

# 稀有气体同位素地球化学研究的某些进展

武丽艳<sup>1,2</sup>, 胡瑞忠<sup>1</sup>, 毕献武<sup>1</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039

**摘 要:** 稀有气体的化学惰性使其在示踪成矿流体方面具有明显的优越性, 其与碳、氢、氧、硫、锶、钕、铅同位素方法, 以及卤素方法等结合使用, 不但可以避免单一方法的片面性, 还可以相互补充, 相互印证, 更好地示踪成矿流体的来源与演化, 进而探讨矿床的成矿机制。本文归纳了近年来稀有气体同位素与其他同位素体系联合应用的研究进展, 及其存在的问题和发展趋势。

**关键词:** 稀有气体同位素; 碳、氢、氧、硫同位素; 锶、钕、铅同位素; 卤素; 成矿流体

**中图分类号:** P593 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2007)01-0088-06

## Some Advances in the Research on Noble Gas Isotopic Geochemistry

WU Li-yan<sup>1,2</sup>, HU Rui-zhong<sup>1</sup>, BI Xian-wu<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract:** Because of the chemical inertness of noble gases (He, Ne, Ar, Kr and Xe), their isotopic geochemistry has distinct advantages on tracing the source of ore-forming fluids in comparison with other isotopic systems. The integrated application of noble gas isotopic geochemistry and other isotopic geochemistry (such as C, H, O, S, Sr, Nb, Pb and halogen elements) has special theoretical and practical significance for tracing the source and evolution of ore-forming fluids and for further discussing ore-forming mechanism of ore deposits. This paper has summarized some advances, existing problems and developing tendency on the geochemical research by integrated application of noble gas isotopes and other isotopic methods.

**Key words:** noble gas isotopes; C, H, O, S isotopes; Sr, Nd, Pb isotopes; halogens; ore-forming fluids

随着分析测试技术的提高, 稀有气体同位素越来越受到关注, 广泛应用于地学研究的各个领域, 特别是对地球的形成和演化、岩石和矿床成因, 以及油气的成因研究, 稀有气体同位素与其他同位素相结合的示踪方法不断完善, 并在示踪流体来源、分析对比构造环境及解决矿床成因<sup>[1]</sup>等方面取得不少成果。

## 1 稀有气体同位素方法

稀有气体在地球各圈层具有特征的同位素组成, 是各种地质作用和地球化学过程理想的示踪

剂<sup>[1~4]</sup>。近年来, 稀有气体同位素地球化学研究中最令人瞩目的进展之一, 是示踪地球内部流体的来源、运移机制和演化历史, 研究对象包括各种现代地热流体、天然气和成矿古流体。

稀有气体尤其是氦和氩的同位素组成在地壳与地幔中差异极大, 因而是壳—幔相互作用过程极灵敏的示踪剂。早在上世纪 60 年代便已广泛应用于现代地质流体的源区及其水—岩反应过程的研究, 如 Kennedy 等<sup>[5]</sup>对美国内华达州的热泉、喷气孔(天然 C<sub>2</sub>O 气藏)和井水中稀有气体丰度及其组成的研究。

收稿日期: 2006-04-21 收到, 07-27 改回

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-125)资助; 中国科学院“百人计划”项目资助

第一作者简介: 武丽艳(1981—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 矿床地球化学专业。E-mail: wuliyan04@mails.ucas.ac.cn.

通讯作者: 胡瑞忠。E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn.

自 Simmons 等<sup>[6]</sup>首次通过流体包裹体的氦同位素组成研究了秘鲁两个热液矿床的成因以来,氦、氩同位素对成矿古流体的示踪研究引起了矿床地质学家的广泛重视。Stuart 等<sup>[7]</sup>对韩国 Dae Hwa 钨钼矿床的氦、氩同位素研究发现,从蚀变带中心到边缘, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  和  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  逐渐降低,反映了大气降水与岩浆流体混合作用的加强。Turner 等<sup>[8]</sup>研究了东太平洋海隆  $21^\circ\text{N}$  海底硫化物中流体包裹体的氦同位素和  $^3\text{He}/\text{热比值}$ ,发现成矿流体的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  约为  $7\sim 8\text{ Ra}$ ,与上地幔的值基本一致。Burnard 等<sup>[9]</sup>对云南哀牢山金矿带中金矿床的氦、氩同位素研究表明,大坪金矿、墨江金矿和镇沅金矿的成矿流体是地幔来源的岩浆流体与另外两种类似现代地下水的低温流体混合作用的结果。

我国利用氦、氩同位素示踪现代地壳流体和成矿流体的研究也取得了显著的成果。如胡瑞忠等<sup>[10-15]</sup>对哀牢山-金沙江富碱侵入岩带金铜矿床、哀牢山金矿带金矿床、金顶超大型铅-锌矿床的氦、氩同位素研究表明,金顶超大型铅-锌矿床成矿流体中的稀有气体为地壳成因,而其余矿床成矿流体中有大量幔源组分的加入。毛景文等<sup>[16-18]</sup>研究了四川大水沟碲矿床、河北东坪碲-金矿床和湖南万古金矿床成矿流体的稀有气体同位素。一些学者<sup>[19-21]</sup>研究了冲绳海槽块状硫化物以及大西洋中脊 TAG 热液区硫化物中流体包裹体的氦、氩和氩同位素组成,指出两地区热液硫化物中流体包裹体的稀有气体是地幔和海水混合的产物;流体包裹体中的氦主要来自上地幔,氩和氩则主要来自海水。大厂锡矿氦、氩同位素组成的研究<sup>[22]</sup>表明,铜坑-长坡矿床不同形态矿体的氦、氩同位素组成基本一致,成矿流体具同源性,并有明显的地幔流体混入;茶山锑矿则表现出岩浆流体与大气降水的混合特征。

此外,不少学者利用稀有气体同位素研究成矿古流体的性质和来源,并取得了许多重要成果<sup>[23-30]</sup>。对华南下寒武统具代表性的黑色岩系中黄铁矿流体包裹体的氦、氩同位素组成研究发现,成矿流体主要由建造水(盆地热卤水)和饱和大气水(海水)组成,基本不含地幔流体或深源岩浆水。成矿过程可能是盆地中的建造水由于上覆沉积物的压力,顺层侧向迁移,并沿断裂上升与海水混合而成。

## 2 稀有气体与其他同位素体系的联合应用

一般来说,单一体系难免有片面性,多元结合则可互相印证、互相补充,更有助于流体成因的探索。

近年来,一些学者尝试用碳、氢、氧、硫、锶、钨、铅、氮等同位素与稀有气体同位素联合应用于成矿流体来源的研究,并已取得一定的进展。

### 2.1 稀有气体与碳、氢、氧、硫同位素

碳、氢、氧、硫同位素是判断流体或熔体来源最常用的方法,但在投影图上不同来源流体或熔体间常有重合,造成来源的多解性,而稀有气体示踪源区有独特的优越性。因此,稀有气体与碳、氢、氧、硫同位素的结合,可合理解释单一体系无法阐明的现象,多用于追溯岩浆和流体源区。南美小安的列斯群岛岛弧环境热卤水<sup>[32]</sup>的氢、氧同位素结果显示,其水来自大气降水,而氦同位素 ( $2.2\text{ Ra} < ^3\text{He}/^4\text{He} < 8.6\text{ Ra}$ )、碳同位素 ( $-20\text{‰} < \delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} < 0.5\text{‰}$ )显示,氦和  $\text{CO}_2$  是地壳流体和地幔流体的混合物<sup>[32]</sup>。胡瑞忠等<sup>[10,11]</sup>通过氦、氩同位素研究认为马厂箐斑岩型铜矿床成矿流体为贫硫和碳的大气成因低温地下水与富硫和碳的地幔高温岩浆流体两个端员的混合物。此外,对韩国 Dae Hwa 钨钼矿床和冰岛某地火山岩的氦、氩和  $\delta^{18}\text{O}$  研究<sup>[7,33]</sup>表明,岩浆流体不断被大气降水影响的过程。而新疆阿哈奇布隆石英重晶石脉型金矿矿石中黄铁矿的氦、氩和硫同位素的研究结果<sup>[34]</sup>指出,成矿流体主要来源于地壳。

稀有气体与碳同位素的结合,可以解释复杂油气藏的成因。匈牙利 Pannonian 盆地的天然气田氦、氩、氩及碳同位素的变化特征<sup>[35]</sup>表明,2%~5%的氦来自幔源,氩则有大气、地壳甚至地幔的贡献,而  $\text{CH}_4$  则为生物成因壳源气。我国学者<sup>[26,36]</sup>对国内多个气田稀有气体同位素的研究也均取得了良好的效果。

火山地震活动会导致稀有气体与碳同位素的同步变化,可以用来判断地震活动的特征。美国亚利桑那州的朗瓦利(Long Vally)火山口地震排出的气体中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 及  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  变化均表明,地震过程中有幔源气体释出,该地区地震系深达地幔的断裂活动所致<sup>[37]</sup>。

### 2.2 稀有气体与锶、钨、铅同位素体系

锶、钨、铅同位素对示踪火成岩成因已相对成熟,主要用于追溯岩浆起源及其演化。锶、钨、铅体系与稀有气体结合主要应用于岩浆源区的综合辨识上,两种体系的结果可以互相印证和补充<sup>[29]</sup>。

Marty 等<sup>[39]</sup>发现塔朱拉(Tadjourah)峡谷大洋玄武岩有较高且相对均一的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 同位素组成(14~15Ra),含较少放射成因  $\text{Sr}$  ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7034$ ),海拔较高地区的样品中, $^3\text{He}/^4\text{He}$  较低

(7.0~14.5 Ra), 含较少放射成因 Sr( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7034 \sim 0.7037$ ),  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值与大气相近。结合铈-钕-铅和氦-氩同位素数据, 认为这种玄武岩可能是地幔羽物质、放射成因组分和大气组分的混合物。

Farley<sup>[40]</sup>从物质运移角度, 利用氦、铈、钕、铅同位素结果提出了 Somoan 地区火山岩的形成模式: 高  $^3\text{He}/^4\text{He}$  地幔羽物质间歇性上升, 在上地幔或岩石圈与地壳再循环物质相遇, 最终以二元混合物形式喷出地表形成火山岩; 或者俯冲作用将壳源物质带入下地幔的 PHEM 库, 形成具源区混合特征的岩浆, 喷出形成火山岩。

Hanan 等<sup>[41]</sup>则通过 MORB 样品同位素变化趋势定义了 C 端员(COMMON 组分), 这个端员具适中的 Sr(0.7030~0.7040)、Nd(4~6)、Pb(19.2~19.8)同位素值, 高于或低于 MORB 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , 即第五端员。第五端员已被越来越多的研究者所接受。

### 2.3 稀有气体与卤素元素示踪体系

流体包裹体中挥发分的含量与比值可区分含盐份的流体和示踪流体的来源。而氦、氩同位素只能提供成矿流体源区的信息, 其对成矿流体的盐份来源却无能为力。因此, 流体中卤素元素的一些特征值(如 Br/Cl 值和 I/Cl), 可以为氦、氩同位素示踪流体来源和水-岩反应提供佐证<sup>[39]</sup>。

Kendrick 等<sup>[42]</sup>认为, Br/Cl 值和 I/Cl 值可有效区分原始岩浆水的成分与海水和沉积建造水的成分。研究表明, 沉积建造水中的 Cl 含量最高, Br 次之, 且 Cl、Br 和 F 可能受同一地质因素的制约, 而 I 则在海底环境中优先富集在有机质中; 相对海水和蒸发岩而言, 油源岩有较高的 I/Cl 值和 I/Br 值<sup>[43]</sup>。流体包裹体中氦、氩同位素和 Cl、Br、I 可以有效示踪地幔流体参与成矿的过程及其背景, 有助于对流体热场和运移轨迹的深入研究<sup>[38]</sup>。

研究发现, 加拿大金刚石流体包裹体的 Br/Cl 值和 I/Cl 值较高, 且变化范围大, 而非洲金刚石流体包裹体中的 Br/Cl 值和 I/Cl 值较低, 变化范围较窄<sup>[44]</sup>。可认为地幔也存在挥发分的分馏作用。加拿大金刚石流体包裹体中 Br/Cl 值与含氯矿物的结晶有关。

### 2.4 稀有气体与 N<sub>2</sub> 体系

Giggenbach<sup>[45~47]</sup>认为岩浆流体、地壳流体和大气降水流体在 N<sub>2</sub>-Ar-He 三角图解中有各自独特的区域。因此 N<sub>2</sub>、Ar、He 等微量气体间的比值可以用来确定流体来源。在此基础上, Norman<sup>[48, 49]</sup>认为

结合其他地质条件, 流体包裹体中 N<sub>2</sub>-Ar-He 组成可以示踪古流体系统中流体的混合作用。

孙晓明等<sup>[50]</sup>利用流体包裹体 N<sub>2</sub>-Ar-He 示踪方法, 指出广东长坑金-银矿床和嵩溪银-锑矿床成矿流体主要来源于建造水或沉积热卤水, 而不是先前认为的大气降水来源、岩浆流体来源或海底热卤水来源。

Moore 等<sup>[51]</sup>对马达加斯加西北的热塞浅滩(Geyser)地区不同类型流体(幔源流体、壳源气体、大气流体、沸腾流体等)的稀有气体与 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 等综合研究显示, 不同类型流体的 N<sub>2</sub>/Ar 值、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  值明显不同, 可以作为判断其来源的指标。

此外, 稀有气体与  $\delta^{15}\text{N}$  值的变化可以有效地阐明与大气及地壳再循环组分相关的问题, 很好地弥补稀有气体研究体系的不足。澳大利亚东部幔源包体的 He、Ar、N<sub>2</sub> 研究发现,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值 ( $10.1 \times 10^{-6} \pm 0.2 \times 10^{-6}$ ) 非常均一, 具大陆地幔源区特征而无混合源区迹象; 但这些样品的  $\delta^{15}\text{N}$  值变化范围较大 (-6.0‰ ~ 2.0‰), 且  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 384 \sim 3277$ <sup>[52]</sup>。计算结果表明, 这些幔源包体中有大约 30%~40% 的沉积再循环组分。在美国西部圣卡洛斯(San Carlos)的超镁铁包体<sup>[53]</sup>和夏威夷地幔包体<sup>[54]</sup>中也发现了再循环组分的加入。

### 2.5 $^3\text{He}$ /热研究

$^3\text{He}$ /热或  $^4\text{He}$ /热最早用于现代海底热液系统的研究, 目前还处于起步阶段。大陆地区现代地下水和热液流体中幔源  $^3\text{He}$  的发现证明幔源挥发分和热量可以穿透厚的地壳, 到达有利的成矿环境<sup>[32]</sup>。而流体包裹体中  $^3\text{He}$ /热的研究可有效地示踪大规模成矿作用过程中流体-热场的运移轨迹。即使是幔源流体与其他流体的混合流体,  $^3\text{He}$ /热也可以发挥显著的效果, 提供预测大型矿集区的依据<sup>[38]</sup>。

Turner 等<sup>[8]</sup>研究了东太平洋海隆 21°N 硫化物流体包裹体中的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值 ( $7.73 \pm 2.2$  Ra) 和  $^3\text{He}$ /热值 ( $1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \text{ STP/J}$ ), 发现与现代喷口流体的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值和  $^3\text{He}$ /热值基本一致, 因此认为这两个值可用于地壳古成矿流体系统的研究。

Burnard 等<sup>[9]</sup>对云南哀牢山金矿带几个金矿的研究表明, 大坪金矿的  $^3\text{He}$ /热值 ( $0.5 \times 10^{-12} \sim 30 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ STP/J}$ ) 与陆上冰岛热液系统的  $^3\text{He}$ /热值 ( $0.001 \times 10^{-12} \sim 15 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ STP/J}$ ) 基本一致, 大大高于墨江金矿和镇沅金矿的  $^3\text{He}$ /热值 ( $0.1 \times 10^{-12} \sim 0.8 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ STP/J}$ )。这三个金矿床  $^3\text{He}$ /热值差异的原因在于它们形成于不同的流

体热运移场:大坪金矿与岩浆流体的直接注入有关,而墨江金矿和镇沅金矿可能是岩浆流体与其他流体混合作用的结果<sup>[9]</sup>。

### 3 存在问题

稀有气体同位素与其他同位素的综合研究和应用,目前仍处于起步阶段。对大气、地壳和上、下地幔等不同来源物质的 He、Ar 同位素组成已有较清晰的认识,而对 Ne、Kr、Xe 在地球中的作用和意义的认识尚有分歧。稀有气体同位素与其他同位素的综合应用也有局限性,如在 NAH 图上,尚未确定变质水的范围<sup>[50]</sup>;在解决成矿流体来源时,一般采用两种流体混合的简单的二元混合模式,而实际情况可能是三种、四种或者更多种流体参与的结果。因此,应确切界定不同源区的稀有气体和其他元素同位素的组成范围,建立不同源区流体和稀有气体的比值指标,以更合理的模式解决成矿流体来源问题。

#### 参考文献 (References):

- [1] 马锦龙,陶明信. 稀有气体同位素地球化学研究进展[J]. 地球学报, 2002, 23(5): 471-476.  
Ma Jinlong, Tao Mingxin. The advances in the research of noble gas isotopic geochemistry[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(5): 471-476. (in Chinese)
- [2] 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 451.  
Wang Xianbin. Noble gas isotopic geochemistry and cosmochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989. 451. (in Chinese)
- [3] 傅卫东. 稀有气体同位素地球化学应用前景[J]. 福建地质, 2006, (2): 90-96.  
Fu Weidong. Application prospects of the noble gas isotope on geochemistry[J]. Fujian Geology, 2006, (2): 90-96. (in Chinese)
- [4] 李兆丽,胡瑞忠,彭建堂,毕献武,李晓敏. 稀有气体同位素示踪成矿古流体研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 57-63.  
Li Zhaoli, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, Bi Xianwu, Li Xiaomin. Advances in tracing the ore-forming fluids using rare gas isotopes[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 57-63. (in Chinese)
- [5] Kennedy B M, Soest M C. A helium isotope perspective on the Dixie Valley, Nevada, hydrothermal system[J]. Geothermics, 2006, 35: 26-43.
- [6] Simmons S F, Sawkins F J, Schlutter D J. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits[J]. Nature, 1987, 329: 429-432.
- [7] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, Turner G. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralization, South Korea[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, 59(22): 4663-4671.
- [8] Turner G, Stuart F. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulphides from the ocean floor[J]. Nature, 1992, 357 (18): 581-583.
- [9] Burnard P G, Hu Ruizhong, Turner G, Bi Xianwu. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, 63(10): 1595-1604.
- [10] 胡瑞忠,毕献武,Turner G, Burnard P G. 马厂箐铜矿床黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素体系[J]. 中国科学(D辑), 1997, 27(6): 503-508.  
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Turner G, Burnard P G. Helium and argon isotope systematics of fluid inclusions in pyrites from the Machangqing copper deposit[J]. Science in China (series D), 1997, 27(6): 503-508. (in Chinese)
- [11] 胡瑞忠,毕献武,邵树勋,Turner G, Burnard P G. 云南马厂箐铜矿床氦同位素组成研究[J]. 科学通报, 1997, 42(17): 1542-1545.  
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Shao Shuxun, Turner G, Burnard P G. Helium isotopic compositions in the Machangqing copper deposit Yunnan Province[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(17): 1542-1545. (in Chinese)
- [12] 胡瑞忠,毕献武. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(4): 321-330.  
Hu Ruizhong, Bi Xianwu. Helium and argon isotope geochemistry of the ore-forming fluid for gold deposits in Ailaoshan metallogenic belt[J]. Science in China(series D), 1999, 29(4): 321-330. (in Chinese)
- [13] 胡瑞忠,钟宏,叶造军,毕献武. 金顶超大型铅-锌矿床氦、氩同位素地球化学[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(3): 208-213.  
Hu Ruizhong, Zhong Hong, Ye Zaojun, Bi Xianwu. Helium and argon isotope geochemistry of the Jinding super-large Pb-Zn deposit[J]. Science in China(series D), 1998, 28(3): 208-213. (in Chinese)
- [14] Hu Ruizhong, Burnard P G, Turner G, Bi Xianwu. Helium and argon systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in west Yunnan Province, China[J]. Chem. Geol., 1998, 146: 55-63.
- [15] Hu Ruizhong, Burnard P G, Bi Xianwu, Zhou Guofu, Peng Jiantang, Su Wenchao, Wu Kaixing. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China[J]. Chem. Geol., 2004, 203: 305-317.
- [16] 毛景文,魏家秀. 大水沟碲矿床流体包裹体的 He、Ar 同位素组成及其示踪成矿流体的来源[J]. 地球学报, 2000, 21(1): 58-61.  
Mao Jingwen, Wei Jiaxiu. Helium and Argon isotopic components of fluid inclusions and tracing to the source of metallogenic fluids in the Dashuigou tellurium deposit of Sichuan Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2000, 21(1): 58-61.

- (in Chinese)
- [17] 毛景文, 李荫清. 河北省东坪碲化物金矿床流体包裹体研究: 地幔流体与成矿关系[J]. 矿床地质, 2001, 20(1): 23-36.  
Mao Jingwen, Li Yinqing. Fluid inclusions of the Dongping Au-Te deposit in Hebei Province, China: Involvement of mantle fluid in metallogenesis[J]. Mineral Deposits, 2001, 20(1): 23-36. (in Chinese)
- [18] 毛景文, 李延河, 李红艳, 王登红, 宋鹤彬. 湖南万古金矿床地幔流体成矿的氦同位素证明[J]. 地质论评, 1997, 43(6): 646-649.  
Mao Jingwen, Li Yanhe, Li Hongyan, Wang Denghong, Song Hebin. Helium isotopic evidence on metalgenesis of mantle fluids in the Wangu gold deposit, Hunan Province[J]. Geological Review, 1997, 43(6): 646-649. (in Chinese)
- [19] 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎. 大西洋中脊 TAG 热液区硫化物中流体包裹体的 He-Ne-Ar 同位素组成[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(6): 628-633.  
Zeng Zhigang, Qin Yunshan, Cui Shikui. He-Ne-Ar isotopic compositions of the fluid inclusions in sulfides from the TAG hydrothermal region, Atlantic[J]. Science in China (series D), 2000, 30(6): 628-633. (in Chinese)
- [20] Zeng Zhigang, Qin Yunshan, Zhai Shikui. Helium, neon and argon isotope compositions of fluid inclusions in massive sulfide from the Jade hydrothermal field, the Okinawa Trough[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 23(4): 655-661.
- [21] 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎. 冲绳海槽 Jade 热液区块状硫化物中流体包裹体的氦、氖、氩同位素组成[J]. 海洋学报, 2003, 25(4): 36-42.  
Zeng Zhigang, Qin Yunshan, Zhai Shikui. He, Ne and Ar isotope compositions of fluid inclusions in massive sulfides from the Jade hydrothermal field, Okinawa Trough[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(4): 36-42. (in Chinese)
- [22] 蔡明海, 毛景文, 梁婷, 吴付新. 广西大厂锡多金属矿床氦、氩同位素特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2004, 23(2): 225-231.  
Cai Minghai, Mao Jingwen, Liang Ting, Wu Fuxin. Helium and Argon isotopic components of fluid inclusions in Dachang tin-polymetallic deposit and their geological implications[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(2): 225-231. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王登红, 余金杰, 杨建民, 闫升好, 薛春纪, 陈毓川. 中国新生代成矿作用的情性气体同位素研究与动力学背景[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 179-186.  
Wang Denghong, Yu Jinjie, Yang Jianmin, Yan Shenghao, Xue Chunji, Chen Yuchuan. Inert gas isotopic studies and dynamic background of Cenozoic ore-forming process in China[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(2): 179-186. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 阿尔泰造山带岩石和矿石的氦同位素研究[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(2): 110-115.  
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang. The Characteristics of fluid during metamorphic peak of the Archean Khondalite series from Xinghe district, Inner Mongolia[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001, 31(2): 110-115. (in Chinese with English abstract)
- [25] 薛春纪, 陈毓川, 王登红, 杨建民, 杨伟光, 曾荣. 滇西北金顶和白秧坪矿床: 地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(4): 315-322.  
Xue Chunji, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Yang Jianmin, Yang Weiguang, Zeng Rong. Jinding and Baiyangping deposits in northwestern Yunnan: Geology and He, Ne, Xe isotopic compositions as well as metallogenic epoch[J]. Science in China (series D), 2003, 33(4): 315-322. (in Chinese)
- [26] 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 陶明信, 孙明良, 杜建国. 天然气中稀有气体地球化学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 237.  
Xu Yongchang, Shen Ping, Liu Wenhui, Tao Mingxin, Sun Mingliang, Du Jianguo. The study of noble gas geochemistry in natural gas[M]. Beijing: Science Press, 1998. 237. (in Chinese)
- [27] 赵葵东, 蒋少涌, 肖红权, 倪培. 大厂锡-多金属矿床成矿流体来源的 He 同位素证据[J]. 科学通报, 2002, 47(8): 632-635.  
Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Xiao Hongquan, Ni Pei. The Helium isotopic evidence for the ore-forming fluid source of the Dachang tin poly-metal deposit[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(8): 632-635. (in Chinese)
- [28] 张连昌, 沈远超, 李厚民, 曾庆栋, 李光明, 刘铁兵. 胶东地区金矿床流体包裹体的 He、Ar 同位素组成及成矿流体来源示踪[J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 559-565.  
Zhang Lianchang, Shen Yuanchao, Li Houmin, Zeng Qingdong, Li Guangming, Liu Tiebing. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of the ore-forming fluids for Jiaodong gold deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(4): 559-565. (in Chinese with English abstract)
- [29] 马锦龙, 陶明信. 幔源岩类中的稀有气体同位素与 Sr、Nd、Pb 同位素研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 69-74.  
Ma Jinlong, Tao Mingxin. A review on isotopes of noble gas and Sr, Nd, Pb for mantle-derived rocks[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(1): 69-74. (in Chinese with English abstract)
- [30] 马锦龙, 陶明信. 稀有气体与轻稳定同位素气体地球化学的应用研究[J]. 地质通报, 2004, 23(4): 329-335.  
Ma Jinlong, Tao Mingxin. Applied study of noble gas and light stable isotope gas geochemistry[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(4): 329-335. (in Chinese with English abstract)
- [31] 孙晓明, 王敏, 薛婷, 马名扬, 李延河. 华南下寒武统黑色岩系铂多金属矿中黄铁矿流体包裹体的 He-Ar 同位素体系[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 661-666.  
Sun Xiaoming, Wang Min, Xue Ting, Ma Mingyang, Li Yanhe. He-Ar isotopic systematics of fluid inclusions in pyri-

- tes from PGE-polymetallic deposits in Lower Cambrian [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(4): 661—666. (in Chinese)
- [32] Pedroni A, Hammersc Hmidi K, Friedrichsen H. He, Ne, Ar and C isotope systematics of geothermal emanations in the Lesser Antilles Islands Arc [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, 63(3/4): 515—532.
- [33] Condomines M, Gronvold K, Hooker P J, Muehlenbachs K, ONions R K, Oskarsson N, Oxburgh E R. Helium, oxygen, strontium and neodymium isotopic relationships in Icelandic volcanics [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1983, 66: 125—136.
- [34] 杨富全, 王义天, 毛景文, 杜红星. 新疆阿合奇县布隆石英重晶石脉型金矿地质特征和硫、氮、氩同位素研究 [J]. 地质论评, 2004, 50(1): 87—98.  
Yang Fuquan, Wang Yitian, Mao Jingwen, Du Hongxing. Geological features and S, He and Ar isotopic studies of Bulong quartz-barite vein-type gold deposit in Akqi County, Xinjiang [J]. Geological Review, 2004, 50(1): 87—98. (in Chinese with English abstract)
- [35] Ballentine C J, ONions R K. The nature of mantle neon contributions to Vienna Basin hydrocarbon reservoirs [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1991, 113: 553—567.
- [36] 戴金星, 宋岩, 戴春林, 陈安福, 孙明良, 廖永胜. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.  
Dai Jinxing, Song Yan, Dai Chunlin, Chen Anfu, Sun Mingliang, Liao Yongsheng. Conditions governing the formations of abiogenic gas and gas bools in eastern China [M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)
- [37] Sorey M L, Kennedy B M, Evans W C. Helium isotope and gas discharge variations associated with crustal unrest in long Valley Caldera, California [J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 1993, 98(B9): 15871—15899.
- [38] 李晓峰, 毛景文, 王义天, 王登红. 惰性气体同位素和卤素示踪成矿流体来源 [J]. 地质论评, 2003, 49(5): 513—529.  
Li Xiaofeng, Mao Jingwen, Wang Yitian, Wang Denghong. Evidence of noble gas isotopes and halogen for the origin of ore-forming fluids [J]. Geological Review, 2003, 49(5): 513—529. (in Chinese with English abstract)
- [39] Marty B, Appora I, Barrat J A, Deniel C, Vellutini P, Vidal Ph. He, Ar, Sr, Nd and Pb isotopes in volcanic rocks from Afar: Evidence for a primitive mantle component constraint on magmatic sources [J]. Geochemical. Journal., 1993, 27: 219—221.
- [40] Farley K A, Natland J H, Craig H. Binary mixing of enrich and undegassed (primitive?) mantle components (He, Sr, Nd, Pb) in Samoan lavas [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1992, III: 183—199.
- [41] Hanan B B, Graham D W. Lead and helium isotope evidence from oceanic basalts for a common deep source of mantle plumes [J]. Science, 1996, 272: 991—995.
- [42] Kendrick M A, Burgess R, Patrick R A, Turner G. Fluid inclusion noble gas and galgen evidence on the origin of Cu-porphry mineralizing fluids [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2001, 65(16): 2651—2668.
- [43] Worden R. Controls on halogen concentrations in sedimentary formation waters [J]. Mineralogical Magazine, 1996, 60: 259—274.
- [44] Johnson L H, Burgess R, Turner G, Minedge H J, Harris J W. Noble gas and halogen geochemistry of mantle fluids comparison of African and Canadian diamonds [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2000, 64(4): 717—732.
- [45] Giggenbach W F. The use of gas chemistry in delineating the origin of fluid discharges over the Taupo Volcanic: A review [R]. Proc. Intel. Volcanol. Congress, New Zealand, 1986, 5: 47—50.
- [46] Giggenbach W F, Matsuo S. Evaluation of results from Second and Third IAVCEI Field Workshops on Volcanic Gases, Mt. Usu, Japan, and White Island, New Zealand [J]. Appl. Geochem., 1991, 6: 125—141.
- [47] Giggenbach W F, Glover R B. Tectonic and major processes governing the chemistry of water and gas discharges from the Rotorna geothermal field, New Zealand [J]. Geothermics, 1992, 21: 121—141.
- [48] Norman D I, Sawkins F J. Analysis of gases in fluid inclusions by mass spectrometer [J]. Chem. Geol., 1987, 61: 1—10.
- [49] Norman D I, Musgrave J. N<sub>2</sub>-Ar-He compositions in fluid inclusions: indicators of fluid source [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, 58: 1119—1131.
- [50] 孙晓明, Norman D I, 孙凯, 陈敬德, 陈炳辉. 一种新的成矿流体示踪法——流体包裹体 N<sub>2</sub>-Ar-He 示踪体系 [J]. 地质论评, 2000, 46(1): 99—104.  
Sun Xiaoming, Norman D I, Sun Kai, Chen Jingde, Chen Binghui. A new indicator of ore-forming fluids source: N<sub>2</sub>-Ar-He compositions in fluid inclusions [J]. Geological Review, 2000, 46(1): 99—104. (in Chinese with English abstract)
- [51] Moore J N, Norman D I, Kennedy B M. Fluid inclusion gas compositions from an active magmatic-hydrothermal system: a case study of the Geysers geothermal field, USA [J]. Chem. Geol., 2001, 173: 3—30.
- [52] Matsumoto T, Pinti D L, Matsuda J I, *et al.* Recycled noble gas and nitrogen in the subcontinental lithospheric mantle: Implications from N-He-Ar in fluid inclusions of SE Australian xenolith [J]. Geochemical Journal, 2002, 36: 209—217.
- [53] Mohapatra R K, Murty S V S. Search for the mantle nitrogen in the ultramafic xenoliths from San Carlos, Arizona [J]. Chem. Geol., 2000, 164: 305—320.
- [54] Rocholl A, Heusser E, Kirsten T, Oehm J, Richter H. A noble gas profile across a Hawaiian mantle xenolith: Coexisting accidental and cognate noble gases derived from the lithospheric and asthenospheric mantle beneath Oahu [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1996, 60: 4773—4783.