



江西漂塘钨矿成矿流体来源的He和Ar同位素证据

王旭东, 倪培*, 蒋少涌, 赵葵东, 王天刚

南京大学内生金属成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093;
南京大学地质流体研究所, 南京 210093

* 联系人, E-mail: peini@nju.edu.cn

2008-12-26 收稿, 2009-05-13 接受

国家自然科学基金创新群体基金资助项目(批准号: 40221301)

摘要 江西漂塘钨矿是华南钨矿的一个典型代表, 对该矿床主成矿阶段形成的黄铜矿、黑钨矿样品进行了流体包裹体 He 和 Ar 同位素组成测定, 结果表明, 成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.17~0.86 R/R_a , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 354.5~590.7. 根据这些样品的 He 和 Ar 同位素组成特征, 即 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值介于地壳(0.01~0.05 R/R_a)和饱和大气水(1 R/R_a)之间, 明显低于地幔的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(6~9 R/R_a), 而 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 稍高于大气饱和水的 Ar 同位素组成, 结合与成矿有关的花岗岩体及矿床中锂元素含量特征, 认为漂塘钨矿成矿流体以混有部分饱和大气水的地壳流体为主, 没有明显的幔源流体参与.

关键词

He-Ar 同位素
地壳流体
漂塘钨矿
江西

南岭钨多金属成矿带为环太平洋成矿带的组成部分, 是我国最重要的钨矿资源基地, 也是世界著名的钨矿资源集中区之一, 漂塘钨矿为该成矿带一个重要的大型石英脉型钨多金属矿床.

因稀有气体均具有化学惰性、在其参与的各种地质作用过程中基本保持不变, 可以反映出地质流体来源的原始信息, 并且其不同来源的流体中具有极不相同的同位素组成, 特别是地壳氦($^3\text{He}/^4\text{He}=0.01\sim 0.05 R/R_a$)和地幔氦($^3\text{He}/^4\text{He}=6\sim 9 R/R_a$)的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值存在高达近 1000 倍的差异, 即使地壳流体中有少量幔源氦的加入, 用氦同位素也易于判别出来. 因此, 稀有气体, 尤其是 He 和 Ar 同位素成为研究地质流体来源和多源流体混合的一种有效的方法 [1~4]. 20 世纪 80 年代末期以来, 一些学者先后以矿床中的矿物流体包裹体为测定对象, 研究了成矿古流体的 He 和 Ar 同位素组成, 并对一些重要的成矿区带和典型矿床的成矿流体来源进行了重新的厘定, 取得了许多重要的成果, 从而开拓了稀有气体在成矿古流体研究中的广泛应用 [5~24].

前人对南岭地区的钨矿成矿流体来源和演化的研究, 主要侧重于 H, O, S 和 C 等稳定同位素方面 [25,26], 尚未进行过流体包裹体稀有气体同位素研究. 近年来, 已有学者提出华南与花岗岩、火山岩有关的铀矿成矿过程中有幔源流体的参与 [27~29]. 对华南与花岗岩有关的钨多金属矿床成矿过程中是否有地幔流体参与, 目前尚未有人开展这方面的工作, 但国外已有研究者开展过钨多金属矿床成矿流体的 He 和 Ar 同位素研究, 发现这类与花岗岩有关的钨矿床成矿过程中有部分地幔流体参与了成矿 [4,18]. 为此, 我们开展了江西漂塘钨矿中黄铜矿、黑钨矿中流体包裹体的 He, Ar 同位素组成的分析, 以期对该矿床成矿流体的来源及矿床的成因机制进行厘定.

1 矿床地质简介

赣南地区大地构造位置处于欧亚大陆板块与滨西太平洋板块消减带内侧的华夏板块中 [30], 在成矿带上, 位于武夷山和南岭两大成矿带的交汇复合部位. 区内广泛分布具有高于地壳克拉克值几倍至几

引用格式: 王旭东, 倪培, 蒋少涌, 等. 江西漂塘钨矿成矿流体来源的 He 和 Ar 同位素证据. 科学通报, 2009, 54: 3338~3344

Wang X D, Ni P, Jiang S Y, et al. Origin of ore-forming fluid in the Piaotang tungsten deposit in Jiangxi Province: Evidence from Helium and argon isotopes. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0416-8

十倍钨含量的震旦纪-寒武纪基底岩系及泥盆纪地层^[31]。岩体出露较多,侵入岩以花岗岩为主,间有少量的中酸性、基性岩。岩浆侵入具有多期次活动的特点,与成矿有关的花岗岩类主要是分异演化程度较高并以高硅、富碱、富挥发分、铝过饱和为特征的燕山期陆壳改造型花岗岩^[32],岩体富含钨、锡、钼、铋、铍等成矿元素,常呈复式岩体产出。赣南地区矿产资源丰富,尤其以富产钨闻名于世。主要钨矿床类型包括热液石英脉型、花岗岩型、云英岩型、矽卡岩型、层控浸染型、破碎带型等,其中热液石英脉型是本区最重要的矿床类型。漂塘钨矿为本区一大型黑钨矿石英细脉带型钨多金属矿床,矿体内除富含黑钨矿、锡石外,尚伴有钼、铋、铜、铅、锌等可供综合利用。矿床位于区内西华山-棕树坑北东向构造岩浆成矿带北段(图 1)。

由于多次构造运动影响和岩浆的侵入,岩层均遭受不同程度的区域热变质,多见黑云母角岩、角岩化砂岩、板岩及斑点板岩等。

矿区内构造运动具有多旋回的特征。加里东期形成强烈的褶皱构造,为一紧密挤压,轴向北东,轴面倾向南东,倾角 60°~70°的复式向斜。燕山期断裂构造发育,主要表现为明显的东西向压性断裂带及北东向压剪性断裂带。断裂交接部位控制了燕山期隐伏花岗岩的峰部,为脉状钨锡矿床的充填提供了有利的空间条件。矿区内有出露地表的海西期石英闪长岩, K-Ar法年龄 274 Ma^[34]; 及隐伏 300 m 标高以下呈岩瘤状产出的燕山期斑状中细粒黑云母花岗岩,单颗粒锆石 U-Pb 年龄(161.8±1) Ma^[35]。石英闪长岩分布于矿区北部,受北东向和北西向断裂控制,岩体与围岩的接触变质作用不发育,与成矿没有成因关系。黑云母花岗岩受北东向和东西向断裂控制,与围岩接触界限清晰,接触变质作用发育,围岩广泛角岩化。漂塘钨多金属矿床由数百条含矿石英脉组成,含矿石英脉密集的分布在花岗岩凸起上部的围岩地层中,并延伸入岩体内部,脉侧通常发育有云英岩化。含矿石英脉具有多期次、多阶段的矿化特征。矿床的流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄(150.2±1.4) Ma^[36],稍晚于花岗岩。大量研究成果表明,本区此类型的钨矿床的形成,与燕山期陆壳改造型花岗岩类有密切的成因关系,赋矿的围岩地层亦为成岩成矿物质的重要来源之一^[31,37]。

矿体由密集的含矿石英脉构成,赋存标高总体上在 200~750 m 之间,一般长 100~1200 m,单脉脉幅从几厘米至 2 m,走向近东西,向北倾斜,倾角 75°~82°。类型上分细脉带型矿体和单独大脉型矿体两种,前者为矿床的主体,并且在整体上具有上部为细脉带型,向下部过渡为单独大脉型的典型“五层楼”形态特征^[38]。

含矿石英脉中矿物以石英和黑钨矿为主,其次有锡石、硫化物、碳酸盐矿物等数十种矿物,矿石结构类型主要有各种不同的自形晶结构和少量的交代、压碎结构。矿石构造主要以块状为主,尚有浸染状、梳状、条带状、角砾状和少量的晶洞构造出现。

2 分析方法和结果

本次研究对 3 件黄铜矿样品和 3 件黑钨矿样品流体包裹体的 He 和 Ar 同位素进行测定,样品取自漂塘

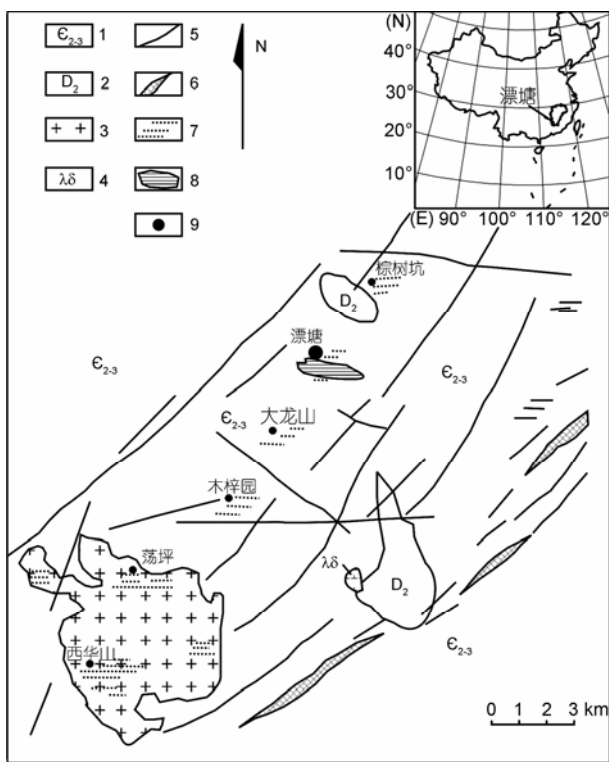


图 1 西华山-棕树坑钨锡成矿带区域地质略图

1, 中上寒武统; 2, 中泥盆统; 3, 燕山期花岗岩; 4, 海西期石英闪长岩; 5, 断裂; 6, 构造硅化带; 7, 含钨石英脉群; 8, 含钨石英细脉带矿体; 9, 钨矿床。据文献^[33]修改

漂塘钨矿矿区出露的地层主要为中厚层状的中上寒武统浅变质岩系,岩性为浅变质砂岩、板岩及少量硅质板岩,另有泥盆纪砂砾岩层在矿区零星分布。

钨矿主成矿阶段即黑钨矿-锡石-硫化物-石英脉阶段的含矿石英脉,黑钨矿和黄铜矿均为同一手标本上的共生样品。

在双目显微镜下挑选新鲜纯净的黄铜矿、黑钨矿,纯度达 99% 以上,在中国科学院贵阳地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室稀有气体质谱实验室进行 He 和 Ar 同位素测定. 实验步骤如下: (1) 将挑选好的单矿物在超声波丙酮溶液中洗净烘干; (2) 称取 500~1000 mg 矿物装入螺旋式压碎装置; (3) 烘烤螺旋式加热装置及装入的样品,烘烤温度在 120~150 之间,除掉矿物和装置吸附的大气成分,把系统抽成高真空状态; (4) 在高真空条件下压碎样品,使流体包裹体中的气体释放,进入气体净化系统; (5) 气体被纯化后,使用液氮将重的稀有气体冷冻在活性炭冷阱中,与氦分离; (6) 将纯化分离后的稀有气体送入主机中进行同位素分析。

分析仪器为英国产 GV5400He 型静态真空稀有气体质谱仪,³He 用电子倍增器接收,⁴He 用法拉第杯接收. 仪器的主要技术参数为: 灵敏度, He 为 2.9796×10⁻⁶ A/Pa, Ar 为 8.2642×10⁻⁶ A/Pa, 分辨率, 电子倍增器为 682.3, 法拉第杯为 228.1.

3 结果和讨论

分析结果见表 1, 黑钨矿是漂塘钨矿中最主要且最早晶出的矿石矿物之一, 黄铜矿为主要成矿阶段最主要的硫化物矿物, 其中的流体包裹体可以在最大程度上反映成矿期成矿流体的原始信息. 同时, 研究表明, 与黄铁矿具有很低的氦扩散系数相比, 尽管其他矿物中流体包裹体中的氦在流体包裹体被圈闭后发生一定的丢失, 但在扩散丢失过程中, 氦同位素并未产生明显的分馏, 对其 ³He/⁴He 比值一般影响不大, 因此, 在以 ³He/⁴He 值(而不是基于 He 的丰度)讨

论问题时, 可以不考虑扩散丢失的影响 [8]. 而大多数矿物中流体包裹体对氦都有很好的保存能力 [39]. 研究表明, 使用真空压碎的方法提取样品中的稀有气体时, 既不会产生明显的同位素分馏, 也不会使封闭在寄主矿物晶格中的放射性成因的 ⁴He 和 ⁴⁰Ar 释放出来 [3]. 由于热液流体包裹体内 U, Th, Pb 等元素含量极低 (Th 在热液中几乎不溶), 而黑钨矿、黄铜矿为非含钾矿物, 因此, 由 Th 和 K 放射性形成的 He 和 Ar 可以忽略不计 [40,41]. 氦在大气中的含量极低, 不足以对地壳流体中氦的丰度和同位素组成产生明显影响, 同时本次研究用的样品均采自地下坑道, 且暴露时间很短, 这些样品中流体包裹体内存在宇宙成因 ³He 的可能性可以排除 [14]. 因此可以认为测试的漂塘钨矿黄铜矿、黑钨矿流体包裹体中的 ³He/⁴He 比值及 Ar 同位素组成能够代表流体包裹体被捕获时成矿流体的初始值。

热液流体中惰性气体有 4 种来源 [9], 而且不同来源气体的氦、氩同位素组成及其特征比值具有显著差别: (1) 大气饱和水 (ASW), 包括大气降水和海水, 其典型的同位素组成为: ³He/⁴He = 1 R/Ra (Ra 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 ³He 含量高的特征, ³He/⁴He 的特征值为 6~9 R/Ra, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 值变化较大, Ar 以放射性成因 Ar 为主, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 值一般大于 40000, 尽管近年来对幔源包体、高压巨晶的稀有气体研究表明 [42~50], 欧洲、澳洲及中国大陆地幔 He 和 Ar 同位素特征和上述引用的地幔流体的值具有较大的差异, 中国东部大陆地幔的氦同位素组成还具有极不均一的 ³He/⁴He 特征, 但由于本论文研究区尚没有进行相关的研究, 缺失大陆地幔 He 和 Ar 同位素数据, 因此, 本文采用近年来国内外学者在用 He-Ar 同位素体系示踪成矿流体来源研究中通用的 He 和 Ar 同位素组成的值代

表 1 漂塘钨多金属矿床黄铜矿和黑钨矿中流体包裹体 He 和 Ar 同位素组成^{a)}

样品号	样品名称	⁴ He(×10 ⁻⁶)	³ He(×10 ⁻¹²)	³ He/ ⁴ He(×10 ⁻⁶)	误差 (%)	R/Ra	误差	⁴⁰ Ar(×10 ⁻⁷)	⁴⁰ Ar(×10 ⁻⁹)	³⁸ Ar/ ³⁶ Ar	误差	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	误差 (%)
pt-1	黄铜矿	5.3942	5.2947	1.0682	1.9014	0.763	0.014	13.1588	2.3732	0.1938	0.0038	554.27	3.05
pt-2	黄铜矿	3.3776	3.7357	1.2069	1.231	0.862	0.009	11.0522	1.8653	0.1904	0.0019	396.84	3.13
pt3	黄铜矿	3.2393	1.1827	0.3954	0.3796	0.282	0.003	6.8883	1.8193	0.1912	0.0049	378.62	2.27
pt-1-1	黑钨矿	4.8243	3.2513	0.7403	0.4441	0.529	0.003	10.3547	1.8113	0.1944	0.0050	590.65	3.28
pt-2-2	黑钨矿	8.2385	1.9727	0.2542	0.2974	0.182	0.002	6.4536	1.6535	0.195	0.0058	575.03	3.14
pt3-3	黑钨矿	6.7529	1.5029	0.2387	0.1384	0.170	0.001	6.6186	1.9092	0.194	0.0069	354.45	3.90

a) 样品由中国科学院贵阳地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室稀有气体质谱实验室蒋国豪分析测试. ⁴He, ³He, ⁴⁰Ar 含量单位为 cm³STP/g, 比值均为原子数之比, 以当地空气为标样, 标样测试值: ³⁸Ar/³⁶Ar=0.1876, ⁴⁰Ar/³⁶Ar=297.2, ³He/⁴He=1.497×10⁻⁶, 样品经过标准样品校正, 误差为 1δ 误差值, 浓度误差均小于 10%. 压碎重量为小于 100 目的样品重量, Ra 为空气的 ³He/⁴He 值

表热液流体 He 和 Ar 同位素的地幔端元。(3) 地壳放射成因的 He 和 Ar, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征值为 0.01~0.05 R/Ra , 而 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} \geq 45000$; (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。

由表 1 可知, 黄铜矿流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 0.28~0.86 R/Ra , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 378.62~554.27, 黑钨矿流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 0.17~0.53 R/Ra , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 354.45~590.65, 黑钨矿的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值略低于黄铜矿, 两者的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值相近。在 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^3\text{He}/^4\text{He}$ 图解(图 2)上, 黄铜矿、黑钨矿流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的投点落在地壳端元和饱和大气水之间, 与地幔端元相距较远, 反映出漂塘钨矿成矿流体主要为地壳流体和饱和大气水的混合, 没有明显的地幔流体成分混入。

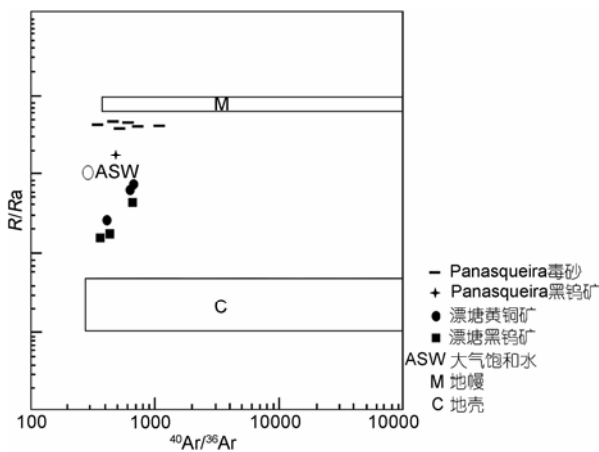


图 2 漂塘钨矿 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^3\text{He}/^4\text{He}$ 图解

(据文献 [14]修改) Dae Haw数据据文献 [4], Panasqueira数据据文献 [18]

与地壳放射成因的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征值相比, 本次工作所测试样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 还是略显偏高, 导致 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值略高的可能性有两种: 一是幔源 ^3He 的加入, 二是富含 Li 元素的地壳岩石矿物的存在。

近年来的大量研究表明, 华南地区中生代大规模的成矿作用与大陆岩石圈伸展关系密切 [51,52], 漂塘钨矿床无论在空间上还是时间上都处于这一成矿作用的范围之内, 但我们看到赣南地区与钨成矿有关的花岗岩均具有较高的 Sr 同位素初始比值、较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、较古老的 Nd 模式年龄的特征, 表明它们的成岩物质主要都是来源于该地区的基底

岩石, 为典型的陆壳改造型花岗岩, 同时区内主要的赋矿地层及与成矿有时空关系的花岗岩均具有高于地壳克拉克值几倍至几十倍钨含量。

就漂塘矿区来说, 矿区内及其邻近地区既没有大规模的深断裂作为幔源组分进入浅部的通道, 也不存在与成矿时代相近的与深源岩浆活动相对应的基性岩脉, 显然, 由高钨丰度的花岗岩和围岩地层组成的地壳部分在多旋回的构造岩浆活动中对钨矿的形成发挥了重要的作用。当然, 也不能完全排除在岩石圈伸展的构造环境下, 地幔物质的主动或被动上涌, 其中少量挥发份极强的幔源的组分进入到地壳流体体系, 参与成矿, 导致了 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的升高。

由于核反应 $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}(\beta)^3\text{He}$ 存在 [4], 而且锂在流体中是可溶的, 研究表明, 富含 Li 元素的花岗质岩石, 可以导致流体包裹体中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的升高 [2], 因而地壳岩石中 Li 元素的富集可能是导致其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值高于正常地壳值的原因之一。

与漂塘钨矿床有成因关系的花岗岩中的 Li 元素含量高达 81~127 ppm [53], 高于地壳的平均含量 20 ppm, 同时漂塘钨矿主要的工业矿脉中均含有的锂云母和铁锂云母, 值得注意的是, 含 Li 矿物铁锂云母存在于与黄铜矿和黑钨矿相同的成矿阶段中, 近于同时形成。

因此在漂塘钨矿床中, 尽管目前对测试矿物中的流体包裹体中 Li 的含量还不清楚, 但包裹体形成之时捕获含 Li 的流体及成矿流体在水岩反应中获取由于核反应 $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}(\beta)^3\text{He}$ 产生的 ^3He 则是可能的。虽然高的 Li 元素含量及由其引起的地壳 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值升高之间的对应关系还有待于进一步深入研究确定, 但与成矿相关的花岗岩及成矿阶段的矿石矿物中的高 Li 含量可能是黄铜矿、黑钨矿流体包裹体测得的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 组成高于地壳特征的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值原因之一。

从氩同位素组成特征可以看出, 所有样品的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值都稍高于饱和大气水的特征值(295.5), 其中均含有一定量的过剩 ^{40}Ar 。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值偏高是由放射性成因 ^{40}Ar 值偏高引起的。这些现象说明, 流体的温度较高(高于一般含钾矿物的氩封闭温度, 200)。因此, 在其与流经的岩石相互作用中, 捕获了部分放射成因的 ^{40}Ar 。这与该矿床成矿温度为 180~320 且大多高于 200 的事实较为一致 [36,54,55]。

尽管漂塘钨矿成矿流体的氩同位素组成特征与目前确定的有部分地幔流体参与成矿作用的热液矿

床如云南哀牢山金矿带 [8,9]、大渡河金矿田 [56]、小秦岭地区金矿 [57]、马厂箐铜矿床 [6,7]、胶东地区金矿床 [58]、新疆萨瓦亚尔顿金矿床 [59]、云南大坪金矿 [11]、秘鲁Casapalca 银多金属矿床和Pasto Bueno 钨贱金属矿床 [1]、韩国的Dae Haw 钨钼矿床 [4]等矿床的氦同位素变化范围(0.1~2.0 R/Ra)相差不大。但漂塘钨矿除了在矿种、构造背景、矿床的成因类型与上述矿床明显不同外,本次工作所测试的样品中还存在着没有一个测试数据的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值高于饱和大气水的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(1 R/Ra)的事实,同时Ar同位素特征与上述 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值低于 1 R/Ra 的矿床也存在较大的差异,基于以上原因,我们难以确认漂塘钨矿床的成矿流体中有明显的幔源成分参与。

对漂塘钨矿已进行的流体包裹体研究表明 [36,54,55],该矿床主成矿阶段含矿石英脉石英中流体包裹体的类型主要是不含或仅含微量 CO_2 的两相水溶液包裹体,其均一温度介于 180~290 之间,盐度范围为 0.35~10 wt% NaCl当量,成矿流体为盐度、均一温度不高但范围较宽的NaCl- H_2O 体系,其均一温度、盐度特征体现了成矿流体由花岗岩岩浆冷凝分异产生的均一温度、盐度较高的岩浆水与均一温度、盐度较低的大气水混合而成。

漂塘钨矿床成矿流体的氢氧同位素组成研究显示 [25],主成矿阶段含矿石英脉中石英和黑钨矿的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值分别为+6.1‰ ~ +1.1‰和+3.6‰ ~ +2.1‰,石英中 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为-59‰ ~ -63‰,表明漂塘钨矿床主成矿阶段成矿流体中的水为初始岩浆水与大气水混合而成,并且大气水成分占了较大的比例。

与漂塘钨矿床相比,经研究表明有明显幔源组分参与成矿的韩国Dae Haw钨钼矿床 [4]与矿化有关的花岗岩为燕山晚期I型花岗岩;而与本矿床极为类似的葡萄牙Panasqueira钨多金属矿床 [18],尽管与矿床有密切时空关系的花岗岩为典型的海西期S型花岗岩,矿床的He同位素组成表明幔源流体仍然可以是成矿流体中岩浆组分的主要来源(图 2)。但基于漂塘钨矿黄铜矿、黑钨矿流体包裹体中He和Ar同位素的组成特征,结合岩石及矿床中矿石矿物Li元素含量较高的事实,同时依据矿床成矿流体的氢氧同位素及流体包裹体特征,我们认为漂塘钨矿成矿流

体主要为地壳流体和饱和大气水的混合,即使有幔源组分的存在,其在成矿过程中也不发挥主要作用。

基于以上讨论,漂塘钨矿成矿流体可能的形成演化过程为:由花岗岩岩浆冷凝分异出富含成矿元素和挥发份的岩浆水与通过区内大量断裂和裂隙下渗的、被加热而深部循环并萃取了围岩地层中一定量金属元素的饱和大气水混合后向上运移,在物理化学条件改变的情况下,在有利的构造地段沉淀成矿(图 3)。

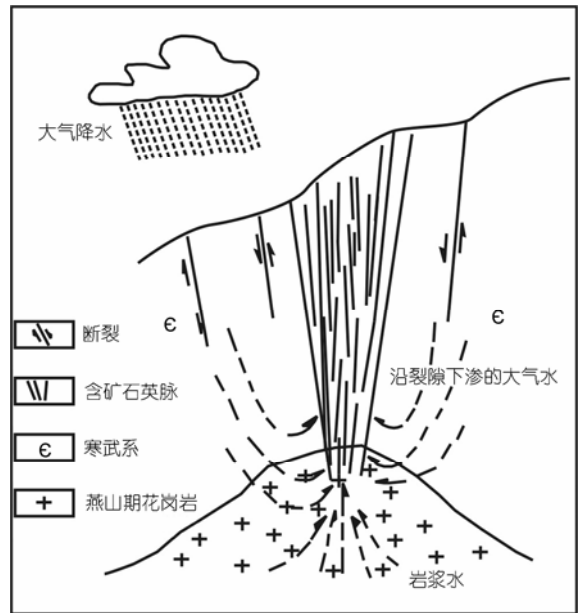


图 3 漂塘钨矿成矿模式简图

4 结论

漂塘钨矿主成矿阶段成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.17~0.86 R/Ra , 介于地壳放射成因的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(0.01~0.05 R/Ra)和饱和大气水的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(1 R/Ra)之间,明显低于地幔的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(6~9 R/Ra)。样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值略高于地壳的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值可能是由于岩石及矿床中矿石矿物 Li 元素含量较高所致。主成矿阶段成矿流体的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 354.45~590.65, 稍高于饱和大气水,其原因是,成矿流体与流经岩石的相互作用过程中,捕获了部分放射成因的 ^{40}Ar 所致。结合该矿床的具体地质情况,我们认为,漂塘钨矿与成矿有关的流体主要为与饱和大气水混合的地壳流体。

致谢 野外工作得到江西漂塘钨矿领导、漂塘坑口及生产部地质测量科人员的热情帮助,两位审稿人对论文初稿提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 Simmons S F, Sawkins F J, Schlutter D J. Mantle derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits. *Nature*, 1987, 329: 429—432[[doi](#)]
- 2 Stuart F M, Turner G. The abundance and isotopic composition of the noble gases in ancient fluids. *Chem Geol*, 1992, 101: 97—109
- 3 Stuart F M, Turner G, Duckworth R C, et al. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean floor sulfides. *Geology*, 1994, 22: 823—826[[doi](#)]
- 4 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, S. Korea. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 4663—4673[[doi](#)]
- 5 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: 1542—1545
- 6 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: 地球科学*, 1997, 27: 503—508
- 7 胡瑞忠, 钟宏, 叶进军, 等. 金顶超大型铅-锌矿床氦、氩同位素地球化学. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 208—213
- 8 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, 等. 哀牢山金矿带成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29: 321—330
- 9 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[[doi](#)]
- 10 孙晓明, Norman D I, 孙凯, 等. 粤中坑金矿成矿流体 N-Ar-He 示踪体系及来源. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29: 240—246
- 11 Kendrick M A, Burgess R, Patrick R A D, et al. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-porphyry mineralizing fluids. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65: 2651—2668[[doi](#)]
- 12 Kendrick M A, Burgess R, Leach D, et al. Hydrothermal fluid origins in Mississippi valley-type ore districts: Combined noble gas (He, Ar, Kr) and halogen (Cl, Br, I) analysis of fluid inclusions from the Illinois-Kentucky fluorspar district, Viburnum Trend and Tri-State districts, Midcontinent United States. *Econ Geol*, 2002, 97: 453—469[[doi](#)]
- 13 Kendrick M A, Burgess R, Patrick R A D, et al. Hydrothermal fluid origins in a fluorite-rich Mississippi valley-type district: Combined noble gas (He, Ar, Kr) and halogen (Cl, Br, I) analysis of fluid inclusions from the South Pennine ore field, United Kingdom. *Econ Geol*, 2002, 97: 435—451[[doi](#)]
- 14 赵葵东, 蒋少涌, 肖红权, 等. 大厂锡-多金属矿床成矿流体来源的 He 同位素证据. *科学通报*, 2002, 47: 632—635
- 15 Ballentine C J, Burgess R, Marty B. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Rev Mineral Geochem*, 2002, 47: 539—614[[doi](#)]
- 16 Mao J W, Li Y Q, Goldfarb R J, et al. Fluid inclusion and noble gas studies of the Dongping gold deposit, Hebei province, China: A mantle connection for mineralization? *Econ Geol*, 2003, 98: 517—534[[doi](#)]
- 17 Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, et al. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China. *Chem Geol*, 2004, 203: 305—317[[doi](#)]
- 18 Burnard P G, Polva D A. Importance of mantle derived fluids during granite associated hydrothermal circulation: He and Ar isotopes of ore minerals from Panasqueira. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 1607—1615[[doi](#)]
- 19 Sun X M, Wang M, Xue T, et al. He-Ar isotopic systematics of fluid inclusions in pyrites from PGE-polymetallic deposits in Lower Cambrian black rock series, South China. *Acta Geol Sin*, 2004, 78: 471—475
- 20 孙晓明, 熊德信, 王生伟, 等. 云南大坪金矿白钨矿惰性气体同位素组成及其成矿意义. *岩石学报*, 2006, 22: 725—732
- 21 Li X F, Mao J W, Wang C Z, et al. The Daduhe gold field at the eastern margin of the Tibetan Plateau: He, Ar, S, O, and H isotopic data and their metallogenic implications. *Ore Geol Rev*, 2007, 30: 244—256[[doi](#)]
- 22 Nicole A S, Samuel N, Karsten M H. Neon and helium isotopes as tracers of mantle reservoirs and mantle dynamics. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 258: 334—344[[doi](#)]
- 23 Zhao K D, Jiang S Y, Ni P, et al. Sulfur, lead and helium isotopic compositions of sulfide minerals from the Dachang Sn-polymetallic ore district in South China: Implication for ore genesis. *Mineral Petrol*, 2007, 89: 251—273[[doi](#)]
- 24 Sun X M, Xue T, He G W, et al. Noble gas isotopic compositions of cobalt-rich ferromanganese crusts from the western Pacific ocean and their geological implications. *Acta Geol Sin*, 2007, 81: 90—98
- 25 张理刚, 庄龙池, 钱雅倩, 等. 江西西华山-漂塘地区花岗岩及其钨锡矿床的稳定同位素地球化学. 见: 余鸿彰, 主编. 钨矿地质讨论会论文集(中文版). 北京: 地质出版社, 1984. 325—338
- 26 穆治国, 黄福生, 陈成业, 等. 漂塘-西华山石英脉型钨矿床碳、氢和氧稳定同位素研究. 见: 余鸿彰, 主编. 钨矿地质讨论会论文集(中文版). 北京: 地质出版社, 1984. 153—169
- 27 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞. 地幔流体与轴成矿作用. *地学前缘*, 2004, 11: 528—538
- 28 Jiang Y H, Ling H F, Jiang S Y, et al. Trace element and Sr-Nd isotope geochemistry of fluorite from the Xiangshan uranium deposit,

- SE China. *Econ Geol*, 2006, 101: 1613—1622[[doi](#)]
- 29 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题. *矿床地质*, 2007, 26: 139—152
- 30 徐克勤, 程海. 中国钨矿形成的大地构造背景. *地质找矿论丛*, 1987, 2: 1—7
- 31 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 等. 华南钨矿床的区域成矿条件分析. 见: 余鸿彰, 主编. 钨矿地质讨论会论文集(中文版). 北京: 地质出版社, 1984. 245—249
- 32 徐克勤, 孙鼎, 王德滋, 等. 华南花岗岩成因与成矿. 见: 徐克勤, 涂光炽, 主编. 花岗岩地质和成矿关系(国际学术会议论文集). 南京: 江苏科学技术出版社, 1984. 1—20
- 33 柳志青. 脉状钨矿床成矿预测理论. 北京: 科学出版社, 1980. 43
- 34 山峰. 某石英细脉带型钨锡矿床地质特征. *地质学报*, 1976, 1: 1—16
- 35 华仁民, 张文兰, 姚军明, 等. 大吉山-漂塘-黄沙坪岩体. 见: 周新民, 主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 2007. 446—449
- 36 李华芹, 刘家齐, 魏林. 热液矿床流体包裹体年代学. 北京: 地质出版社, 1993. 50—54
- 37 刘英俊, 李兆麟, 谢少卿, 等. 华南钨矿实验地球化学研究. 见: 余鸿彰, 主编. 钨矿地质讨论会论文集(中文版). 北京: 地质出版社, 1984. 127—140
- 38 古菊云. 华南脉状钨矿床的形态分带. 见: 余鸿彰, 主编. 钨矿地质讨论会论文集(中文版). 北京: 地质出版社, 1984. 35—45
- 39 Trull T W, Kurz M D, Jenkins W J. Diffusion of cosmogenic ^3He in olivine and quartz: Implications for surface exposure dating. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 103: 241—256[[doi](#)]
- 40 Qiu H N. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the quartz samples from two mineral deposits in western Yunnan (SW China) by crush in vacuum. *Chem Geol*, 1996, 127: 211—222[[doi](#)]
- 41 Turner G, Stuart F. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulfides from the ocean floor. *Nature*, 1992, 357: 581—583[[doi](#)]
- 42 Dunai T J, Baur H. Helium, neon, argon systematic of the European subcontinental mantle: Implications for its geochemical evolution. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 2767—2783[[doi](#)]
- 43 Matsumoto T, Honda M, McDougall I, et al. Noble gas in anhydrous lherzolites from the newer Volcanics, southeastern Australia: A MORB-like reservoir in the subcontinental mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62: 2521—2533[[doi](#)]
- 44 Matsumoto T, Honda M, McDougall I, et al. Noble gases in pyroxenites and metasomatised peridotites from the Newer Volcanics, southeastern Australia: Implications for mantle metasomatism. *Chem Geol*, 2000, 168: 49—73[[doi](#)]
- 45 徐胜, 刘丛强. 中国东部地幔包体的氦同位素组成及其地幔地球化学演化意义. *科学通报*, 1997, 42: 1190—1198
- 46 李延河, 李金城, 宋鹤彬, 等. 中国东部新生代玄武岩中幔源包体和高压巨晶的氦同位素研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31: 641—647
- 47 徐胜, 刘丛强. 我国东北部幔源包体中稀有气体丰度和同位素组成. *科学通报*, 2002, 7: 141—146
- 48 徐士进, 方中, 松本拓也, 等. 女山和英峰岭地幔巨晶矿物中的 He 和 Ar 同位素特征及其地质意义. *科学通报*, 2003, 48: 1087—1091
- 49 汤华云, 郑建平, 余淳梅. 华北东部新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体的流体及稀有气体组成研究. *岩石学报*, 2007, 23: 1531—1542
- 50 汤华云, 郑建平, 陈红汉, 等. 山东半岛第三纪基性火成岩 He-Ar 同位素与岩浆起源. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 451—459
- 51 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 335—343
- 52 毛景文, 谢桂清, 李晓峰, 等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. *地学前缘*, 2004, 11: 45—55
- 53 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 等. 赣南大吉山与漂塘花岗岩及有关成矿作用特征对比. *高校地质学报*, 2003, 9: 609—619
- 54 刘家齐, 常海量. 南岭地区某些燕山期花岗岩及其脉钨矿床的温压地球化学研究. 见: 宜昌地质矿产研究所-南岭地质矿产科研报告集. 第一辑. 武汉地质学院出版社, 1987. 164—165
- 55 王旭东, 倪培, 蒋少涌, 等. 赣南漂塘钨矿流体包裹体研究. *岩石学报*, 2008, 24: 2163—2170
- 56 李晓峰, 毛景文, 王登红, 等. 四川大渡河金矿田成矿流体来源的氦氩硫氩氧同位素示踪. *地质学报*, 2004, 78: 203—210
- 57 王义天, 毛景文, 叶安旺, 等. 小秦岭地区中深部含金石英脉的同位素地球化学特征及其意义. *矿床地质*, 2005, 24: 270—279
- 58 张连昌, 沈远超, 李厚民, 等. 胶东地区金矿床流体包裹体的 He 和 Ar 同位素组成及成矿流体来源示踪. *岩石学报*, 2002, 18: 559—565
- 59 杨富全, 毛景文, 王义天, 等. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床年代学、氦氩碳氧同位素特征及其地质意义. *地质论评*, 2006, 52: 341—351