

文章编号: 1000-6524(2003)03-0254-05

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

吴茂炳^{1,2}, 王先彬², 叶先仁², 张铭杰²

(1. 石油大学 资源与信息学院, 北京 102200; 2. 中国科学院 兰州地质研究所 气体地球化学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对宽甸新生代碱性玄武岩、地幔包体及辉石巨晶的稀有气体同位素组成的分析, 认为不同岩性稀有气体含量的差异反映了岩浆作用过程中轻重稀有气体的分馏特性, 较轻的稀有气体(He、Ne)比较重的稀有气体(Kr、Xe)具有更高的活动性和不相容性; 该地区上地幔源区具有典型的 MORB 型源区特征, 以辉石巨晶为代表; 地幔包体的³He/⁴He 值较低, 可能是地幔流体交代作用造成的; 大陆碱性玄武岩具有与大洋玄武岩截然不同的 He 同位素组成, 反映了大陆区地幔岩浆上升过程中受到了陆壳物质混染。地幔源区⁴⁰Ar/³⁶Ar 值为 350 左右, 二辉橄榄岩和碱性火山岩的⁴⁰Ar/³⁶Ar 值比大气略高, 可能有大气组分的混合。部分样品中有²¹Ne、²²Ne、¹²⁹Xe、¹³⁴Xe 和¹³⁶Xe 相对于大气的过剩现象, 是核成因造成的。

关键词: 同位素地球化学; 稀有气体同位素; 地幔包体; 碱性玄武岩; 新生代; 辽宁宽甸

中图分类号: O613.1; P597

文献标识码: A

Noble gas isotopic compositions of Cenozoic volcanics and mantle-derived xenoliths from Kuandian in Liaoning Province and their significance

WU Mao_bing^{1,2}, WANG Xian_bin², YE Xian_ren² and ZHANG Ming_jie²

(1. China University of Petroleum, Beijing 102200, China; 2. Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The noble gas isotopic and compositional data of alkali basalt, lherzolite xenolith and megacryst clinopyroxene from Kuandian area confirm the opinion that fractionation of noble gases existed during magmatism, and that the lighter noble gases such as He and Ne have much higher mobility and incompatibility than heavier ones like Kr and Xe. Therefore, the lighter noble gases are relatively concentrated in volcanics, especially in volcanics with bubbles, whereas lherzolite xenoliths have quite abundant heavier noble gases. Megacryst clinopyroxene has the lowest abundance of noble gases, probably attributed to its high $p-T$ generation. Noble gas isotopic compositions reveal that the mantle source beneath Kuandian area has an MORB-like reservoir with ³He/⁴He being 10 Ra (atmospheric ³He/⁴He value) and ⁴⁰Ar/³⁶Ar being 350. Lherzolite xenoliths possess ³He/⁴He ratios of 2.59~4.53Ra, reflecting their high $p-T$ deformation and metasomatism. Volcanics have very low ³He/⁴He ratios (0.47~0.61 Ra), indicating the contribution of radiogenic ⁴He due probably to crust contamination. Most samples show excesses of ²¹Ne and ²²Ne compared with atmospheric neon, while Kr and Xe isotopic compositions are indistinguishable from atmospheric values with only a few samples showing excesses

收稿日期: 2002-11-18; 修订日期: 2003-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40273009)

作者简介: 吴茂炳(1964-), 男, 汉族, 博士, 副教授, 地球化学专业。

of ^{129}Xe , ^{134}Xe and ^{136}Xe .

Key words: isotopic geochemistry; noble gas isotope; mantle_derived xenoliths; alkali basalt; Cenozoic; Kuandian in Liaoning Province

1 概述

自然界稀有气体元素在门捷列夫化学元素周期表上位于零族位置,包括氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)和氡(Rn)6种气态元素(其中氡为放射性气态元素)。地幔流体中稀有气体同位素地球化学研究是揭示地球形成、热演化、构造演化和化学演化史的关键,是探索地球深部物理和化学过程的重要手段。

氦有两种稳定同位素(^3He 、 ^4He)和两种主要来源。一种是原始氦,在宇宙演化历程中主要由氢燃烧形成,地幔中保存着大量的原始氦,并在地球脱气过程中向浅层和地表排出。另一种是放射性成因氦:放射性 ^4He 主要由铀、钍元素的 α 衰变产生,而放射性 ^3He 主要由反应 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}(\beta^-)^3\text{He}$ 产生(王先彬, 1989),因而铀钍矿物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值很低(10^{-8}),而含锂矿物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值可高达 1.2×10^{-5} ;另外还有极少量宇宙射线散裂作用产生的宇宙成因 ^3He 和 ^4He 。氩有3种稳定同位素(^{36}Ar 、 ^{38}Ar 、 ^{40}Ar),一般认为地球物质的 ^{36}Ar 和 ^{38}Ar 主要是原始氩,而 ^{40}Ar 主要是由 ^{40}K 蜕变形成的放射性成因氩。

目前,氦和氩同位素的研究比较成熟,而对其他稀有气体同位素的认识还处在探索和完美阶段。Kaneoka等(1985)将地球上氦和氩储层总结出4种主要类型:大气型(A型)、地壳型(C型)、大洋中脊玄武岩型(M型)和地幔羽型(P型)。现代大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值分别为 1.4×10^{-6} 和295.5,并以此作为标样;地壳型 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值分别为 2×10^{-8} 和1500,与岩石圈中放射性成因的氦、氩相关,并随地质体产出位置、时代和构造等的不同存在较大的差异;M型和P型与地幔俘获的原始氦、氩组分相关,M型代表亏损地幔物质,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值分别为 1.1×10^{-5} 和 2×10^4 ,P型含有更多的原始气体成分,代表富集地幔,其氦、氩同位素特征值分别为 6×10^{-5} 和350。

地幔中Ne、Kr、Xe同位素的特征值大多与大气值相一致,以往认为是大气成因的,随着研究工作的深入和测试技术水平的提高,相继发现了Ne、Xe同

位素的过剩现象(Niedermann, 1993; Porcelli等, 1995),并认为是由核作用造成的,有关这方面的研究和探索在进一步深化。地幔岩包体是获取地幔深部地球化学信息的最重要样品,地幔包体的稀有气体同位素是研究地幔演化和深部地质乃至探讨地球起源和演化的重要途径,与大洋区的研究相比,大陆地幔方面的研究相对较少,在我国处于起步阶段。辽宁宽甸新生代火山锥不同类型岩石的稀有气体同位素研究可以为进一步解释我国东部大陆地幔的地球化学演化提供重要依据,是目前国内全面分析稀有气体同位素的第一批样品。

2 样品与实验

样品采自辽宁省宽甸县西南约30 km处的青椅山火山锥,是宽甸火山群的代表,也是我国东部新生代长白山-郯庐断裂带火山群的组成部分。组成火山锥的岩石主要为碱性玄武岩、火山角砾岩和渣状碱性玄武岩,熔岩中含有二辉橄榄岩包体和辉石高压巨晶,采样位置见图1。碱性橄榄玄武岩为暗灰色-灰褐色,致密块状,熔岩上部为渣状和气孔状,间隐-玻基斑状结构。显微斑晶为橄榄石和斜长石,一般小于0.1 mm,基质为微晶斜长石、辉石和灰褐色火山玻璃组成,结晶矿物占50%以上。地幔岩包体主要为二辉橄榄岩,主要矿物成分为橄榄石55%~60%,斜方辉石20%~30%,单斜辉石15%~

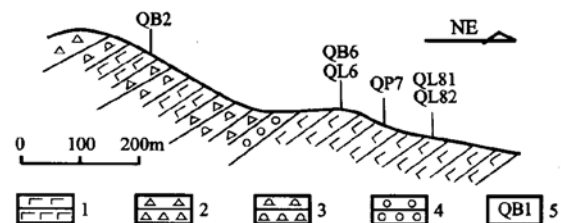


图1 青椅山火山锥剖面及采样位置图

Fig. 1 Section of Qingyishan volcanic core and sampling locations

1—碱性玄武岩; 2—火山角砾岩; 3—渣状碱性玄武岩; 4—砾石层; 5—样品号

1—alkali basalt; 2—volcanic breccia; 3—cinder alkali basalt; 4—gravel bed; 5—sample number

20%和少量尖晶石(1%),发育残斑结构或粒状变晶结构。残斑结构的残斑为橄榄石和斜方辉石,粒度为2~5 mm,橄榄石普遍发育扭折带,有阶梯状消光,局部具定向变形,单斜辉石矿物边缘或裂缝处出现海绵边,显示熔融结构及高温变形特征;具粒状变晶结构的岩石,其矿物粒度略小(1~2 mm),细粒橄榄石光性均一,明显受重结晶作用的影响。

样品由中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室用MM5400稀有气体质谱计测定。样品包括地幔包体全岩、辉石巨晶和碱性橄榄玄武岩。将样品称重后用铝箔包装放入高真空熔样坩埚中,电阻炉加热,碱性玄武岩熔样温度为1450℃,二辉橄榄岩和辉石巨晶熔样温度为1600℃。析出的气体进入全金属超高真空稀有气体净化系统除去活性组分,再经液氮温度下的活性炭阱分离为He+Ne和Ar+Kr+Xe两部分。待He、Ne分别送入MM5400静态真空质谱仪分析其同位素组成后,改变碳阱温度,冻住Xe并放出Ar+Kr进行测试,最后测Xe。MM5400质谱仪最低热本底值为 ^4He : $5.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^3\text{STP/g}$; ^{40}Ar : $9.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3\text{STP/g}$; ^{84}Kr : $4.8 \times 10^{-14} \text{ cm}^3\text{STP/g}$; ^{132}Xe : $4.0 \times$

$10^{-14} \text{ cm}^3\text{STP/g}$,它们对样品的影响极小。包装样品用的铝箔熔化试验表明,其所含的稀有气体中Ar对样品的影响最大,但仍低于1%,其各种同位素组成与大气值接近,对样品分析结果的影响可以忽略。所测的结果以大气为标准得出各种同位素丰度及比值(叶先仁等,2001)。稀有气体同位素含量的测定误差小于10%,稀有气体同位素比值的测定误差以 1σ 列于表1。

3 结果与讨论

表1为宽甸青椅山火山锥各类岩石的稀有气体丰度及其同位素测定结果。从中看出以下特点:

(1) 辉石巨晶(QP7)具有最低的各种稀有气体含量;渣状碱性玄武岩中 ^4He 含量最高,碱性玄武岩(QB2)中其他稀有气体含量也很高;二辉橄榄岩包体的轻稀有气体含量介于辉石巨晶和碱性玄武岩(QB2)之间,其重稀有气体含量与碱性玄武岩相当。不同岩性稀有气体含量的差异很大程度上反映了岩浆作用过程中轻、重稀有气体的分馏特性。

岩石学和岩石化学研究表明,辉石巨晶为高温

表1 宽甸火山岩及地幔包体中稀有气体分析结果

Table 1 Analytical results of noble gases in Cenozoic volcanics and xenoliths from Kuandian

样号 岩性	QP7	QL6	QL81	QL82	QB2	QB6	大气(Air)
	辉石巨晶	二辉橄榄岩			渣状碱性玄武岩	碱性玄武岩	
^4He ($10^{-8} \text{ cm}^3\text{STP/g}$)	0.782 0	1.461	2.346	2.872	7.203	6.032	
^{20}Ne ($10^{-8} \text{ cm}^3\text{STP/g}$)	6.924	10.04	17.74	22.02	37.99	7.357	
^{40}Ar ($10^{-6} \text{ cm}^3\text{STP/g}$)	1.968	3.264	3.881	1.976	3.530	1.269	
^{84}Kr ($10^{-10} \text{ cm}^3\text{STP/g}$)	1.019	2.807	4.022	2.077	4.631	1.305	
^{132}Xe ($10^{-10} \text{ cm}^3\text{STP/g}$)	0.533 6	1.298	4.478	1.588	2.437	0.772 8	
$^3\text{He}/^4\text{He}$ (10^{-6})(R)	13.98(17)	6.34(20)	3.619(98)	4.33(12)	0.852(30)	0.657(27)	1.399(Ra)
R/Ra	9.98	4.53	2.58	3.09	0.61	0.47	1
$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	8.47(18)	8.93(29)	9.187(69)	9.202(69)	8.976(90)	8.29(23)	9.80
$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	0.025 4(6)	未测出	0.030 2(6)	0.027 4(2)	0.024 8(5)	0.027 2(8)	0.029 0
$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	0.196 4(41)	0.191 8(27)	0.190 7(10)	0.199 1(47)	0.188 6(28)	0.191 5(44)	0.188 0
$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	345.6(24)	307.6(11)	305.20(40)	316.0(17)	307.29(98)	305.4(22)	295.5
$^{82}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0.205 5(29)	0.219 7(23)	0.201 7(20)	0.199 4(24)	0.206 0(20)	0.204 4(28)	0.202 2
$^{83}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0.200 4(27)	0.212 7(22)	0.192 0(13)	0.205 7(20)	0.213 0(20)	0.200 7(23)	0.201 4
$^{86}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	0.318 1(17)	0.313 5(20)	0.298 9(14)	0.312 5(19)	0.304 0(18)	0.306 5(16)	0.305 2
$^{128}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.058 1(34)	0.057 4(69)	0.074 2(18)	0.066 8(27)	0.068 4(20)	0.048 9(33)	0.071 4
$^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.862(18)	0.892(93)	0.917 8(75)	0.960(11)	0.987(16)	0.970(12)	0.983 2
$^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.156 8(62)	0.145(13)	0.136 2(16)	0.151 4(38)	0.165 7(35)	0.180 2(43)	0.151 4
$^{131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.835(18)	0.766(24)	0.721 6(56)	0.775 7(83)	0.786 5(99)	0.866(14)	0.789 0
$^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.400(66)	0.401(26)	0.388 4(36)	0.378 2(55)	0.422 4(49)	0.417 6(64)	0.387 9
$^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.330 9(56)	0.304(29)	0.320 0(29)	0.332 6(49)	0.316 6(42)	0.332 7(57)	0.329 4

注:样品由中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室MM5400稀有气体质谱计测定;括号中的数字为测定值最后位数的 1σ 误差值;同位素含量误差小于10%。

高压条件下玄武岩浆的结晶矿物, 而二辉橄榄岩包体则是地幔岩部分熔融的残留体(池际尚, 1988)。辉石巨晶低的稀有气体含量与其高压成因及稀有气体在晶体-熔体体系中的活动性有关。实验研究表明(Broadhurst, 1992), 较轻的稀有气体(He、Ne)比较重的稀有气体(Kr、Xe)具有更高的活动性, 较轻的稀有气体趋于富集在熔体及气相中, 而较重的稀有气体则趋于富存在固相中。地幔岩部分熔融产生的玄武岩浆中轻稀有气体含量相对较高而重稀有气体含量低; 从玄武岩浆中结晶的高压辉石巨晶, 由于轻稀有气体留存在岩浆中, 而重稀有气体虽然趋于在晶体中存在, 但岩浆中本身就贫重稀有气体, 从而表现出从玄武岩浆中结晶的辉石巨晶轻、重稀有气体含量都很低的特征。渣状碱性玄武岩(QB2)中高的稀有气体含量是因岩石中含有较多的气泡。由于稀有气体的溶解度很低, 形成气相时稀有气体大多赋存在气相中, 因而含有较多的气泡的渣状碱性玄武岩中稀有气体含量较高。

(2) 辉石巨晶具有最高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, 是大气的近10倍(9.98 Ra, Ra = 1.399×10^{-6} , 为大气He同位素比值), 与李延河等(2001)测定的结果相近, 反映MORB型源区特征(图2)。由于辉石巨晶是高温高压结晶形成的, 显微镜下没有明显的变形变质, 因而有理由认为宽甸地区大陆地幔具有MORB型的源区特征。Matsumoto等(1998)对澳大利亚东南部地幔包体的稀有气体研究表明, 该区大陆地幔源区也与MORB型类似。

二辉橄榄岩包体的He同位素组成(2.59~4.53 Ra)比辉石巨晶低得多, 与欧洲大陆地幔岩包体及美国西部玄武岩中橄榄石斑晶的He同位素组成类似

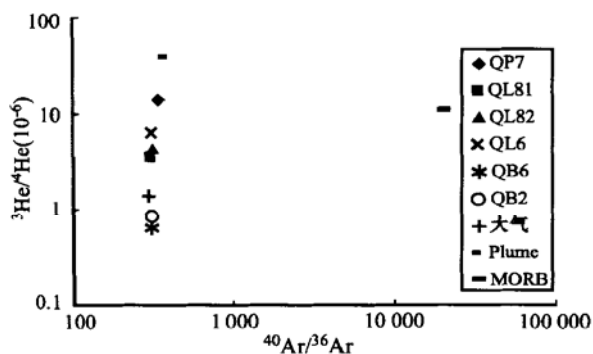


图2 宽甸火山岩及地幔包体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解
Fig. 2 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ diagram for volcanics and xenoliths from Kuandian, Liaoning Province

(Dunai *et al.*, 1995)。一般情况下, 地幔包体中Li的含量极低, 岩石未长期暴露地表受到宇宙射线的作用, 因而由Li及宇宙作用产生的核成因 ^3He 可以忽略, ^3He 主要是由聚合时期捕获的原始组分(Sarda *et al.*, 1993), 因此, 地幔包体低的He同位素比值应是地质时期大陆地幔U+Th衰变形成较高的放射性成因 ^4He 的结果。宽甸二辉橄榄岩包体的Sr和Nd同位素组成具有MORB型源区特征(解广轰等, 1989), 与其He同位素组成反映的源区特征部分一致(李延河等, 2001)。岩石学和岩石地球化学研究表明, 宽甸地区岩石圈地幔的塑性变形作用和地幔流体交代作用十分普遍(池际尚, 1988); 地幔流体的研究发现其流体组成以 CO_2 为主, 流体组分以晚期包裹体的贡献为主(吴茂炳, 2000)。因此, 该区大陆地幔很可能是MORB型亏损地幔, 后期受到富集U+Th的地幔流体交代作用, 形成了低 $\text{He}/(\text{U}+\text{Th})$ 值和低 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的富集地幔。

碱性火山岩的He同位素比值很低(0.47~0.61 Ra), 与MORB截然不同, 反映了大陆火山岩形成时一方面不能快速得到冷却而导致原始He丢失, 另一方面是岩浆上升过程中难免有陆壳物质混染而提高了岩浆中的U、Th含量(碱性玄武岩中的U含量平均为 1.3×10^{-6} , Th为 4.9×10^{-6} , 分别比二辉橄榄岩的U、Th含量高10倍)(解广轰等, 1989), 放射性成因 ^4He 增高, 造成该火山岩He同位素比值降低。

(3) 辉石巨晶的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值最高, 为345.6±2.4; 二辉橄榄岩包体和碱性火山岩的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值比大气值略高一些(305.20±0.40~316.0±1.7)。目前, 地幔中Ar同位素组成还存在争议, MORB的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值变化从大气值(295.5)至 2.8×10^4 , 认为是地幔Ar与大气Ar不同比例混合的结果(Honda *et al.*, 1999)。由于碱性火山岩中 K_2O 平均含量为2.2%, 而辉石巨晶和地幔包体中 K_2O 含量比火山岩低近二个数量级(解广轰等, 1989), 火山岩与地幔包体具有相似的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值, 说明火山岩中 ^{40}K 对 ^{40}Ar 的贡献不大, 其原因可能是火山岩形成时代较新(中-晚更新世)或火山岩相对于大气封闭性较差。在 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $1/^{36}\text{Ar}$ 图解上, 地幔岩包体和辉石巨晶具有较好的正相关关系, 显示有大气Ar混入, 其中辉石巨晶中大气混入量应该小一些, 构成了上端点, 在一定程度上能反映地幔源区的Ar同位素特征。

火山岩及地幔包体的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 值

在误差范围内与大气值相近或略低,而 $^{21}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ 和 $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ 值普遍高于大气值,显示出较明显的 ^{21}Ne 、 ^{22}Ne 过剩现象,认为是由核反应 $^{18}\text{O}(\alpha, n)^{21}\text{Ne}$ 、 $^{24}\text{Mg}(n, \alpha)^{21}\text{Ne}$ 和 $^{19}\text{F}(\alpha, n)^{22}\text{Ne}$ 、 $^{25}\text{Mg}(n, \alpha)^{22}\text{Ne}$ 形成的(Niedermann, 1993)。多数样品 Kr、Xe 同位素组成在误差范围内与大气值基本一致,个别样品有 ^{129}Xe 、 ^{134}Xe 和 ^{136}Xe 相对于大气的过剩现象,认为是 ^{238}U 和已绝灭的 ^{244}Pu 自发裂变、已绝灭的 ^{129}I 衰变造成的(Porcelli *et al.*, 1995)。

4 结 论

宽甸新生代火山锥各类岩石的稀有气体含量及其同位素组成表明,不同岩性稀有气体含量的差异反映了岩浆作用过程中轻、重稀有气体的分馏特性,较轻的稀有气体(He、Ne)比较重的稀有气体(Kr、Xe)具有更高的活动性和不相容性。结合前人研究成果,认为该区上地幔源区具有 MORB 型源区特征,其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 350 左右。上地幔橄榄岩在上隆和塑性流变过程中,可能存在深部富集流体的交代作用,造成地幔包体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值较低, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值比大气略高。另外,大陆碱性玄武岩的 He 同位素组成很低,与大洋玄武岩截然不同, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值与大气相近,可能有大气组分的混合,反映了大陆区地幔岩浆上升过程中陆壳物质混染比较严重。

致 谢 野外工作得到中国地质大学路凤香教授的指导和国土资源部沈阳地质矿产研究所王海俊高级工程师的帮助,在此一并致谢!

References

- Broadhurst C L. 1992. Solubility and partitioning of Ne, Ar, Kr and Xe in minerals and synthetic basaltic melts[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 709~ 723.
- Chi Jishang. 1988. Study on the Cenozoic Basalts and Upper Mantle in East China[M]. Wuhan: Press of China University of Geology, 76 ~ 112(in Chinese).
- Dunai T, Baur H. 1995. Helium, neon and argon systematics of European subcontinental mantle: implication for its geochemical evolution [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 2 767~ 2 783.
- Honda M, Patterson D B. 1999. Systematic elemental fractionation of mantle_derived helium, neon and argon in mid_oceanic ridge glasses [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 2 863~ 2 874.
- Kaneoka I, Takaoka N. 1985. Noble gas state in the earth's interior -

some constraints on the present state[J]. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 52: 75~ 95.

- Li Yanhe, Li Jincheng, Song Hebin, *et al.* 2001. Study on Helium isotope of mantle_derived xenoliths and high_p megacrysts in Cenozoic basalts from East China[J]. *Science in China(Series D)*, 31(8): 641 ~ 647(in Chinese).
- Matsumoto T, Honda M. 1998. Noble gases in anhydrous lherzolites from the Newer Volcanics, southeastern Australia: A MORB-like reservoir in the subcontinental mantle[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62(14): 2 521~ 2 533.
- Niedermann S. 1993. Mass spectrometric identification of cosmo_ray_produced neon in terrestrial rocks with multiple neon components[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 118: 65~ 73.
- Porcelli D, Wasserburg G J. 1995. Mass transfer of Xe through a steady state upper mantle[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 1 991~ 2 007.
- Sarda P, Staudacher T. 1993. Cosmogenic neon and helium at Réunion: measurement of erosion rate[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 119: 405 ~ 417.
- Wang Xianbin. 1989. *Isotope Geochemistry of Noble Gases and Cosmochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 23~ 66(in Chinese).
- Wu Maobing. 2000. The volatile compositions and noble gas isotope geochemistry in alkali volcanics and xenoliths from Kuandian Cenozoic volcanos, Liaoning Province, China[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Geology, Chinese academy of sciences(in Chinese).
- Xie Guanghong, Wang Junwen, Wei Kejian, *et al.* 1989. Study on REE and Sr, Nd, Pb isotope compositions of basalts from Huangyishan volcano, Kuandian in Liaoning Province [J]. *Science in China (Series B)*, (7): 752~ 758(in Chinese).
- Ye Xianren, Wu Maobing and Sun Mingliang. 2001. Determination of the noble gas isotopic composition in rocks and minerals by mass spectrometry [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(3): 174~ 178(in Chinese).

附中文参考文献

- 池际尚. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 76~ 112.
- 李延河, 李金城, 宋鹤彬, 等. 2001. 中国东部新生代玄武岩中幔源包体和高压巨晶的氦同位素研究[J]. *中国科学(D)*, 31(8): 641~ 647.
- 王先彬. 1989. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学[M]. 北京: 科学出版社, 23~ 66.
- 吴茂炳. 2000. 辽宁宽甸新生代碱性火山岩及幔源包体中的流体组成和稀有气体同位素地球化学研究[D]. 兰州: 中国科学院兰州地质研究所.
- 解广轰, 王俊文, 韦克俭, 等. 1989. 辽宁宽甸黄椅山玄武岩 REE 及 Sr、Nd、Pb 同位素组成研究[J]. *中国科学(B辑)*, (7): 752~ 758.
- 叶先仁, 吴茂炳, 孙明良. 2001. 岩矿样品中 He、Ne、Ar、Kr、Xe 同位素组成的质谱分析[J]. *岩矿测试*, 20(3): 174~ 178.