

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

一种新的成矿流体示踪法——流体包裹体 N_2 -Ar-He 示踪体系

孙晓明^{1,2)} David I. Norman³⁾ 孙凯¹⁾ 陈敬德¹⁾ 陈炳辉¹⁾

1) 中山大学地球科学系, 广州, 510275;

2) 南京大学成矿作用国家重点实验室, 南京, 210093;

3) 新墨西哥矿业和技术学院地球与环境科学系, Socorro, 87801, 美国

内容提要 本文介绍了一种新的成矿流体示踪法: N_2 -Ar-He 示踪体系, 概述了其基本原理和分析方法, 并以粤中坑 Au-Ag 矿和粤东嵩溪 Ag-Sb 矿为例, 进行了成矿流体 N_2 -Ar-He 示踪体系研究, 结果显示其成矿流体均主要来自建造水或沉积热卤水, 为矿床成因研究提供了新的证据。

关键词 成矿流体示踪 N_2 -Ar-He 组成 He 同位素 沉积热卤水

成矿流体的来源是矿床学研究中最重要的问题之一。到目前为止, 根据流体包裹体分析判断成矿流体来源最常用的方法仍是 δD - $\delta^{18}O$ 组成投影法 (Taylor, 1974, 1997), 但由于: ① 此法所需纯净样品较多, 有时很难获得足够样品用于流体包裹体 δD 分析; ② 流体包裹体与石英等含氧矿物之间会发生氧同位素分馏; ③ δD - $\delta^{18}O$ 投影图上不同来源水之间有相当大程度重合, 造成成矿流体来源的多解性, 因而有必要探索一些新的成矿流体示踪法。近年来, 一些学者尝试用 Sr 同位素 (Norman et al., 1983; 魏春生等, 1996) 和惰性气体同位素组成 (Stuart et al., 1995; 胡瑞忠等, 1997) 进行成矿流体来源研究, 已取得一定的进展。

Giggenbach (1986, 1991, 1992) 在对新西兰等地大量热温泉研究基础上, 首先提出地热体系中 N_2 、Ar、He 等微量气体之间比值可用来确定热温泉中岩浆水、地壳水和大气降水之间相互比例, 因为这三者具有完全不同的 N_2 -Ar-He 组成; Norman 等 (1987) 利用四极质谱仪测定了各种矿床成矿流体包裹体中的气相组成, 积累了大量数据, 并在 Giggenbach (1986, 1991, 1992) 等人工作基础上, 提出成矿流体中 N_2 -Ar-He 之间比值可作为成矿流体的示踪体系 (Norman et al., 1994, 1996), 从而开辟了成矿流体示踪研究的一个新领域。笔者利用 N_2 -Ar-He 示踪法研究了粤中坑 Au-Ag 矿和粤东嵩溪 Ag-Sb 矿成矿流体的来源, 并据此对矿床成因提出了新的见解。

1 基本原理

大气中 N_2/Ar 为 83.6, 但由于 Ar 在水中溶解度大于 N_2 , 因此, 大气饱和水 (含海水) 的 N_2/Ar 为 38 左右。在浅部循环的大气降水中, He 的含量极低, 因而在 NAH 图上 (图 1), 大气

注: 本文为国家自然科学基金 (编号 49773195、49502029)、广东省自然科学基金 (编号 970123)、国家教育部优秀青年教师基金、中山大学自然科学基金、南京大学成矿作用国家重点实验室开放基金和美国岭南基金会青年教师培养基金联合资助。

本文 1999 年 1 月收到, 4 月改回, 章雨旭编辑。

降水由于富 Ar 而偏向 Ar 一侧(范围 E);成矿流体中 He 的来源主要有二:⁴He 主要来源于地壳中 U 和 Th 等放射性元素的衰变,³He 则主要来自地幔,但³He 含量远低于⁴He,即使在地幔流体中,³He/⁴He 一般 $<1.25 \times 10^{-5}$ 。由于地壳中 U 和 Th 含量较高,因而地壳水或建造水也因⁴He 含量较高而在 NAH 图上落在 He 一侧(范围 B);深部循环的大气降水也会因⁴He 的不断加入而落在建造水与浅部循环的大气降水之间(范围 D)。后来,Giggenbach(1992)等的研究发现:在 NAH 三角图上,与裂谷中玄武岩或流纹岩有关的岩浆水也会因³He 的积聚而落在地壳水范围内(范围 C),但其³He/⁴He 应 $>5.6 \times 10^{-6}$ (即 $R/R_a > 4$)(R 为样品中的³He/⁴He 值, R_a 为大气中的³He/⁴He 值),与典型的地壳水或建造水有明显区别;B 型板块俯冲过程中将大量海底沉积物带到地壳深部,由于其中生物分解过程中会释放出大量 N₂,因此来源较深的岩浆水因富含 N₂(N₂/Ar >200)而在 NAH 图上落在 N₂ 一侧(范围 A)。

2 分析方法

2.1 流体包裹体中 N₂、Ar、He 含量

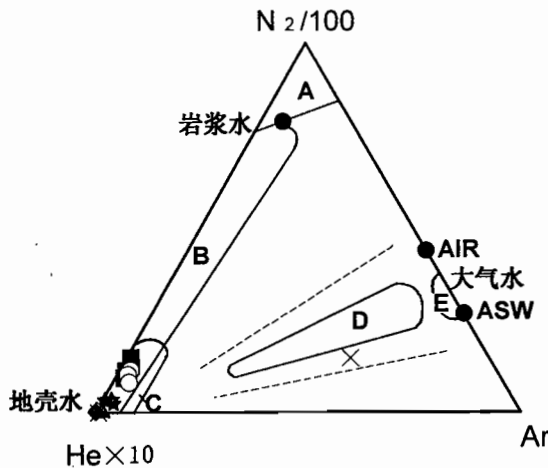


图1 长坑 Au-Ag 矿成矿流体 N₂-Ar-He 三角图

Fig. 1 N₂-Ar-He ternary diagram of ore-forming fluid in Changkeng Au-Ag deposit

AIR—大气; ASW—大气饱和水; A—岩浆水范围; B—建造水(沉积热卤水)范围; C—裂谷玄武岩或流纹岩有关岩浆水范围; D—深部循环的大气降水范围; E—浅部循环的大气降水(包括海水)范围。图中各种流体范围据 Norman 等(1994)。样品符号: ■—9629; ○—9767; ▲—9698; ★—96107; ×—F03

AIR—air; ASW—air-saturated water; A—magmatic water field; B—formation water (or sedimentary hot brines) field; C—rift basalt or rhyolite associated water field; D—deep circulated meteoric water field; E—shallow circulated meteoric water, including sea water, field. The fields of various fluids come from Norman et al. (1994). Sample symbol: ■—9629; ○—9767; ▲—9698; ★—96107; ×—F03

将 100 mg 粒径约 1 mm 的纯净矿物样品置于螺旋式手动碎样装置中,并将样品在 100℃ 条件下烘烤 8 h,同时将气体处理和提取系统抽成高真空($<2 \times 10^{-7}$ Pa)。在高真空条件下手动压碎样品,矿物中流体包裹体释放的气体在 1 sec 左右时间被送入 Balzer QMS420 型质谱仪测量。测试误差一般可达 $<5\%$ 。具体过程参见 Norman 等(1987)。

2.2 流体包裹体 He 同位素组成

将纯净矿物样品在 105℃ 烤干,置于炉内,在 500℃ 下加热约 1 h,释放出的气体经纯化后由乌克兰生产的 M1-12021G 型惰性气体质谱仪测定,其中³He 用电子倍增器接收,⁴He 用法拉第杯接收。³He 和⁴He 的空白值分别为 8×10^{-15} cm³ STP 和 8×10^{-10} cm³ STP。测试误差为 1%~5%。具体过程见 Li 等(1997)。

3 应用实例

3.1 粤中长坑大型 Au-Ag 矿

杜均恩等(1993, 1994, 1996)、关康等(1997)、张生等(1998)和张湖等(1999)曾先后研究了长坑 Au-Ag 矿床的地质特征。杜均恩等(1993, 1994, 1996)和关康等(1997)根据流体包裹体 δD - $\delta^{18}O$ 组成均认为其成矿流体来源于大气降水,但在 NAH 上,绝大多数数

据(表 1)落在建造水和裂谷中玄武岩或流纹岩有关的岩浆水范围内。从表 1 可见,所有样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均很低, $R/R_a < 1$, 因而可以排除成矿流体来源于裂谷玄武岩或流纹岩有关岩浆水的可能性。同时,该矿成矿流体也不可能主要来源于大气降水,否则大部分数据应落在图 1 的 E 或 D 范围内。因而长坑金银矿成矿流体应来源于建造水或沉积热卤水。

3.2 嵩溪 Ag-Sb 矿

郑庆年(1996)认为嵩溪 Ag-Sb 矿床成矿流体来源于海底热卤水;姚德贤等(1996)则认为其来源于岩浆水,主要证据亦是流体包裹体 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 组成及液相成分。但在 NAH 图上(图 2),可见所有样品亦落在范围 B 和 C 内。此外,从表 1 可见,嵩溪银锑矿所有样品流体包裹体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 组成均很低, $R/R_a < 1$, 因而完全可以排除成矿流体主要来自裂谷中玄武岩或流纹岩有关

表 1 长坑金银矿和嵩溪银锑矿成矿流体包裹体中 N_2 、Ar、He 含量(mol%)及 He 同位素组成

Table 1 N_2 , Ar and He contents(mol%) and He isotopic composition of fluid inclusions in Changkeng Au-Ag and Songxi Ag-Sb deposits

矿床	样品号	样品名称	采样位置	矿石类型	碎样次数	N_2	Ar	He	$\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}}$ ($\times 10^{-6}$)	$\frac{R}{R_a}$ ^①
长坑金银矿	9629	含金石英	ZK0406,132m	金矿	1	0.642500	0.000452	0.003634	0.0076	0.0054
					2	0.638432	0.001478	0.006013		
					3	0.841124	0.001200	0.006449		
	9767	含金石英	ZK0406,135m	金矿	1	1.579015	0.003565	0.011896	0.0240	0.0171
					2	3.083491	0.007394	0.026164		
					3	0.861116	0.003995	0.009284		
	9698	石英	ZK3206,132.15m	银矿	1	0.029492	0.000319	0.002994	1.1700	0.8357
	96107	石英	ZK3206,177.34m	银矿	1	0.143524	0.001677	0.005352	0.8500	0.6071
					2	0.094718	0.000539	0.002535		
					3	0.103830	0.000180	0.002954		
F03	闪锌矿	ZK1609,179m	银矿	1	n. d. ^②	0.000057	0.000807	0.8300	0.5930	
				2	0.001950	0.000070	0.000004			
嵩溪银锑矿	97201Q	石英	宝山-13m 中段,TD8	银锑矿	1	0.581166	0.000053	0.006866	0.242	0.1729
					2	0.519665	0.000074	0.003480		
					3	0.373786	0.000329	0.007253		
					4	0.608874	0.000152	0.018548		
					5	0.232133	0.000026	0.019687		
	97201Sb	辉锑矿	宝山-13m 中段,TD8	银锑矿	1	0.259227	0.000164	0.038851	0.081	0.0579
					2	0.013119	0.000024	0.000962		
	97209	石英	宝山-13m 中段,TD4	银锑矿	1	0.220098	0.000145	0.013427	0.484	0.3457
					2	0.097213	0.000052	0.009473		
					3	0.305190	0.000096	0.011707		
	97210	黄铁矿	宝山-13m 中段,TD4	银矿	1	0.790980	0.000577	0.007547	0.625	0.4464
					2	2.148841	0.051975	0.001275		
	97257	石英	ZK609,208.75m	银矿	1	0.654579	0.000141	0.015407	0.096	0.0686
					2	0.530185	0.000176	0.013898		
3					0.080460	0.000243	0.006304			
97299	石英	ZK609,407.75m	银矿	1	0.939319	0.000489	0.007163	0.285	0.2036	
				2	0.517790	0.000285	0.007803			
				3	0.359293	0.000272	0.004058			

① R 为样品中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, R_a 为大气中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值,取 1.4×10^{-6} ; ② n. d.: 低于检测限。

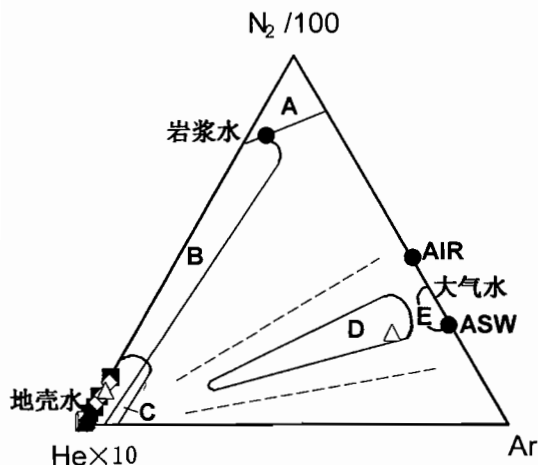


图2 嵩溪银锑矿成矿流体 N_2 -Ar-He 三角图
Fig. 2 N_2 -Ar-He ternary diagram of ore-forming fluid in Songxi Ag-Sb deposit

各流体的范围同图1; 样品符号: ■—97201Q; □—97201Sb; ▲—97209; △—97210; ◆—97257; ◇—97299
The fields of various fluids are same as those in Fig. 1. Sample symbol: ■—97201Q; □—97201Sb; ▲—97209; △—97210; ◆—97257; ◇—97299

成矿流体均以中低温(150~250℃)、中等盐度(10~20 NaCl wt%)和富含有机质为特征,类似于美国密西西比型(MVT)Pb-Zn 矿成矿流体(Norman et al., 1985)。因而,两者的成因也应有一定的相似性。从成矿流体来源看,两者成因类型均属沉积热卤水改造型矿床。推测其成因大致如下:接受了巨厚沉积的三洲或寨岗上沉积盆地在裂谷活动和岩浆侵入影响下,地热梯度升高,加上上覆沉积物的压力,沉积岩中的建造水或沉积热卤水将顺地层向盆地边缘侧向移动,并在有利的构造部位成矿。

4 局限性

作为一种新的成矿流体示踪法, N_2 -Ar-He 示踪体系有许多不可替代的优点,如:①用样量很少,且任何矿物均可测定;②分析速度很快;③NAH图上不同来源成矿流体范围很少重叠;④ N_2 、Ar、He 均为惰性气体,与赋存矿物之间一般不会发生化学反应。

但此法也有一些局限性,如:①成矿流体的一种重要类型——变质水在NAH图上尚未确定范围;②由于高温下He在矿物中扩散速率远高于 N_2 、Ar,因而分析数据中常出现He偏低情况;③当矿物中共存各种流体包裹体时,如因沸腾作用引起矿物中气相包裹体和液相包裹体共存时,同一样品分析给出的 N_2 、Ar、He 会差异甚大,且仅代表流体包裹体的平均组成。目前,笔者等正努力使这种新的成矿流体示踪法日臻完善。

本文得到 Andrew Campbell 教授和 Beverly Chomiak 女士技术上的帮助,谨此致谢!

参 考 文 献

杜均恩,马超槐,张国恒. 1993. 广东长坑金银矿成矿特征. 广东地质, 8:1~8.

岩浆水的可能性。因而,嵩溪银锑矿成矿流体亦可能主要来源于建造水或沉积热卤水。

3.3 矿床成因意义

成矿流体 N_2 -Ar-He 示踪体系研究为我们探讨长坑 Au-Ag 矿和嵩溪 Ag-Sb 矿成因提供了新的思路。这两个矿床虽属不同的工业类型,但有许多相似的地质特征,如:①大地构造上,两者均位于早期裂谷中。长坑位于属陆内微型扩张的东西向高要—惠来构造带中(广东省地质矿产局,1988),而嵩溪位于具裂谷性质的永梅拗陷南段(郑庆年,1996);②两者均以巨厚的沉积岩为围岩,其中有机质含量均很高(杜均恩等,1993;郑庆年等,1996);③两者均位于巨厚沉积盆地的边缘。长坑位于三洲晚古生代断陷盆地北西缘(杜均恩等,1993,1994,1996),而嵩溪位于寨岗晚古生代火山沉积盆地之北缘(郑庆年,1996;姚德贤等,1996);④矿体明显受到构造控制。长坑主要受上三叠统和下石炭统之间缓倾斜的层间断裂控制,而嵩溪主要受背斜轴部张裂控制;⑤

- 杜均恩,马超槐. 1994. 长坑微细粒型金矿与银矿的地质特征. 见:刘东升主编. 中国卡林型(微细浸染型)金矿. 南京大学出版社. 343~355.
- 杜均恩,马超槐,魏琳. 1996. 广东长坑金银矿地球化学特征. 广东地质, 11:49~59.
- 关康,栾有守,颜竹筠. 1997. 长坑金矿床地质特征与成因探讨. 贵金属地质, 6:27~37.
- 广东省地质矿产局. 1988. 广东省区域地质志. 北京:地质出版社. 1~941.
- 胡瑞忠,毕献武,Turner G. Burnard P G. 1997. 马厂菁铜矿床黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系. 中国科学, 27(6): 503~508.
- 魏春生,涂光炽. 成矿流体 δD - $\delta^{18}O$ - ^{87}Sr - ^{86}Sr 理论模型研究. 中国科学, 1996, 26(4):373~377.
- 姚德贤,李兆麟,叶银法,张守基. 1996. 粤东宝山银(锑)矿床地质特征和成因. 矿床地质, 15(2):123~132.
- 张湖,程景平,王秀璋,李统锦. 1999. 广东长坑—富湾银金矿区硅质岩时代的新资料及其意义. 地质论评, 45(1):36.
- 张生,李统锦,王联魁. 1998. 广东长坑金银矿床成矿机制热力学模拟研究. 地质学报, 72(1):52~63.
- 郑庆年. 1996. 一个海底基性火山喷流成因的银锑矿床地质特征. 矿床地质, 15(3):238~248.
- Giggenbach W F. 1986. The use of gas chemistry in delineating the origin of fluid discharges over the Taupo Volcanic; A review. Proc. Intel. Volcanol. Congress, New Zealand, 5: 47~50.
- Giggenbach W F, Matsuo S. 1991. Evaluation of results from Second and Third IAVCEI Field Workshops on Volcanic Gases, Mt. Usu, Japan, and White Island, New Zealand. Appl. Geochem. 6: 125~141.
- Giggenbach W F, Glover R B. 1992. Tectonic and major processes governing the chemistry of water and gas discharges from the Rotorna Geothermal Field, New Zealand. Geothermics, 21:121~140.
- Li Y H, Song H B, Li J C, Yao X M. 1997. Relation between polymetallic nodules and submarine hydrothermalism in the central Pacific Ocean. Chinese Science Bulletin, 42: 1980~1983.
- Norman D I, Landis G P. 1983. Source of mineralizing components in hydrothermal ore fluids as evidenced by ^{87}Sr / ^{86}Sr and stable isotope data from the Pasto Bueno deposit, Peru. Econ. Geol. 78: 451~465.
- Norman D I, Ting W, Bordan R P, Smith R W. 1985. Mineralization of the Hansonburg Mississippi-Valley-Type deposit, insight from composition of gases in fluid inclusions. Canadian Mineralogist, 23:353~368.
- Norman D I, Sawkins F J. 1987. Analysis of gases in fluid inclusions by mass spectrometer. J. Chem. Geol., 61:1~10.
- Norman D I, Musgrave J. 1994. N_2 -Ar-He compositions in fluid inclusions; indicators of fluid source. Geochim. Cosmochim. Acta, 58:1119~1131.
- Norman D I, Moor J N, Yonaka B, Musgrave J. 1996. Gaseous species in fluid inclusions; a tracer of fluids and indicator of fluid processes. In: Norman D I. ed. Proceedings of 21st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University. 1~8.
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, Turner G. 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Pal Hwa W-Mo mineralization, South Korea. Geochim. Cosmochim. Acta, 59: 4663~4673.
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. Econ. Geol., 69: 843~883.
- Taylor H P. 1997. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. In: Barnes H L. ed. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (Third edition). New York: Wiley. 229~302.

A New Indicator of Ore-forming Fluids Source: N_2 -Ar-He Compositions in Fluid Inclusions

Sun Xiaoming^{1,2)} David I. Norman³⁾ Sun Kai¹⁾ Chen Jingde¹⁾ Chen Binghui¹⁾

1) Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou, 510275;

2) State Key Laboratory of Metallogenesis, Nanjing University, Nanjing, 210093;

3) Department of Earth & Environmental Sciences, New Mexico Institute
of Mining and Technology (NMT), Socorro, NM87801, USA

Abstract

A new indicator of ore-forming fluids source, N_2 -Ar-He compositions in fluid inclusions, including its principle and analytical method, has been introduced. A case study has been taken on

two Chinese ore deposits; the Changkeng Au-Ag deposit and the Songxi Ag-Sb deposit situated in Guangdong Province, South China. The results show that the ore-forming fluids in the two deposits are mainly composed of formation water or sedimentary hot brines, which provides new evidence for the genesis of the two deposits.

Key words: ore-forming source; N₂-Ar-He compositions; He isotope; sedimentary hot brine

作者简介

孙晓明,男,1963年生。1990年获中国—澳大利亚联合培养矿床学博士学位。现为中山大学地学院教授。通讯地址:510275,广州中山大学地学院;电话:020—84036653;传真:020—84113616;E-mail: eessxm@zsu.edu.cn。
