

塔里木大火成岩省瓦吉里塔格霞石岩稀有 气体同位素特征及其地质意义

孔维亮, 张招崇, 程志国

(中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 稀有气体被广泛用作地球化学示踪剂, 本文对塔里木大火成岩省西北缘瓦吉里塔格霞石岩中的橄榄石和辉石单矿物进行了稀有气体同位素测定。结果表明, 瓦吉里塔格霞石岩中的橄榄石和辉石单矿物具有较低的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(分别为 $2.0\sim 2.4\text{ Ra}$ 和 $0.65\sim 0.85\text{ Ra}$)和略高于大气值的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值($342.3\sim 651.7$), 反映了由古板块俯冲导致的较低的He、Ar同位素比值特征。研究表明, 早中古生代南天山洋向南俯冲到塔里木板块之下, 将富U或富 ^4He 以及含有大气组分的流体带入到深部地幔, 在塔里木地幔柱的作用下地幔源区发生低程度部分熔融产生霞石岩岩浆。

关键词: 塔里木大火成岩省; 霞石岩; 稀有气体; 俯冲作用

中图分类号: P588.15; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)04-0581-12

Noble gas isotopic characteristics and geological significance of Wajilitag nephelinites in Tarim large igneous province

KONG Wei-liang, ZHANG Zhao-chong and CHENG Zhi-guo

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Noble gases are widely used as geochemical tracers. In this study, noble gas isotopes of olivine and pyroxene in nephelinites from Wajilitag of Northwest Tarim large igneous province were analyzed. The results show low $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios ($2.0\sim 2.4\text{ Ra}$ and $0.65\sim 0.85\text{ Ra}$, respectively) and low $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios ($342.3\sim 651.7$, slightly higher than atmospheric value). This feature can be interpreted as being influenced by the paleo-subduction. It is inferred that the south Tianshan oceanic plate subducted southward beneath the Tarim plate in the early Paleozoic and the subducting plate brought the fluid enriched with U or ^4He and atmospheric components into the deep mantle. Furthermore, the nephelinite magma was produced by low degree partial melting of the mantle source region with the involvement of the mantle plume.

Key words: Tarim large igneous province; nephelinite; noble gas; subduction

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41472060, 41390442)

塔里木大火成岩省是我国继峨眉山大火成岩省之后又一被国际广泛承认的大火成岩省, 然而与峨眉山和西伯利亚等大火成岩省相比, 其岩性组合更加复杂, 几乎包含了目前所有大火成岩省的岩石类

型, 是所有大火成岩省中岩石组合最为复杂的。这种复杂的岩石组合被认为可能是地幔柱和俯冲板片在不同深度相互作用的结果(Zhang *et al.*, 2013; Cheng *et al.*, 2015, 2017), 当然这个推测需要更多

收稿日期: 2017-03-07; 接受日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472060, 41390442)

作者简介: 孔维亮(1991-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: wlkong@foxmail.com; 通讯作者: 张招崇(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学以及相关金属矿产的教学和研究, E-mail: zczhang@cugb.edu.cn

的证据证明。瓦吉里塔格地区位于塔里木盆地西北缘,在面积不到 10 km² 范围内出露有复杂的岩石类型,如金伯利质岩石、基性-超基性侵入体、霓霞正长岩、霞石岩等,并且发育有大量的闪长岩脉、辉绿岩脉、煌斑岩脉、碳酸岩脉(Zhang *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013; Cheng *et al.*, 2015)。

霞石岩在地球上分布较少,主要产出于板块内部,如大陆裂谷(如东非裂谷)、洋岛(如夏威夷)和大火成岩省中(如 Deccan, Karoo; Le Bas, 1989; Farmer, 2003),并且霞石岩具有类似于 OIB 的地球化学特征和同位素特征,因此,一些学者认为霞石岩与地幔柱存在一定关联(Cheng *et al.*, 2015)。基于霞石岩的地球化学以及实验岩石学研究,霞石岩的形成被认为必须至少具备下列 3 个因素之一或者所有 3 个因素(Vapnik *et al.*, 2007; Ali *et al.*, 2013): ① 低部分熔融; ② 高压环境; ③ 源区在部分熔融前经历了交代作用,如碳酸盐化。虽然前人普遍认为霞石岩的岩浆源区在部分熔融前发生了 CO₂ 交代作用(Vapnik *et al.*, 2007; Ali *et al.*, 2013; Cheng *et al.*, 2015),但对于地幔交代中的流体/熔体来源还存在争议,概括起来主要有两种不同的观点:一是认为来自俯冲的再循环洋壳,地幔柱或软流圈只是起到了加热作用(Bernstein *et al.*, 2000; Doucelance *et al.*, 2010; Cheng *et al.*, 2015);二是认为来自上涌的软流圈地幔或地幔柱(Hoernle *et al.*, 2002; Ray *et al.*, 2010; Ali *et al.*, 2013)。前人的研究方法此前多集中在 C、O 同位素等方面,但由于其极易受到后期热液蚀变的影响而不能提供精确的示踪信息。

瓦吉里塔格霞石岩代表塔里木大火成岩省晚期岩浆作用(Cheng *et al.*, 2015),若该期岩石源区识别出俯冲物质来源,可以为塔里木大火成岩省地幔柱和俯冲板片相互作用提供重要约束。Cheng 等(2015)根据瓦吉里塔格霞石岩的地球化学特征认为瓦吉里塔格霞石岩的地幔源区具有碳酸盐化的特征,并根据 Mg 同位素示踪提出源区可能存在俯冲碳酸盐岩。然而,霞石岩同时具有亏损的 Sr-Nd 同位素组成,这并不与俯冲碳酸盐岩的加入特征相一致。因此,霞石岩受交代源区的交代流体/熔体来源需要进一步讨论。稀有气体由于其化学惰性被广泛用作地球化学示踪剂,可有效示踪幔源岩浆的源区特征,地球大气、地壳、地幔和地幔柱具有明显不同的稀有气体同位素特征。前人研究表明,地球初始

成分类似于太阳气体,³He/⁴He 值为 120 Ra(Ra 为大气中的³He/⁴He 值,1 Ra = 1.40 × 10⁻⁶)。在地球演化过程中,地幔³He 和⁴He 随着脱气作用不断丢失,同时由于 U、Th 衰变作用不断产生⁴He,使得地幔³He/⁴He 值不断降低至约 8 Ra(Gonnermann & Mukhopadhyay, 2009),如洋中脊玄武岩(MORB)³He/⁴He 值多集中在 8 ± 1 Ra(Ozima & Podasek, 2002)。深部地幔由于去气程度较低,同时可能受到俯冲板片影响,其³He/⁴He 值变化范围较大,一般为 5~50 Ra(Starkey *et al.*, 2009)。地幔柱来源岩浆具有较高的³He/⁴He 值,如夏威夷 Loihi 海山的富挥发分纯橄榄岩捕虏体³He/⁴He 值达 24.5 ± 0.5 Ra(Trieff *et al.*, 2000)。地壳由于去气程度较高,同时 U、Th 含量也较高,导致地壳³He/⁴He 值较低,约为 0.03 Ra(Ozima & Podasek, 2002)。与 He 不同,Ar 在不同地幔储库端元中区别不大。洋中脊玄武岩(MORB)⁴⁰Ar/³⁶Ar 值变化范围较大,如东太平洋为 580~4 370(Niedermann *et al.*, 1997),北大西洋为 426~42 366(Marty and Humbert, 1997),但 MORB 的⁴⁰Ar/³⁶Ar 值普遍多分布于 296~12 000 之间(马锦龙等,2003)。洋岛玄武岩(OIB)的⁴⁰Ar/³⁶Ar 值变化范围与 MORB 类似,最低可接近大气值(Staudacher *et al.*, 1990; Vaibracht *et al.*, 1997),但 OIB 的⁴⁰Ar/³⁶Ar 值一般低于 MORB 值,且多集中在 1 000 以下(马锦龙等,2003)。因此,大气、地壳和地幔物质等具有明显不同的 He、Ar 同位素储库,He、Ar 同位素可以作为示踪地幔交代流体/熔体来源的有效示踪剂。

本文通过对瓦吉里塔格霞石岩稀有气体同位素的研究,为示踪霞石岩源区的交代流体/熔体的来源以及评估地幔柱作用的贡献提供进一步的证据。

1 地质背景及岩相学特征

塔里木板块位于中国西北部,由北部的天山造山带、南部的昆仑造山带及阿尔金造山带所环绕,是中国境内的三大主要板块之一(杨树峰等,2014)。塔里木板块主要由前寒武纪基底及上覆的沉积盖层组成,按照其构造性质由北向南可划分为三隆五拗,即库车拗陷、塔北隆起、北部拗陷、中央隆起、西南拗陷、塔南隆起和东南拗陷(图 1)。塔里木板块岩浆活动在早二叠世最为强烈,形成了大规模的基性-超基性岩浆建造,构成我国继峨眉山大火

成岩省后的又一大火成岩省(贾承造, 1997; 厉子龙等, 2008; Bryan and Ernst, 2008; Tian *et al.*, 2010)。然而, 与典型的大火成岩省相比(如峨眉山和西伯利亚), 塔里木大火成岩省具有持续时间相对较长(300~270 Ma)和岩性组合更为复杂的特征(Zhang *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013; Xu *et*

al., 2014; Cheng *et al.*, 2015)。除大火成岩省最常见的玄武岩、基性岩墙、基性-超基性侵入岩和流纹岩外, 还有霞石岩、碳酸岩、金伯利质岩石、煌斑岩、碱性-过碱性侵入岩以及各类中酸性岩体和岩墙(厉子龙等, 2008; 程志国等, 2013; Xu *et al.*, 2014; Cheng *et al.*, 2017)。

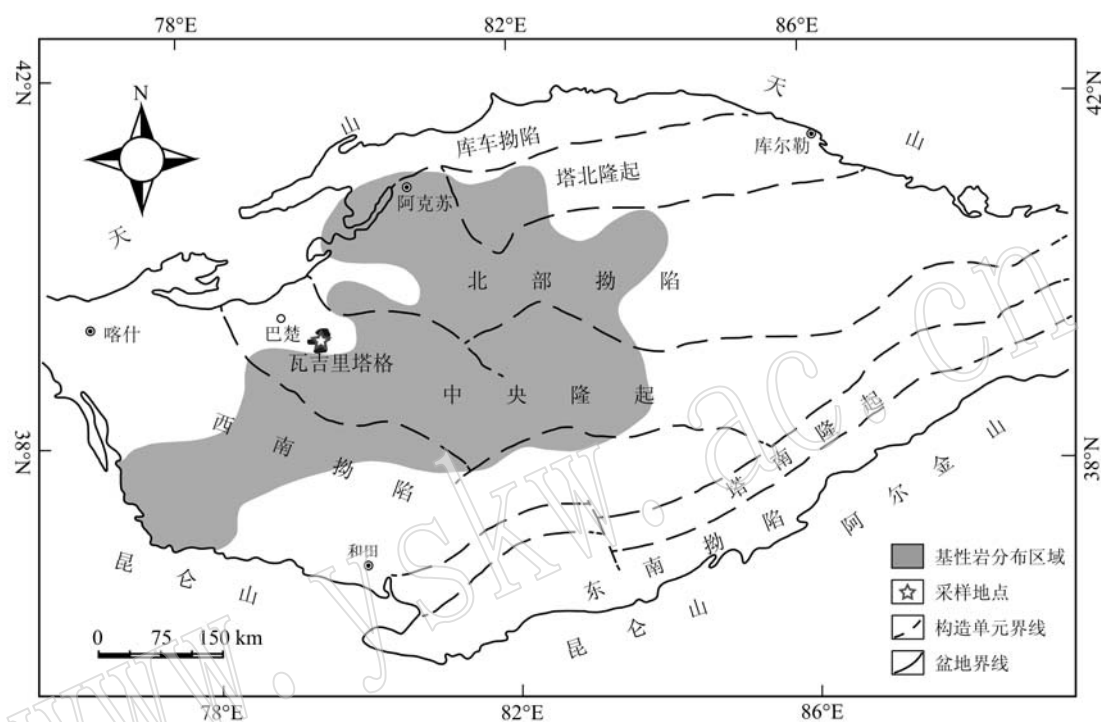


图1 塔里木大火成岩省地质简图[据厉子龙等(2008)、邹思远等(2013)修改]

Fig. 1 Sketch geological map of Tarim large province (modified after Li Zilong *et al.*, 2008 and Zou Siyuan *et al.*, 2013)

瓦吉里塔格位于塔里木大火成岩省西北缘巴楚隆起之上(图2), 距巴楚县城约45 km。区内出露的古生代地层为泥盆系, 另有少量第三系零星出露, 第四系风积物和冲-洪积物大面积分布于山麓及地形低洼处, 形成沙漠沙丘景观。岩体主要由镁铁-超镁铁质岩体和碱性岩体组成, 呈椭圆形展布。晚期有大量的辉绿岩脉、闪长岩脉、煌斑岩脉、碳酸岩脉等大量岩脉出露。根据前人资料, 瓦吉里塔格岩浆岩单元的侵入顺序为金伯利质岩石-基性-超基性侵入岩-碳酸岩-辉绿岩脉-煌斑岩和霞石岩(余星, 2009; Zhang *et al.*, 2013, 2016; Xu *et al.*, 2014; Cheng *et al.*, 2015)。霞石岩呈熔岩状覆盖在泥盆系和基性-超基性侵入体之上, 代表塔里木大火成岩省晚期岩浆活动。

霞石岩手标本呈黑色, 斑状结构, 主要由单斜辉石、霞石和橄榄石组成, 含有少量的磷灰石、方钠石

和碱性长石。显微镜下观察显示霞石岩呈斑状结构, 斑晶主要为单斜辉石、霞石和橄榄石, 基质主要由单斜辉石、霞石、钛铁氧化物、方钠石、磷灰石、黑云母、角闪石、碱性长石等组成, 还发现有少量矿物集合体。单斜辉石呈自形板状或柱状斑晶(图3a、3b), 粒径由1到4 mm不等, 部分单斜辉石发育环带; 霞石斑晶多呈正方形板状产出(图3a), 粒径大小为0.5~1 mm, 偶尔被单斜辉石包裹; 橄榄石斑晶较小, 粒径大小约0.2~0.5 mm(图3b), 少量还具有辉石反应边。基质中矿物多呈微晶状, 粒径较小, 少量霞石和单斜辉石也分布在基质中(图3b)。

2 分析方法

将新鲜的霞石岩样品碎至20~40目, 挑选其中新鲜的橄榄石和辉石单矿物颗粒。用5%的稀硝酸

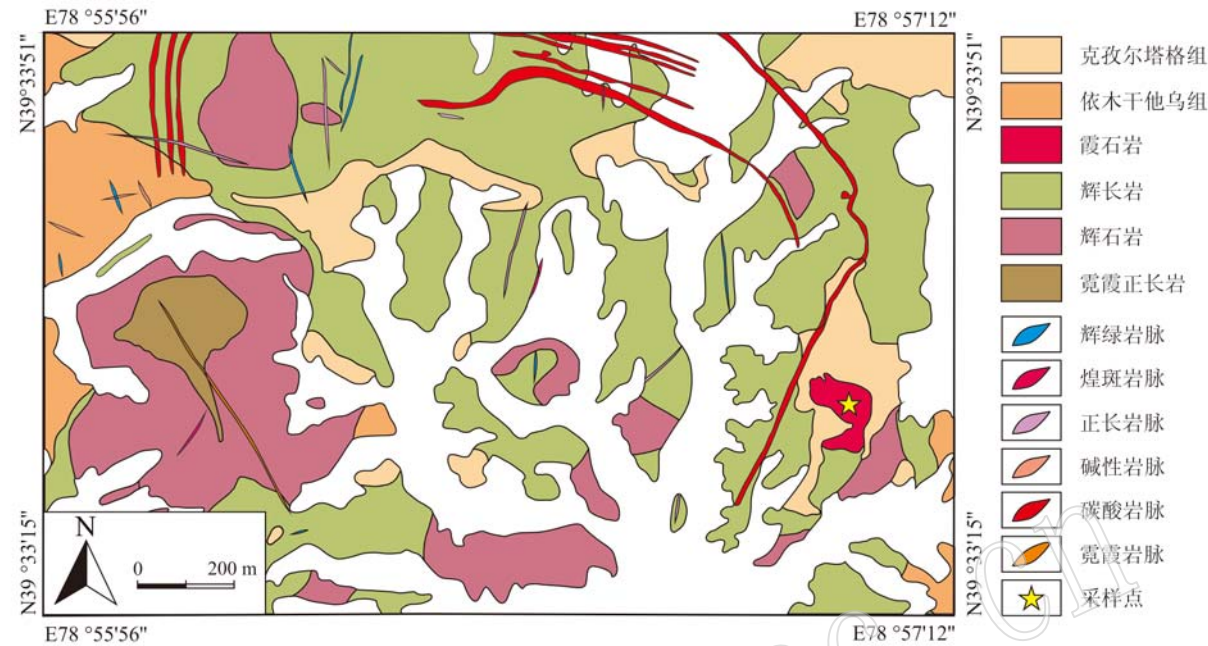


图 2 瓦吉里塔格地质图及样品采样位置[据新疆第十一地质大队(2009)^①修改]

Fig. 2 Geological map of Wjilitag area and sampling position (modified from No. 11 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2009)^①

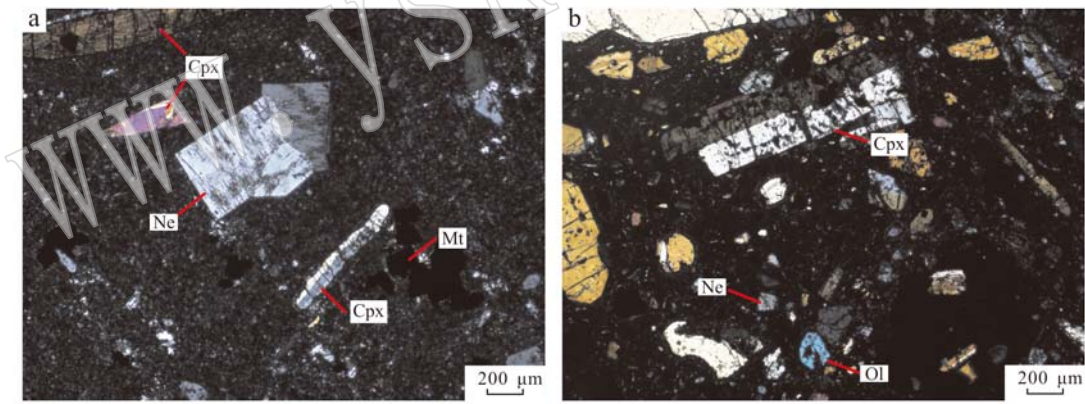


图 3 瓦吉里塔格霞石岩镜下照片(正交偏光)

Fig. 3 Photomicrographs of the Wajilitag nepheline (crossed nicols)

Cpx—单斜辉石; Ol—橄榄石; Mt—磁铁矿; Ne—霞石

Cpx—clinopyroxene; Ol—olivine; Mt—magnetite; Ne—nepheline

超声波清洗 20 min, 消除可能的蚀变影响以及颗粒表面放射性成因和宇宙射线成因的元素影响(Mor-eira and Madureira, 2013), 用丙酮超声波清洗 10 min, 再用去离子水超声波清洗数次直至干净。烘干后称取约 1 g 样品装载到单次静压真空粉碎机中, 装样完毕后, 纯化系统在 130℃ 的温度下烘烤 2~3 d 以去除在样品表面的大气影响。在真空粉碎机中使

用约 1 500 psi (1 psi = 6.895 kPa) 的压力单次静压矿物颗粒样品释放其中的稀有气体。释放的气体依次通过液氮温度下的不锈钢冷阱去除一些高熔沸点的气体(H₂O)等, 采用 4 个锆铝泵(两组, 每组 1 个在室温, 1 个在约 200℃)去除一些活性气体。液氮温度下装有活性炭的不锈钢冷阱可以吸附 Ar 以备后续测量, He 被吸附在可到 10 K 以下的冷泵, 然后设置

① 新疆第十一地质大队. 2009. 新疆巴楚县瓦吉里塔格钒钛磁铁矿详查报告.

在温度 35 K 时释放以测量。He、Ar 同位素测量在 Noblesse 稀有气体质谱仪上完成,该质谱仪上配有 1 个法拉第杯和 3 个电子倍增器,可同时接收 3 个同位素。该仪器大于 700 的质量分辨率可以将³He 和 HD 分开,实验观测证明,当³He 的计数大于 1 cps 时,HD 的影响基本上不存在,故以此作为筛选数据的依据之一。样品数据结果以空气作为标样计算得到,假设测量气体是来源于压碎后小于 100 目的样品,在实验结束后将所装样品过筛,称取小于 100 目的样品质量来计算稀有气体的含量(Burnard *et al.*, 1999)。稀有气体同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所稀有气体实验室(Noblesse 稀有气体质

谱仪)完成,详细的实验流程参见文献 He 等(2011)。

3 结果

3.1 He 同位素

对瓦吉里塔格霞石岩中辉石和橄榄石单矿物的稀有气体同位素测试结果见表 1。橄榄石中⁴He 含量变化范围为 $0.5 \times 10^{-7} \sim 0.7 \times 10^{-7}$ cm³ STP/g, ³He/⁴He 值为 2.0~2.4 Ra;辉石中⁴He 含量变化范围为 $46.0 \times 10^{-7} \sim 358.5 \times 10^{-7}$ cm³ STP/g, ³He/⁴He 值为 0.65~0.85 Ra。很显然,橄榄石的⁴He 比辉石低,而³He/⁴He 值比辉石高。

表 1 瓦吉里塔格霞石岩稀有气体同位素分析结果
Table 1 Noble gas isotopic analyses of olivine and pyroxene from Wajilitag nephelinites

样品	矿物	m/g	⁴ He (10 ⁻⁷ cm ³ STP/g)	³ He/ ⁴ He(Ra)	⁴⁰ Ar(10 ⁻⁷ cm ³ STP/g)	⁴⁰ Ar* (10 ⁻⁷ cm ³ STP/g)	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³⁸ Ar/ ³⁶ Ar
NP-7	橄榄石	0.2	0.7	2.4±0.2	0.4	0.1	342.3±2.8	0.183±0.005
NP-5	单斜辉石	0.2	46.0	0.65±0.04	1.5	0.4	416.6±3.4	0.186±0.005
NP-8	单斜辉石	0.2	358.5	0.85±0.05	20.9	5.6	403.6±3.2	0.185±0.005
NP-4	单斜辉石	0.3	71.3	0.65±0.04	6.0	2.2	470.2±3.8	0.189±0.005
NP-1	橄榄石	0.3	0.5	2.1±0.1	0.2	0.04	382.2±3.1	0.176±0.006
NP-2	橄榄石	0.2	0.6	2.0±0.1	0.3	0.1	441.2±3.5	0.185±0.006
NP-6	单斜辉石	0.2	81.0	0.75±0.05	4.2	2.3	651.7±5.2	0.188±0.005

3.2 Ar 同位素

根据测试结果,橄榄石中⁴⁰Ar 含量变化范围为 $0.2 \times 10^{-7} \sim 0.4 \times 10^{-7}$ cm³ STP/g, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 值为 342.3~441.2;辉石中⁴⁰Ar 含量变化范围为 $1.5 \times 10^{-7} \sim 20.9 \times 10^{-7}$ cm³ STP/g, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 值为 403.6~651.7。样品中⁴⁰Ar/³⁶Ar 值总体较低,均略高于大气值(295.5;Nier, 1950),但橄榄石和辉石间无明显差异。扣除放射性成因⁴⁰Ar* 后⁴⁰Ar/³⁶Ar 值为 290.3~297.6,接近大气值 295.5。⁴⁰Ar/³⁶Ar 值和⁴⁰Ar 没有明显的协变关系,表明样品较少受到岩浆喷发到地表后 K 衰变的影响(图 4a)。

4 讨论

4.1 低 He 同位素比值的原因

地球 He 同位素比值由地幔到地壳变化范围较大,达到几个数量级。大洋中脊玄武岩(MORB)的 He 同位素比值多集中在 8 ± 1 Ra(Ozima& Podosek, 2002),而洋岛玄武岩(OIB)的 He 同位素比值为 5~

50 Ra(Starkey *et al.*, 2009),变化范围较大且高于 MORB。地壳的 He 同位素比值约为 0.03 Ra(Ozima & Podosek, 2002)。瓦吉里塔格霞石岩橄榄石和辉石中提取出的气体均具有较低的³He/⁴He 值,与被认为经受过古老俯冲物质交代的地幔包体类似,比如俄罗斯远东地区(Yamamoto *et al.*, 2004)以及中国东部幔源包体(徐胜等,1997,2002;陶士振等,2001;李延河等,2001a,2001b;马锦龙等,2005;胡文瑄等,2006;汤华云等,2007;曾亮等,2013),但明显低于多数典型 MORB 和与地幔柱有关的地幔源区(Kurz, 1991; Hilton *et al.*, 1993)或与大火成岩省有关的岩石(Ozima& Podosek, 2002),以及东澳大利亚(Matsumoto *et al.*, 1998, 2000)、欧洲(Dunai & Baura, 1995; Gautheron *et al.*, 2005)等典型大陆幔源包体(图 4b)。前人对地幔柱或大火成岩省岩石的研究普遍认为地幔柱或大火成岩省岩石具有较高的 He 同位素比值,如西伯利亚大火成岩省橄榄霞石岩中的橄榄石³He/⁴He 值达 12.7 Ra(Basu *et al.*, 1995),西格陵兰苦橄岩斑晶中³He/⁴He 值达 30.74

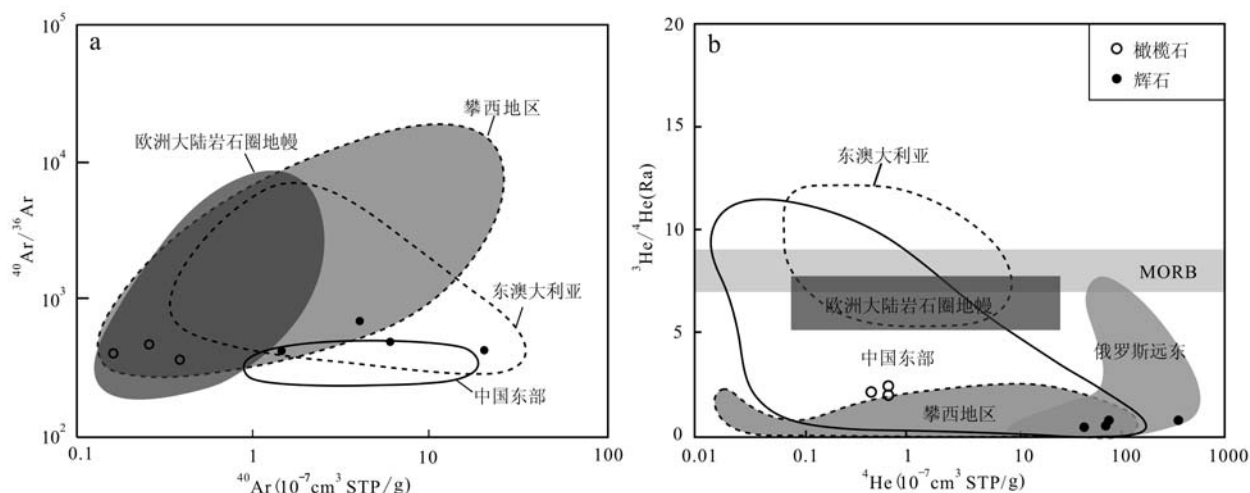


图 4 瓦吉里塔格霞石岩橄榄石和辉石单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ — ^{40}Ar (a)和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ — ^4He (b)含量变化图

Fig. 4 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ versus ^{40}Ar (a) and $^3\text{He}/^4\text{He}$ versus ^4He (b) diagrams of olivine and pyroxene from Wajilitag nephelinites
其他数据来源: 东澳大利亚二辉橄榄岩据 Matsumoto 等(1998, 2000); 欧洲大陆岩石圈地幔据 Dunai & Baur(1995)、Gautheron 等(2005); 俄罗斯远东幔源包体据 Yamamoto 等(2004); 中国东部幔源捕掳体据汤华云等(2007); 攀西地区含钒钛磁铁矿镁铁-超镁铁质岩体据 Hou 等(2011); MORB 据 Kurz(1991)、Hilton 等(1993)

Data sources: lherzolites of Eastern Australia (Matsumoto *et al.*, 1998, 2000); European subcontinental lithospheric mantle (Dunai & Baur, 1995; Gautheron *et al.*, 2005); mantle xenoliths from Far Eastern Russia (Yamamoto *et al.*, 2004); mantle xenoliths from eastern China (Tang Huayun *et al.*, 2007); Fe-Ti-V oxide ore-related mafic-ultramafic intrusions in the Panxi area (Hou *et al.*, 2011); MORB (Kurz, 1991; Hilton *et al.*, 1993)

Ra(Graham *et al.*, 1998)。然而仍有少数研究表明地幔柱或大火成岩省具有较低的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值,如峨眉山大火成岩省含钒钛磁铁矿镁铁-超镁铁质岩体橄榄石和辉石 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值最低约 0.1 Ra(Hou *et al.*, 2011),埃塞俄比亚新生代溢流玄武岩 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值可低至 0.035 Ra(Marty *et al.*, 1996)。峨眉山大火成岩省低的 He 同位素比值被认为是俯冲作用的影响(Hou *et al.*, 2011),埃塞俄比亚溢流玄武岩低的 He 同位素比值被认为很可能是地幔源区存在大量放射性 ^4He ,并且岩浆上升过程中受到地壳混染的结果(Marty *et al.*, 1996)。对于瓦吉里塔格霞石岩出现如此低的 He 同位素比值可能的机制,下面将逐一进行讨论。

4.1.1 大气混染

大气中的气体可以通过俯冲作用进入到地幔中,但大气稀有气体丰度较低,大气中 He 的含量约为 5×10^{-6} ,通过俯冲作用进入到地幔中 He 很少(Ozima & Podasek, 2002)。此外,霞石岩样品中辉石的 He 同位素比值为 0.65~0.85 Ra,比大气值还低,因此可能存在少量大气成分进入到地幔源区,但是不能用地幔源区与大气的简单混解释释低 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的形成。

4.1.2 地壳混染

霞石岩在经过地壳喷出地表的过程中很可能受到地壳混染作用。前人对瓦吉里塔格霞石岩地球化学特征的研究表明, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 与大陆地壳相比具有明显的亏损特征,并且部分不相容元素比值及微量元素蛛网图也与大陆地壳具有明显的不同(Cheng *et al.*, 2015),由此认为瓦吉里塔格霞石岩在成岩过程中没有发生很明显的地壳混染作用。所以低的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值不能用地壳混染解释。

4.1.3 放射性成因 ^4He 的富集

放射性成因 ^4He 可能来源有两个:壳源物质的混染和矿物本身放射性物质产生,前者已经排除,后者可能是放射性成因 ^4He 的主要来源。岩浆喷出地表后橄榄石和辉石矿物晶格中的 U-Th 衰变会产生放射性成因的 ^4He ,从而导致 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的降低。橄榄石通常具有极低的 U、Th 含量,它们的影响较小,辉石 U、Th 含量需要考虑。用公式 $^4\text{He} = 8 \times ^{238}\text{U} \times (e^{\lambda^{238}\text{U} \times t} - 1) + 7 \times ^{235}\text{U} \times (e^{\lambda^{235}\text{U} \times t} - 1) + 6 \times ^{232}\text{Th} \times (e^{\lambda^{232}\text{Th} \times t} - 1)$ 及衰变常数(Dunai and Baur, 1995),参考 Cheng 等(2014)与瓦吉里塔格霞石岩具有相似构造背景和源区特征的金伯利质岩石辉石单

矿物微量元素数据,辉石中U和Th含量分别平均为 0.0141×10^{-6} 和 0.0637×10^{-6} ,定量计算岩石喷出地表后至今积累的放射性成因 ^4He 约为 $5.59 \times 10^{-5} \text{cm}^3 \text{STP/g}$,假设放射性成因 ^4He 由矿物晶格向外扩散为约1%,则为约 $5.59 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \text{STP/g}$ 。而霞石岩相对金伯利质岩石更加年轻,放射性成因 ^4He 应低于金伯利质岩石。将霞石岩中辉石扣除放射性成因 ^4He 影响后 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.71 \sim 0.86 \text{Ra}$,仍相对较低,对结果影响较小。此外如果 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的降低和矿物晶格中的U-Th衰变会产生放射性成因的 ^4He 有关,那么样品中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 ^4He 应该存在负相关,本文橄榄石和辉石样品没有明显显示出这样的特征(图4b),因此可以排除放射性成因 ^4He 的富集导致低 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值。

4.1.4 源区 ^4He 的加入

综上所述,低的He同位素比值受到源区之外因素影响的可能性较小,因此低的He同位素比值可以反映源区特征。Cheng等(2015)的研究认为瓦吉里塔格霞石岩具有碳酸盐化地幔的特征,可能是碳酸盐化橄榄岩低程度部分熔融成因,同时基于Mg同位素特征认为其源区可能具有俯冲沉积型碳酸盐岩的加入。那么,低He同位素比值就很可能来自霞石岩的地幔源区。 ^4He 加入到地幔源区的形式有两种:一是加入的流体富集 ^4He ;二是加入的流体富U,并且具有高的U/He值,随后U-Th衰变产生大量的 ^4He (Hou *et al.*, 2011)。这两种形式都是由于俯冲作用导致流体加入的结果。如果是加入的流体富集 ^4He ,那么流体必然也具有低的He同位素比值,这种情况可能是俯冲的洋壳长时间停留在地幔区域,产生富 ^4He 的流体;如果是加入的流体富U,那么富U的流体渗透到地幔中,随后U-Th衰变产生大量的 ^4He ,导致低的He同位素比值(Hou *et al.*, 2011)。这两种形式可以单独存在,也可以同时存在导致低He同位素比值的出现。因此,结合区域地质背景,本区很可能是由于早中中生代南天山洋向塔里木板块俯冲(Charvet *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011; Ge *et al.*, 2012)使得岩石圈地幔受到俯冲板片流体影响,导致低的He同位素比值。

4.2 Ar同位素体系

Ar在不同地幔储库端元中区别不大,OIB与MORB的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值均可低至大气值,但MORB最高可达64 000(Burnard *et al.*, 1997)。俯冲带幔源岩石的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值总体较低,如日本岛弧和马里

亚纳海沟的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值分别为 $307 \sim 1\,870$ (Nagao and Takahashi, 1993)和 $360 \sim 3\,869$ (Sano *et al.*, 1986),可能是受到地壳/大气与地幔交代作用的影响。大陆幔源包体 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值总体也较低,如东澳大利亚 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值变化为 $308 \sim 6\,148$ (Matsumoto *et al.*, 2000),欧洲大陆 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值最低可低至大气值(Dunai & Baur, 1995)。瓦吉里塔格霞石岩与峨眉山大火成岩省含钒钛磁铁矿镁铁-超镁铁质岩体及中国东部地区(陶士振等, 2001; 徐胜等, 2002; 马锦龙等, 2005; 胡文瑄等, 2006; 汤华云等, 2007; 曾亮等, 2013; 苏菲等, 2014)、东澳大利亚(Matsumoto *et al.*, 1998, 2000)和欧洲(Dunai & Baur, 1995; Gautheron *et al.*, 2005)等大陆的样品 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值类似,但总体略低于东澳大利亚、欧洲及峨眉山大火成岩省(图4a)。由于大陆上各类地幔源区的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值普遍偏低,Matsumoto等(2001)和Gautheron等(2005)认为大陆幔源岩石接近大气值的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值与俯冲再循环进入到岩石圈地幔的大气混染有关,并认为陆下地幔的古大气混染是普遍存在的。

综上,瓦吉里塔格霞石岩略高于大气值的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值必须用大气Ar的加入来解释,可能是在岩石暴露到地表和样品处理、测试过程中受到大气混染(Czuppon *et al.*, 2009),也可能是富含大气组分的流体进入到地幔源区(Sarda *et al.*, 1999, 2000; Matsumoto *et al.*, 2001; Gautheron *et al.*, 2005)。 ^{36}Ar 和 ^3He 不能由放射性衰变过程产生,Ozima和Podosek(1983)认为地幔中的 ^{36}Ar 几乎全部脱出,所以样品中 ^{36}Ar 主要源自大气,而 ^3He 主要来自于地幔。如果样品在处理、测试过程中受到大气混染,导致 ^{36}Ar 明显增加,那么 ^{36}Ar 与 ^3He 之间不存在相关性;只有地幔源区受到大气组分的影响, ^{36}Ar 和 ^3He 才会表现出正相关性(Matsumoto *et al.*, 2002; 苏菲等, 2014)。本文霞石岩样品 ^{36}Ar 和 ^3He 含量具有较为良好的相关性(图5),说明样品中较低的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值可以反映地幔源区的同位素特征,地幔源区受到过低 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值物质的影响,如俯冲洋壳将富含大气成分的流体带入到地幔源区。需要指出的是,由于测试样品数量较少,没有确切的证据完全排除样品在地表、处理、测试过程中受到大气Ar混染,但由于橄榄石等单矿物对地表大气的屏蔽性较好(汤华云等, 2007),且在测试过程中经过纯化系统在 130°C 的温度下烘烤 $2 \sim 3 \text{d}$ 去除样品表面的大气影响,因此我们更倾向于认为大气Ar的混染发生在

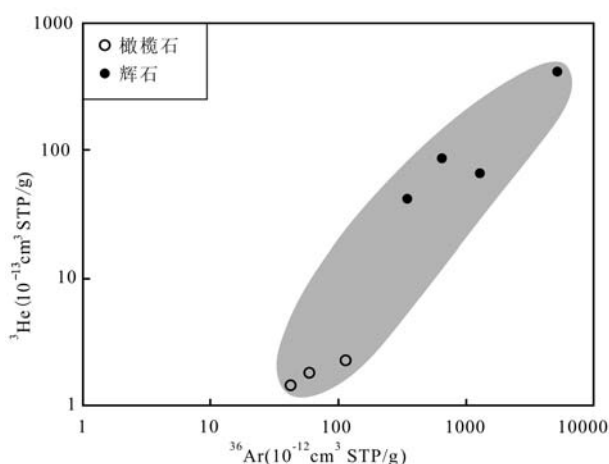


图5 瓦吉里塔格霞石岩橄榄石和辉石单矿物 ^3He 和 ^{36}Ar 图解

Fig. 5 ^3He versus ^{36}Ar diagram of olivine and pyroxene from Wajilitag nephelinites

地幔源区,至少地表大气以及样品处理、测试过程中发生的大气Ar混染不是导致样品低Ar同位素比值的主要原因。

4.3 瓦吉里塔格霞石岩的源区特征及其形成机制

瓦吉里塔格霞石岩的地幔源区受到俯冲作用影响,富 ^4He 或富U以及含有大气组分的流体加入地幔源区,导致低的He同位素比值和Ar同位素比值。前文已经提到普遍认为地幔柱或大火成岩省的岩石具有较高的He同位素比值,与瓦吉里塔格霞石岩低的He同位素比值不同。在 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解上(Kaneoka & Takaoka, 1985),瓦吉里塔格霞石岩样品落入地幔柱、大气和地壳之间,并且靠近大气端员(图6),因此可以认为受到3个端员的混合,即地幔柱岩浆物质和含有大气成分的俯冲物质的混合。He、Ar同位素识别出俯冲物质对瓦吉里塔格霞石岩的交代源区具有重要贡献,虽然低的He同位素比值使得霞石岩形成过程中是否存在地幔柱物质的参与仍不明确,但这种混合机制要求地幔柱和俯冲再循环物质对霞石岩的源区同时具有贡献。

总之,虽然不能完全排除其他的可能性,但是用地幔柱和俯冲板片脱水流体交代的地幔源区可以很好地解释He和Ar同位素组成。

综上霞石岩的源区研究,并结合区域地质背景,本文提出瓦吉里塔格霞石岩形成过程如下:在早中古生代,由南天山洋向南俯冲到塔里木板块之下(Charvet *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011; Ge *et al.*, 2012; Cheng *et al.*, 2015; Zhang *et al.*,

2016),塔里木板块的软流圈和岩石圈都受到俯冲物质的交代作用。岩石圈地幔受到富U或富 ^4He 以及含有大气组分流体的影响,导致岩石圈地幔具有低的He、Ar同位素比值;在约280 Ma的塔里木地幔柱作用晚期,地幔柱上升过程中与受到俯冲流体交代的岩石圈地幔相互作用,使其发生低程度部分熔融产生霞石岩岩浆。

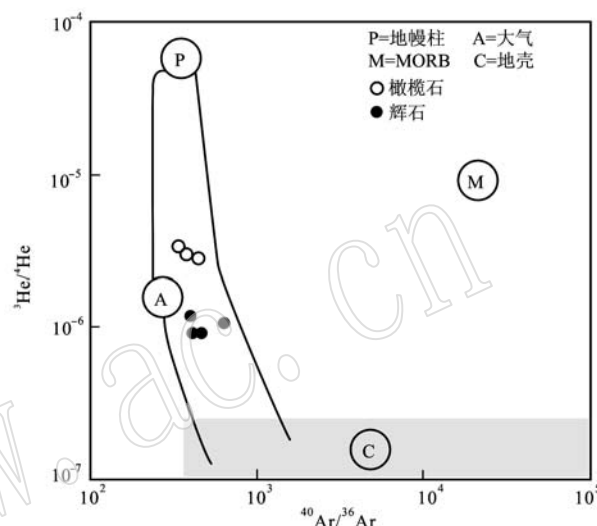


图6 瓦吉里塔格霞石岩橄榄石和辉石单矿物 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解(据 Kaneoka & Takaoka, 1985)

Fig. 6 $^3\text{He}/^4\text{He}$ versus $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ diagram of olivine and pyroxene from Wajilitag nephelinites (after Kaneoka & Takaoka, 1985)

5 结论

通过对塔里木大火成岩省瓦吉里塔格霞石岩橄榄石和辉石单矿物稀有气体同位素特征分析,主要获得以下认识:

(1) 瓦吉里塔格霞石岩具有低的He同位素比值和略高于大气值的Ar同位素比值,是由于早中古生代南天山洋向塔里木板块俯冲将富U或富 ^4He 以及含有大气组分的流体带入到岩石圈地幔;

(2) 瓦吉里塔格霞石岩是塔里木地幔柱作用晚期,在地幔柱作用下受到俯冲流体交代的地幔源区发生低程度部分熔融产生的。

References

- Ali S, Ntaflou T and Upton B G J. 2013. Petrogenesis and mantle source characteristics of Quaternary alkaline mafic lavas in the western

- Carpathian-Pannonian Region, Styria, Austria[J]. *Chemical Geology*, 337~338: 99~113.
- Basu A R, Poreda R J, Renne P R, *et al.* 1995. High-³He plume origin and temporal- spatial evolution of the Siberian flood basalts[J]. *Science*, 269: 822~825.
- Bernstein S, Leslie A G, Higgins A K, *et al.* 2000. Tertiary alkaline volcanics in the Nunatak Region, Northeast Greenland: new observations and comparison with Siberian maymechites[J]. *Lithos*, 53: 1~20.
- Bryan S E and Ernst R E. 2008. Revised definition of large igneous provinces (LIPs) [J]. *Earth Science Reviews*, 86: 175~202.
- Burnard P G, Graham D W and Turner G. 1997. Vesiclespecific noble gas analyses of "popping rock": implications for primordial noble gases in earth[J]. *Science*, 276: 568~571.
- Burnard P G, Hu R, Turner G, *et al.* 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(10): 1 595~1 604.
- Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S, *et al.* 2011. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan Belt, NW China[J]. *Science China Earth Science*, 54: 166~184.
- Cheng Z G, Zhang Z C, Hou T, *et al.* 2015. Petrogenesis of nephelinites from the Tarim Large Igneous Province, NW China: Implications for mantle source characteristics and plume-lithosphere interaction[J]. *Lithos*, 220~223: 164~178.
- Cheng Z G, Zhang Z C, Hou T, *et al.* 2017. Decoupling of Mg-C and Sr-Nd-O isotopes traces the role of recycled carbon in magnesiocarbonatites from the tarim large igneous province[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 202: 159~178.
- Cheng Z G, Zhang Z C, Santosh M, *et al.* 2014. Carbonate- and silicate-rich globules in the kimberlitic rocks of northwestern Tarim large igneous province, NW China: Evidence for carbonated mantle source [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95: 114~135.
- Cheng Zhiguo, Zhang Zhaochong, Zhang Dongyang, *et al.* 2013. Petrological and mineralogical characteristics of explosion breccia in Bachu, Xinjiang and its constraints on the magmatic processes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(8): 1 104~1 123(in Chinese with English abstract).
- Czuppon G, Matsumoto T, Handler M R, *et al.* 2009. Noble gases in spinel peridotite xenoliths from Mt Quincan, North Queensland, Australia: Undisturbed MORB-type noble gases in the subcontinental lithospheric mantle[J]. *Chemical Geology*, 266: 19~28.
- Doucélance R, Hammouda T, Moreira M, *et al.* 2010. Geochemical constraints on depth of origin of oceanic carbonatites: The Cape Verde case[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 7 261~7 282.
- Dunai T J and Baur H. 1995. Helium, neon and argon systematics of the European subcontinental mantle: implications for its geochemical evolution[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 2 767~2 783.
- Farmer G L. 2003. Continental Basaltic Rocks[M]. *Treatise on Geochemistry*.
- Gautheron C, Moreira M and Allegre C. 2005. He, Ne and Ar composition of the European lithospheric mantle[J]. *Chemical Geology*, 217: 97~112.
- Ge R F, Zhu W B, Wu H L, *et al.* 2012. The Paleozoic northern margin of the Tarim Craton: Passive or active? [J]. *Lithos*, 142~143 (6): 1~15.
- Gonnermann H M and Mukhopadhyay S. 2009. Preserving noble gases in a convection mantle[J]. *Nature*, 459: 560~563.
- Graham D W, Larsen L M, Hanan B B, *et al.* 1998. Helium isotope composition of the early Iceland mantle plume inferred from the Tertiary picrites of West Greenland[J]. *Earth Planet Science Letters*, 160(3~4): 223~237.
- He H Y, Zhu R X and Saxton J. 2011. Noble gas isotopes in corundum and peridotite xenoliths from the eastern North China Craton: Implications for comprehensive refertilization of lithospheric mantle[J]. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 189(3): 185~191.
- Hilton D R, Hammerschmidt K, Look G, *et al.* 1993. Helium and argon isotope systematics of the central Lau Basin and Valu Fa Ridge: Evidence of crust-mantle interactions in a back-arc basin [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(12): 2 819~2 841.
- Hoernle K, Tilton G, Le Bas, *et al.* 2002. Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142(5): 520~542.
- Hou Tong, Zhang Zhaochong, Ye Xianren, *et al.* 2011. Noble gas isotopic systematics of Fe-Ti-V oxide ore-related mafic-ultramafic layered intrusions in the Panxi area, China: The role of recycled oceanic crust in their petrogenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(22): 6 727~6 741.
- Hu Wuxuan, Song Yucai, Chen Xiaoming, *et al.* 2006. Noble gas isotopic compositions of corundum giant in changle basalt, shandong[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(21): 2 526~2 533(in Chinese).
- Jia Chengzao. 1997. Tectonic Characteristics and Petroleum Tarim Basin China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese with English abstract).

- lish abstract).
- Kaneoka I and Takaoka N. 1985. Noble-gas state in the earth's interior—Some constraints on the present state[J]. *Chemical Geology*, 52(1): 75~95.
- Kurz M D. 1991. Noble gas isotopes in oceanic basalts: controversial constraints on mantle models[A]. Heaman L and Ludden J N. *Short Course Handbook on Applications of Radiogenic Isotope Systems to Problems in Geology*[C]. Mineral. Assoc. Canada.
- Le Bas M J. 1989. Nephelinitic and basanitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 30(5): 1 299~1 312.
- Li Yanhe, Li Jincheng, Song Hebin, *et al.* 2001a. Helium isotope studies of the mantle xenoliths and megacrysts from the Cenozoic basalts in eastern China[J]. *Science in China (Series D)*, 31(8): 641~647 (in Chinese).
- Li Yanhe, Li Jincheng, Song Hebin, *et al.* 2001b. Helium isotope studies of the mantle xenoliths and megacrysts from the Cenozoic basalts in Hannuoba, Hebei Province, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 214~217 (in Chinese with English abstract).
- Li Zilong, Yang Shufeng, Chen Hanlin, *et al.* 2008. Chronology and geochemistry of Taxinan basalts from the Tarim basin: Evidence for Permian plume magmatism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 959~970 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jinlong and Tao Mingxin. 2003. Constraints of tectonic setting on noble gas isotope ratios in mantle-source rocks[J]. *Geology Geochemistry*, 31(4): 87~94 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jinlong, Tao Mingxin and Ye Xianren. 2005. Fluid and noble gas geochemistry studies of the fluid and noble gas from the mantle minerals in Yishu area, Shandong[J]. *Science in China (Series D)*, 35(11): 1 019~1 027 (in Chinese).
- Matsumoto T, Chen Y and Matsuda J. 2001. Concomitant occurrence of primordial and recycled noble gases in the Earth's mantle[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 185(1~2): 35~47.
- Matsumoto T, Honda M, McDougall I, *et al.* 1998. Noble gases in anhydrous lherzolites from the newer volcanics, southeastern Australia: A MORB-like reservoir in the subcontinental mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(14): 2 335~2 345.
- Matsumoto T, Honda M, McDougall I, *et al.* 2000. Noble gases in pyroxenites and metasomatised peridotites from the Newer Volcanics, southeastern Australia: implications for mantle metasomatism[J]. *Chemical Geology*, 168(1): 49~73.
- Matsumoto T, Pinti D L, Matsuda J, *et al.* 2002. Recycled noble gas and nitrogen in the subcontinental lithospheric mantle: Implications from N-He-Ar in fluid inclusions of SE Australian xenoliths[J]. *Geochemical Journal*, 36(3): 209~217.
- Marty B and Humbert F. 1997. Nitrogen and argon isotopes in oceanic basalts[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 152(1~4): 23~112.
- Marty B, Pik R and Gezahegn Y. 1996. Helium isotopic variations in ethiopian plume lavas: Nature of magmatic sources and limit on lower mantle contribution[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 144(1~2): 223~237.
- Moreira M and Madureira P. 2013. Cosmogenic helium and neon in 11 Myr old ultramafic xenoliths: Consequences for mantle signatures in old samples[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 6(8): 115~139.
- Nagao K and Takahashi E. 1993. Noble gases in the mantle wedge and lower crust: An inference from the isotopic analyses of xenoliths from Oki-Dogo and Ichinomegata, Japan[J]. *Geochemical Journal*, 27: 229~240.
- Niedermann S, Bach W and Erzinger J. 1997. Noble gas evidence for a lower mantle component in MORBs from the southern East Pacific Rise: Decoupling of helium and neon isotope systematics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(13): 2 697~2 715.
- Nier A O. 1950. A redetermination of the relative abundances of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argon and potassium[J]. *Physical Review*, 77(6): 789~793.
- Ozima M and Podosek F A. 1983. *Noble Gas Geochemistry*[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ozima M and Podosek F A. 2002. *Noble Gas Geochemistry*(2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ray J S, Shukla A D and Dewangan L K. 2010. Carbon and oxygen isotopic compositions of Newania Dolomite Carbonatites, Rajasthan, India: implications for source of carbonatites[J]. *Mineralogy and Petrology*, 98(1): 269~282.
- Sano Y, Nakamura Y and Wakita H. 1986. Light noble gases in basalt glasses from Mariana Trough[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(11): 369~350.
- Sarda P, Moreira M and Staudacher T. 1999. Argon-lead isotopic correlation in Mid-atlantic ridge basalts[J]. *Science*, 283(5402): 666~668.
- Sarda P, Moreira M, Staudacher T, *et al.* 2000. Rare gas systematics on the southernmost Mid- Atlantic Ridge: constraints on the lower mantle and the Dupal source[J]. *Journal of Geophysical Research*,

- 105(105): 5 973~5 996.
- Starkey N A, Stuart F M, Ellam R M, *et al.* 2009. Helium isotopes in early Iceland picrites: Constraints on the composition of high $^3\text{He}/^4\text{He}$ mantle [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 277(1): 91~100.
- Staudacher T, Sarda P and Aiiegre C J. 1990. Noble gas systematics of Reunion Island, Indian Ocean[J]. *Chemical Geology*, 89: 1~17.
- Su Fei, Xiao Yan, He Huaiyu, *et al.* 2014. He and Ar isotope geochemistry of pyroxene megacrysts and mantle xenoliths in Cenozoic basalt from the Changle-Linqu area in western Shandong[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59: 374~386(in Chinese with English abstract).
- Tang Huayun, Zheng Jianping and Yu Chunmei. 2007. Mantle fluids and noble gas isotopic compositions of peridotitic olivines in Cenozoic basalts from eastern North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 531~1 542(in Chinese with English abstract).
- Tao Shizhen, Liu Deliang, Zhu Wenjin, *et al.* 2001. Isotope geochemistry of mantle-derived gas in eastern China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(4): 412~419(in Chinese with English abstract).
- Tian W, Campbell I H, Allen C M, *et al.* 2010. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(3): 407~425.
- Trieloff M, Kunz J, Clague D A, *et al.* 2000. The nature of pristine noble gases in mantle plumes[J]. *Science*, 288(5 468): 1 036~1 039.
- Vaibracht P J, Staudacht T, Maiahpf A, *et al.* 1997. Noble gas systematics of deep rift zone glasses from Loihi Seamount, Hawaii[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 150(3~4): 399~411.
- Vapnik Y, Sharygin V V, Samoilov V, *et al.* 2007. The petrogenesis of basic and ultrabasic alkaline rocks of western Makhtesh Ramon, Israel: Geochemistry, melt and fluid inclusion study[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 96(4): 663~684.
- Wang B, Shu L S, Faure M, *et al.* 2011. Paleozoic tectonics of the southern Chinese Tianshan: Insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic melange (NW China) [J]. *Tectonophysics*, 497(1~4): 85~104.
- Xu Sheng and Liu Congqiang. 1997. Noble gas compositions and the geochemistry evolution significance in mantle xenoliths from eastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(11): 1 990~1 993 (in Chinese).
- Xu Sheng and Liu Congqiang. 2002. Abundance and isotopic composition of noble gases in mantle derived xenoliths from northeastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(2): 141~146(in Chinese).
- Xu Y G, Wei X, Luo Z Y, *et al.* 2014. The Early Permian Tarim large igneous province: Main characteristics and a plume incubation model [J]. *Lithos*, 204(3): 20~35.
- Yamamoto J, Kaneoka I, Nakai S, *et al.* 2004. Evidence for subduction-related components in the subcontinental mantle from low $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio in mantle xenoliths from Far Eastern Russia [J]. *Chemical Geology*, 207: 237~259.
- Yang Shufeng, Chen Hanlin, Li Zilong, *et al.* 2013. Early Permian Tarim Large igneous province in northwest China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 44: 187~199(in Chinese with English abstract).
- Yu Xing. 2009. Magma Evolution and Deep Geological Processes of Early Permian Tarim Large Igneous Province[D]. Zhejiang University (in Chinese with English abstract).
- Zeng Liang, Cheng Zhiyan, Erkanati Keizati, *et al.* 2013. Compositions of noble gas isotope in different kinds of mantle-driven rocks and its origins, Shandong province, China[J]. *Geological Review*, 50(4): 677~686(in Chinese with English abstract).
- Zhang C L, Li X H, Li Z X, *et al.* 2008. A Permian layered intrusive complex in the Western Tarim Block, Northwestern China: Product of a Ca. 275 Ma mantle plume? [J]. *Journal of Geology*, 116(3): 269~287.
- Zhang D Y, Zhang Z C, Mao J W, *et al.* 2016. Zircon U-Pb ages and Hf-O isotopic signatures of the Wajilitag and Puchang Fe-Ti oxide-bearing intrusive complexes: Constraints on their source characteristics and temporal-spatial evolution of the Tarim large igneous province [J]. *Gondwana Research*, 37: 71~85.
- Zhang D Y, Zhang Z C, Santosh M, *et al.* 2013. Perovskite and baddeleyite from kimberlitic intrusions in the Tarim large igneous province signal the onset of an end-Carboniferous mantle plume[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 361(1): 238~248.
- Zindler A and Hart S R. 1986. Helium: problematic primordial signals [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 79(1): 1~8.
- Zou Siyuan, Li Zilong, Ren Zhongyuan, *et al.* 2013. U-Pb dating and Hf isotopic compositions of detrital zircons from Permian sedimentary rocks in Keping area of Tarim Basin, Xinjiang, China: Constraints on geological evolution of Tarim Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3 369~3 388(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程志国, 张招崇, 张东阳, 等. 2013. 新疆巴楚爆破角砾岩筒矿物学特征及其对岩浆演化过程的约束[J]. *地质学报*, 87(8): 1 104

~1 123.

胡文瑄, 宋玉财, 陈小明, 等. 2006. 山东昌乐玄武岩内刚玉巨晶稀有气体同位素组成[J]. 科学通报, 51(21): 2 526~2 533.

贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社.

厉子龙, 杨树峰, 陈汉林, 等. 2008. 塔西南玄武岩年代学和地球化学特征及其对二叠纪地幔柱岩浆演化的制约[J]. 岩石学报, 24(5): 959~970.

李延河, 李金城, 宋鹤彬, 等. 2001a. 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.

李延河, 李金城, 宋鹤彬, 等. 2001b. 河北汉诺坝新生代玄武岩中幔源包体和高压巨晶的氦同位素地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 214~217.

马锦龙, 陶明信. 2003. 构造环境对幔源岩中稀有气体同位素比值的制约[J]. 地质地球化学, 31(4): 87~94.

马锦龙, 陶明信, 叶先仁. 2005. 山东沂沭地区幔源矿物中的流体和稀有气体地球化学研究[J]. 科学通报, 35(11): 1 019~1 027.

苏菲, 肖燕, 贺怀宇, 等. 2014. 山东昌乐-临朐玄武岩中单斜辉石巨晶及地幔捕虏体的 He-Ar 同位素地球化学[J]. 科学通报,

59: 374~386.

汤华云, 郑建平, 余淳梅. 2007. 华北东部新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体的流体及稀有气体组成研究[J]. 岩石学报, 23(6): 1 531~1 542.

陶士振, 刘德良, 朱文锦, 等. 2001. 中国东部幔源气体同位素地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 25(4): 412~419.

徐胜, 刘丛强. 1997. 中国东部地幔包体的氦同位素组成及其地幔地球化学演化意义[J]. 科学通报, 42(11): 1 990~1 993.

徐胜, 刘丛强. 2002. 我国东北部幔源包体中稀有气体丰度和同位素组成[J]. 科学通报, 47(2): 141~146.

杨树峰, 陈汉林, 厉子龙, 等. 2014. 塔里木早二叠大火成岩省[J]. 中国科学: 地球科学, 44: 187~199.

余星. 2009. 塔里木早二叠世大火成岩省的岩浆演化与深部地质作用[D]. 浙江大学.

曾亮, 成志雁, 也尔哈那提·黑扎提, 等. 2013. 山东地区新生代不同类型幔源样品中稀有气体同位素组成与成因[J]. 地质论评, 50(4): 677~686.

邹思远, 厉子龙, 任钟元, 等. 2013. 塔里木柯坪地区二叠系沉积岩碎屑锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征及其对塔里木块体地质演化的限定[J]. 岩石学报, 29(10): 3 369~3 388.