

中国 SEDEX 型矿床成矿流体硼、硅、 氦-氩同位素组成研究评述

祝朝辉^{1,2}, 张 乾¹, 朱笑青¹, 何玉良^{1,2}

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 100049

摘 要: SEDEX 型矿床成矿流体的研究是矿床地球化学研究的重要课题之一。正确识别系统中不同的流体来源及其混合过程, 是深刻理解 SEDEX 型矿床形成演化的关键。系统总结了国内几个典型的 SEDEX 型矿床同位素研究成果, 认为 B 和 Si 同位素是根据 SEDEX 型矿床独特的矿物组合而提出的一种示踪方法, 对矿床成因和沉积环境示踪效果理想; He、Ar 同位素则因为在地壳和地幔储库中有极不相同的组成, 是理想的幔源流体示踪剂。鉴于 SEDEX 型矿床含有电气石、黄铁矿、硅质岩等特殊的矿物与岩石组合, B、Si、He-Ar 同位素可能更适合 SEDEX 型矿床矿化流体来源研究, 并指出其理论发展的薄弱之处。

关 键 词: SEDEX 矿床; 成矿流体; 硼同位素; 硅同位素; 氦-氩同位素

中图分类号: P597 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2006)03-0279-06

A Review on the B, Si, He-Ar Isotopic Compositions of the Ore-Forming Fluids of the SEDEX Type Ore Deposits in China

ZHU Chao-hui^{1,2}, ZHANG Qian¹, ZHU Xiao-qing¹, HE Yu-liang^{1,2}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The study on the ore-forming fluid of the SEDEX ore deposits is one of the important subjects in the field of ore deposit geology and geochemistry. To distinguish different kinds of fluid sources and their mixing process of the ore-forming fluid system is the key to deeply understand the formation and evolution of the SEDEX type deposits. Based on the systemic summary of the isotopic study on several typical SEDEX ore deposits, It is indicated that the B, Si isotopic tracing method, which is proposed on the basis of the unique mineral association of the SEDEX deposits, is an ideal one for tracing ore genesis and sedimentary environment. The He, Ar isotopic compositions are ideal for tracing mantle sourced fluids due to the big differences between their isotopic compositions in crust and those in mantle. Due to the special mineral and rock association of tourmaline, pyrite, siliceous rock in the SEDEX deposits, the above methods could be more suitable for tracing the ore-forming fluid source of the SEDEX ore deposits. The disadvantage of the B, Si, He, Ar isotopic theory has been point out.

Key words: SEDEX ore deposit; ore-forming fluid; boron isotope; silicon isotope; helium-argon isotope

过去,地质学家将以沉积岩为容矿岩石的块状硫化物矿床称为“页岩型”矿床。但实际上,这类矿床的容矿岩石除了页岩外,还有许多其他类型的沉积岩,如碎屑岩、硅质岩、碳酸岩等。因此,现在称这

类矿床为以沉积岩容矿的喷流沉积矿床(sedimentary exhalative deposit),即 SEDEX 型矿床。由于世界上许多超大型的有色金属矿床(如铅锌、铁、锡矿床等)和贵金属矿床(如银矿床等)都与喷流沉积

收稿日期:2006-03-10 收到,05-12 改回

基金项目:中国科学院重要方向项目资助(KZCX3-SW-125);国家自然科学基金资助项目(40172037)

第一作者简介:祝朝辉(1978-),男,博士研究生,矿床地球化学专业, E-mail: zchdue2008@sina.com;

通讯作者:张乾(1955-),男,研究员,主要从事矿床地球化学研究, E-mail: zhqiangeol@163.com.

作用有关,因而受到地学界的极大关注。然而国内外对 SEDEX 型矿床的成矿流体系统的认识还未见报道,本文拟通过对国内重要的 SEDEX 矿床成矿流体系统同位素组成的对比研究,试图找出更适合于研究其矿化流体同位素组成的方法。

矿化流体在矿床的形成过程中扮演了至关重要的角色,是金属等成矿物质得以活化、运移和富集成矿的主要介质。自然界已发现的各种类型矿床几乎都是由各种不同性质的流体直接或间接以不同程度混合形成,即使纯粹通过岩浆结晶分异作用或熔离作用的某些岩浆矿床,也有其他流体的混入。所以,成矿作用过程中流体的来源、性质及其演化的研究已成为矿床地球化学的重要课题之一。

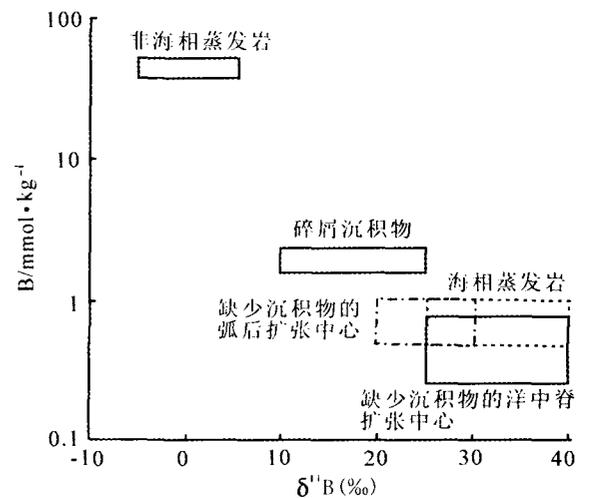
1 研究现状

目前,有关成矿流体来源的探讨主要依靠流体包裹体研究和氢、氧同位素资料。由于 SEDEX 型矿床的矿物粒度相对细小,原生流体包裹体小而少,故难度相对较大,资料匮乏。尽管现有的一些氢、氧同位素研究成果也为探讨 SEDEX 型矿床矿化流体来源提供了重要信息,但并不能像其他类型矿床那样,可以准确指示矿化流体来源并预测演化过程。所以,通过 SEDEX 型矿床独特的矿物、岩石组合,选用硼、硅、氮、氩同位素可能会更好地指示矿化流体的来源。

1.1 SEDEX 型矿床硼同位素组成

硼是微量易溶的轻元素,主要存在于水圈及上地壳沉积岩系中,海相沉积物、大洋热液蚀变玄武岩及海水是硼的主要载体^[1]。下地壳、地幔和陨石中的硼含量都非常低。¹¹B 与 ¹⁰B 的相对质量差较大,分馏较显著,且硼在自然界没有不同价态的变化,不受氧化-还原条件的支配。对硼同位素组成的测量始于 20 世纪 60 年代初^[2]。由于当时分析测量技术所限,分析精度达不到要求,阻碍了硼同位素地球化学的发展。直至 20 世纪 80 年代中期,由于方法上的改进和创新,才建立了硼同位素高精度测量方法^[3~6],使硼同位素进入实际地质应用阶段。现有资料显示,自然界中 $\delta^{11}\text{B}$ 值为 $-37\text{‰} \sim 58\text{‰}$ 。其中,较负的 $\delta^{11}\text{B}$ 值见于非海相蒸发盐矿物和某些电气石,而较正的值见于某些盐湖卤水和蒸发海水;现

代大洋水的 $\delta^{11}\text{B}$ 值十分恒定 (39.5‰);原始地幔的 $\delta^{11}\text{B}$ 值估测为 $-10\text{‰} \pm 2\text{‰}$;陨石的 $\delta^{11}\text{B}$ 值很不均匀,变化可达 90‰ 。由于硼同位素存在大的分馏和不同地质体中截然不同的 $\delta^{11}\text{B}$ 值;从硼的浓度和 $\delta^{11}\text{B}$ 值的综合图(图 1)^[7~9]上看出不同源区的流体特征。目前,硼同位素主要用于研究星云形成过程和宇宙事件、壳-幔演化和板块俯冲作用过程,判别沉积环境和矿床成因,示踪古海洋、古气候条件和环境污染源区,并成效显著。



据 Palmer(1991)修改

图 1 不同源区流体的 $\delta^{11}\text{B}$ 值分布

Fig. 1 Distribution of boron concentration- $\delta^{11}\text{B}$ values of various sourced fluids

大厂锡矿位于泥盆纪裂谷盆地碎屑岩和碳酸盐岩中,其成因一直有燕山期花岗岩浆热液夕卡岩型和泥盆纪海底热液喷流型之争。Jiang^[9]研究了大厂锡矿两种类型的电气石硼同位素,发现与层状矿体有关的条带状电气石的硼同位素组成为 $-17.5\text{‰} \sim -15.0\text{‰}$,与花岗岩有关的石英-电气石脉硼同位素组成为 $-16.4\text{‰} \sim -14.5\text{‰}$ 。尽管两种电气石的硼同位素几乎相当,但结合韩发等^[10]计算的两种电气石的氧同位素温度,分别为 $210 \pm 38\text{°C}$ ($n=3$) 和 425°C ($n=1$),Jiang^[9]计算出形成两种电气石的成矿热液的硼同位素组成分别为 $-1\text{‰} \sim -5\text{‰}$ 和 -10‰ 左右,由此可见,两种电气石为不同的来源,使人们对大厂锡矿的成因有了进一步的认识。虽然 Jiang^[9]成功地应用硼同位素解释了大厂锡矿的成

因,但仅靠这一点是不够的;共生矿物对的氧同位素分析,不仅可以提供矿物形成时的温度,还可以帮助确定成矿流体的来源及流体形成时的环境。目前,硼同位素在国外已被广泛应用于各种矿床的研究,国内起步较晚,仅有数例(如银洞子铅锌矿、秦城子铅锌矿和个旧等锡矿)。

1.2 SEDEX 型矿床硅同位素组成

国际上硅同位素的研究始于 20 世纪 50 年代,由于硅同位素组成在自然界中变化较小,且分析精度要求高,难度大,一直没有突破性进展。直到 80 年代,丁悌平把硅同位素的分析精度由国际上的 $\pm(0.3\% \sim 0.6\%)^{[11]}$ 提高到 $\pm 0.1\%$ 以内^[12],取得了很多有价值的成果,划定了硅同位素在自然界中的分布轮廓,即基性火成岩的 $\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS 28}}$ 为 $-0.9\% \sim -0.3\%$ (集中于 $-0.3\% \sim -0.7\%$),花岗岩类的硅同位素集中分布于 $-0.4\% \sim 0.4\%$,沉积岩的硅同位素组成为 $-1.1\% \sim 0.8\%$,不同岩性岩石的硅同位素组成的中值又不一样,变质岩的变化较大($-1.1\% \sim 0.4\%$),分布范围包含了火成岩区和沉积岩区,这主要取决于其原岩的性质^[13],为硅同位素地质的应用奠定了基础。研究指出,硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值可以反映其沉积环境^[11,12,14]。深海环境沉积硅质岩 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 $-0.6\% \sim 0.8\%$ (平均 0.16%),半深海环境沉积硅质岩 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 $0.1\% \sim 0.6\%$ (平均为 0.4%),浅海环境沉积的为 $-0.35\% \sim 3.4\%$ (平均为 1.3%)。徐跃通等^[15~18]的研究也得出相近的结论。

硅同位素在解释 SEDEX 型矿床硅质岩的成因及石英中硅的来源问题和沉积环境时表现出自己的优越之处。大厂锡多金属矿床硅质岩系统的硅同位素研究表明,大厂矿区有两种不同成因的硅质岩:浅海放射虫硅质岩的硅质来自海水, $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 $0.2\% \sim 0.8\%$,它与矿化没有直接的联系;另一种是含较多长石与粘土矿物并与电气石等共生的硅质岩,大部分 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 $-0.1\% \sim -0.6\%$,可能属海底喷气成因,与硫化物成矿作用密切相关^[19]。韩发等^[20]指出,大厂矿床各类矿化体中石英的硅同位素组成几乎相同,且与直接容矿硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值十分接近,但完全不同于矿区侵入岩的相应值,可能属海底热水系统喷流沉积。同时,该矿区硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与

部分深海(洋壳区)、半深海(陆壳区)放射虫硅质岩的相似,但 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于全球各类硅质岩,推测为海底热水活动与生物化学作用共同参与的产物。上述结论与大厂矿床电气石-铷-锶-钇-铈同位素^[21]及硼同位素^[9]的研究结果一致。虽然硅同位素能很好地解释不同类型石英和岩石硅的来源,但对其与成矿的关系,还必须结合地质特征,厘定各类石英和岩石与矿体是否系同期产物。

1.3 SEDEX 型矿床的氦-氩同位素研究

稀有气体同位素可以示踪地壳现代流体的来源及其水-岩作用的历史^[22]。

稀有气体尤其是氦和氩在地壳和地幔储库中具有极不相同的组成,它们是壳-幔相互作用过程极灵敏的示踪剂。尤其是氦,由于地壳 ($^3\text{He}/^4\text{He} = 0.01 \sim 0.05\text{Ra}$) 和地幔 ($^3\text{He}/^4\text{He} = 6 \sim 9\text{Ra}$) 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值存在高达近 1000 倍的差异^[23],即使现代地壳流体(如地下水、温泉、地热体系、海底热液、火山气体和天然气等)中有少量幔源氦的加入,用氦同位素也易于判别出来^[21~28]。但是,在用稀有气体示踪古地壳流体(如成矿流体)方面,则因为长期以来难以评估后期地质作用对流体初始同位素组成的影响而一直未发挥其应有的作用。直到 20 世纪 90 年代初以后,一些学者发现黄铁矿中的流体包裹体可以很好地保存稀有气体,在包裹体圈闭后的 100 Ma 内,即使是最容易扩散的氦,也不会发生明显的丢失^[29]。此后,以流体包裹体为对象,研究部分成矿古流体的氦、氩同位素组成的工作才有所突破^[23,29~31],开拓了稀有气体在成矿古流体研究中的应用。这些工作主要包括对秘鲁 Casapalca Ag-Pb-Zn-Cu 矿床以及一些洋中脊热水沉积黄铁矿等的研究。中国对氦-氩同位素的研究起步较晚,主要有胡瑞忠^[35~38]在云南马厂箐铜矿床、金顶超大型铅-锌矿床、哀牢山金矿带的氦-氩同位素研究,蒋崧生^[39]对地球上氦源的总结,孔令昌等^[10]在实验地球化学方面的初步探讨,以及赵葵东等^[11]测定的大厂矿床黄铁矿和萤石氦-氩同位素数据。

现有的资料表明,研究以流体包裹体形式保存的成矿古流体,在氦-氩同位素的测试方法上并不难,关键在于能否正确评估流体包裹体形成以后的后生过程对流体包裹体初始氦-氩同位素组成的影响。胡瑞忠等^[38]在研究哀牢山金矿带金成矿流体

氦-氩同位素时发现,在石英和黄铜矿等矿物流体包裹体大量扩散丢失氮的过程中,氮同位素并未产生明显的分馏。其主要证据是:1) $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-^3\text{He}/^4\text{He}$ 图解上,被确定丢失大量氮的样品与基本未丢失氮的黄铁矿样品,投影点都落在相同的壳幔混合趋势线上。2)同一手标本中共生的黄铁矿和石英,在形成初期,其中的流体包裹体应有大致相同的氮丰度,而 He-Ar 同位素的实测结果发现,石英中流体包裹体的氮已丢失到不足黄铁矿中的 1%,但两者的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值在误差范围内几乎一致。

大厂锡多金属矿床成矿流来源一直有岩浆来源和海底热液来源之争。赵葵东等^[39]用氮同位素很好地解释了这个问题。研究表明,大厂矿床成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.7~2.5 Ra,有地幔流体的混入,可能是海水与地幔流体混合所致(图 2)。这与花岗岩的氮同位素组成明显不同,从而推翻了成矿流来源于岩浆的认识。这与韩发和孙海田利用硅同位素得出的结论相同:该矿区中的硅与容矿硅质岩都来源于海底热液对流系统,与矿区花岗岩无关。胡瑞忠^[36]在用 He-Ar 同位素研究金顶超大型铅锌矿时,准确地解释了成矿流体同时具有地壳氮、大气氮、地壳成因硫和幔源铅的同位素组成的原因,推测成矿流体的演化过程为:大气成因地下水下渗增温→通过水-岩作用从盆地地层中获取硫、氯及放射成因的氮和氩→浸取盆地底部幔源火成岩中的铅和锌→含矿流体回返上升成矿。虽然现在有关 SEDEX 型矿床流体包裹体氮-氩同位素研究资料较少,但基于上述认识,选用氮-氩同位素来确定矿化流体的来源并推测其演化过程可以取得很好的效果。

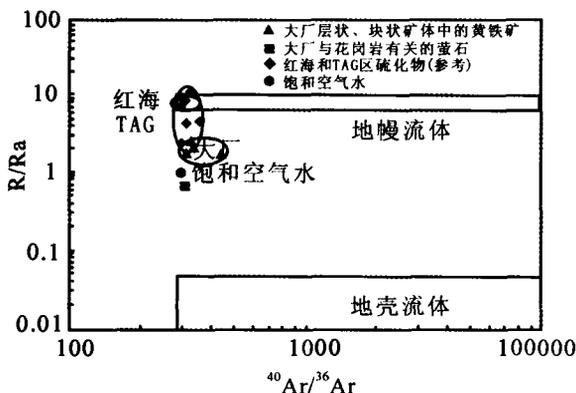


图 2 大厂锡矿成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}-^{10}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解
Fig. 2 A plot of the $^3\text{He}/^4\text{He}-^{10}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ of the ore-forming fluids of the Dachang Sn deposit

2 存在问题和发展趋势

史奈德于 20 世纪早期就将喷流概念引入矿床学,但真正得到重视和发展不过十几年的时间;虽然随着深海钻探计划和大洋钻探计划的实施,喷流沉积矿床的研究取得了丰富的成果,但是很多理论尚有一个成熟过程,应用方面也值得探讨。

(1)成矿物质及流体的来源:这是矿床成因研究中最基本的要素。SEDEX 矿床的物质和流体来源一直有多种观点。不同环境下 SEDEX 矿床的成矿物质和流体会不同的来源。硼、硅、氮-氩同位素虽然在解决成矿流体来源时表现出了一定的优越性,但是应用范围还很小,特别是在国内,只有几个矿床进行过这方面的研究,其理论并不成熟。

(2)形成环境的判别:总体上,喷流沉积型矿床产出的具体构造背景为受裂谷控制的克拉通内或其边缘的沉降盆地;实际上,同生断裂或沉降盆地对矿床的形成起着直接的控制作用,并决定着矿床的规模、形态和产状。SEDEX 矿床主要形成于元古代,那时的构造格局必定不同于现今的面貌。因此,如何应用硼、硅、氮-氩同位素分析认识同生断裂或沉降盆地的起源、形成环境以及成矿流体的活动机制等都有待进一步研究。

(3)成矿作用过程的认识:SEDEX 矿床与火山作用的关系并不明显,同生沉积对矿床的成因起着决定性作用,成矿建造中没有直接的火山活动证据。但是,深部的岩浆活动对成矿流体的形成和演化会有一定的影响,可提供部分成矿物质;此外,在沉积阶段之后,伴随着大地构造运动的变迁,特别是盆-山转换,矿床所处的物理化学条件也将发生变化。在地壳变化过程中,还会有一些热流体进入矿区,对矿床起改造作用。因此,如何应用硼、硅、氮-氩同位素分析深部岩浆活动在 SEDEX 矿床形成中的作用、喷流沉积期后矿床经历的变迁对矿床的最终形成的影响;以及矿床发生变化的过程,都有待深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Chaussidon M, Jambon A. Boron content and isotope composition of oceanic basalts: Geochemical and cosmochemical implication[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1994, 121: 277-291.

- [2] McMullen C C, Cragg C B, Thode H G. Absolute ratio of $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ in Searles Lake borax[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1961, 23: 147-149.
- [3] Ramakumar K L, Parab A R, Khodade P S. Determination of isotopic composition of boron[J]. *J. Radioanal Nucl. Chem. Lett.*, 1985, 94: 53-62.
- [4] Spivack A J, Edmond J M. Determination of boron isotope ratios by thermal ionization mass spectrometry of the dicesium metaborate cation[J]. *Analytical Chemistry*, 1986, 58: 31-35.
- [5] Vengosh A, Chivas A R, McCulloch M T. Direct determination of boron and chlorine isotopes in geological materials by negative thermal ionization mass spectrometry[J]. *Chemical Geology*, 1989, 79: 333-343.
- [6] Hemming N G, Hanson G N. Boron isotopic composition and concentration in modern marine carbonates [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, 56: 537-543.
- [7] Palmer M R. Boron isotope systematics of Halmahera arc (Indonesia) lavas: Evidence for involvement of the subducted slab [J]. *Geology*, 1991, 19: 215-217.
- [8] 蒋少涌. 硼同位素组成及其地质应用研究[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(1): 1-6.
Jiang Shaoyong. Boron isotope and its geological applications [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [9] Jiang S Y. Boron isotope geochemistry of hydrothermal ore deposits in China: A preliminary study[J]. *Phys. Chem. Earth*, 2001, 26: 851-858.
- [10] 韩发, 赵汝松, 沈建忠, Hutchinson R W, 蒋少涌. 大厂锡-多金属矿床地质及成因[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 213.
Han Fa, Zhao Rusong, Shen Jianzhong, Hutchinson R W, Jiang Shaoyong. *Geology and origin of ores in the Dachang tin-polymetallic ore field*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 213. (in Chinese)
- [11] Douthitt C B. The geochemistry of the stable isotopes of silicon[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1982, 46(8): 1449-1458.
- [12] 丁悌平, 万德芳, 李金城. 硅同位素测量方法及其地质应用[J]. *矿床地质*, 1988, 7(4): 90-95.
Ding Tiping, Wang Defang, Li Jincheng. Measurement and geological application of silicon isotope[J]. *Mineral deposits*, 1988, 7(4): 90-95. (in Chinese with English abstract)
- [13] 丁悌平, 蒋少涌, 万德芳, 李延河, 李金城, 宋鹤彬, 刘志坚, 姚晓梅. 硅同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 31-42.
Ding Tiping, Jiang Shaoyong, Wan Defang, Li Yanhe, Li Jincheng Song Hebin, Liu Zhijian, Yao Xiaomei. *Silicon isotope geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 31-42. (in Chinese)
- [14] 宋天锐, 丁悌平. 硅质岩中的硅同位素 ($\delta^{30}\text{Si}$) 应用于沉积相分析的新尝试[J]. *科学通报*, 1989, 34(18): 1408-1411.
Song Tianyue, Ding Tiping. Sedimentary phase analysis of siliceous rocks: A preliminary application of silicon isotope ($\delta^{30}\text{Si}$) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(18): 1408-1411. (in Chinese with English abstract)
- [15] 徐跃通, 周保华, 黄福生. 山东平阴地区中元古代层状硅质岩热水沉积地球化学特征及沉积环境意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1997, 33(2): 167-174.
Xu Yuetong, Zhou Baohua, Huang Fusheng. Hydrothermal sedimentary geochemistry characteristics and sedimentary environmental significance of Media-Proterozoic stratiform siliceous rocks in Pingyin region, Shandong Province[J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 1997, 33(2): 167-174. (in Chinese with English abstract)
- [16] 徐跃通, 胡文璋, 徐克勤, 胡受奚. 浙西石炭纪层状硅质岩地球化学特征及其意义[J]. *地层学杂志*, 1997, 21(1): 47-54.
Xu Yuetong, Hu Wenzhang, Xu Keqing, Hu Shouxi. Geochemistry characteristics and its significance of Carboniferous stratiform siliceous rocks, western Zhejiang Province[J]. *J. Stratigraphy*, 1997, 21(1): 47-54. (in Chinese with English abstract)
- [17] 徐跃通. 信江盆地石炭纪硅质岩地球化学特征及沉积环境意义[J]. *矿床在质*, 1998, 33(1): 39-50.
Xu Yuetong. Geochemistry characteristics and sedimentary environmental significance of the Carboniferous siliceous rocks in Xinjiang basin[J]. *Mineral deposits*, 1998, 33(1): 39-50. (in Chinese with English abstract)
- [18] 徐跃通. 江西东乡矿区沉积硅质岩的地球化学特征和成因[J]. *沉积学报*, 1997, 15(3): 110-114.
Xu Yuetong. Geochemistry characteristics and genesis of the sedimentary siliceous rocks of Dongxiang, Jiangxi[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(3): 110-114. (in Chinese with English abstract)
- [19] 姚晓梅, 丁悌平. 广西大厂锡多金属矿床硅质岩和层状矿体氧硅同位素研究[J]. *地球学报*, 1994, 1(2): 124-130.
Yao Xiaomei, Ding Tiping. Silicon and oxygen stable isotope studies on the siliceous rocks and stratiform ore bodies of the Dachang tin-polymetallic deposit, Guangxi[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1994, 1(2): 124-130. (in Chinese with English abstract)
- [20] 韩发, 孙海田. SEDEX 型矿床成矿系统[J]. *地学前缘*, 1999, 6(1): 139-162.
Han Fa, Sun Haitian. Metallogenic system of SEDEX type deposits: A review[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, (1): 39-162. (in Chinese with English abstract)
- [21] Jiang Shaoyong, Han Fa, Shen Jianzhong, Martin R Palmer. Chemical and Rb-Sr, Sm-Nd isotope systematics of tourmaline from the Dachang Sn-polymetallic ore deposit, Guangxi Province, P.R. China[J]. *Chemical Geology*, 1999: 49-67.
- [22] Zartman R E, Wasserburg G J, Reynolds J H. Helium, argon and carbon in some natural gases[J]. *J. Geophys. Res.*, 1961, 66: 277-306.

- [23] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, Turner G. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotope in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralization, South Korea [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 4663-4673.
- [24] Clarke W B, Beg M A, Craig H. Excess ^3He in the sea: Evidence for terrestrial primordial helium[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1969, 6: 213-220.
- [25] Lupton J E. Terrestrial inert gases: Isotope tracer studies and clues to primordial components in the mantle[J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1983, 11: 371-414.
- [26] Marty B, Jambon A, Sano Y. Helium isotope and CO_2 in volcanic gases of Japan[J]. *Chem. Geol.*, 1989, 76: 25-40.
- [27] Hilton D R, Hammerschmidt K, Teufel S, Friedrichsen H. Helium isotope characteristics of Andean geothermal fluids and lavas[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, 120: 265-282.
- [28] Sheng Xu, Shunichi Nakai, Hiroshi Wakita, Xianbin Wang. Mantle-derived noble gases in natural gases from Songliao Basin, China[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 4675-4683.
- [29] Baptiste P J, Fouquet Y. Abundance and isotope composition of helium in hydrothermal sulfides from the East Pacific Rise at 13N[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1996, 60: 87-93.
- [30] Turner G., Burnard P B, Ford J L. Tracing fluid sources and interaction[J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 1993, 344: 127-140.
- [31] Simmons S F, Sawkins F J, Schlutter D J. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 1987, 329: 429-432.
- [32] Turner G, Burgess R, Bannon M. Volatile-rich mantle fluids inferred from inclusions in diamond and mantle xenoliths[J]. *Nature*, 1990, 344: 653-655.
- [33] Turner G, Stuart F. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulfides from the ocean floor[J]. *Nature*, 1992, 357: 581-583.
- [34] Stuart F M, Turner G, Duckworth R C. Helium isotope as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean-floor sulfides [J]. *Geology*, 1994, 22: 823-826.
- [35] 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(14): 1542-1545.
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Shao Shuxun, Turner G, Burnard P G. The composition of helium of Machangqing copper deposit in Yunnan province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(14): 1542-1545. (in Chinese with English abstract)
- [36] 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. The helium-argon isotope in fluid inclusions of pyrite in Machangqing deposit[J]. *Science in China(series D)*, 1997, 27(6): 503-508. (in Chinese with English abstract)
- [37] 胡瑞忠, 钟宏, 叶造军, 毕献武, Turner G, Burnard P G. 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, Turner G, Burnard P G. Helium and argon isotopic geochemistry of Jingding superlarge Pb-Zn deposit[J]. *Science in China (series D)*, 1998, 28(3): 208-213. (in Chinese with English abstract)
- [38] 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, Burnard P G. 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, Turner G, Burnard P G. Helium and argon isotopic geochemistry of ore-forming fluid of Ailao Mount gold mineralization belt[J]. *Science in China(series D)*, 1999, 29(4): 321-330. (in Chinese with English abstract)
- [39] 孔令昌, 王桂清, 王志敏. $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值质谱计的研制与应用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 434-436.
Kong Lingchang, Wang Guiqing, Wang Zhimin. Development and application of the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio mass spectrometer [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 434-436. (in Chinese with English abstract)
- [40] 蒋崧生. 地球上氦同位素的起源及 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值变化特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 475-476.
Jiang Songsheng. He isotopic genesis and $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio variation on earth[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 475-476. (in Chinese with English abstract)
- [41] 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. Genesis of ore-forming fluid of Dachang-polymetallic deposit: Evidence from He isotope [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(8): 632-635. (in Chinese)