

专题9：与沉积岩有关矿床的成矿模式与勘查技术方法

南盘江-右江盆地金、锑共生分异机制

陈军^{1,2*}, 黄智龙², 杨瑞东¹, 刘建中³, 杜丽娟¹

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 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 550081; 3. 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术创新中心, 贵阳 550081

元素的共生分异是指一些地球化学性质相近的元素在成矿过程中相互依存、共同迁移, 但由于成矿环境的变化和元素配合物稳定性的差异, 这些共生的元素通常会在时空上出现分异。元素的共生分异机制是矿床地球化学的重要研究内容, 这一研究已在找矿勘探中得到了广泛应用。南盘江-右江成矿带是我国划分的第 21 个重要成矿区(带), 位于全球特提斯和环太平洋两大巨型成矿域的交汇部位, 成矿条件优越, 目前在区内已探明金矿储量 920t, 发育多个大型-超大型多元素组合(Au-As-Sb-Hg-Tl)金矿床^[1]。在该成矿带内, 金、锑呈现出明显的共生分异特征, 表现为: 第一, 金矿床和锑矿床密集相邻产出, 这些金、锑矿床成矿时代一致, 赋矿地层岩性、围岩蚀变等地质特征相似^[2-4], 赋矿围岩主要为中-上二叠统碳酸盐岩及火山碎屑岩, 发育硅化、萤石化、去碳酸岩化和硫化等围岩蚀变^[4-6]。第二, 金矿化伴生弱的锑矿化、锑矿化伴生弱的金矿化, 呈现“你中有我, 我中有你”特征^[7], 如水银洞超大型金矿床伴生锑矿化^[8]、晴隆大型锑矿床伴生金矿化^[5]。

由于 Au、Sb 在区域上或同一矿床中这种共生分离现象的存在, 直接影响了 Au、Sb 成矿过程模型的建立和找矿评价工作。因此, 亟须运用新的研究视角和研究方法进行 Au、Sb 成矿过程的异同研究, 以揭示 Au、Sb 共生分异机制, 为进一步深化大面积低温成矿理论提供补充。为此, 本文主要利用矿物原位微量元素、同位素分析和热力学模拟等手段, 对 Au、Sb 成矿过程中的流体物质组成变化、元素在热液演化过程中的行为特征以及富集沉淀机制进行研究, 揭示 Au、Sb 发生共生分异的主要控制因素, 并初步建立南盘江-右江成矿带金、锑共生分异机制模型, 为下一步找矿勘查提供理论借鉴。

1、主要认识

系统的流体包裹体研究显示, 锑成矿流体为中-低温(161~294°C)中-低盐度(0.35~13.18 wt.% NaCl equiv.)酸性 H₂O-NaCl-有机烃混合水溶液体系, 金成矿流体为中-低温(168~227°C)低盐度(0.18~6.30 wt.% NaCl equiv.)中型 H₂O-NaCl-CO₂ 水溶液体系^[5-6]。热力

基金项目: 国家自然科学基金: 青年科学基金(批准号: 41802107); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2019]1315号)
作者简介: 陈军(1987—), 男, 特聘教授, 研究方向: 金锑成矿作用研究。

学计算显示, Sb 主要以 $Sb_2S_2(OH)_2$ 方式运移, 在流体晚阶段以 HSb_2S_4 方式运移, 流体混合导致的温度和氧逸度的降低是引起辉锑矿沉淀的主要机制; 而 Au 主要以 $AuHS^0$ 运移并以化学结合态 (Au^{1+}) 的方式赋存于黄铁矿富 As 环带中^[5]。

对含金黄铁矿不同环带进行 NanoSIMS 硫同位素组成分析, 结果显示 As 含量与硫同位素组成在不同环带中存在着协同变化^[4]。 $\delta^{34}S$ 值在富 As 环带中呈现出相对较低并且集中的趋势 ($-6.9\% \sim +6.1\%$, 集中在 $-4.2\% \sim +1.6\%$)。相反, 在贫 As 环带中, $\delta^{34}S$ 值介于 $-18.9\% \sim +18.1\%$, 集中在 $+3\% \sim +12\%$ 。含金黄铁矿这种富 As 环带较窄的的硫同位素组成 ($-5.0\% \sim +5.0\%$), 揭示金锑成矿流体中的硫不可能来自于地层, 而是来自于岩浆或者变质来源^[9]。尽管研究区没有岩体出露, 但是近些年的地球物理勘探发现右江盆地存在隐伏岩体^[10-11]。同样, 一些地球化学参数也指示成矿流体与深部岩浆热液有关, 如 He-Ar 同位素^[12]和与金-锑成矿年龄相接近的岩浆锆石年龄以及热液锆石氧同位素组成^[13]。以上这些特征表明金、锑成矿流体中的硫具有相同的来源, 主要来源于深部岩浆流体。

对与锑成矿相关的萤石进行微量元素分析显示: 萤石的中稀土 (MREE, Sm-Dy) 特征指示成矿流体流经了深部硫酸盐富集区 (比如下寒武统牛蹄塘富重晶石黑色岩系); 萤石稀土元素的 Ce 的弱负异常和 Eu 的无异常揭示碳酸盐地层水或者同时期海水可能也是主要的成矿流体来源之一^[6]。对萤石的 Sr 同位素组成分析显示: 锑成矿相关萤石的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值数据范围较宽 ($0.70776 \sim 0.70931$), 并且从未蚀变灰岩-硅化灰岩-萤石逐渐升高。流体中的放射性成因 Sr 主要来自深部变质储层, 而低 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 端元主要来自于中二叠碳酸盐地层 (或同时期海水)。石英和萤石 H-O 同位素组成显示: 成矿流体初始流体为岩浆水, 随着流体的运移, 在成矿早阶段与盆地流体混合, 这种流体混合导致的稀释作用使得流体温度降低, 引发成矿早阶段石英、萤石和辉锑矿的大量沉淀。在成矿晚阶段, 缺乏萤石矿物的沉淀说明流体中的 F 被大量消耗, 也暗示盆地流体的供给趋于停止, 成矿流体重新被岩浆流体主导, 继而岩浆流体与大气降水混合, 引发强烈的水/岩反应, 导致黄铁矿沉淀, 形成金矿体。

2、金、锑共生分异模型建立

综合前人对卡林型金矿床大量的研究成果, 在此基础上, 建立了金、锑共生分异模型 (图 1)。在燕山晚期 ($\sim 140Ma$), 高温岩浆热液可能沿盆地伸展断裂上升^[14], 并交代盆地基底的碳酸盐岩或者是含硫酸盐地层 (如下寒武统的黑色岩系及碳酸盐岩), 萃取成矿物质 (Au、As、Sb) 形成富集 ^{87}Sr 的含矿流体。当这些成矿流体上升至 $1.7 \sim 4.3km$ (低于静岩压力), 成矿流体发生沸腾^[15], 导致流体不混溶形成两种不同性质的流体。其一为富 Au-As (含少量 Sb) 富 CO_2 、中低盐度的流体, 其二为富 Sb (含 Au-As) 较高盐度的流体。当这些不同

性质的流体进入上二叠统碳酸盐岩的层间断裂或者是构造断裂带时,前者与碳酸盐岩地层发生强烈的水/岩相互作用,形成金矿床(伴生 Sb);而后者与盆地流体(地层水)混合,导致大量辉锑矿沉淀,形成锑矿床。由此认为,不同成矿阶段流体混合导致的稀释过程在金、锑成矿过程中扮演了重要作用,同时这一过程引发的成矿流体成分、温度、氧逸度以及 pH 的差异,是导致 Au、Sb 发生分异的主要控制因素。

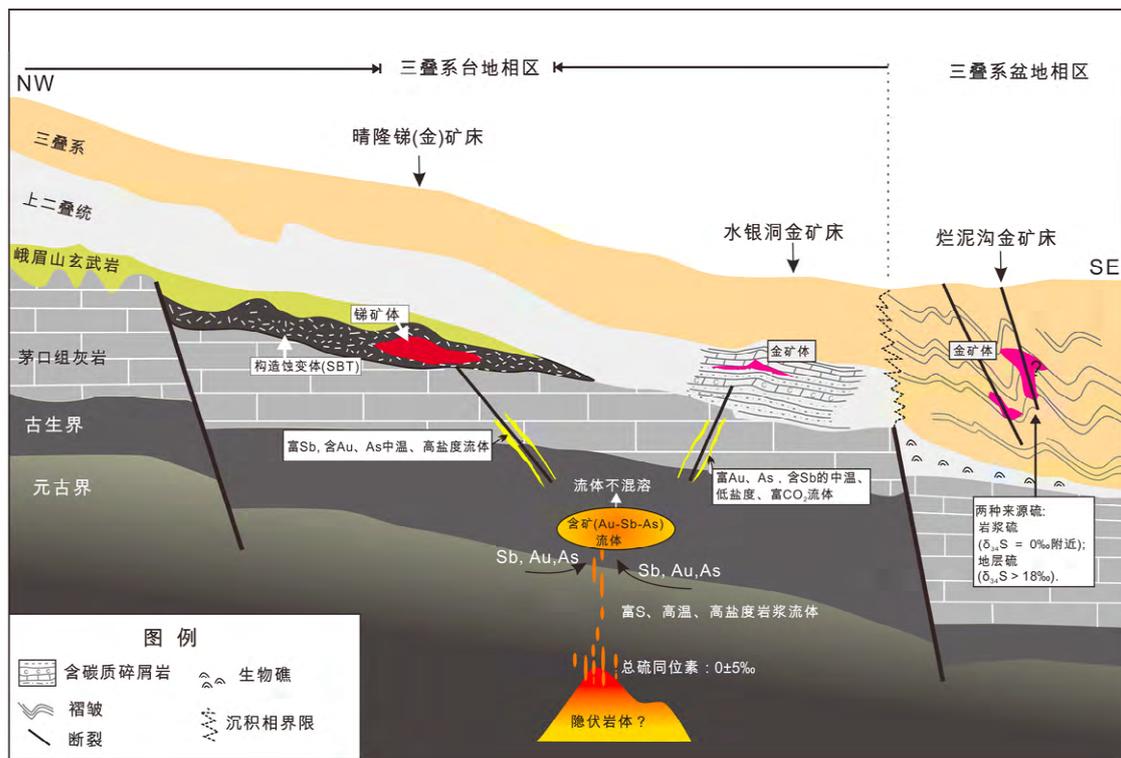


图1 南盘江-右江成矿带金、锑共生分异机制模式

(显示金、锑成矿流体来源相同,均为岩浆流体,当这种含 Au-Sb-As 成矿流体上升过程中,由于减压发生流体不混溶,分别形成两种流体:富 Sb 高盐度流体和富 Au 低盐度流体,导致右江盆地呈现出金、锑共生分异)

3、对找矿勘查的启示

金、锑在很多造山型金矿床中易形成 Au-Sb 共生矿床,如西秦岭早子沟金矿床^[16]和津巴布韦 Kwekwe 地区的太古代绿片岩带世界级的 Au-Sb 矿床^[17]。在一些类卡林金成矿区也发育一些具规模的 Au-Sb 矿床,如最新发现的吉尔吉斯斯坦 Kadamzhai 和 Chauvai 卡林型 Au-Sb-Hg 矿床^[18]。那么,南盘江-右江成矿带是否具有大型金-锑共生矿床的可能?我们在前期研究中发现,Au-Sb 共生现象仅在多阶段成矿中的某一阶段发生,如晴隆锑矿床在成矿晚期阶段呈 Au-Sb 共生,林旺金矿床在成矿晚期也呈 Au-Sb 共生(含金黄铁矿、自然金与辉锑矿叠加共生),说明金锑在一定的条件下可以共生成矿,但由于研究区金、锑流体性质的不同,形成大型金、锑共生矿床的潜力有限。不同的是,在低温条件下,围岩硫化会导致

Log(aH₂S)明显降低,同时降低 Au 的溶解度,但对 Sb 的溶解度影响不大,相对于 Au 而言 Sb 迁移距离较远,因此对区域锑矿床的勘查应重视成矿断裂系统的远端汇聚区。

主要参考文献:

- [1]刘建中, 夏勇, 陶琰, 付绍洪, 杨成富, 王泽鹏, 吴文明, 谭亲平, 陈睿. 2017. 贵州西南部 SBT 研究. 北京: 中国地质大学出版社.
- [2]Hu, R. Z., Fu, S. L., Huang, Y., Zhou, M. F., Fu, S. H., Zhao, C. H., Wang, Y. J., Bi, X. W., Xiao, J. F., 2017. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: reviews and a new geodynamic model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 9-34.
- [3]Chen, M. H., Bagas, L., Liao, X., Zhang, Z. Q., Li, Q. L., 2019. Hydrothermal apatite SIMS Th-Pb dating: Constraints on the timing of low-temperature hydrothermal Au deposits in Nibao, SW China. *Lithos*, 324: 418-428.
- [4]Chen, J., Huang, Z. L., Yang, R. D., Du, L. J., Liao, M. Y., 2021. Gold and antimony metallogenic relations and ore-forming process of Qinglong Sb(Au) deposit in Youjiang basin, SW China: Sulfide trace elements and sulfur isotopes. *Geoscience Frontiers*, 12(2): 605-623.
- [5]Chen, J., Yang, R. D., Du, L. J., Zheng, L. L., Gao, J. B., Lai, C. K., Wei, H. R., Yuan, M. G., 2018. Mineralogy, geochemistry and fluid inclusions of the Qinglong Sb-(Au) deposit, Youjiang basin (Guizhou, SW China). *Ore Geology Reviews*, 92: 1-18.
- [6]Chen, J., Yang, R. D., Du, L. J., Gao, J. B., Zheng, L. L., Huang Z. L., 2020. Multistage fluid sources and evolution of Qinglong Sb-(Au) deposit in northern margin of Youjiang basin, SW China: REE geochemistry and Sr-H-O isotopes of ore-related jasperoid, quartz and fluorite. *Ore Geology Reviews*, 127: 103851.
- [7]涂光炽. 2002. 我国西南地区两个别具一格的成矿带(域). *矿物岩石地球化学通报*, (1): 1-2.
- [8]Su, W. C., Zhang, H. T., Hu, R. Z., Ge, X., Xia, B., Chen, Y. Y., Zhu, C., 2012. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: implications for gold depositional processes. *Mineralium Deposita*, 47(6): 653-662.
- [9]Ohmoto, H., Rye, R.O., 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes, H.L. (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, second ed. Wiley, New York, pp. 509-567.
- [10]王亮, 张应文, 刘盛光. 2009. 区域重磁资料圈定贵州境内侵入岩体及局部地质构造. *物探与化探*, 33(3):245-249.
- [11]王亮, 龙超林, 刘义. 2015. 黔西南隐伏岩体圈定与金矿物源探讨. *现代地质*, 29(3):702-712.
- [12]陈娴, 苏文超, 黄勇. 2016. 贵州晴隆锑矿床成矿流体 He-Ar 同位素地球化学. *岩石学报*, 32(11): 3312-3320.
- [13]Zhu, J., Zhang, Z.C., Santosh, M., Jin, Z.L., 2020. Carlin-style gold province linked to the extinct Emeishan plume. *Earth Planet Science Letters*. 530: 115940.
- [14]Wang, Q. F., Groves, D., 2018. Carlin-style gold deposits, Youjiang Basin, China: tectono-thermal and structural analogues of the Carlin-type gold deposits, Nevada, USA. *Mineralium Deposita*, 53(7): 909-918.
- [15]刘丽, 顾雪祥, 彭义伟, 章永梅, 吴成赞, 程文斌. 2012. 贵州太平洞金矿床流体包裹体特征及流体不混溶机制. *岩石学报*, 28(5):1568-1576.
- [16] Qiu, K. F., Yu, H. C., Deng, J., McIntire, D., Gou, Z. Y., Geng, J. Z., Chang, Z. S., Zhu, R., Li, K. N., Goldfarb,

- R., 2020. The giant Zaozigou Au-Sb deposit in West Qinling, China: magmatic- or metamorphic-hydrothermal origin? *Mineral. Depos.* 55: 345-362.
- [17]Buchholz, P., Oberthür, T., Lüders, V., Wilkinson, J., 2007. Multistage Au-As-Sb mineralization and crustal-scale fluid evolution in the Kwekwe district, midlands greenstone belt, Zimbabwe: a combined geochemical, mineralogical, stable isotope, and fluid inclusion study. *Economic Geology*, 102(2): 347-378.
- [18]Nevolko, P.A., Hnylko, O.M., Mokrushnikov, V.P., Gibsher, A.S., Redin, Yu.O., Zhimuley, F.L., Drovzhak, A.E., Svetlitskaya, T.V., Fomynikh, P.A., Karavashikin, M.I., 2019. *Ore Geology Reviews*, 105: 551-571.