

# 大气降水量对成矿流体热场的影响

## ——以锡矿山锑矿床成矿流体为例

杨瑞琰<sup>1,2</sup>, 马东升<sup>2</sup>, 潘家永<sup>2</sup>

1. 中国地质大学数理学院, 湖北武汉 430074

2. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏南京 210093

**摘要:** 成矿流体热场直接影响矿床的成矿作用。依据湘中盆地的水文地质特征, 以锡矿山锑矿床成矿流体为例, 利用热—重力驱动型流体运移模型, 选择具有代表性的龙山岳坪峰—锡矿山(AB)剖面, 研究大气年降水量的大小对成矿流体热场的影响。首先选取一个对比降水量 1 200 mm/a, 计算出区域的温度场分布, 然后分别取年平均大气降水量为 600、1 800 和 2 400 mm/a 与对比降水量的温度场进行对比, 得出 2 种温度场的差值图。模拟结果表明: 大气降水的水量大小对区域流场影响较大, 而对区域温度场的影响不大, 在不同降水量条件下, 其对温度的影响在 5%~20% 之间。研究结论认为, 大气降水量对成矿流体的热场影响不大。

**关键词:** 成矿流体; 数值模拟; 热场; 大气降水量; 锑矿床; 锡矿山。

中图分类号: P611.5

文章编号: 1000-2383(2005)03-0366-05

收稿日期: 2004-10-25

## Effect of Annual Precipitation to Geotherm of Ore-Forming Fluid: A Case of Antimony Deposits in Xikuangshan

YANG Rui-yan<sup>1,2</sup>, MA Dong-sheng<sup>2</sup>, PAN Jia-yong<sup>2</sup>

1. School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory for Research of Mineral Deposits, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract:** The geotherm of ore-forming fluid affects ore formation directly. This article studies the effect of annual precipitation on the geotherm of ore-forming fluid, according to the geohydrologic conditions of the central Hunan basin. Ore-forming fluid in antimony deposits in Xikuangshan was taken as an example and a representative section of Xikuangshan-Yuepingfeng was chosen. Heat and gravity driven modes of fluid movement were considered. A contrastive rainfall  $Q=1\ 200\ \text{mm/a}$  was chosen, the distribution of the area temperature field was calculated, and the difference of two temperature fields was obtained by taking the annual precipitation of 600 mm/a, 1 800 mm/a and 2 400 mm/a compared with the temperature field of the contrastive rainfall. The simulation result shows that precipitation affects the fluid field more than the temperature field. The effect of precipitation on the temperature stays between 5%—20%. The effect of precipitation on the geotherm of ore-forming fluid is negligible.

**Key words:** ore-forming fluid; simulation; geotherm; annual precipitation; antimony deposits; Xikuangshan.

### 0 引言

沉积盆地作为地壳中重要的大地构造单元, 是流体活动最活跃的场所; 而盆地流体广泛参与沉积

盆地演化的全过程, 包括沉积物的各种成岩—后生变化、盆地的热场变化历史, 以及各种矿床和资源(如石油、天然气)的生成。20 世纪 80 年代以来, 地壳中大规模流体运移与成岩成矿的关系开始受到重

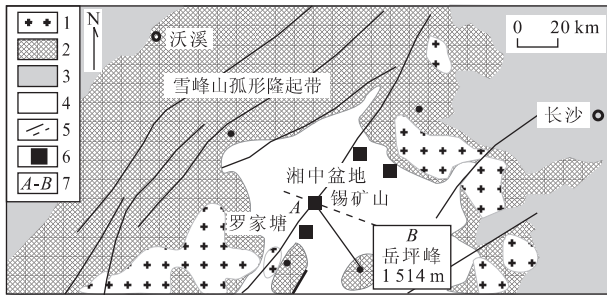


图 1 湘中盆地地质简图

Fig. 1 Geological units in central Hunan basin

1. 花岗岩; 2. 前泥盆纪地层; 3. 侏罗—白垩纪地层; 4. 泥盆—三叠纪盖层; 5. 断裂带; 6. 锡矿床; 7. 剖面位置

视。如 Oliver(1992) 提出了由陆壳碰撞产生大规模构造卤水运动,并在俯冲盘一侧成矿的新设想,以此解释石油、煤和中低热液矿床成因及石英岩化、白云岩化等成岩作用。在涉及大规模流体运移的多种成矿模式中(如陆壳天水环流,重力驱动区域规模的地下水流),以大气降水和地下水为代表的大范围、大流量流体过程受到高度重视,这方面以 Garven and Freeze (1984a, 1984b)、Garven *et al.* (1993)、Person *et al.* (1996) 的研究最为典型。尽管在研究流体流动的过程中也涉及到流体的热场研究,但却很少讨论降水量对流体热场的影响。因此,本文以湘中地区锡矿山锡矿床成矿流体为例来研究大气降水量对成矿流体热场的影响。

湘中地区广泛分布着锑、砷、汞、金和铅锌等中低温热液矿床,其基底为元古界巨厚浅变质碎屑岩系(图 1);盖层主要由古生界碳酸盐岩、碎屑岩系组成。锡矿山锡矿床受  $F_{75}$  断层的控制,主要呈层状、似层状以及脉状,矿体产于泥盆系灰岩中。湘中地区断裂构造发育,主要为北东向、北北东向以及北西向断裂。深大断裂对湘中锡矿床的形成可能起着重要的作用,许多矿床沿着深大断裂带分布,如著名的锡矿山锡矿床就分布在桃江—城步断裂带与新化—涟源断裂带的交汇处。

关于锡矿山锡矿床成矿年代,最近的研究(彭建堂等,2002a)认为锡矿山锡矿床成矿分早晚两期:早期成矿作用时间为  $(155 \pm 1.1)\text{Ma}$ ,晚期成矿作用时间为  $(124.1 \pm 3.7)\text{Ma}$ 。据大气降水与岩浆水在不同温度条件下与赋矿围岩所发生的反应交换演化曲线,以及放射成因同位素(Pb、Sr)和轻稳定同位素(C、O)等研究(彭建堂等,2001, 2002b; 马东升等, 2003),成矿流体与区域流体主要是经深部循环演化

的大气降水。另外,物探资料和数学模拟研究表明,湘中盆地的山区边缘和锡矿山底部均有热源存在(饶家荣等,1999;杨瑞琰等,2003),并且该热源提供的稳定热流值约为  $0.204 \text{ W/m}^2$ 。

## 1 数学模型及参数的选取

锡矿山锡矿床的成矿模式为(杨瑞琰等,2003):在湘中盆地,以大气降水为主要来源的流体,在重力作用下沿地层的裂隙、孔隙向下入渗。在下渗过程中,接受盆地下部热流作用,使流体加热,从而驱使流体向上部运动,这样流体系统处于动态的平衡之中。成矿时期构造—热事件的影响和深大断裂的发育,打通了流体通往地表的通道,破坏了系统的平衡,从而驱动流体向断裂系统运移,流体在到达  $F_{75}$  后沿断裂带向地表渗流,在压力、温度降低等成矿综合环境合适的部位,成矿物质与围岩发生反应而完成成矿过程。

湘中盆地燕山期重力驱动型流体系统的热场研究涉及到如下的方程组(Bear, 1972; Garven and Freeze, 1984a, 1984b; Garven *et al.*, 1993; 於崇文等,1993; Rabinowicz *et al.*, 1999):流体连续性方程、达西定律、状态方程和能量守恒方程。

$$q_x = -\frac{\rho_0 g k_x}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (1)$$

$$q_z = -\frac{\rho_0 g k_z}{\mu} \left( \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\Delta \rho = \rho_0 [1.7 \times 10^{-4} (1 + 0.015T) T], \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{\sigma} (q_x \frac{\partial T}{\partial x} + q_z \frac{\partial T}{\partial z}) = \lambda^* \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (5)$$

其中: $g$  是重力加速度, $h$  是流体的水头值, $\mu$  是动力粘度, $k$  是渗透率, $q$  是流速, $\rho$  是密度, $T$  是温度, $\lambda^*$  是热扩散系数, $\sigma$  是热容比。下标  $x$  和  $z$  代表该量在  $x$  和  $z$  方向的分量,0 代表参考值。

为了求解上述方程组,还应该给出方程的各参数的取值,以及初始条件和边界条件。为模拟大气降水量对成矿流体热场的影响,笔者在湘中盆地选取了锡矿山(海拔 818 m, 记为 A)和锡矿山东南方 42 km 处的龙山岳坪峰(1514 m, 记为 B)的剖面。为便于描述,在图 1 中将龙山岳坪峰的垂直线作为所研究的二维区域左边界( $\Gamma_1$ ),区域的顶部以古地表为界( $\Gamma_2$ )。由于实际情况的需要将上部分为 3 部分:

盆地的底部( $\Gamma_{22}$ )、盆地边缘到盆地底部间的斜坡部分( $\Gamma_{21}$ )和锡矿山到盆地底部的斜坡部分( $\Gamma_{23}$ )。将锡矿山的垂直线所在的区域作为区域的左边界( $\Gamma_3$ )。区域的下部取下边界( $\Gamma_4$ )，将其分为 4 部分： $\Gamma_{41}$ 是左边部分，该部位接近区域的左边界，它可能接受较高热流值； $\Gamma_{42}$ 和  $\Gamma_{43}$ 远离岩岩岩，假设它们接受正常的热流值； $\Gamma_{44}$ 是右边部分。

根据裴荣富等(1998)的研究，湘中地区平均剥蚀速率为  $2.0 \times 10^{-5}$  m/a，隆起区的剥蚀速率大于此值，约为  $2.5 \times 10^{-5}$  m/a，盆地内部拗陷区小于此值，为  $1.2 \times 10^{-5}$  m/a，锡矿山的矿区剥蚀速率为  $1.4 \times 10^{-5}$  m/a。模拟时成矿年龄取 155 Ma，铈矿床成矿时期的古地形可由现代地形加上剥蚀厚度来恢复。于是在盆地边缘一带上推 3.87 km，在锡矿山一带上推 2.17 km，盆地内部上推 1.86 km，就得到成矿时期的古地形。根据各地层单元的岩性特征、水文地质特性以及岩性组合、地层的区域性展布情况等，可建立湘中地区的水文地质单元，同时根据各地层的产状向上、向下延伸可恢复其古地层。

据地层的岩性特性，弱透水层的导水性能最弱，在盆地的底部板溪群与震旦系以及泥盆系与石炭系地层是透水层，同时在区域的左边即在锡矿山下部有一个深大断裂，在断裂带里其导水性能最好。于是可根据文献(Forster and Smith, 1988a, 1988b; Deming, 1994)取弱透水层、透水层和深大断裂的内在渗透率分别为  $10^{-16}$ 、 $10^{-15}$  和  $4 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup>。依据文献(Forster and Smith, 1988a, 1988b, 1989; Deming, 1994)，热扩散系数  $\lambda^*$  为  $3.6 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s，热容比  $\sigma$  取 0.75。

由于该地区目前的大气年平均降水量较为丰沛，为 1 200 mm/a 左右，于是取该区域年平均大气降水量 600、1 200、1 800、2 400 mm/a 来分别讨论。同时假设降水以入渗率  $\epsilon = 10\%$  渗入地层，假设在锡矿山铈矿床成矿地质时期流体的温度场系统是稳定的，即成矿系统流体的温度场不再是时间的函数。

## 2 模拟结果

该区域年平均大气降水量为  $Q = 1\ 200$  mm/a (以下称为对比降水量)时的温度场和流场的模拟结果见图 2a。成矿流体流动的总趋势是：在盆地周围山区的大气降水，入渗到板溪群——震旦纪地层，在重力和热浮力的作用下驱动流体向盆地中心部位移动。成矿流体到达盆地中心部位后，一部分直接向上

运移，另一部分流体继续向锡矿山区区域流动，在到达断裂带下方后则沿着断裂带向上运移。由于龙山下部和锡矿山底部有隐伏的岩体，其热流值是其部位热流值的 3 倍，导致龙山地区的地温梯度高达  $120$  °C/km，锡矿山地区的地温梯度达  $86$  °C/km。盆地中心地区的地温梯度最小为  $37$  °C/km，同时计算得出最下部导水层区域的平均温度为  $200 \sim 260$  °C，成矿部位的温度约为  $180 \sim 200$  °C，成矿流体的密度为  $865 \sim 887$  kg/m<sup>3</sup>，在成矿部位流体的流速接近  $0.4$  m/a。

为研究大气年降水量对成矿流体热场的影响，显示与对比降水量对成矿流体热场的影响差异，另取大气年降水量  $Q = 600、1\ 800$  和  $2\ 400$  mm/a 来讨论。图 2b~2d 显示的是大气年降水量分别为 600、1 800 和 2 400 mm/a 时温度场与对比降水量 1 200 mm/a 时温度场的差值(其中实线表示在该图显示的降水量条件下，该处的温度大于在 1 200 mm/a 情况下的温度，虚线则表示该处的温度小于在 1 200 mm/a 情况下的温度)。

图 2b 显示的是年大气降水量为 600 mm/a 时与对比降水量 1 200 mm/a 所产生的温度场的差异。由于此时的大气降水量小于对比降水量，因此，渗入到地下水的水量小于对比情况下的水量，导致地下水的流体减少，从而流体的流速降低。于是在入渗区的温度普遍要大于对比条件下的温度，其差值在  $10$  °C 左右，最大不超过  $15$  °C；而在流体的排泄口和断裂带的附近的温度普遍要小于对比情况下的温度，其差值的平均值也为  $10$  °C 左右，最大不超过  $25$  °C。由于最下部导水层和成矿部位的温度为  $200$  °C 左右，因此，其最大影响为  $5\%$  左右。

图 2c 显示的是年大气降水量为 1 800 mm/a 时与对比降水量 1 200 mm/a 所产生的温度场的差异。此时温度场的情况正好与图 2b 的情况相反，由于大气降水量大于对比降水量，因此，渗入到地下水的水量也大，导致进入地下水的流体增加，从而流体的流速加大。于是在入渗区的温度普遍要小于对比条件下的温度，其差值为  $10$  °C 左右，最大差值为  $16$  °C 左右；而在流体的排泄口和断裂带的附近的温度普遍要大于对比情况下的温度，其差值的平均值也为  $10$  °C 左右，最大为  $15$  °C 左右。其对温度场的影响为  $10\%$  左右。

图 2d 显示的是年大气降水量为 2 400 mm/a 时与对比降水量 1 200 mm/a 所产生的温度场的差异。此时温度场的情况与图 2c 的情况类似，只是其差值

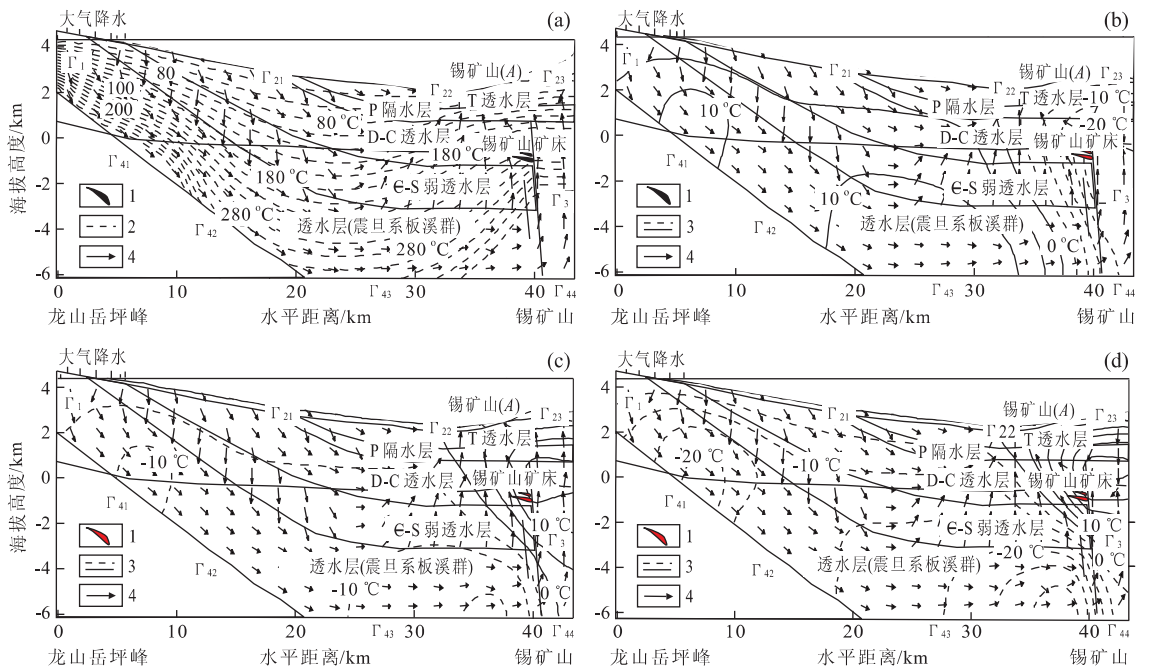


图 2 不同降水量下的模拟结果

Fig. 2 Simulation results at various rainfalls

a.  $Q=1\ 200\ \text{mm/a}$  时区域温度场和流场; b.  $Q=600\ \text{mm/a}$  与  $Q=1\ 200\ \text{mm/a}$  时区域温度场的差异; c.  $Q=1\ 800\ \text{mm/a}$  与  $Q=1\ 200\ \text{mm/a}$  时区域温度场的差异; d.  $Q=2\ 400\ \text{mm/a}$  与  $Q=1\ 200\ \text{mm/a}$  时区域温度场的差异; 1. 矿体; 2. 流体等温线; 3. 温度差值等值线, 实线为正, 虚线为负; 4. 流体的流线

表 1 不同降水量下流体的流速

Table 1 Velocity of flow at various rainfalls

降水量值/ ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	最大流速/ ( $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ )	成矿部位的流速/ ( $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ )
600	0.3	0.2
1 200	0.6	0.4
1 800	0.9	0.6
2 400	1.2	0.8

为降水量  $1\ 800\ \text{mm/a}$  时的 2 倍左右大小. 在这种情况下大气降水对温度场的影响为 20% 左右.

同时, 在各种大气年降水量的条件下成矿部位流体的流速见表 1. 可见无论是最大流速或者是成矿部位的流速均具有较好的线性相关性, 它们的大小完全依赖于大气年降水量的大小. 其最好的解释是这些流体的来源本身就只有大气降水. 如果此时成矿流体还有其他来源, 那么其流速的大小就会根据其他流体来源的不同和大小而有所改变.

### 3 结果与讨论

大气降水的水量大小对区域流场影响较大, 而对区域温度场的影响不大, 在不同降水量情况下, 其

对温度相应的影响在 5%~20% 之间.

尽管本文的研究是在假设成矿流体全部来自大气降水的条件下进行的, 但如果成矿流体还有其他来源, 如地层水和岩浆水等, 那么区域温度场的变化情况可能要复杂得多, 这是因为不同来源的成矿流体必定带来不同的热量, 从而影响到区域的温度场分布情况.

### References

Bear, J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. Dover, New York, 1—764.  
 Deming, D., 1994. Fluid flow and heat transport in the upper continental crust. In: Parnell, J., ed., Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins. Geological Society Special Publication, 78: 27—42.  
 Forster, C., Smith, L., 1988a. Groundwater flow systems in mountainous terrain: 1. Numerical modeling technique. Water Resour. Res., 24: 999—1010.  
 Forster, C., Smith, L., 1988b. Groundwater flow systems in mountainous terrain: 2. Controlling factors. Water Resour. Res., 24: 1011—1023.  
 Forster, C., Smith, L., 1989. The influence of groundwater flow on thermal regimes in mountainous terrain: A

- model study. *J. Geophys. Res.*, B94; 9439—9451.
- Garven, G., Freeze, R. A., 1984a. Theoretic analysis of the role of groundwater flow in the genesis of stratabound ore deposits. 1. Mathematical and numerical model. *Am. J. Sci.*, 284; 1085—1124.
- Garven, G., Freeze, R. A., 1984b. Theoretic analysis of the role of groundwater flow in the genesis of stratabound ore deposits. 2. Quantitative results. *Am. J. Sci.*, 284; 1125—1174.
- Garven, G., De, S., Person, M. A., et al., 1993. Genesis of stratabound ore deposits in the Midcontinent basins of North America. 1. The role of regional groundwater flow. *Am. J. Sci.*, 293; 497—568.
- Ma, D. S., Pan, J. Y., Xie, Q. L., 2003. Ore source of Xiangzhong Sb(Au) deposits: II. Evidences of isotopic geochemistry. *Mineral Deposits*, 22(1): 78—87 (in Chinese with English abstract).
- Oliver, J., 1992. The spots and stains of plate tectonic. *Earth Sci. Reviews*, 32; 77—106.
- Pei, R. F., Wu, L. S., Xiong, Q. Y., et al., 1998. The deflection of ore genesis and structure assembling field of mineralization abnormality on super-large deposits in China. Geological Publishing House, Beijing, 202—223 (in Chinese).
- Peng, J. T., Hu, R. Z., Ling, Y. X., et al., 2002a. Sm-Nd isotopic dating of epithermal calcite for the Xikuangshan antimony deposit. *Chinese Science Bulletin*, 47(10): 789—792 (in Chinese).
- Peng, J. T., Hu, R. Z., Zou, L. Q., et al., 2002b. Isotope tracing of ore-forming materials of the Xikuangshan antimony deposit, central Hunan. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(2): 155—159 (in Chinese with English abstract).
- Peng, J. T., Hu, R. Z., Deng, H. L., et al., 2001. Strontium isotope geochemistry of the Xikuangshan antimony deposit, central Hunan. *Geochimica*, 30(3): 248—256 (in Chinese with English abstract).
- Person, M., Raffensperger, J. F., Ge, S., et al., 1996. Basin-scale hydrogeologic modeling. *Reviews of Geophysics*, 34; 61—87.
- Rabinowicz, M., Sempere, J. C., Genthon, P., 1999. Thermal convection in a vertical permeable slot; Implications for hydrothermal circulation along mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.*, 104(B12): 29275—29292.
- Rao, J. R., Luo, J. L., Yi, Z. J., 1999. The mantle-crustal tectonic metallogenic model and ore-prospecting prognosis in the Xikuangshan antimony ore field. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 23(4): 241—249 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. Y., Ma, D. S., Pan, J. Y., 2003. Study on the paleo-geothermal field of ore-forming fluid to form Xikuangshan Sb deposit. *Geochimica*, 32(6): 509—519 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C. W., Cen, K., Bao, Z. Y., et al., 1993. Dynamics of the hydrothermal ore-forming processes. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—189 (in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 马东升, 潘家永, 解庆林, 2003. 湘中锑(金)矿床成矿物质来源——II. 同位素地球化学证据. *矿床地质*, 22(1): 78—87.
- 裴荣富, 吴良士, 熊群尧, 等, 1998. 中国特大型矿床成矿偏在性与异常成矿构造聚敛场. 北京: 地质出版社, 202—223.
- 彭建堂, 胡瑞忠, 林源贤, 等, 2002a. 锡矿山锑矿床热液方解石的 Sm-Nd 同位素定年. *科学通报*, 47(10): 789—792.
- 彭建堂, 胡瑞忠, 邹利群, 等, 2002b. 湘中锡矿山锑矿床成矿物质来源的同位素示踪. *矿物学报*, 22(2): 155—159.
- 彭建堂, 胡瑞忠, 邓海琳, 等, 2001. 湘中锡矿山锑矿床的 Sr 同位素地球化学. *地球化学*, 30(3): 248—256.
- 饶家荣, 骆检兰, 易志军, 1999. 锡矿山锑矿田幔—壳构造成矿模型及找矿预测. *物探与化探*, 23(4): 241—249.
- 杨瑞琰, 马东升, 潘家永, 2003. 锡矿山锑矿床成矿流体的热场研究. *地球化学*, 32(6): 509—519.
- 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等, 1993. 热液成矿作用动力学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1—189.