

文章编号:1001-8166(2005)01-0057-07

稀有气体同位素示踪成矿古流体研究进展*

李兆丽^{1,2}, 胡瑞忠¹, 彭建堂¹, 毕献武¹, 李晓敏¹

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点研究实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 稀有气体(特别是 He、Ar)是一种研究成矿古流体来源的灵敏示踪剂。地球不同圈层的稀有气体同位素具有不同的特征同位素比值。测试样品流体包裹体中的稀有气体同位素值,从测试值中排除掉包裹体形成后各种后生过程对流体初始同位素组成的影响。把得到的结果与前人研究总结的特征值进行比较分析,可以示踪成矿流体来源,从而探讨各种矿床的成矿机制与成矿作用。归纳了近年来用稀有气体同位素来示踪成矿流体的研究进展,概括了其在不同类型矿床中的应用现状,并指出当前该方法存在的问题及发展趋势。

关键词: 稀有气体同位素;成矿流体;流体包裹体

中图分类号: P59 **文献标识码:** A

稀有气体同位素地球化学示踪是一种准确、灵敏的方法。稀有气体同位素在示踪地壳现代流体、陨石等方面已得到了广泛的应用,但在示踪成矿古流体(后称成矿流体)上,国内外用此方法研究过的矿床及矿种都有限。然而,稀有气体同位素在示踪成矿古流体方面却具有明显的优势和非常重要的意义。其一,因成矿流体中不同来源的稀有气体同位素比值相差较大,使之相比其它同位素示踪方法具有更高的灵敏度。如地幔与地壳来源的³He/⁴He 比值相差大约 1 000 倍^[1]。因此,只要成矿流体中有少量地幔流体的加入,就会使³He/⁴He 比值发生很大的变化。其二,通过对稀有气体同位素示踪成矿流体的研究,不仅可以直接证明流体中稀有气体的不同来源和运移模式^[2],而且可以确定含矿热液中的水、热和成矿元素的来源,进而深刻揭示含矿热液的形成机制和矿床的时空分布规律^[3]。这对于找矿及开采都具有现实指导意义。其三,环境和全球变化基础研究的数据(如大气圈演化^[4]、海水循

环^[5])、勘探各种矿床的信息,都可通过稀有气体同位素示踪成矿流体研究来获取。总之,稀有气体同位素地球化学以其优越性已被广泛地应用于地学研究的各个领域,扮演着地球化学过程示踪剂的重要角色,尤其对研究成矿流体的形成演化、成矿作用、成矿机制具有广泛的意义。

1 成矿流体示踪的基本原理

目前,用于成矿流体示踪的方法主要包括 S、C、O、H 同位素, Pb、Sr、Nd 同位素, 稀有气体同位素, 以及微量元素和稀土元素。用稀有气体同位素来示踪成矿流体,首先要清楚成矿流体中稀有气体的来源。Burnard 等^[6]认为成矿热液流体中的稀有气体可能来自大气饱和水(ASW)、地幔流体、大气 He 和 Ar 及地壳放射成因 4 种来源。由于大气 He 含量很低,不足以对地壳流体中 He 的丰度和同位素组成产生影响,但是无法区别流体中是否有大气 Ar 的混入^[6-9]。因保存于矿物中的原生流体包裹体的成分

收稿日期:2003-10-29;修回日期:2004-04-05.

* 基金项目:国家重点基础研究发展规划项目二级课题“扬子地块西缘大面积低温成矿系统”(编号:G1999043200);中国科学院知识创新工程重要方向项目“中国南方大陆岩石圈拉张及其成矿作用”(编号:KZCX3-SW-125)资助。

作者简介:李兆丽(1976-),女,山东平邑人,博士研究生,主要从事稀有气体地球化学、矿床地球化学和流体地球化学研究。

E-mail: lizhaoli3@tom.com

近似于矿床形成时成矿热液流体的组成,所以,通过对矿物原生流体包裹体均一温度(Th)、压力及组成成分等各种物理化学参数的测定,就可以了解成矿时的条件及环境,进而示踪成矿流体来源。但是,从成矿到现在,样品经历了一系列的地质作用变化。所以,样品流体包裹体中的稀有气体除了来自当时成矿的热液流体,还可能受后期扩散丢失、后生叠加及同位素分馏的影响。对于由扩散丢失造成的影响,因稀有气体在矿物晶格中扩散丢失的量与寄主矿物扩散系数的大小成正比。所以,选择合适的寄主矿物就可以减小包裹体形成后因扩散丢失造成的影响。研究表明,流体包裹体的寄主矿物是硫酸盐和硫化物时,包裹体内的稀有气体被捕获后没有明显的扩散丢失^[10,11]。硫化物中的黄铁矿因具有很低的 He 扩散系数,是保存 He、Ar 最理想的矿物^[10,12]。但对 He 而言,因 He 的扩散丢失对³He/

⁴He 比值的影响程度在测试误差范围内。所以,在通过包裹体中的 He 同位素来研究成矿流体时,一般不考虑扩散丢失的影响。对于由放射性衰变、核反应及宇宙作用过程造成的后生叠加影响,也可估计或排除。如由 U、Th、Pu、F 等原地放射性元素产生的同位素对初始同位素组成的影响可以根据寄主矿物中它们的含量及矿床年龄进行计算扣除。因宇宙 He 主要产生在地表 1.5 m 的范围内,并且在不到 100 年内这些圈闭的值就可以模糊掉^[13]。所以,对于采自较深地层的样品,可以排除宇宙 He 的存在。对于由同位素分馏造成的影响,研究表明稀有气体不同于其它稳定同位素,在包裹体捕获及提取过程中都不会产生明显的分馏。总之,通过各种方法排除掉包裹体形成后后期作用的影响,把得到的稀有气体同位素数据与已有的特征值(如表 1 所示)进行比较分析,就可以示踪成矿热液流体的来源。

表 1 地球各圈层的稀有气体同位素组成特征

Table 1 The isotopic compositions of the rare gas in each sphere of the Earth

圈层	³ He/ ⁴ He	²⁰ Ne/ ²² Ne	²¹ Ne/ ²² Ne	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	⁴ He/ ²⁰ Ne	⁴ He/ ⁴⁰ Ar	¹²⁹ Xe
大气	1.4×10^{-6} ^[14]	9.8 ^[15]	0.029 ^[15]	295.6 ^[14]	0.288 ^[21]	5.8×10^{-3} ^[14]	过剩 6.8% (相对陨石) ^[14]
地壳	$10^{-7} \sim 10^{-8}$ ^[14]	$0 \sim 0.3$ ^[15,21-24]	$0.1 \sim 0.47$ ^[15,21-24]	> 295.6 ^[14]	$n \times 10^8$ ^[14]	> 20 ^[14]	—
地幔	$10^{-5} \sim 10^{-8}$	$9.8 \sim 13.2$	$0.058 \sim 0.068$ ^[16-21]	—	—	—	—
上地幔	1.2×10^{-8} ^[14]	—	—	$\sim 10^4$ ^[14]	$> 10^4$ ^[14]	~ 2 ^[14]	—
下地幔	$(3 \sim 5) \times 10^{-5}$ ^[14]	—	—	~ 400 ^[14]	$> 10^4$ ^[14]	$> 10^4$ ^[14]	过剩 8% (相对空气) ^[14]
地核	3×10^{-4} ^[14]	$12 \sim 13$ ^[14]	0.03 ^[14]	10^{-4} ^[14]	—	—	—
太阳系 原始值	3×10^4 ^[14]	—	—	$\leq 1.4 \times 10^{-3}$ ^[14]	—	—	原始 ¹²⁹ Xe ^[14]

2 研究现状

Zartman 等^[25]20 世纪 60 年代初期用稀有气体同位素示踪地壳现代流体的来源及其水—岩相互作用历史,开拓了稀有气体地球化学最早的研究领域之一。70 年代中期以来,稀有气体同位素在示踪流体研究领域更是得到了广阔的发展与应用。但在示踪成矿古流体方面,80 年代末至 90 年代初以来,才逐渐被关注,并且在国内外逐步得到了广泛的开展与应用。对于目前国内外在稀有气体同位素示踪成矿流体方面取得的进展及得到的初步结论,以下按不同的矿床及矿种进行分类介绍。

(1) 铜矿。相比其它矿床,铜矿床的研究工作开展的较晚且目前被研究过的数目很少。对铜矿的研究工作,典型的是胡瑞忠等^[26,27]开展的对云南马

厂箐斑岩型铜矿床黄铁矿中流体包裹体的 He、Ar 同位素研究。测试结果为:³He/⁴He 值是 0.46 ~ 2.08 Ra (Ra 为大气的³He/⁴He 值,1 Ra = 1.4×10^{-6});⁴He 值是 $(1.5 \sim 11.4) \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$; ⁴⁰Ar 是 $(4.3 \sim 19.4) \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ 。结合对 C、S 同位素的分析,讨论认为马厂箐斑岩型铜矿床成矿流体为地壳大气成因的低温地下水与地幔高温岩浆两个端元流体的混合物。

(2) 金矿。目前通过稀有气体同位素示踪方法研究过的金矿床,成矿流体中都或多或少有幔源成分加入。如毛景文等^[28]对采自湖南万古金矿床含金石英脉及破碎板岩型矿石中的 4 个石英样品进行了 He 同位素测定。结果样品流体包裹体中³He/⁴He 值域为 $231 \times 10^{-6} \sim 1460 \times 10^{-6}$,³He 明显富集。根据矿床的控矿构造及前人的研究^[29,30],作者

认为万古金矿床成矿流体中有地幔流体的组分,并且这种富 ^3He 的成矿流体是由地幔岩石减压部分脱气造成动力学分馏而形成。继对湖南万古金矿床的研究之后,毛景文等^[31]又从河北省东坪碲化物金矿床1号和70号主矿脉采集了7件石英、2件燕山期钾长花岗岩样品进行了流体包裹体He、Ar同位素测试。结果显示矿脉中石英的R/Ra(R为样品实测的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,R/Ra为样品实测比值用大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值归一化后的数值,R/Ra $\ll 1$ 表示样品中无大气成分加入)比值较高(0.3~5.2),且 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比值远大于钾长花岗岩的。这在一定程度上反映出该矿床成矿过程也有地幔流体的参与。较之以前的研究,胡瑞忠等^[12]则主要从流体包裹体形成后一些后生过程对其初始稀有气体同位素组成的影响程度入手,研究了哀牢山金矿带镇沅、墨江和大坪3个金矿床中的He、Ar同位素组成。分析认为哀牢山金矿带的成矿流体是壳幔两端混合的结果。

因为对同一矿床的研究,有时可以从不同的研究对象、着重点得出不同的成矿观点。所以,金矿中是否有幔源组分至今仍然争议很大。如对争议较大的胶东地区金矿床成因问题,前人曾提出过各种不同的观点。针对这个问题,张连昌等^[32]对采自胶东地区4个代表性金矿床中的富金矿石,测试了矿石中黄铁矿流体包裹体的He、Ar同位素数据。结果 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.43~2.36R/Ra, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值变化较大(310~1148)。分析表明这4个金矿床的成矿流体中都有不同比例的地幔流体加入。因而,稀有气体同位素以其在示踪成矿流体方面的高灵敏性为研究这类矿床开拓了思路。

(3) 多金属矿床。对多种金属共生,都达到了开采价值的多金属矿床,研究工作在国外开展的较早。如Simmons等对采自秘鲁安第斯山脉Casapalca Ag-Pb-Zn-Cu矿床和Pasto Bueno W-贱金属矿床的样品进行了He同位素研究。测试对象是矿物内的流体包裹体,包裹体寄主矿物包括石英、闪锌矿、黝铜矿和萤石。测得结果为 $^3\text{He}/^4\text{He} = 2 \sim 3 \text{ Ra}$ ^[33]。研究认为成矿流体中He是幔源的,并且在矿化期间有较冷流体插入成矿热液中。较晚些的Stuart等^[34]对采自韩国Dae Hwa W-Mo矿床4个(B、C、D和E)不同矿区的白钨矿样品中黄铁矿流体包裹的He、Ne、Ar、Kr及Xe同位素组成进行研究。分析结果发现,从矿床中心到外围,白钨矿成矿流体中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ 及 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的比值逐渐降低(D

区He及Ar同位素比值都很高)。结合前人对该矿床 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 及流体包裹体均一化温度(Th)^[35]的研究,限定成矿岩浆热液的 $^3\text{He}/^4\text{He} = 1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$, $^3\text{He}/^{36}\text{Ar} > 0.01$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} > 1000$ 。上述结论结合Ne、Kr、Xe同位素的研究表明该矿床整个成矿过程是一个岩浆流体不断被大气水混合稀释的过程。

在国内,对此类矿床的研究,主要是胡瑞忠等对金顶超大型铅锌矿床的He、Ar同位素,薛春纪等对金顶和白秧坪矿床的He、Ar、Xe同位素及赵葵东等对大厂锡—多金属矿床He同位素组成的研究。前者测试对象是成矿阶段形成的黄铁矿中的流体包裹体,测试结果为 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} \approx 301.7 \sim 385.7$, $^3\text{He}/^4\text{He} \approx 0.03 \sim 0.06 \text{ Ra}$ ^[36]。分析表明成矿流体属于饱和空气的表生水。这与王登红等^[37]所给的He同位素资料及前人所给出的大量Pb同位素资料显示该矿床成矿流体有地幔物质参与的结论不一致。继胡瑞忠等的研究之后,薛春纪等^[38]又对金顶铅锌矿床及最近在其北侧发现的白秧坪大型Cu-Co-Ag矿床样品中流体包裹体的He、Ne和Xe同位素组成进行了研究。根据稀有气体同位素分析结果及Re-Os法和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法测定的成矿时代,作者认为壳幔流体混合是该矿床成矿的基本方式。针对存在争议的广西大厂锡—多金属块状硫化物矿床,赵葵东等^[39]对采自该矿床层状矿体与块状矿体的4件黄铁矿样品进行了流体包裹体的He同位素测定, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 测试值为1.7~2.4Ra,表明成矿流体中有幔源物质的混入。但也不是所有的这些多金属矿床都有幔源成分的加入,Stuart等^[40]对英国奔腾山脉北部与S型花岗岩有关的铅锌矿研究表明,成矿流体中就没有地幔成分的参与。

(4) 一些洋中脊热水沉积黄铁矿等。Corliss等^[41]1977年在加拉帕哥斯群岛的扩张中心(Galapagos Spreading Center)首次发现了活动热液喷口,相隔不久Lupton^[42]及Jenkins^[43]等测得该地区的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $8 \pm 1 \text{ Ra}$ 左右。这之后,沿洋中脊越来越多的热液活动区被发现。但从稀有气体同位素入手来研究洋中脊热水沉积物(特别是硫化物)的工作近几年才得到广泛的开展。

沿洋中脊发现的这些热液喷口,因其地理位置的特殊性,使我们的采样及其它相关研究工作存在一定的困难。针对这个问题,Turner等^[44]对东太平洋21°N现代喷口流体的与该地区沉积硫化物的He、Ar及Kr同位素组成进行了对比研究。结果表明,两者之间同位素组成极其相似,均以幔源为主。

因此,Turner 等认为可以通过古代洋底沉积物来代替喷口流体样品进行 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 及 $\text{He}/\text{热}$ 比值的研 究。该研究为我们提供了一个研究喷口流体,了解地幔及扩张中心的新途径,促进了稀有气体同位素的研究进展。继 Turner 之后,Baptiste 等对多次采集的东太平洋 13°N 的样品进行了 He 同位素研究。样品分为采自热液活动区和热液活动停止区,样品中的热液硫化物有黄铁矿、闪锌矿、白铁矿和黄铜矿等^[45]。经压碎法处理得到的硫化物流体包裹体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $6.85 \sim 8.10 \text{ Ra}^{[10]}$ 。这个结果与本区高温热液喷口流体的 He 同位素组成几乎没有区别。该说法与 Turner 的上述研究相一致。

1994 年,Stuart 等^[8]从更广的范围研究了一些洋中脊热水沉积物样品的 He 同位素组成。这些样品分别采自中大西洋洋脊的 TAG(26°N)和 Snake Pit(23°N)、东太平洋 21°N 及胡安·德富卡(Juan de Fuca)洋脊。结果显示 $21^\circ\text{N}^{[46]}$ 、TAG(26°N)和 Snake Pit(23°N)地区样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $7 \sim 8.1 \text{ Ra}$,与这些地区喷口流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值^[47-49]基本一致,而胡安·德富卡洋脊的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $4.4 \sim 6.9 \text{ Ra}$ 。分析认为 3 个洋中脊热液体系样品的 He 为幔源 He,胡安·德富卡洋脊的 He 为玄武岩来源的与放射性 He 的混合物。鉴于 Stuart 等当时对 TAG 热液区分析研究的样品较少,可能缺少代表性这个问题,曾志刚等^[50]又对采自该地区的 9 个硫化物样品的 He、Ne 和 Ar 同位素组成进行了研究。测得结果: $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $2.2 \sim 13.3 \text{ Ra}$,变化范围较大; $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比值为 $10.2 \sim 11.4$,高于大气值(9.8); $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值的 变化范围从 287 到 359,接近大气值(295.5)。讨论认为包裹体中的稀有气体是地幔和海水端元混合的产物,且其中的 He 主要来自上地幔,与 Stuart 等的研究基本一致。

(5) 其它矿床。除了对上述较典型的几种矿床的研究之外,近几年用稀有气体同位素示踪方法还讨论研究了其它一些矿床矿种的来源及成因,并提出了一些新的观点。如对四川大水沟这种罕见的高品位碲矿床,毛景文等^[51]选取了 2 个主要成矿阶段中的硫化物与白云母进行了 He 和 Ar 同位素测试。结果 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $0.2 \sim 2.8 \text{ R/Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比值变化较大($7 \sim 379$)。此数据与该矿床的 S、C、O、H 同位素资料^[52]都表明地幔物质参与了大水沟碲矿床的成矿过程。为了研究我国新疆阿尔泰造山带地幔脱气的特点及其对成岩成矿的影响,王登红等^[53]对采自该造山带的岩石、矿石样品进行了 Ar

同位素测定。结果 $\omega(^{36}\text{Ar})$ 变化于 $0.079 \times 10^{-9} \sim 17.50 \times 10^{-9} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ 。分析认为其中的矿床有幔源与壳源两种成因类型。

通过大范围的取样,王登红等^[37]对我国不同成矿带中的不同类型的新生代矿床进行了稀有气体同位素研究。结果为 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值变化于 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ 之间, ^{20}Ne 含量为 $0.02 \times 10^{-7} \sim 2.29 \times 10^{-7} \text{ cm}^3\text{STP/g}$, ^{40}Ar 含量为 $10^{-7} \sim 30 \times 10^{-7} \text{ cm}^3\text{STP/g}$, ^{36}Ar 含量为 $0.001 \times 10^{-7} \sim 3.698 \times 10^{-7} \text{ cm}^3\text{STP/g}$ 。在结合前人研究成果及本人研究实践的基础上,作者提出了壳幔相互作用对新生代成矿作用具有宏观制约意义的观点。

3 存在的问题及发展趋势

稀有气体同位素示踪方法虽然近几年发展较快,但由于受到与其相配套的技术相对落后及人们认识的局限性等问题的制约,目前仍然处于起步阶段。在示踪古成矿流体中的应用更是如此。首先,在技术方面还有待新的突破,如用于同位素化学参数监测的很多分析技术都还不完善,故我们至今对洋中脊喷口或热液区的流体组成随时间变化情况还知之甚少。并且,国内与国外技术水平相比还存在一定的差距。如虽然国内利用 MM5400 同位素质谱仪已经建立岩矿样品中 He、Ne、Ar、Kr 和 Xe 同位素组成的一次性全分析,但与国外先进水平相比,仍然存在测试精度低、灵敏度小等问题。其次,一些自身固有的客观因素也限制了它的发展。在稀有气体的 6 种同位素中,相对于 He、Ar,由于 Ne、Kr、Xe、Rn 含量的减少造成分离及测定的难度加大,所以对其研究的进展在过去相当长时间是缓慢的。特别是放射性的 Rn,因其含量极微而难以测定,目前研究极少^[54]。另外,由于成矿过程本身往往是相当复杂的、成矿物质往往是多来源的,如何准确、定量地判断不同来源的成矿物质,目前仍然是相当困难的。而且稀有气体是何时、以何种方法进入成矿流体?这方面的工作积累几乎还是空白,假如两者确是殊途同归,则稀有气体的同位素组成就失去示踪成矿流体来源的意义。

在稀有气体同位素示踪成矿古流体方面,随着研究的矿床矿种不断增加,新的问题也不断被发现和探讨。如王登红等^[37]通过大量的研究发现我国新生代成矿作用宏观上由壳幔相互作用制约。但从全球来看,至今用稀有气体同位素示踪法研究过的矿床矿种,基本上也都有幔源成分的参与。这从成

矿机理或研究方法上也许需要一个更概括贴切的说法来解释。

参考文献 (References):

- [1] Torgersen T, Jenkins W J. Helium isotopes in geothermal systems: Iceland, The Geysers, Raft River and Steamboat Springs [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46:739-748.
- [2] Nions R K, Oxburgh E R. Helium, volatile fluxes and the development of continental crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90:331-347.
- [3] Li Yue, Wang Huimin. Development of ionization techniques in mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutical*, 1998, 29(11): 524-529. [李悦,王慧敏.质谱离子化及其发展[J].中国医药工业杂志,1998,29(11): 524-529.]
- [4] Ozima M, Zahnle K. Mantle degassing and atmospheric evolution: Noble gas view [J]. *Geochemical Journal*, 1993, 27:185-200.
- [5] Lupton J E. A far-field hydrothermal plume from Loihi seamount [J]. *Science*, 1996, 272:976-979.
- [6] Burnard P G, Hu R, Turner G, et al. Mantle, crustal and atmosphere noble gases in Ailaoshan Gold deposits, Yunnan Province, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63:1 595-1 604.
- [7] Marty B, Jambon A, Sano Y. Helium isotope and CO₂ in volcanic gases of Japan [J]. *Chemical Geology*, 1989, 76:25-40.
- [8] Stuart F M, Turner G, Duckworth R C, et al. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean floor sulfides [J]. *Geology*, 1994, 22:823-826.
- [9] Xu Yongchang, Liu Wenhui, Shen Ping, et al. An important branch of gas geochemistry—noble gas geochemistry [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(3): 157-166. [徐永昌,刘文汇,沈平等.天然气地球化学重要分支——稀有气体地球化学[J].天然气地球科学,2003,14(3): 157-166.]
- [10] Baptiste P J, Fouquet Y. Abundance and isotopic composition of helium in hydrothermal sulfides from the East Pacific Rise at ¹³N [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60:87-93.
- [11] Trull T W, Kurz M D, Jenkins W J. Diffusion of cosmogenic ³He in olivine and quartz: Implications for surface exposure dating [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 103:241-251.
- [12] 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 (D)*, 1999, 29(4): 321-330. [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.]
- [13] Kurz M D. In situ production of cosmogenic helium and some applications to geochronology [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50:2 855-2 862.
- [14] Wang Xianbin, Liu Gang, Chen Jianfa, et al. Fluid in the Earth [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3(3~4): 105-118. [王先彬,刘刚,陈践发,等.地球内部流体研究的若干关键问题[J].地学前缘,1996,3(3~4): 105-118.]
- [15] Kennedy B M, Hiyagon H, Reynolds J H. Crustal neon: A striking uniformity [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 98:277-286.
- [16] Harrison D, Bernard P, Turner G. Noble gas behavior and composition in the mantle: Constraints from the Iceland Plume [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171:199-207.
- [17] Thomas S, Claude J A. Terrestrial xenology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 60:389-406.
- [18] David E F. Helium, argon, and xenon in crushed and melted MORB [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61:3 003-3 012.
- [19] Takashi H, Ichiro K, Keisuke N. Noble gas study of HIMU and EM oceanic island basalt in the Polynesian region [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63:1 181-1 201.
- [20] Philippe S, Thomas S, Claude J A. Neon isotope in submarine basalt [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 91:73-88.
- [21] Ballentine C J, O'Nions R K. The nature of mantle neon contributions to Vienna Basin hydrocarbon reservoirs [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 113:533-567.
- [22] Lollar B S, O'Nions R K, Ballentine C J. Helium and neon isotope systematics in carbon dioxide-rich and hydrocarbon-rich gas reservoirs [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 5 277-5 290.
- [23] Swindle T D, Grier J A, Burkland M K. Noble gas in orthopyroxene ALH84001: A different kind of martian meteorite with an atmospheric signature [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59:793-801.
- [24] Ballentine C J, O'Nions R K, Coleman M A. A magnus opus: Helium, neon and argon isotopes in a North Sea oil field [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60:831-849.
- [25] Zartman R E, Wasserburg G J, Reynolds J H. Helium, argon and carbon in some natural gases [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66:277-306.
- [26] Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Turner G, et al. Helium and argon isotope systematics of fluid inclusions in pyrites from the Machangqing copper deposit [J]. *Science in China (D)*, 1997, 27(6): 503-508. [胡瑞忠,毕献武,Turner G,等.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.]
- [27] Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Turner G, et al. Helium isotopic compositions in the Machangqing copper deposit, Yunnan Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(17): 1 542-1 545. [胡瑞忠,毕献武,Turner G,等.云南马厂箐铜矿床氦同位素组成研究[J].科学通报,1997,42(17): 1 542-1 545.]
- [28] Mao Jingwen, Li Yanhe, Li Hongyan, et al. Helium isotopic evidence on metalgenesis of mantle fluids in the Wangu gold deposit, Hunan Province [J]. *Geological Review*, 1997, 43(6): 646-649. [毛景文,李延河,李红艳,等.湖南万古金矿床幔流体成矿的氦同位素证明[J].地质论评,1997,43(6): 646-649.]
- [29] Shukolyukov Yu A, Pleshakov A M, Lavrova L D. The unprecedentedly high ³He/⁴He ratio in diamonds from a metamorphic rock of the Kokchetav Massif, Kazakhstan [J]. *Petrology*, 1993, 1

- (1): 110-119.
- [30] Pleshakov A M, Shukolyukov Yu A. Isotopic variations of helium in the diamonds of the Kokchetav Massifs metamorphic rock, Kazakhstan[A]. In: Matsuda J ed. Noble Gas Geochemistry and Cosmochemistry[C]. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRPUB), 1994. 229-243.
- [31] 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. [毛景文, 李荫清. 湖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.]
- [32] Zhang Lianchang, Shen Yuanchao, Li Houmin, et al. 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. [张连昌, 沈远超, 李厚民, 等. 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.]
- [33] Simmons S F, Sawkins F J, Schlutter D J. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 1987, 329: 429-432.
- [34] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from DaeHwa W-Mo mineralisation, South Korea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 4 663-4 673.
- [35] Shelton K L, Taylor R P, So C S. Stable isotope studies of the Dae Hwa W-Mo Mine, Republic of Korea: Evidence of progressive meteoric interaction in a tungsten-bearing hydrothermal system [J]. *Economic Geology*, 1987, 82: 471-481.
- [36] Hu Ruizhong, Zhong Hong, Ye Zaojun, et al. Helium and argon isotope geochemistry of the Jingding super-large Pb-Zn deposit [J]. *Science in China (D)*, 1998, 28(3): 208-213. [胡瑞忠, 钟宏, 叶造军, 等. 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.]
- [37] Wang Denghong, Yu Jinjie, Yang Jianmin, et al. Inert gas isotopic studies and dynamic background of Cenozoic ore-forming process in China [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(2): 179-186. [王登红, 余金杰, 杨建民, 等. 中国新生代成矿作用的惰性气体同位素研究与动力学背景[J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 179-186.]
- [38] Xue Chunji, Chen Yuchuan, Wang Denghong, et al. The Jinding and Baiyangping deposits, Westnorthern Yunnan: Geological feature, He, Ne and Xe isotope compositions, and metallogenic epoch[J]. *Science in China (D)*, 2003, 33(4): 315-322. [薛春纪, 陈毓川, 王登红, 等. 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.]
- [39] Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Xiao Hongquan, et al. 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. [赵葵东, 蒋少涌, 肖红权. 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.]
- [40] Stuart F M, Turners G. Abundance and isotope composition of the noble gases in fluid inclusions [J]. *Chemical Geology*, 1992, 101: 97-111.
- [41] Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal springs on the Galapagos Rift [J]. *Science*, 1979, 203: 1 073-1 083.
- [42] Lupton J E, Weiss R F, Craig H. Mantle helium in hydrothermal plumes in the Galapagos Rift [J]. *Nature*, 1977, 267: 603-604.
- [43] Jenkins W, Edmond J M, Corliss J B. Excess ^3He and ^4He in Galapagos submarine hydrothermal waters [J]. *Nature*, 1978, 272: 156-159.
- [44] Turner G, Stuart F. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulfides from the ocean floor [J]. *Nature*, 1992, 375: 581-583.
- [45] Fouquet Y, Auclair G, Cambon P, et al. Geological setting and mineralogical investigations on sulfide deposits near ^{13}N on the East Pacific Rise [J]. *Marine Geology*, 1988, 84: 145-178.
- [46] Turner G, Stuart F M. He/heat ratios and the deposition temperatures of ocean-floor sulfides [J]. *Nature*, 1992, 357: 581-583.
- [47] Lupton J, Klinkhammer G P, Normark W R, et al. Helium-3 and manganese at the 21°N East Pacific rise hydrothermal site [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50: 115-127.
- [48] Jean-Baptiste P, Charlou J L, Stievenard M, et al. Helium and methane measurements on hydrothermal fluids from the mid-ocean ridge: The Snake Pit site at 23°N [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 106: 17-28.
- [49] Rudnicki M D, Elderfield H. Helium, radon and manganese at the TAG and Snakepit hydrothermal vent fluids, 26 and 23°N , Mid-Atlantic ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 113: 307-321.
- [50] 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 (D)*, 2000, 30(6): 628-633. [曾志刚, 秦蕴珊, 崔世奎. 大西洋中脊 TAO 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.]
- [51] 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. [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.]
- [52] Chen Yuchuan, Mao Jingwen, Luo Yaonan, et al. Geology and Geochemistry of the Dashuigou Te-(Au) Deposit, Sichuan Province [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1996. [陈毓川, 毛景文, 骆耀南, 等. 四川大水沟碲(金)矿床地质和地球化学 [M]. 北京: 原子能出版社, 1996.]
- [53] Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang. The Characteris-

tics 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. [王登红,陈毓川,徐志刚.阿尔泰造山带岩石和矿石的氩同位素研究[J].长春科技大学学报,2001,31(2):

110-115.]

[54] Ma Jinlong, Tao Mingxin. The advances in the research of Noble gas isotopic geochemistry [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(5): 471-476. [马锦龙,陶明信.稀有气体同地球化学研究进展[J].地球学报,2002,23(5):471-476.]

ADVANCES IN TRACING THE ORE-FORMING FLUIDS USING RARE GAS ISOTOPES

LI Zhao-li^{1,2}, HU Rui-zhong¹, PENG Jian-tang¹, BI Xian-wu¹, LI Xiao-min¹

(1. *Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;*

2. *Graduate School, CAS, Beijing 100039, China*)

Abstract: Rare gas isotopes, especially helium and argon isotopes, are sensitive to trace the origin of the ancient ore-forming fluids. Rare gases in different spheres of the earth have different characteristic isotopic ratios. The rare gas isotopic ratio in the fluid inclusions of the samples is determined, and the influence caused by all kinds of latter processes from the measured data is ruled out. Comparing the above result with the characteristic values in different reservoirs in Earth, we can trace the origin of ore-forming fluids and further discuss the mineralization mechanism for some deposits. The progresses of tracing ore-forming fluids in different kinds of ore deposits using rare gas isotopes are summarized, and some problems and the developing tendency about this method are also discussed.

Key words: Rare gas isotopes; Ore-forming fluids; Fluid inclusions.