接近,在 $6R_A$ 附近变化(R_A 为大气氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,为 1.4×10^{-6})。Porcelli(1986)、Matsumoto 等(1998, 2002)对澳大利亚东南部 Newer Volcanics 区域地幔包体的稀有气体研究表明,该区大陆地幔源区与 MORB 类似。Gautheron 等(2002)收集了全球范围的地幔包体中的橄榄石的氦同位素数据,为排除其他干扰因素,提高可比性,全部采用了压碎法的结果,较系统地总结了大陆岩石圈地幔的氦同位素特征。我国学者致力于中国东部的地幔包体发表了一系列的成果(Xu, 1997, 1998; Li, 2002; 吴茂炳等, 2003; Lai, 2003)。这些研究表明,大陆地幔大致具有与 MORB 近似或略低的氦同位素特征。由于测定上的困难,氦同位素的数据相对较少,早期的数据中大多数氦同位素组成变动在大气氦($^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比值分别为 9.80 ± 0.08 和 0.0290 ± 0.0003)的范围(Eberhardt *et al.*, 1965)。后来积累的数据表明,它们集中在所谓的 MORB 线靠近大气的一端(Dunai, 1995; Matsumoto *et al.*, 1998; Sarda, 1988; Barfod *et al.*, 1999)。氩同位素数据中, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比最大可达 17000(Dunai, 1995)较多的数据则小于 10000,甚至和大气接近。一般认为,这是由于大气中氩的丰度(0.93%)较氦(约 5ppm)大的多,相对来说,样品中的氩的同位素组成更容易

受到地球浅部物质以及大气和地下水等的混染。

本文通过对两种不同类型的地幔岩,即无水地幔岩(以辽宁宽甸黄椅山为代表)和含水地幔岩(以黑龙江五大连池的科洛为代表)的惰性气体地球化学特征的研究,认为大陆地幔至少存在 MORB 型和交代型的地幔,并探讨二者的异同点和它们所反映的演化机理。

2 样品和分析

样品采自黑龙江五大连池科洛和辽宁宽甸黄椅山新生代玄武岩中的地幔包体。五大连池为含金云母的尖晶石二辉橄榄岩,黄椅山为尖晶石二辉橄榄岩。分别将样品粉碎至约 0.4~0.8 mm 后洗净,双目镜下手选出纯净的橄榄石、单斜辉石和斜方辉石单矿物。用 1N 硝酸在超声波中清洗 10 分钟,溶去矿物表面及一些较大裂隙中的蚀变组分。如果发现硝酸有明显的浑浊现象,表明矿物已有蚀变或风化。需视情节将酸洗时间延长至 1 小时以上,或更换新鲜样品。酸洗后的样品分别置于去离子水、丙酮和无水乙醇中用超声波清洗 10 分钟后 150℃ 烘干 24 小时。干燥后的样品称量后用于同位素分析。样品置入超高真空制样系统后,系统和样品室 150℃ 脱气烘干 24 小时,以驱赶矿物表面及系统内壁吸附的空气。惰性气体的提取国内外目前常用的有加热法和压碎法两种。加热法,又分全熔法和分段加热法。前者是在低温烘干后,加热到 1500~1800℃,将样品全部熔融后抽取气体样,得到的是样品中全部的气体。分段加热法即由低到高控制炉温在某一特定的温度,恒温半小时左右来收集这一温度段样品释放出来的气体进行分析。其优点是可通过温度的调节,获得矿物中不同赋存状态(如矿物颗粒表面、矿物微裂隙、矿物包裹体及矿物晶格中)的惰性气体的丰度、比例和惰性气体的总量信息。压碎法则是目前比较认可的从包裹体中获取原生的惰性气体的方法,如果这些包裹体确实都是原生的话。本文是在 250℃ 下采用真空压碎法抽取的惰性气体样品。在日本东京大学地震研究所兼冈实验室(Kaneoka Noble Gas Lab.)测定。待测样品经由两个 Ti-Zr 热阱(800℃)纯化。利用不同温度的冷阱,将 He(常温),Ar(-180℃),Kr-Xe(-70℃),Ne(冷却至 50K)分馏后,用 VG5400 质谱仪分别测定它们的同位素组分。

质谱的标定和校正

空气和日本的上山温泉气作为标样来确定和校正质谱的灵敏度。丰度较高的组分如 ^4He , ^{40}Ar 和 ^{84}Kr 用法拉第杯接受器来检测,而其它的低含量组分则采用 Daly photo multiplier 或 Electron multiplier 接收器来检测。氦同位素中的 ^{20}Ne 和 ^{22}Ne 分别从 $^{40}\text{Ar}^{2+}$ 和 $^{44}\text{CO}^{22+}$ 的叠加峰中扣除法计算获得。系统空白 ^4He 小于 1×10^{-12} , ^{20}Ne , ^{40}Ar , ^{36}Ar , ^{84}Kr 和 ^{132}Xe 分别为 $(0.6 \sim 2) \times 10^{-12}$, $(0.5 \sim 2) \times 10^{-13}$, $(2 \sim 3) \times 10^{-14}$ 和 $(0.4 \sim 2) \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ 。

表 1 五大连池斜角和宽甸黄椅山地幔岩体惰性气体同位素丰度和比值

Table 1 He, Ne, Ar, Kr and Xe isotopes of mantle xenoliths in Keluo, Wudalianchi and Huangyishan, Kuandian

样品号	产地	样品种类	重量(g)	^4He 1E-10cc/g	^{20}Ne 1E-12cc/g	^{40}Ar 1E-8cc/g	^{84}Kr 1E-12cc/g	^{132}Xe 1E-12cc/g	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (R/RA)	$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ err	$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ err	$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ err	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ err
HLJ001B	五大连池	斜方辉石	1.1583	58.82	100.52	6.96	1.42	0.18	5.26	9.91	0.0278	0.1851	769.59
HLJ001A	五大连池	橄榄石	0.9724	44.81	45.25	4.04	1.64	0.23	5.38	10.01	0.0296	0.1844	557.22
HLJ003C	五大连池	单斜辉石	0.9496	183.77	43.45	17.65	0.71	0.11	4.53	9.94	0.0209	0.1849	4005.55
HLJ003B	五大连池	斜方辉石	1.1012	69.22	133.98	7.62	1.01	0.13	5.30	9.84	0.0284	0.1846	1052.89
HLJ003A-1	五大连池	橄榄石	1.1283	29.15	44.65	4.27	0.35	0.14	5.16	9.97	0.0258	0.1846	604.07
HLJ001C	五大连池	单斜辉石	0.8430	578.50	321.31	61.28	2.90	0.26	5.49	9.87	0.0305	0.1891	2926.27
HLJ006-1	五大连池	玄武岩玻璃	1.2611	15.52	32.93	1.35	/	/	1.18	9.88	0.0334	0.1827	820.00
LN-KD2-302A	宽甸	橄榄石	1.0718	298.49	8.78	25.20	1.70	0.16	7.30	/	/	0.1862	1969.86
LN-KD2-302B1	宽甸	斜方辉石	1.0318	142.12	7.46	14.42	0.44	0.03	7.46	/	/	0.1796	7677.24
LN-KD2-302C	宽甸	单斜辉石	1.1562	440.20	181.59	50.47	3.13	0.23	7.52	10.38	0.029	0.1823	1495.89
									0.77	0.19	0.003	0.0006	15.10

3 惰性气体同位素的地球化学

对黑龙江五大连池和辽宁宽甸黄椅山的地幔二辉橄榄岩包体中的橄榄石、单斜辉石和斜方辉石分别进行了惰性气体同位素的分析,两个地区不同矿物的稀有气体丰度及其同位素测定结果见表1。

3.1 氦同位素

五大连池的地幔包体中的三种矿物的 ^4He 的浓度变化在 $2.92 \sim 57.85 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$,其中单斜辉石中的 ^4He 的浓度要比其他矿物高出一个数量级。氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值非常均匀,为 $4.5 \sim 5.3R_A$,平均 $5.19R_A$ 。整体明显低于MORB的 $8 \pm 1R_A$ 值且变化幅度很小。而宽甸的 ^4He 的浓度变化在 $1.42 \sim 4.40 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值较五大连池的高,为 $7.30 \sim 7.52R_A$,平均 $7.43R_A$,落在正常的MORB的 $8 \pm 1R_A$ 范围内(图1)。和Xu等(1997)的宽甸样品的橄榄石全熔法分析结果($8.94 \sim 9.06 R_A$)相近,反映了宽甸黄椅山地幔岩惰性气体组分比较均匀。但二者存在的差别,是由于萃取惰性气体的方法不同导致的系统误差,还是样品本身同位素构成不同,或样品暴露地表后,有宇宙射线成因的 ^3He 的加入,导致 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的升高,有待于更多的实验结果来判明。Li等(2002)分析了宽甸玄武岩中的辉石和石榴石的巨晶矿物,其中辉石巨晶的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $7.5 \sim 8.0R_A$ 和MORB相近。由于巨晶矿物和二辉橄榄岩的起源和演化史不同,二者的对比和解析还需更多其他类型的分析数据作基础。吴茂炳等(2003)的宽甸青椅山二辉橄榄岩全岩的全熔法分析结果表明, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比较低,为 $2.93 \sim 4.53R_A$,寄主玄武岩为 $0.47 \sim 0.61R_A$,和黄椅山的分析结果差异较大。是寄主玄武岩的影响,如熔融包裹体的贯入,还是原始地幔的不均匀,在如此小的尺度内存在这么大的差别,这是一个值得进一步研究的现象。

在地幔包体中的常见矿物中,U,Th等元素的存在会导致形成一些放射性成因的 ^4He 和 ^{40}Ar 的积累。样品的年代越久,放射性成因的惰性气体含量就越高。随样品年代的增长,这种积累很大程度地影响了样品的氦和氩的原始同位素比值。这些矿物中,单斜辉石中U,Th的含量最高,橄榄石最低。因此,橄榄石通常被认为是受后期放射性成因氦和氩影响最小的矿物,最能代表原始的同位素组成。在五大连池和宽甸的样品中,橄榄石,单斜辉石和斜方辉石三种矿物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值均在一个很小的范围内,氦同位素比值不受矿物种类的影响,从一个侧面说明它们基本没有后期的放射性成因的惰性气体的加入。

3.2 氩同位素

五大连池的样品由于氩的浓度较高, ^{20}Ne 约为 $4.35 \times$

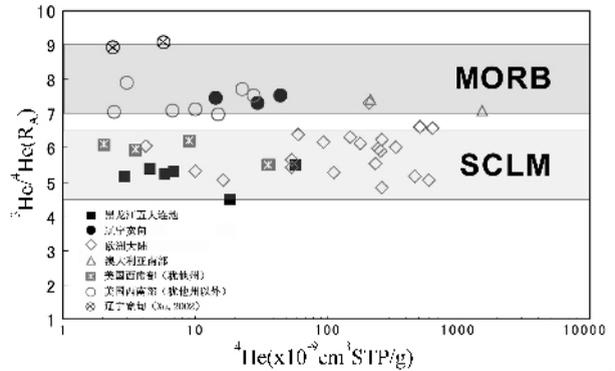


图1 中国东北及世界各地地幔岩 $^3\text{He}/^4\text{He} - ^4\text{He}$ 图解
欧洲大陆数据引自 Dunai *et al.* (1995), 澳大利亚南部数据引自 Matsumoto *et al.* (1998), 美国西南部数据引自 Reid *et al.* (1996), 辽宁宽甸(有注者)引自 Xu *et al.* (2002)。MORB: 洋中脊玄武岩, SCLM: 大陆岩石圈地幔

Fig. 1 $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio vs ^4He abundance for minerals in xenoliths from northeastern China and other areas over the world

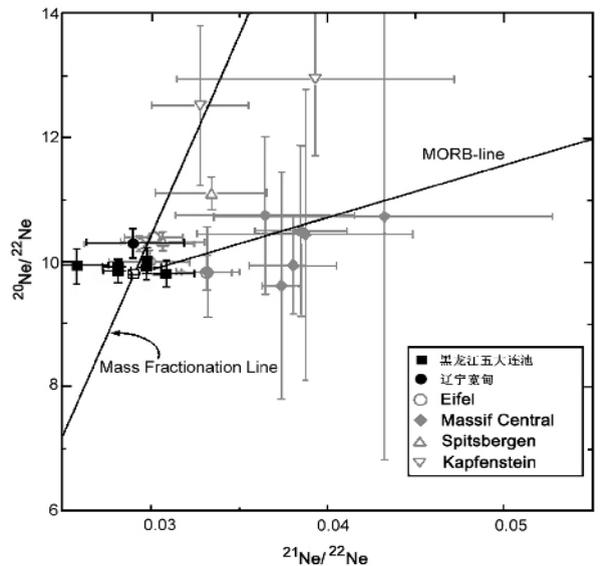


图2 中国东北以及欧洲大陆地幔岩的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} - ^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 图解

其中 Eifel, Massif Central, Spitsbergen 和 Kapfenstein 的数据引自 Dunai T. J. (1995)。

Fig. 2 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ vs $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ for minerals in xenoliths from northeastern China and European continent

$10^{-11} \sim 3.21 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$,但相应的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比值与大气的值相当接近,变化在 $9.84 \sim 10.01$ 和 $0.0258 \sim 0.0305$ 之间。宽甸的样品 ^{20}Ne 浓度变化很大,为 $7.46 \times 10^{-12} \sim 1.82 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$,但由于 ^{21}Ne 、 ^{22}Ne 的丰度太低,只获得一个完整的数据, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 为 10.38 , $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 为 0.029 。其他的数据误差过大而无法使用(图2)。

MORB 的²⁰Ne/²²Ne 和²¹Ne/²²Ne 比大气高,但仅为大气的 1.3 倍和 2.4 倍,所以较容易被大气混染(Eberhardt *et al.*, 1965; Sarda, 1988; Barfod *et al.*, 1999)。在²⁰Ne/²²Ne 对²¹Ne/²²Ne 的投图上,地幔岩通常变化落在以大气氛为端点之一的斜率大约为 83.33 的直线上,原因被解释为是由于上地幔和大气混染的结果(Barfod *et al.*, 1999)。具有高的³He/⁴He 比的 OIB 样品有和 MORB 相似的²⁰Ne/²²Ne 比,但²¹Ne/²²Ne 则要比 MORB 低。这是由于 OIB 核成因的²¹Ne 较低的缘故,与之相对应的是其放射成因的⁴He 也较低。图 2 中欧洲大陆的地幔岩氦同位素显示,除一部分落在大气一端以外,部分地区变化在 MORB 线附近,还有一些则介于分馏线和 MORB 线之间。由于不同的分馏作用会引起²⁰Ne 的升高或降低,但就目前的分析精度,还不足以定量地评价分馏效应。五大连池和宽甸的样品均集中在大气附近,原始地幔的信息由于大气混染几乎已消失殆尽。

3.3 氩同位素

氩同位素的测定结果见表 1。五大连池的样品的⁴⁰Ar 浓度为 4.04 ~ 61.28 × 10⁻⁸ cm³ STP/g,氩同位素⁴⁰Ar/³⁶Ar 比的变化在 557 ~ 4005,³⁸Ar/³⁶Ar 比的变化在 0.1844 ~ 0.1891。宽甸的样品的⁴⁰Ar 浓度为 14.42 ~ 50.47 × 10⁻⁸ cm³ STP/g,氩同位素⁴⁰Ar/³⁶Ar 比的范围在 1496 ~ 7677,³⁸Ar/³⁶Ar 比的变化在 0.1796 ~ 0.1862。现在的地球大气中的⁴⁰Ar/³⁶Ar 比是 295.5,³⁸Ar/³⁶Ar 比 0.1880。而从 MORB、OIB 等样品推定的地球内部的⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值要比大气高很多,MORB 的岩浆源约为 28000(Staudacher *et al.*, 1989; Moreira *et al.*, 1998)至 40000 左右(Burnard *et al.*, 1997),OIB 岩浆源的情况根据 Loihi, Iceland 等地的结果,大约变化在 6000 ~ 8000 的范围(Trieff *et al.*, 2000)。一般而言,相对于氩同位素,大陆地幔岩的⁴⁰Ar/³⁶Ar 显示更容易受大气的混染的趋势,且比值均小于 MORB 的最大值。如将³He/⁴He 和⁴⁰Ar/³⁶Ar 投到同一图上,则表现为³He/⁴He 维持在 MORB 或 SCLM 线,而⁴⁰Ar/³⁶Ar 随混染的大气组分增而减小的变化规律。当⁴⁰Ar/³⁶Ar 接近大气值时,³He/⁴He 则通常也会急剧下降而接近大气值(图 3)。在五大连池的地幔岩中,同一个二辉橄橄榄岩样品,则通常显示单斜辉石具有最高的⁴⁰Ar/³⁶Ar 比,斜方辉石次之,橄橄榄石最低的特征(表 1)。

3.4 氙同位素

氙同位素的特征在地幔包体中讨论得较少。现代大气的¹³⁶Xe/¹³⁰Xe 和¹²⁹Xe/¹³⁰Xe 分别是 2.17 和 6.48。相对于大气,MORB 中的“过剩”¹²⁹Xe 来自¹²⁹I(半衰期 16Ma)的衰变。¹³¹-¹³⁶Xe 则是由²⁴⁴Pu(半衰期 80Ma)和²³⁸U(半衰期 4.468Ga)衰变后的产物。由于在 MORB 中²³⁸U 成因的¹³¹-¹³⁶Xe 还在积蓄,确定在 Xe 中有多少是²⁴⁴Pu 的贡献,对于地球演化脱气、地幔分异的探讨意义重大。90 年代末 Kunz 等(1998)发现了洋中脊玄武岩(MAR popping rock)中的组分

表 2 五大连池科洛和宽甸黄椅山地幔岩包体氙同位素分析结果

Table 2 Xe isotopes in mantle xenoliths from Keluo, Wudalianchi and Huangyishan, Kuandian

样品号	产地	矿物	重量	Normalized to ¹³⁰ Xe = 100								
				¹³⁰ Xe (10 ⁻¹⁴)	¹²⁴ Xe	¹²⁶ Xe	¹²⁸ Xe	¹²⁹ Xe	¹³¹ Xe	¹³² Xe	¹³⁴ Xe	¹³⁶ Xe
HLJ001B	五大连池	Opx	1.1583	2.7	7.85	1.85	49.65	664.43	521.94	657.51	248.73	215.70
HLJ001A	五大连池	OI	0.9724	3.5	10.98	3.39	47.31	666.27	542.32	662.87	247.50	206.39
HLJ003C	五大连池	Cpx	0.9496	1.6	10.08	2.82	53.63	701.21	578.63	692.34	260.08	241.13
HLJ003B	五大连池	Opx	1.1012	2.1	8.50	2.05	48.09	628.45	495.60	625.81	229.33	204.40
HLJ003A-1	五大连池	OI	1.1283	2.1	8.98	2.48	50.15	701.86	549.54	679.57	239.63	221.36
HLJ001C	五大连池	Cpx	0.8430	4.1	3.87	2.53	46.97	642.09	498.82	632.83	263.47	211.62
LN-KD2-302A	黄椅山	OI	1.0718	2.3	6.19	1.67	51.67	700.00	544.52	685.00	255.71	218.33
LN-KD2-302B1	黄椅山	Opx	1.0318	0.4	13.19	5.49	45.60	735.16	569.78	728.02	263.19	228.57
LN-KD2-302C	黄椅山	Cpx	1.1562	3.4	3.83	2.45	50.15	671.01	521.63	669.02	265.49	213.34

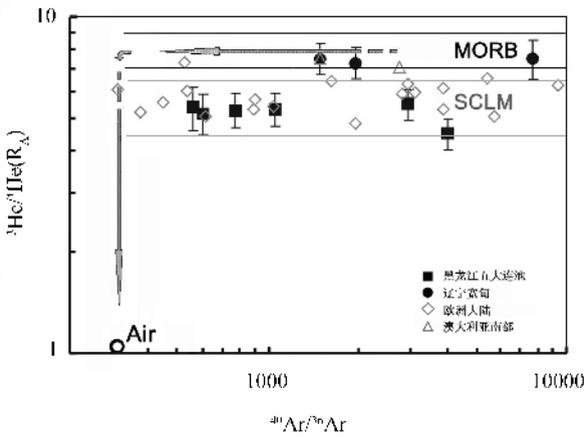


图3 地幔岩 $^3\text{He}/^4\text{He} - ^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解

欧洲大陆数据引自 Dunai *et al.* (1995), 澳大利亚南部数据引自 Matsumoto *et al.* (1998), 其他地区因缺相应的氦同位素数据没有投图。

Fig. 3 $^3\text{He}/^4\text{He}$ vs $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ in xenoliths

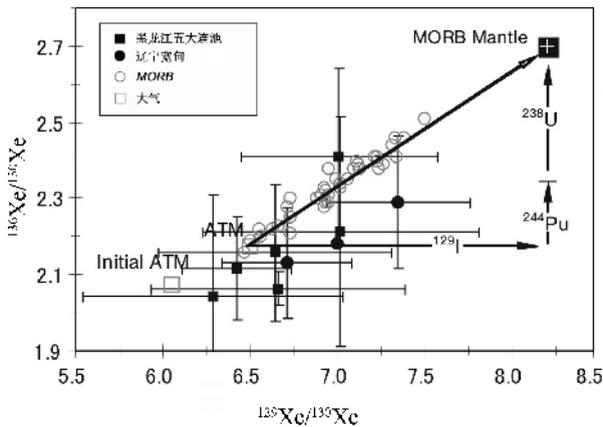


图4 地幔岩 $^{136}\text{Xe}/^{130}\text{Xe} - ^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ 图解

MORB 数据引自 Kunz J. (1998)。ATM 为现代大气, Initial ATM 为无放射成因 Xe 的原始大气。

Fig. 4 $^{136}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ vs $^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ in xenoliths

中由 ^{244}Pu 衰变生成的 Xe 的比例为 $32 \pm 10\%$ 而成为惰性气体地球化学中一个重要的进展。在五大连池的样品中多数分布在大气附近, 其中 HLJ003A-1 和 HLJ003C 显示了“过剩 ^{129}Xe 的存在(表 2)。宽甸样品 $^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ 几乎和 Kunz 的 MORB 区一致, 但由于 ^{136}Xe 较 MORB 低, 所以呈和 MORB 线平行分布(图 4)。导致 ^{136}Xe 偏低的原因尚不清楚。

为了比较玄武岩的惰性气体同位素特征, 作者尝试分析了二克山的玄武岩玻璃惰性气体同位素组成。结果见表。其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比为 1.18, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比为 9.88, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比为 820。显然, 玄武岩的惰性气体同位素中, 氦、氖和氩均非常接近大气值。表明玄武岩熔浆在喷发后和空气或湖水充分

地进行了同位素交换, 以至于被混染后玄武岩玻璃具有了大气特征。还有一种可能是在熔浆上升过程中, 受到地壳物质的污染。但从氦、氖和氩的同位素比值特征来看, 笔者更倾向于前一种原因。

4 讨论

五大连池玄武岩以富钾、钡等不相容元素为特征。Hsu 等(1998)通过五大连池碱性玄武岩的岩石化学研究, 认为玄武岩异乎寻常高的 K(平均 5.10%) Ba(平均 1800ppm) 含量以及其它主量元素和微量元素地球化学特征均反映了玄武岩浆起源于被交代了的富集地幔。并且认为这种富集地幔的特征和 Weaver(1991)定义的 EM-I 型地幔相类似。邱家骥等(1991)认为, 该区火山岩的是由深度为软流圈顶部的含金云母的尖晶石二辉橄榄岩交代地幔源区低度部分熔融的产物。

同样, 其他一些学者, 如 Zhang 等(2000)基于玄武岩的 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学特征, 认为五大连池的碱性玄武岩和 EM-I 型地幔组成密切相关。在中生代晚期到新生代, 源区岩石进一步受到了因软流圈上隆而产生的 OIB 型熔体上升时的混合。

而玄武岩所携带的地幔包体, 则富含金云母。两者均反映了被交代后的上地幔条件。地幔岩中的含水矿物的出现, 更为交代作用提供了矿物学的证据。

惰性气体的证据没有支持五大连池的源区岩石受到了因软流圈上隆而产生的 OIB 型熔体上升时的混合的观点。就目前的资料, 绝大多数 OIB 都具有比 MORB 更高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比。如果有正常的 OIB 型熔体的混入, 那么 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 应该变得比 MORB 更高而不是相反。

地球化学和矿物学的证据均支持由 EM-I 型地幔部分熔融生成富钾玄武岩岩浆的论点。如何解释富集地幔的形成机制? 可能导致地幔发生交代的营力主要有三种, 分别是碳酸盐岩浆(Yaxley *et al.*, 1991), 来自俯冲板片中的 $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ 流体(Stalder *et al.*, 1998) 和富含挥发分的硅酸盐融体(Zangana *et al.*, 1999)。硅酸盐融体又可分为来自富集软流圈(EAR: Enriched Asthenospheric Reservoir)和来自俯冲板片(SRM: Subduction-Related Silicate Melt)两种类型(Rosenbaum *et al.*, 1997)。

根据 Xu(1998)、Basu(1991)、Liu(1992)、王俊文(1988)、刘从强(1995)、樊祺诚等(2001)的分别关于五大连池和宽甸的碱性玄武岩和其中的地幔包体的 Sr-Nd 同位素数据, 宽甸的地幔岩变化区域和 MORB 的范围基本一致, 这和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征非常吻合。而宽甸的玄武岩则显示 Sr 高 Nd 低的特点(图 5)。五大连池的地幔岩的 Sr-Nd 同位素显示较大的变化范围, 但其和 SRM 的演化轨迹有很好的相似性, 显示地幔岩遭受到来自俯冲板片的硅酸盐融体的交代。这和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征也非常吻合。

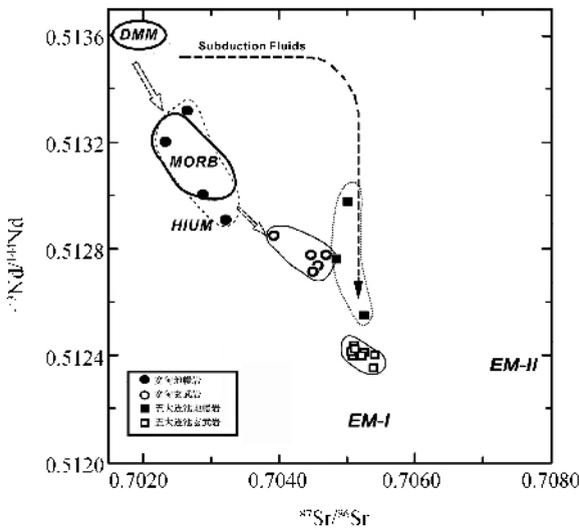


图5 五大连池和宽甸碱性玄武岩及两地的地幔岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解

Sr-Nd 同位素数据分别引自 Xu (1998), Basu (1991), Liu (1992), 王俊文等 (1988), 刘从强等 (1995) 和樊祺诚等 (2001)。五大连池和宽甸的地幔岩和玄武岩的 Sr-Nd 同位素特征显示了它们不同的演化轨迹,并且与 He 同位素的特征吻合。

Fig. 5 Nd and Sr variations in xenoliths and their host basalts from northeastern China

Menzies 等 (1987) 提出 CO_2 和 H_2O 是地幔交代作用的主要营力。因为惰性气体的移动主要受 CO_2 流体的控制 (Porcelli *et al.*, 1986; Andersen, 2001), 所以, 有 CO_2 流体体参加的交代作用对惰性气体的重新分配至关重要。橄榄石和两种辉石中发育的含 CO_2 包裹体也证实 CO_2 流体参与了地幔岩矿物的形成和演变过程。

Zhang 等 (2000) 根据五大连池、二克山和科洛等地的地幔包体中斜方辉石的 Nd 模式年龄 (1.5、1.2 Ga 以及 0.25 Ga), 代表了上部地幔交代作用发生的时间。确定五大连池地幔岩的交代作用发生的时间对探讨是古俯冲板片交代地幔有很大意义。

欧洲中、西部的新生代碱性玄武岩通常和张性构造相关 (Dunai, 1995)。同位素的特征亦表明大陆地幔中古俯冲洋壳及沉积物的存在 (Wilson and Downes, 1991, W?rner *et al.*, 1986, Menzies, 1990, Embey-Isztin *et al.* 1993)。它们对玄武岩浆的生成具有重要的影响 (Woodhead *et al.*, 1993, Hauri *et al.*, 1993)。在 Eifel, Spitsbergen 和 Massif Central 等地区的碱性玄武岩中的地幔包体中, 普遍含有角闪石或金云母等富含挥发份的矿物, 表明交代型大陆地幔的普遍存在。

令人感兴趣的是 Reid 等 (1996) 的对美国西南部的研究结果。在分析了西南犹他州的 Markagunt Plateau 和 St. Geroge, 加州 Majave 的 Cima 和 Pisgah, 以及内华达州的 Big Pine 和 Long Valley 等区域的玄武岩中橄榄石斑晶的氦同

位素(压碎法)后, 结果显示, 以西南犹他为中心的橄榄石斑晶 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比为 5.54 ~ 6.25 R_A , 而其他地区为 7.05 ~ 7.90 R_A 。前者正好落在被交代的大陆地幔区域, 而后者则在典型的 MORB 区。

但是, Matsumoto 等 (2002) 对澳大利亚西南地区的含水地幔岩的惰性气体同位素的研究结果却表明, 这一地区无水地幔岩和含水地幔岩都呈现和 MORB 相似的氦同位素特征。这一结果说明并非所有交代作用都会导致 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比的降低, 同时也反映了地幔岩交代作用的多样性和复杂性。

Mull 等 (1992) 将富钾火山岩产出的构造环境分为五种类型, 其中板内的富钾火山岩, 如东非裂谷带的 Virunga 岩省, 北美科迪勒拉的 Wyoming, Colorado 和 Sierra Nevada, 以及澳大利亚的 New South Wales 等。板内钾质火山岩成岩时无明显的俯冲作用, 岩石的形成主要受热点活动或伸展(特别是裂谷)构造运动的制约, 但岩浆源区应受到过古俯冲事件的影响。

鄂霍次克海在 55 ~ 65 Ma 发生弧陆碰撞, 而在此之前, 东亚和西伯利亚之间存在一个狭长的蒙古-鄂霍次克海。自西向东推进的缝合作用, 在晚白垩纪结束, 古鄂霍次克海完全闭合 (张梅生, 1998)。自中国东北部一直向西, 经贝加尔湖东部的 Vitim 地区, 贝加尔湖南部的 Bartoy, Hamar-Baban 地区, 以及蒙古中部的 Tariat 地区, 新生代的碱性玄武岩发育有大量的地幔包体。其中 Bartoy, Tariat 地区的地幔包体中已发现含有角闪石、金云母或磷灰石等富挥发分矿物 (Ionov, 1997)。显示这些地区的地幔岩和五大连池一样, 发生过机理类似的交代作用。对这些地区的地幔包体的系统的惰性气体地球化学研究, 将会为进一步认识蒙古-鄂霍次克海的闭合及其板块拼贴、以及西伯利亚地块和南侧的东亚大陆碰撞的构造演化史提供重要的线索。探讨上地幔交代作用的营力和交代事件发生的时间, 对研究交代作用的发生机制, 进而反演上地幔岩石圈的进化过程, 对了解和重塑东亚地区的构造演化历史具有重要意义。

5 结论

结合惰性气体同位素和微量元素地球化学证据, 可以得出以下结论:

- (1) 位于五大连池地区的上地幔曾被富 $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ 的硅酸盐熔体强烈地交代, 且流体可能和古俯冲作用有关;
- (2) 五大连池地区的地幔岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比在 $5.5 \pm 1R_A$ 范围, 宽甸黄椅山具有和 MORB 相似的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比。它们分别代表了被交代的大陆富集地幔和未被交代的 MORB 型大陆亏损地幔。

致谢 感谢北京大学地球与空间科学学院穆治国教授提供了五大连池的地幔岩样品。项目得到日本学术振兴会 (JSPS) 的资助。感谢东京大学兼冈一郎教授提供了实验条

件,山本顺司博士、羽生毅博士和三浦弥生博士在实验中的帮助,感谢孙景贵教授在野外采样时给予的帮助以及他和邵济安教授在本文成文过程中的宝贵意见。非常感谢两位匿名评审员对本文的细致阅读以及建设性意见。

Reference

- Allegre C J, Staudacher T, Sarda P, *et al.* 1983. Constraints on evolution of Earth's mantle from rare gas systematics. *Nature*, 303: 762–766
- Allegre C J, Staudacher T, Sarda P. 1987. Rare gas systematics, formation of the atmosphere evolution and structure of the Earth's mantle. *Earth and Planet Science Letters*, 81: 127–150
- Andersen T, Neuman E R. 2001. Fluid inclusions in mantle xenoliths. *Lithos*, 55: 301–320
- Anderson D L. 1995. Lithosphere, asthenosphere and perisphere. *Review Geophysics*, 33: 125–149
- Barfod D N, Ballentine C J, Halliday A N, *et al.* 1999. Noble gases in the Cameroon line and the He, Ne, and Ar isotopic compositions of high u (HIMU) mantle. *Journal of Geophysical Research*, 104: 29509–29527
- Basu A R, Wang J, Huang W, *et al.* 1991. Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth and Planet Science Letters*, 105: 149–169
- Burnard P G, Graham D, Turner G. 1997. Vesicle specific noble gas analyses of popping rock: implication for primordial noble gases in Earth. *Science*, 276: 568–571
- Dunai T J, Baur H. 1995. Helium, neon and argon systematic of the European subcontinental mantle: Implications for its geochemical evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(13): 2767–2783
- Dunai T J, Porcelli D. 2002. The storage and transport of noble gases in the subcontinental lithosphere. *Review Mineral Geochemistry*, 47: 371–409
- Eberhardt P, Eugster O, Marti K. 1965. A redetermination of the isotopic composition of atmospheric neon. *Z Naturforsch* 20a, 623–624
- Embey-Isztin A, Downes H, James D E, *et al.* 1993. The petrogenesis of Pliocene alkaline volcanic rocks from the Pannonian basin, Eastern Central Europe. *Journal of Petrology*, 34: 317–343
- Fan Q C, Sui J L, Liu R X. 2001. Sr–Nd Isotopic Geochemistry and Magmatic Evolutions of Wudalianchi Volcano, Tianchi Volcano and Tengchong Volcano. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 233–238 (in Chinese with English abstract)
- Farly K A, Neroda E. 1998. Noble gases in the Earth's mantle. *Annual Review Earth Planet Science*, 26: 189–218
- Gautheron C, Moreira M. 2002. Helium signature of the subcontinental lithospheric mantle. *Earth and Planet Science Letters*, 199: 39–47
- Graham D W. 2002. Noble gas isotope geochemistry of mid-ocean ridge and ocean island basalts: characterization of mantle source reservoirs. *Review Mineral Geochemistry*, 47: 247–318
- Hanyu T, Kaneoka I. 1997. The uniform and low $3\text{He}/4\text{He}$ ratios of HIMU basalts as evidence for their origin as recycled materials. *Nature*, 390: 273–276
- Hauri E H, Shimizu N, Dieu J J, *et al.* 1989. Evidence for hotspot-related carbonatite Metasomatism in the oceanic upper mantle. *Nature*, 365: 221–227
- Honda M, McDougall I, Patterson D B. 1993. Solar noble gases in the Earth: The systematics of helium-neon isotopes in mantle derived samples. *Lithos*, 30: 257–265
- Hsu C N, Chen J C. 1998. Geochemistry of late Cenozoic basalts from Wudalianchi and Jingpohu areas, Heilongjiang Province, northeast China. *Journal of Asian Earth Science*, 16(4): 385–405
- Ionov D A, Griffin W L, O'Reilly S Y. 1977. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle. *Chemical Geology*, 141: 153–184
- Kaneoka I. 1983. Noble gas constraints on the layered structure of the mantle. *Nature*, 302: 698–700
- Kaneoka I. 1987. Constraints on the characteristics of magma sources for Hawaiian volcanoes based on noble-gas systematics. In *Volcanism in Hawaii*, (eds.) Decker R W, Wright T L and Stauffer P H. USGS Prof. Paper 1350, 743–750
- Kaneoka I. 1998. Noble gas signatures in the Earth's interior-coupled or decoupled behavior among each isotope systematics and problems related to their implication. *Chemical Geology*, 147: 61–76
- Kunz J, Staudacher T, Allegre C J. 1998. Plutonium-fission xenon found in Earth's mantle. *Science*, 280: 877–880
- Lai Y, Kaneoka I. 2003. Noble gas study on fluid inclusions in mantle-derived xenoliths from Eastern China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(18S), A245
- Li Y H, Li J C, Song H B, *et al.* 2002. Helium isotope studies of the mantle xenoliths and megacrysts from Cenozoic basalts in the eastern China. *Science in China (D)*, 45(2): 174–183
- Liu C Q, Masuda A, Xie G H. 1992. Isotope and trace-element geochemistry of alkali basalts and associated megacrysts from the Huangyishan volcano, Kuandian, Liaoning, NE China. *Chemical Geology*, 97: 219–231
- Liu C Q, Xie G H, Masuda A. 1995. Geochemistry of Cenozoic basalts from Eastern China: (II) Sr, Nd and Ce isotopic compositions. *Geochimica Acta* 24(3): 203–214 (in Chinese with English abstract)
- Matsumoto T, Honda M, McDougall I, *et al.* 2002. Noble gases in pyroxenites and metasomatised peridotites from the Newer Volcanics, southeastern Australia: implications for mantle Metasomatism. *Chemical Geology*, 168: 49–73
- Matsumoto T, Honda M. 1998. Noble gases in anhydrous lherzolites from the Newer Volcanics, southeastern Australia: A MORB-like reservoir in the subcontinental mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(14): 2521–2533
- Menzies M A. Petrology and geochemistry of the continental mantle: A history perspective. In *Continental Mantle* (ed. Menzies M A.), Clarendon Press, 1990, 157–177
- Menzies M, Rogers N, Tindle A, *et al.* 1987. Metasomatic and enrichment Processes in lithospheric peridotites, an effect of asthenosphere-lithosphere interaction. in: Halkworth M A (Ed.), *Mantle Metasomatism*, London: Academic Press, 313–361
- Moreira M, Kunz J, Allegre C. 1998. Rare gas systematics in popping rock: isotopic and elemental compositions in the upper mantle. *Science*, 279: 1178–1189
- Mull E D, Rock N M S, Groves D I. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks from different tectonic settings: A pilot study. *Mineralogy and Petrology*, 46: 259–289
- Ozima M, Kudo K. 1972. Excess argon in submarine basalts and an earth-atmosphere evolution model. *Nature*, 239: 23–24
- Porcelli D R, O'Nions R K, O'Reilly S Y. 1986. Helium and strontium isotopes in ultramafic xenoliths. *Chemical Geology*, 54: 237–249
- Porcelli D R, Stone J O H, O'Nions R K. 1987. Enhanced $3\text{He}/4\text{He}$ ratios and cosmogenic helium in ultramafic xenoliths. *Chemical Geology*, 64: 25–33
- Porcelli D R, Woolum D, Cassen P. 2001. Deep earth rare gases: initial inventories, capture from the solar nebula, and losses during Moon formation. *Earth and Planet Science Letters*, 193: 237–251
- Qiu J X. 1991. Wudalianchi-Keluo-Erkeshan K-rich Volcanic Rocks. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese with English abstract)
- Reid M R, Graham D W. 1996. Resolving lithospheric and sub-

- lithospheric contributions to helium isotope variations in basalts from the southwestern US. *Earth and Planet Science Letters*, 144 :213 – 222
- Rosenbaum J M, Wilson M, Downes H. 1997. Multiple enrichment of the Carpathian-Pannonian mantle: Pb-Sr-Nd isotope and trace element constraints. *Journal of Geophysical Research*, 102(B7): 14947 – 14961
- Sarda P, Staudacher T, Allegre C J. 1988. Neon isotopes in submarine basalts. *Earth and Planet Science Letters*, 91 :73 – 88
- Stalder R, Foley S F, Brey G P, *et al.* 1998. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900 1200 C and 3.0 5.7 GPa: new experimental data for garnet, clinopyroxene, and rutile, and implications for mantle Metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(10): 1781 – 1801
- Staudacher T, Allegre C J. 1989. Noble gases in glass samples from Tahiti: Teahitia, Rocard and Mehetia. *Earth and Planet Science Letters*, 93 :210 – 222
- Trieloff M, Kunz J, Clague D, *et al.* 2000. The nature of pristine noble gases in mantle plumes. *Science*, 288 :1036 – 1038
- Wang J W, Xie G H, Tatusmoto. 1988. Sr, Nd and Pb isotope geochemistry and magma evolution of potash volcanic rocks at Wudalianchi. *Geochimica*, 4 :1 – 13 (in Chinese with English abstract)
- Weaver B L. 1991. The origin of oceanic island basalt endmember compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth and Planet Science Letters*, 104 :381 – 397
- Wieler R. 2002. Noble gases in the solar system. *Review Mineral Geochemistry*, 47 :21 – 70
- Williams W, Poths J, Anthony E, *et al.* 1992. Magmatic $^3\text{He}/^4\text{He}$ signatures, ^3He surface exposure dating and paleomagnetism of quaternary volcanics in the Rio Grande Rift, New Mexico. *Eos*, 73 : 610
- Wilson M, Downes H. 1991. Tertiary-Quaternary extension related alkaline magmatism in Western and Central Europe. *Journal of Petrology*, 32 :811 – 849
- Woodhead J D, Greenwood P, Harmon R S, *et al.* 1993. Oxygen isotope evidence for recycled crust in the source of EM-type ocean island basalts. *Nature*, 362 809 – 813
- Werner G, Zindler A, Staudigel H, Schmincke H U. 1986. Sr, Nd, and Pb isotope geochemistry of Tertiary-Quaternary alkaline volcanics from West Germany. *Earth and Planet Science Letters*, 79 :107 – 119
- Wu M B, Wang X B, Ye X R and Zhang M J. 2003. Noble gas isotopic compositions of Cenozoic volcanics and mantle-derived xenoliths from Kuandian in Liaoning Province and their significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 254 – 258 (in Chinese with English abstract)
- Xu S, Liu C Q. 1997. The helium isotope compositions of the mantle xenoliths and their significance in the mantle geochemical evolution. *Chinese Science Bulletin*, 42(11): 1190 – 1193
- Xu S, Nagao K, Uto K, *et al.* 1998. He, Sr and Nd isotopes of mantle-derived xenoliths in volcanic rocks of NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(5 – 6): 547 – 556
- Yaxley G M, Crawford A J, Green D H. 1991. Evidence for carbonatite metasomatism in spinel peridotite xenoliths from western Victoria, Australia. *Earth and Planet Science Letters*, 107(2): 305 – 317
- Zangana N A, Downes H, Thirlwall M F, Marriner G F, *et al.* 1999. Geochemical variation in peridotite xenoliths and their constituent clinopyroxenes from Ray Pic (French Massif Central): implications for the composition of the shallow lithospheric mantle. *Chemical Geology*, 153(1 – 4): 11 – 35
- Zhang M, Suddaby P, O'Reilly S Y *et al.* 2000. Nature of the lithospheric mantle beneath the eastern part of the Central Asian fold belt: mantle xenolith evidence. *Tectonophysics*, 328 :131 – 156
- Zhang M S, Peng X D, Sun X M. 1998. The Paleozoic tectonic geographical pattern of Northeast China. *Liaoning Geology*, (2): 91 – 96 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新. 2001. 五大连池、天池和腾冲火山岩 Sr、Nd 同位素地球化学特征与岩浆演化. *岩石矿物学杂志* 20(3): 233 – 238
- 刘丛强, 解广轰, 增田彰正. 1995. 中国东部新生代玄武岩的地球化学(II) Sr、Nd、Ce 同位素组成. *地球化学* (3): 203 – 214
- 邱家骥等. 1991. 五大连池 – 科洛 – 二克山富钾火山岩. 武汉: 中国地质大学出版社
- 王俊文, 解广轰, Tatusmoto 等. 1988. 五大连池钾质火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学及其岩浆的化学演化. *地球化学* (4): 1 – 13
- 吴茂炳, 王先彬, 叶先仁等. 2003. 辽宁宽甸新生代火山岩和地幔包体的稀有气体同位素组成及其演化意义. *岩石矿物学杂志* 22(3): 254 – 258
- 张梅生. 1998. 中国东北区古生代构造古地理格局. *辽宁地质* (2): 91 – 96