

大厂锡-多金属矿床成矿流体来源的 He 同位素证据

赵葵东 蒋少涌* 肖红权 倪培

(南京大学地球科学系, 内生金属成矿作用国家重点实验室, 南京 210093. *联系人, E-mail: shyjiang@public1.ptt.js.cn)

摘要 对取自该矿床层状矿体和块状矿体的 4 件黄铁矿样品进行了流体包裹体的 He 同位素测定, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $1.7\sim 2.5 R_a$, 反映了成矿流体中有地幔流体的混入, 可能是海水与地幔流体混合的结果, 类似于许多现代大洋底块状硫化物矿床. 而与花岗岩有关的 1 件萤石样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.7 R_a$, 明显低于与层状矿体和块状矿体有关的成矿流体. 两种流体可能具有不同的来源, 因此层状和块状矿体的形成可能与花岗岩无成因联系.

关键词 He 和 Ar 同位素 地壳流体 地幔流体 块状硫化物矿床 大厂锡矿

大厂锡-多金属矿床是世界上最大的锡矿之一, Sn 储量超过了 1×10^6 t, Pb, Zn 储量也很大, 具有重要的工业价值. 对大厂矿床层状矿体和块状矿体的成因一直存在着花岗岩浆热液矽卡岩型^[1~4]和海底热液喷流型(即 Sedex 型)^[5~9]的争论. 对其成矿流体也相应地存在着岩浆来源和海底热液来源的争论^[1~9].

稀有气体, 尤其是 He 和 Ar, 在地壳和地幔储库中具有极不相同的同位素组成. 由于这一特性, He 和 Ar 同位素被广泛用于研究现代地壳流体的源区及其水-岩作用. 目前, 这一工作已扩展到研究成矿古流体的性质和来源, 并取得了许多重要的成果^[10~18]. 但前人对块状硫化物矿床的研究大多集中在对现代海底热液成矿系统的研究^[19~25]. 本文报道了我们对广西大厂锡-多金属块状硫化物矿床的 He 和 Ar 同位素组成的初步研究结果, 并进一步探讨了成矿流体的来源及其形成演化.

1 矿床地质简介

大厂矿田位于丹(南丹)-池(河池)成矿带中部. 该成矿带在构造上位于江南古陆南西缘、右江再生地槽边缘的丹池褶皱带, 属古特提斯构造域和太平洋构造域的复合部位. 大厂矿田主要由拉么、长坡-铜坑和高峰 3 个矿床组成(图 1, 2). 拉么矿床主要产于笼箱盖花岗岩和上泥盆统条带状灰岩以及扁豆状灰岩接触带的矽卡岩中, 矿体呈似层状或透镜状, 矿石以含 Zn, Cu, Pb 和 Sn 为主. 笼箱盖花岗岩主要由斑状黑云母花岗岩和等粒状黑云母花岗岩组成, 形成年龄在 $115 \sim 99$ Ma^[26]. 长坡-铜坑矿床位于矿田西南部, 距笼箱盖花岗岩出露部位约 5 km. 该矿床以层状矿体为主, 产于上泥盆统硅质岩-碳酸盐岩中, 与

地层整合产出. 主要矿石矿物以锡石、黄铁矿和闪锌矿为主. 在层状矿体上部存在着大脉状和网脉状矿化. 高峰矿床主要由 100 号矿体组成, 呈囊状位于中泥盆统下部的礁灰岩中, 由块状硫化物和锡石组成. 块状矿石中金属富集程度极高, Zn, Pb, Sb, Sn 和 Ag 的含量分别为 9.7%, 4.84%, 4.22%, 1.86% 和 $148 \mu\text{g/g}$ ^[8]. 矿体与礁灰岩呈截然突变的接触关系, 热液蚀变作用不明显.

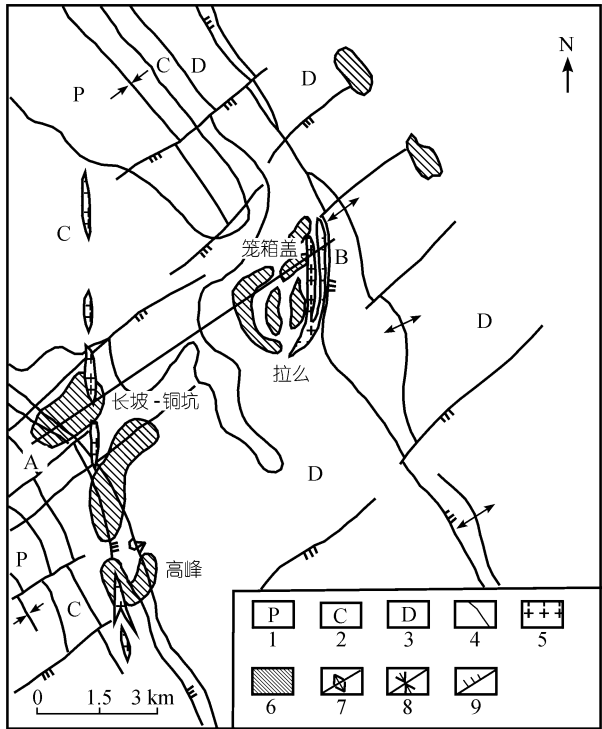


图 1 大厂矿田矿床分布平面图^[8]

1. 二叠纪灰岩、硅质岩; 2. 石炭纪灰岩; 3. 泥盆纪灰岩、页岩及硅质岩; 4. 地层线; 5. 花岗岩; 6. 矿体; 7. 背斜轴; 8. 向斜轴; 9. 断裂

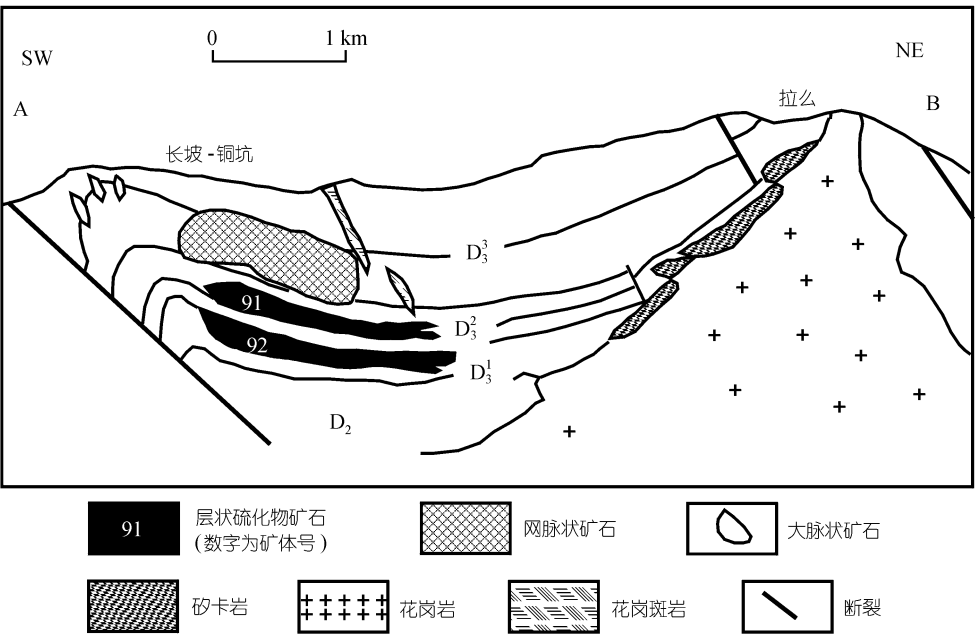


图 2 大厂长坡-铜坑-拉么矿床(A-B, 图 1)地质剖面图^[9]

2 取样及分析过程

本次研究对 4 件黄铁矿样品和 1 件萤石样品进行了流体包裹体的 He 和 Ar 同位素测定。

黄铁矿样品全部取自长坡-铜坑和高峰矿床的层状和块状矿体，其中 G-10, G-15 和 G-25b 样品取自高峰 100 号矿体，为块状硫化物矿石；T-38 样品取自长坡-铜坑矿床 92 号层状矿体。而萤石样品取自拉么与笼箱盖花岗岩有关的一条萤石-石英脉中。

测试工作在国土资源部矿床地质研究所完成。先将样品用丙酮在超声波中清洗 20 min，烘干，在真空中 120℃去气 24 小时。再压碎样品，释放出气体。释放出的气体经海绵钛泵、锆-铝泵、活性碳液氮冷阱 4 级纯化，活性气体均被冷冻、吸收，纯净的 He 和 Ne 进入分析系统。随 He 和 Ne 进入分析系统的微量 H₂ 及 Ar 等杂质气体经加液氮的钛升华泵再次纯化去掉，分析 He 同位素。最后于-78℃释放 Ar，进行 Ar 同位素分析。

测试仪器为乌克兰产 MI1201IG 惰性气体同位素质谱仪。³He 用电子倍增器接收，⁴He 用法拉第杯接收。分辨率：电子倍增器为 1200，法拉第杯为 760。使用标准为大气，其 ³He/⁴He = 1.4 × 10⁻⁶。

3 分析结果及讨论

分析结果如表 1。已有的研究表明，黄铁矿的流体包裹体中的 He 在流体包裹体被圈闭后不可能有明显的丢失^[22]。石英的流体包裹体中的 He 虽然有扩散丢失，但其 He 同位素组成没有明显的变化^[17]。萤石的情况可能与石英类似。因此可以认为表 1 中的 He 和 Ar 同位素组成的测定值，基本可以代表黄铁矿或萤石形成时流体的初始同位素值。

热液流体中惰性气体可能有 4 种来源^[18]：(1) 大气饱和水(ASW)，包括大气降水和海水，其典型的 He 和 Ar 同位素组成为：³He/⁴He = 1R_a (R_a代表大气氦的 ³He/⁴He 值，为 1.4 × 10⁻⁶)，⁴⁰Ar/³⁶Ar = 295.5；(2) 地幔流体，具有高 ³He 的特征，³He/⁴He 的特征值为 6~9 R_a，⁴⁰Ar/³⁶Ar 变化较大，一般比较高(>40000)；(3) 地壳放射成因的 He 和 Ar，³He/⁴He 的特征值为 0.01~0.05 R_a，而 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 也很高；(4) 大气 He 和 Ar，由于大气 He 含量很低，不足以对地壳流体中的 He 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。

从表 1 可以看出大厂锡-多金属矿床的层状和块

表 1 大厂锡-多金属矿床黄铁矿和萤石中流体包裹体 He 和 Ar 同位素组成^{a)}

样品号	样品名称	³ He/ ⁴ He (× 10 ⁻⁶)	⁴ He (× 10 ⁻⁶)	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁸ Ar	³⁶ Ar/ ³⁸ Ar	⁴⁰ Ar (× 10 ⁻⁷)	R/R _a
G-10	黄铁矿	2.5 ± 0.3	2.22	312 ± 2			1.58	1.8
G-15	黄铁矿	3.0 ± 0.8	1.06	327 ± 1	1741 ± 8	5.3 ± 0.0	26.59	2.1
G-25b	黄铁矿	2.4 ± 0.3	0.81	446 ± 18			23.48	1.7
T-38	黄铁矿	3.5 ± 0.1	3.67	323 ± 2	1699 ± 17	5.2 ± 0.1	24.04	2.5
L-69	萤石	0.98 ± 0.04	2.29	310 ± 3	1715 ± 18	5.5 ± 0.0	10.75	0.7

a) 样品测定在国土资源部矿床地质研究所, 分析者: 李金城, 李延河. 表中 ⁴He, ⁴⁰Ar 含量单位为 cm³/g(STP), 样品质量为压碎后通过 160 目(0.1 mm)的样品质量, R_a = 1.4 × 10⁻⁶

状矿体的成矿流体的 ³He/⁴He 值为 1.7~2.5 R_a, 大大高于地壳放射成因的 ³He/⁴He 比值. 这说明成矿流体中, 有地幔流体的参与. 一些学者将大厂锡-多金属矿床的成因类型归于岩浆热液交代和矽卡岩型, 主要是由于矿区内存在笼箱盖花岗岩体和拉么矽卡岩型矿化. 陈毓川等人^[1~3]和 Fu 等人^[4]认为成矿流体是岩浆来源. 与花岗岩有关的萤石所测得的流体的 ³He/⁴He 为 0.7 R_a, 低于层状和块状矿体的成矿流体, 反映了两者可能具有不同的来源.

在 ³He/⁴He-⁴⁰Ar/³⁶Ar 图解(图 3)上, 与层状和块状矿体有关的成矿流体落在地幔流体与大气饱和水(包括大气降水或者海水)之间. 作为对比, 图 3 中也标明了红海和 TAG 区现代海底成矿热液的同位素组成范围^[24,25], 它们均落在海水与地幔流体的演化曲线上, 说明该成矿流体可能是海水与地幔流体混合形成的. 而与花岗岩有关的流体落在大气饱和水与地壳流体之间. 笼箱盖花岗岩是典型的 S-型花岗岩^[1,2], 其 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值为 0.7159 和 0.7163^[26]. 目前世界上对花岗岩的 He 同位素组成研究还较少, 只有少量几个花岗岩的 ³He/⁴He 值, 其中乌克兰一些花岗岩, ³He/⁴He 值为(0.014~0.017) × 10⁻⁶, 为典型的放射成因 He^[27]. Stuart^[11]研究了 Pennines 北部与 S-型花岗岩有关的 Pb-Zn 矿化的硫化物和萤石中的流体包裹体的 He 和 Ar 同位素组成, 没有找到任何地幔流体混入的证据, 是典型的放射成因 He. 因此我们推测与笼箱盖花岗岩有关流体的惰性气体可能是大气降水与地壳放射成因 He 的混合而成. 由于与层状和块状矿体有关的成矿流体和与花岗岩有关的流体具有不同的来源, 从而证实了两者的可能没有成因联系. Jiang 等人^[9]也发现, 大厂层状矿体中的电气石和与花岗岩有关的脉状矿体中的电气石具有截然不同的地球化学和 Rb-Sr 及 Sm-Nd 同位素组成, 证明了它们形成于不同的热液系统. 结合其他一些研究成果, 如大厂层状矿体的容矿围岩的微量元素及稀土元素

地球化学研究表明, 容矿的硅质岩是一种热水沉积岩^[6,8]. 韩发等人^[8]还在层状矿体和块状矿体中发现了很可能是在海底热液体系中形成的冰长石和钡冰长石, 因此我们认为长坡-铜坑层状矿体和高峰块状矿体很可能是在泥盆纪时的海底热液喷流活动中形成的.

对现代海底热液成矿流体的稀有气体同位素组成有许多详细的研究, 这为我们对比研究古代的块状硫化物矿床的成矿流体提供了方便. 在以火山岩为容矿岩石的现代海底硫化物矿床中, 如东太平洋隆起 13° N 及 21° N; 中大西洋 23° N 及 26° N, 其成矿流体的 He 同位素组成比较均一, ³He/⁴He 值为 6~8 R_a, 为典型的地幔氦, 且与其围岩(玄武质火山岩)的 He 同位素组成是一致的^[19~24]. 但在以沉积岩为容矿岩石的 Juan de Fuca 海脊的 Middle Valley 硫化物矿床, 其成矿流体中 ³He/⁴He 比值为 4.4~6.9 R_a^[22], 低于以火山岩为容矿岩石的硫化物矿床. 这种降低的趋势正反映了成矿背景不同, 其地幔组分混入的程度降低. 大厂锡矿成矿流体的 ³He/⁴He 值比现代海底成矿热液要低, 这与其产在成熟的大陆壳背景下, 以地壳组分为主, 只有部分地幔组分混入这一特征相一致.

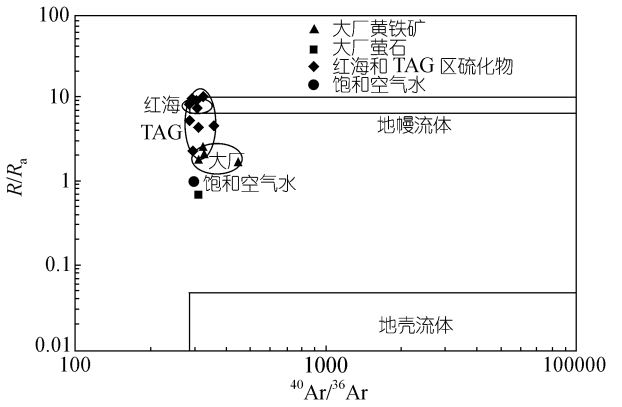


图 3 大厂锡矿成矿流体的 ³He/⁴He-⁴⁰Ar/³⁶Ar 图解
其中红海根据文献[24]; TAG 区根据文献[25]

本次研究中,也对黄铁矿和萤石样品的 Ar 同位素组成进行了测定(如表 1). 其中黄铁矿的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为 312~446, 略高于大气水的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值(295.5), 与现代海底成矿热液的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值一致^[24,25]. 萤石的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为 310.

4 结论

大厂锡-多金属矿床层状矿体和块状矿体的成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 1.7~2.5 R_a , 反映了成矿流体中有地幔流体的混入, 可能是海水与地幔流体混合形成的. 其 He 同位素组成不同于与花岗岩有关的流体, 说明了这些矿体的形成可能与笼箱盖花岗岩没有成因关系. 这为大厂锡矿层状矿体和块状矿体的海底热液喷流成因提供了新的证据.

致谢 本工作受国家杰出青年科学基金(批准号: 49925306)和国家重点基础研究发展规划(G1999043211)项目资助.

参 考 文 献

1 陈毓川, 黄民智, 徐钰, 等. 大厂锡石-硫化物多金属矿带地质特征及成矿系列. 地质学报, 1985, 59(3): 228 ~ 240

2 陈毓川, 黄民智. 大厂锡矿地质. 北京: 地质出版社, 1993

3 Fu M, Changkakoti A, Krouse H R, et al. An oxygen, hydrogen, sulfur, and carbon isotope study of carbonate-replacement (skarn) tin deposits of the Dachang tin field, China. Econ Geol, 1991, 86: 1683 ~ 1703

4 Fu M, Kwak T A P, Mernagh T P. Fluid inclusion studies of zoning in the Dachang tin-polymetallic ore field, People's Republic of China. Econ Geol, 1993, 88: 283 ~ 300

5 韩发, 哈钦森 R W. 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积成因的证据——含矿建造及热液沉积岩. 矿床地质, 1989, 8(2): 25 ~ 40

6 韩发, 哈钦森 R W. 大厂锡-多金属矿床热液喷气沉积成因的证据——容矿岩石的微量元素及稀土元素地球化学. 矿床地质, 1989, 8(3): 33 ~ 42

7 韩发, 哈钦森 R W. 大厂锡-多金属矿床热液喷气沉积成因的证据——矿床地质、地球化学特征. 矿床地质, 1990, 9(4): 309 ~ 323

8 韩发, 赵汝松, 沈建忠, 等. 大厂锡多金属矿床地质及成因. 北京: 地质出版社, 1997

9 Jiang S Y, Han F, Shen J Z, et al. Chemical and Rb-Sr, Sm-Nd isotopic systematics of tourmaline from the Dachang Sn-polymetallic ore deposit, Guangxi Province, P R China. Chem Geol, 1999, 157: 49 ~ 67

10 Simmons S F, Sawkins F j, Schulutter D J. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits. Nature, 1987, 329: 429 ~ 432

11 Stuart F M, Turner G. The abundance and isotopic composition of the noble gases in ancient fluids. Chem Geol, 1992, 101: 97 ~ 109

12 Stuart F M, Burnard P, Taylor R P, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluid: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralisation, South Korea. Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59: 4663 ~ 4673

13 Hu R Z, Burnard P G, Turner G, et al. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in west Yunnan Province, China. Chem Geol, 1998, 146: 55 ~ 63

14 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. 科学通报, 1997, 42(17): 1542 ~ 1545

15 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. 中国科学, D 辑, 1997, 27(6): 503 ~ 508

16 胡瑞忠, 钟宏, 叶造军, 等. 金顶超大型铅-锌矿床氮、氩同位素地球化学. 中国科学, D 辑, 1998, 28(3): 208 ~ 213

17 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, 等. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学. 中国科学, D 辑, 1999, 29(4): 321 ~ 330

18 Burnard P G, Hu R, Turner G, et al. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan Gold deposits, Yunnan Province, China. Geochim Cosmochim Acta, 1999, 63: 1595 ~ 1604

19 Baptiste P J, Charlou J L, Stievenard M, et al. Helium and methane measurements in hydrothermal fluids from the mid-Atlantic ridge: The Snake Pit site at 23° N. Earth Plant Sci Let, 1991, 106: 17 ~ 28

20 Rudnicki M D, Elderfield H. Helium, radon and manganese at the TAG and Snakepit hydrothermal vent fields, 26° and 23° N, Mid-Atlantic Ridge. Earth Planet Sci Let, 1992, 113: 307 ~ 321

21 Turner G, Sturart F. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulphides from the ocean floor. Nature, 1992, 357: 581 ~ 583

22 Stuart F M, Turner G, Duckworth R C, et al. Helium isotopes as traces of trapped hydrothermal fluids in ocean-floor sulfides. Geology, 1994, 22: 823 ~ 826

23 Baptiste P J, Fouquet Y. Abundance and isotopic composition of helium in hydrothermal sulfides from the East Pacific Rise at 13° N. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60: 87 ~ 93

24 Winckler G, Aeschbach-Hertig W, Kipfer R, et al. Constraints on origin and evolution of Red Sea brines from helium and argon isotopes. Earth Planet Sci Let, 2001, 184: 671 ~ 683

25 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. 中国科学, D 辑, 2000, 30(6): 628 ~ 633

26 徐文忻. 大厂锡多金属矿田同位素地球化学研究. 锡矿地质讨论会论文集, 北京: 地质出版社, 1987

27 Mamyrin B A, Tostikhin L N. Helium Isotope in Nature. Amsterdam: Elsevier, 1984

(2001-11-28 收稿, 2002-01-01 收修改稿)