安徽铜陵新桥铜-金矿床的 He、Ar 同位素组成及其意义

王彦斌[1]，曾普胜[2]，李延河[2]，蒙义峰[2]，杨竹森[2]，田世洪[2]

(1. 中国地质科学院 地质研究所，北京 100037；2. 中国地质科学院 矿产资源研究所，北京 100037)

摘要：对安徽铜陵新桥铜-金矿床层状矿体和块状矿体的黄铁矿进行了流体包裹体的 He、Ar 同位素研究。结果表明，成矿流体的 $N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar)\approx 238\sim 293$，$N(^{3}He)/N(^{4}He)\approx 1.03\sim 1.23$ Ra，与大气饱和水（包括大气降水和海水）的特征值 $N(^{3}He)/N(^{4}He)=1$ Ra，$N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar)=295.5$ 非常接近，表明成矿流体含大气降水和海水，这与野外地质特征也相符合，反映了成矿流体来自海底喷流（热水）沉积作用过程，这一认识为该区铜-金矿床可能的海底热液喷流成因提供了新的证据。

关键词：He 和 Ar 同位素；流体包裹体；新桥；铜陵；安徽

中图分类号：P597　　**文献标识码**：A

文章编号：1000 - 8527(2004)04 - 0524 - 05

0 引 言

氦同位素对示踪地壳的现代流体（海底热液、火山气体、地热体系等）中有无幔源组分的加入十分灵敏。研究表明地壳氦（$N(^{3}He)/N(^{4}He)\approx 0.01\sim 0.05$ Ra，Ra 为空气的 $N(^{3}He)/N(^{4}He)$ 值）和地幔氦（$N(^{3}He)/N(^{4}He)\approx 6\sim 9$ Ra）的 $N(^{3}He)/N(^{4}He)$ 值存在高达近 1 000 倍的差异，即使地壳流体中有少量幔源 He 的加入，用 He 同位素也易于判别出来[1]。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，但对安徽铜陵新桥铜-金矿床尚未进行He、Ar 同位素组成的研究。本文通过研究层状矿体中黄铁矿的流体包裹体的 He、Ar 同位素组成，来探讨其成矿流体的来源及其性质。

安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床是中国长江中下游铜-铁多金属成矿带中的重要矿床。由于其具有两种主要矿化类型：石炭纪地层控制的层状矿体类型和与石英闪长岩有关的矽卡岩型矿化类型，使得国内外学者对其成因存在以下不同的观点：(1) 早期的热液成矿[2]；(2) 接触交代型（层控矽卡岩型）[2]矿床；(3) 与石炭纪海底火山活动有关的火山喷发沉积形成的黄铁矿型铜矿，后经燕山期岩浆热液叠加改造而成[3~7]。对其成矿流体相应地存在着岩浆来源和海底来源的争论，这也是引人关注的问题。

1 矿床地质简介

新桥铜-硫-铁-金矿床位于长江中下游成矿带铜陵矿集区铜陵—顺安东西向基底断裂的南侧，舒家店背斜南西倾伏端与大成山背斜北东倾伏端的斜列交汇地带（图 1）[6]。

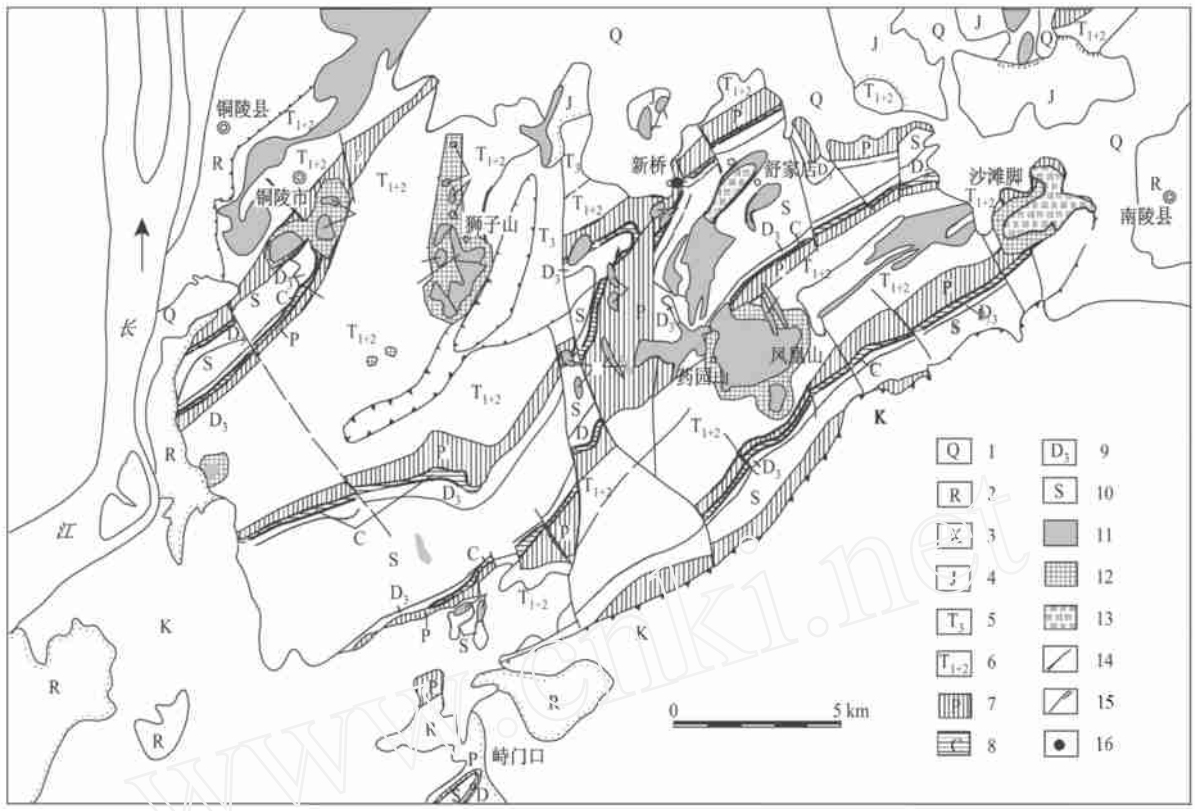
矿体按野外产状分为矿区内占主体的层状矿体和规模较小的矽卡岩矿体。层状矿体底板为上泥盆统五通组上段（D_3w^2）砂页岩，顶板为下二叠统栖霞组或上石炭统船山组的灰岩。矿体主要分布在上石炭统黄龙组、部分上石炭统船山组灰岩中，以及少部分火成岩体(石英二长闪长岩)的

收稿日期：2004 - 05 - 10；**改回日期**：2004 - 07 - 08；**责任编辑**：楼亚儿。

基金项目：国土资源部国际合作与科技司重点项目（20010209）。

作者简介：王彦斌，男，研究员，1966 年出生，地球化学专业，主要从事同位素地质年代学和地球化学的研究工作。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



1. 第四系；2. 第三系砂砾岩；3. 白垩系砂岩、砾岩；4. 侏罗系砂岩、火成岩；5. 上三叠统砂岩、页岩；6. 中—下三叠统灰岩、白云岩；7. 二叠系灰岩、硅质岩、页岩；8. 石炭系页岩、灰岩；9. 上泥盆统砂岩；10. 志留系砂岩、页岩；11. 中酸性岩体；12. 大理岩化带；13. 斑岩铜矿化岩体；14. 地质界线；15. 实测及推测断层；16. 取样位置

图 1　安徽铜陵矿集区地质简图

Fig. 1　Sketch geological map and sampling location of Tongling mineralization concentration area, Anhui

接触带中。主矿体呈似层状产于上石炭统黄龙组下部的白云岩段中，走向长 2 550 m，倾向延伸 1 810 m，垂直平均厚度 21 m，产状与围岩一致。赋矿层位处于海侵岩系的底部，但沿矿体和赋矿地层接触带，矿体与中石炭统黄龙组、部分上石炭统船山组灰岩普遍存在局部穿切关系。矿体上盘下二叠统栖霞组粉砂岩角砾还被矿体胶结[7]。层状矿体的矿石类型主要是以含铜黄铁矿矿石为主。矿石中金属矿物为黄铁矿、胶黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、菱铁矿等，脉石矿物主要为石英、白云石、方解石以及少量硬石膏、石膏、重晶石等。在岩体接触带附近还出现蛇纹石、石榴子石、透辉石。围岩蚀变主要有黄铁矿化、绿泥石化、矽卡岩化、大理岩化、硅化、绢云岩化、高岭土化等。

从新桥铜-金-硫-铁矿床 23 线地质剖面可以看出：石英闪长岩岩体穿切了层状矿体，并超覆其上，表明岩体侵入之前层状矿体已形成，但矿体在岩体附近明显加厚，指示岩体对成矿有叠加作用[7]。

2　分析方法

新桥矿区以黄铁矿矿石为主体，次为黄铁矿型铜矿石。空间上的分布规律为菱铁矿、铅锌矿石在外部，向内为黄铁矿型铜矿石，里面为磁铁矿矿石及叠加的磁铁矿型铜矿石。矿石的金属矿物以黄铁矿为主（占 90 %以上），其次为磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、方铅矿、闪锌矿、菱铁矿等。采集新桥铜矿层状主矿体的黄铁矿矿石样品，矿石矿物主要为黄铁矿（占 90 %以上）。经过在显微镜下观察，挑选 5 件黄铁矿样品进行了流体包裹体的 He、Ar 同位素测定。

测试工作在国土资源部同位素地质开放实验室完成。先将样品用丙酮在超声波中清洗 20 min，烘干，在真空中 120 ℃温度下去气 24 h，再压碎样品，释放出气体。释放出的气体经海绵钛泵、

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

锆铝泵去除掉活性气体，经活性碳液氮冷阱 4 级纯化，吸附 Ar、Xe，然后，Ar、Xe 被冷冻，纯净的 He、Ne 加入分析系统。随 He、Ne 进入分析系统的微量 H_2 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。最后在 - 78 ℃温度下释放 Ar，进行 Ar 同位素分析。根据压碎后通过 160 目（0.1 mm）的样品质量，计算样品的 He、Ar 含量。

测试仪器为乌克兰产的 MI-1201IG 惰性气体同位素质谱仪。^{3}He 用电子倍增器接收，^{4}He 用法拉第杯接收。电子倍增器的分辨率为 1 200，法拉第杯的分辨率为 760，使用标准大气，其 $N(^3He)/N(^4He) = 1.4 \times 10^{-6}$。

3 分析结果及讨论

He、Ar 同位素组成的分析结果如表 1 所列。已有的研究表明，黄铁矿的流体包裹体中含 He 的流体包裹体被圈闭后不可能有明显的丢失[7]。由于选取的层状矿体黄铁矿远离矶头岩株，其成矿阶段形成的矿物中的流体包裹体基本上可以代表黄铁矿形成时流体的初始同位素值。因此可以认为表 1 中的 He、Ar 同位素组成的测定值基本可以代表黄铁矿形成时流体的初始同位素值。

研究表明，矿物内的 He 和 Ar 主要有 3 种赋存状态：(1) 圈闭在流体包裹体中；(2) 矿物晶格中由 U + Th 和 K 衰变而产生的后生放射成因的 ^{4}He 和 ^{40}Ar；(3) 矿物表面吸附的 He 和 Ar。Stuart 等[8] 1994 年研究证明用压碎样品来提取稀有气体，矿物晶格内放射成因的 ^{4}He 和 ^{40}Ar 并未释放出来，且黄铁矿具有很低的氦扩散系数[9]，黄铁矿被认为是保存氦的理想矿物。Trull 等[10] 1991 年研究证实流体包裹体对氩有很好的保存能力，氩在漫长的地质历史时期也可以定量地保存下来。Qiu 和 Turner 等[10~13] 研究了流体包裹体内原地放射成因的 ^{40}Ar 的产率，结果表明，虽然对钾或含钾矿物中的流体包裹体不能完全排除原地放射成因的 ^{40}Ar 的叠加，但对于非含钾矿物（本研究属于这种情况），其流体包裹体内原地放射成因的 ^{40}Ar 的量则可以忽略不计。

热液流体中惰性气体可能有 4 种来源[14]：(1) 大气饱和水，包括大气降水和海水，其典型的 He 和 Ar 同位素组成为：$N(^3He)/N(^4He) = 1$ Ra（Ra 代表大气氦的 $N(^3He)/N(^4He)$ 值，为 1.4×10^{-6}，$N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar) = 295.5$；(2) 地幔流体，具有 ^{3}He 含量高的特征，$N(^3He)/N(^4He)$ 的特征值为 6～9 Ra，$N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar)$ 值变化较大，一般较高（40 000）；(3) 地壳放射成因的 He 和 Ar，$N(^3He)/N(^4He)$ 的特征值为 0.01～0.05 Ra，而 $N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar)$ 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，但是目前无法区别流体中是否有大气 Ar 的混入。

本次研究用的黄铁矿为采自新开采的掌子面的新鲜样品，从而排除了样品中存在宇宙成因 ^{3}He 的可能[7]。地壳中 ^{3}He 的产生主要受中子反应 $^6Li(n, \alpha) \rightarrow {}^3He$ 的控制。由于研究区缺乏含锂矿物，因此该区地壳的 $N(^3He)/N(^4He)$ 值应与地壳特征值相似，即 $N(^3He)/N(^4He) = 0.01$～0.05 Ra。从表 1 中可以看出，新桥铜-金矿床层状矿体的成矿流体的 $N(^3He)/N(^4He)$ 值为 1.02～1.22 Ra，大大高于地壳放射成因的 $N(^3He)/N(^4He)$ 比值，高出地壳特征值 2 个数量级，但与大气饱和水（包括大气降水和海水）相比，其成矿流体的 $N(^3He)/N(^4He)$ 约为 1.03～1.23 Ra，$N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar)$ 约为 238～293，与其特征值 $N(^3He)/N(^4He) = 1$ Ra，$N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar) = 295.5$ 非常接近，这表明热液流体中的稀有气体 He 的主要源区为含大气的降水和海水，这一新资料与野外地质特征相符合。

表 1 铜陵新桥铜-金矿床黄铁矿中流体包裹体的 He、Ar 同位素组成

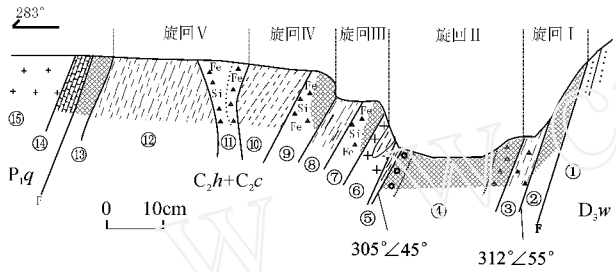
Table 1 He, Ar isotopic composition of fluid inclusions in pyrite from Xinqiao Cu-Au deposit

样品号	测定矿物	$N(^3He)/N(^4He)/10^{-6}$	$w(^4He)/10^{-7}$	$N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar)$	$N(^{40}Ar)/N(^{38}Ar)$	$w(^{40}Ar)/10^{-7}$	R/ Ra
505X3 - 1	黄铁矿	1.43 ±0.26	1.88	263 ±4	1 441 ±20	1.83	1.02
505X3 - 2	黄铁矿	1.56 ±0.21	0.82	238 ±3	1 424 ±11	0.62	1.11
505X3 - 3	黄铁矿	1.60 ±0.42	2.54	269 ±8	1 554 ±32	1.54	1.14
505X3 - 4	黄铁矿	0	微量	260 ±6	1 497 ±27	0.14	
505X3 - 5	黄铁矿	1.71 ±0.27	2.12	293 ±3	1 637 ±20	0.36	1.22

注：样品由国土资源部矿产资源研究所李金城分析测试；表中 ^{4}He 和 ^{40}Ar 的含量单位为 cm^3/g（STP），样品质量为压碎后通过 160 目（0.1 mm）的样品量，Ra = 1.4×10^{-6}。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如我们对新桥矿区重晶石和石膏的硫同位素研究知道，重晶石的硫同位素 $\delta^{34}S$ 值为 16.2‰，石膏的硫同位素 $\delta^{34}S$ 值为 14.6‰～16.0‰，与石炭纪海相硫酸盐的 $\delta^{34}S$ 值完全相当，证实矿层内石膏是石炭纪同生成因的。而且显示该区流体体系活动于中石炭世，以海底喷流-沉积为特征，主要证据为黄龙组（C_2h）底部的块状硫化物层，经采揭可见到完整的沉积-喷流岩石组合，分带清楚，虽然矿体附近或矿层软泥内有燕山期岩体的侵入，但沉积的胶黄铁矿层等块状硫化物矿层的重结晶等热扰动轻微，矿层的沉积-喷流组构保留完整，其中最完整的剖面中可见 4 次喷发旋回，韵律明显(图 1)[15]。



①五通组石英砂岩；②含纹层状黄铁矿泥质砂岩；③蓝灰色含构造角砾粘土岩；④块状硫化物，下部含角砾，上部为胶黄铁矿；⑤蓝色软泥；⑥含蓝色软泥捕虏体的石英二长闪长岩；⑦铁碧玉＋块状硫化物；⑧含重晶石蓝色软泥；⑨铁碧玉＋块状硫；⑩含重晶石菱锰矿蓝色软泥；⑪下部为赤铁矿＋上部铁碧玉角砾岩筒；⑫含混杂堆积角砾的蓝色软泥；⑬块状黄铁矿层；⑭大理岩化沥青灰岩；⑮蚀变的石英二长闪长岩

图 2　安徽新桥沉积-喷流块状硫化物矿床的剖面略图
(据曾普胜等，2003)

Fig. 2　Schematic section of Sedex massive sulfide in Xinqiao, Tongling, Anhui

完整的一次旋回的沉积-喷流系统由 3 部分组成，即补给带、通道相和喷出相。补给带位于喷流系统的下部，由主要网脉状石英硫化物组成，富铜、金，通常延续到下伏的地层中（与深部流体库相连），上为通道相；通道相通常其上部由紫红色角砾状赤铁矿或铁碧玉（Jasper）组成，孔洞发育，局部可见“黑烟囱”中残留的硫化物灰尘附着于孔洞壁上，向下逐渐过渡为原生硫化物；喷出相具有一定的堆积层理，喷溢活跃时期的胶黄铁矿或部分结晶黄铁矿堆积于底层，常含有较多的黄铁矿角砾或下伏地层的角砾，在快速堆积的斜坡地带可形成角砾大小不等、成分复杂的垮塌堆积，向外有重晶石、石膏、菱铁矿、菱锰矿堆积；其间夹有含炭质粘土形成的微细粒黄铁矿层，因自身重力作用，这种含黄铁矿的层状软泥可形成弯曲的甚至是箱状的小褶皱，蓝色粘土层代表相对平静的时期。

4　结　论

铜陵新桥铜-金矿床层状矿体的黄铁矿矿物中流体包裹体的 He、Ar 同位素组成基本上反映了成矿流体的初始同位素组成。与大气饱和水(包括大气降水和海水)相比，其成矿流体的 $N(^3He)/N(^4He)$ 约为 1.03～1.23 Ra，$N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar)$ 约为 238～293，与其特征值 $N(^3He)/N(^4He)=1$ Ra 以及 $N(^{40}Ar)/N(^{36}Ar)=295.5$ 非常接近，这表明热液流体中稀有气体 He 的主要源区为含大气的降水和海水，与红海和 TAG 区现代海底成矿热液的同位素组成相比[16,17]，该矿床的 $N(^3He)/N(^4He)$ 比值属于海水范围内，说明该成矿流体可能是海水，这一新资料与野外地质特征也相符合。因此，我们认为新桥层状矿体很可能是在石炭纪由海底热液喷流活动中形成的[18,19]。该新数据还为该区铜-金矿床的海底热液喷流成因提供了新的证据。

本文的研究工作一直得到张宗清研究员的指导和帮助，野外工作得到侯增谦研究员的指导和帮助，在此表示诚挚的感谢。

参考文献：

[1] 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 Dae Hwa W-Mo mineralization, South Korea [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59: 4663—4673.

[2] 杨兵，王之田. 铜官山铜矿床新类型矿体的发现及矿床成因模式 [J]. 矿床地质，1985，4 (4)：41—13.

[3] 徐克勤，朱金初. 我国东南部几个断裂拗陷带中沉积（或火山沉积）热液叠加类铁铜矿床成因的探讨 [J]. 福建地质，1978，4：1—68.

[4] 顾连兴，徐克勤. 论长江中下游中石炭世海底块状硫化物矿床 [J]. 地质学报，1986，60 (2)：176—188.

[5] Gu Lianxin, Hu Wenxuan, He Jinxiang, et al. Regional variations in ore composition and fluid features of massive sulphide deposits in South China: Implications for genetic modelling [J]. Episodes, 2000, 23 (2): 110—118.

[6] Zhai Y S, Xiong Y L, Yao S Z, et al. Metallogeny of copper and iron deposits in the eastern Yangtze Craton, east-central China [J]. Ore Geology Reviews, 1996, 11: 229—248.

[7] Xu G, Zhou J. The Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Tongling mineral district, China: synorogenic remobilization of a stratiform sulfide deposit [J]. Ore Geology Reviews, 2001, 18: 77—94.

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

[10] Trull T W, Kurz M D, Jenkins W J. Diffusion of cosmogenic ^{3}He in olivine and quartz: implications for surface exposure dating [J]. Earth Planet Sci Lett, 1991, 103: 241—256.

[11] Qiu H N. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of the quartz samples from two mineral deposits in western Yunnan (SW China) by crushing in vacuum [J]. Chem Geol, 1996, 127: 211—222.

[12] Turner G, Stuart F. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulfides from the ocean floor [J]. Nature, 1992, 357: 581—583.

[13] Turner G, Burnard P B, Ford J L, et al. Tracing fluid sources and interaction [J]. Phil Trans R Soc Lond A, 1993, 344: 127—140.

[14] Burnard P G, Hu R, Turner G, et al. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1999, 63: 1595—1604.

[15] 曾普胜, 裴荣富, 侯增谦, 等. 安徽铜陵地块沉积-喷流块状硫化物矿床 [J]. 矿床地质, 2002, 21 (增刊): 532—535.

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

[17] 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.

[18] 佟景贵, 李胜荣, 肖启云, 等. 贵州遵义中南村黑色岩系黄铁矿的成分标型与成因探讨 [J]. 现代地质, 2004, 18 (1): 41—47.

[19] 陈学明, 邓军, 白金刚, 等. 云南白牛厂矿区沉积盆地的成矿流体系统 [J]. 现代地质, 2000, 14 (2): 173—178.

ORIGIN OF ORE-FORMING FLUIDS OF THE XINQIAO Cu-Au DEPOSIT IN THE TONGLING MINERAL DISTRICT, ANHUI: EVIDENCE FROM He AND Ar ISOTOPES

WANG Yan-bin[1], ZENG Pu-sheng[2], LI Yan-he[2], MENG Yi-feng[2], YANG Zhu-sen[2], TIAN Shi-hong[2]

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*;
2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*)

Abstract: The ore genesis model of the Xinqiao Cu-Au deposit in Tongling of Auhui Province has long been in dispute, and the major debate focuses on whether the stratiform orebodies formed during the Yanshanian magmatic-hydrothermal event or they were products of carbonferious syn-sedimentary exhalative-hydrothermal event. The paper presents helium isotope data from fluid inclusions of five pyrites. The pyrites were collected from the stratiform orebodies in the deposit, and their $^{3}He/^{4}He$ ratios are significantly higher than 1, range from 1.02 to 1.22Ra, which indicateds a mantle component in the responsible hydrothermal fluids. It is suggested that the ore-forming fluids were a mixture of deep circulating seawater and a mantle-derived fluids, which are similar to many of those modern submarine hydrothermal fluids. The data provide a new evidence that favour the submarine exhalative-hydrothermal origin for the stratiform mineralization in Xinqiao Cu-Au deposit.

Key words: He and Ar isotopes; crustal fluid; mantle fluid,; Xinqiao Cu-Au deposit, Tongling; Anhui

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net