华南热隆起成矿及其机制探讨*

A tentative discussion on heat uplift mineralization in South China and its mechanism

马东升

（内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室，南京大学，江苏 南京 210039）

MA DongSheng

(State Key Laboratory for Metallogenic Mechanism of Endogenic Metallic Deposits, Nanjing University, Nanjing 210039, Jiangsu, China)

摘 要 华南热液矿床至少在 3 方面表现出明显的热隆起成矿特征，即：它们主要集中在后加里东隆起区和海西-印支凹陷中的岛状复背斜带，常与花岗岩穹隆，前寒武纪基底中的块断隆起，以及沉积盆地中的局部隆起或背斜构造有关；与成矿有关的花岗岩类往往呈现早期早阶段斑状-似斑状中-粗粒到晚期晚阶段中-细粒的结构演化，且成矿主要与后者有关；与中酸性火成岩有关的热液成矿流体在早期以岩浆水来源为主，晚期大气降水增多。流体温度和浓度变化制约的浮力驱动机制是造成热隆起成矿的主要因素。除了花岗岩类侵入之外，快速隆起造成的地温异常也是热隆起成矿的重要机制。

关键词 热液矿床；成矿机制；华南

对华南热液矿床的研究已有近百年的历史，积累了大量资料。在已往单一矿床、矿种、成矿类型或成矿区带研究的基础上，对华南热液矿床成因进行综合认识和理论提高的条件已趋于成熟。尽管华南热液矿床分布广大，类型多样，组合复杂，但却显示出若干公认的成矿特征和共同的分布规律——如成矿时代的集中爆发性，成矿作用的空间分带性和成矿元素的基底继承性等。“热隆起成矿”也是华南热液矿床的一种普遍现象。虽然对这些现象和规律的成因认识不尽相同，但以这些基本事实为出发点，并结合新的研究资料和认识加以重新考虑，可能对华南热液矿床成因乃至华南大陆地壳演化的进一步深入理解提供重要线索。本文是为庆贺王德滋院士 80 周年诞辰撰写论文的部分内容，谨提交第八届全国矿床会议交流，以求得到广大同行的指正。

1 热液成矿与隆起构造的关系

在区域分布上，华南热液矿床主要集中在后加里东隆起区（主要为寒武系和元古代基底）和海西-印支凹陷中的岛状复背斜带（主要为泥盆系）；在具体定位上，它们常与花岗岩穹隆，前寒武纪基底中的块断隆起，以及沉积盆地中的局部隆起或背斜构造有密切的空间关系。以钨矿为例，华南地区 80%以上的钨矿床和 90%以上的钨矿储量分别产于后加里东隆起区和海西—印支凹陷中的岛状隆起区内（冶金部南岭钨矿专题组，1985）。中低温热液矿床也是如此，只不过空间上与花岗岩无关或关系不明显，且赋矿层位较多而已。如江南金—锑成矿带本身就是元古代基底初露部位；湘黔汞矿带的矿床基本都受背斜(复背斜)构造控制，汞矿床沿背斜轴或其两翼分布；锡矿山超大型锑矿锑产于湘中古生代盆地中的泥盆系背斜穹隆中；西南中生代盆地中的卡林型金矿大多分布于古生界基底隆起部位及其周边。根据多年找矿经验提出的所谓“凹中隆”控矿认识，早已在华南找矿勘探界广为流行。

2 含矿花岗岩结构演化的热隆起成矿信息

*第一作者简介 马东升，男，1952 年生，教授（博导），长期从事矿床地球化学和元素地球化学的研究与教学工作。

根据大量的观察统计（冶金部南岭钨矿专题组，1985），燕山早期（早、中侏罗世）花岗岩类以黑云母花岗岩为主，大多为中粗粒似斑状结构；燕山中期（晚侏罗世—早白垩世）花岗岩类主要也为黑云母花岗岩，以中粗粒到中粒结构为主；燕山晚期（晚白垩世）主要为白云母或二云母二长花岗岩、黑云母花岗岩和花岗斑岩，呈中细粒、中细粒斑状和细粒结构。众所周知，火成岩的结构直接反映岩浆的侵入深度和冷却速度。岩石结构从燕山早期到晚期不断由粗到细的演化清楚地表明，继印支运动中国东部全面隆升之后，华南地壳由于燕山期花岗岩的强烈活动总体上处于持续隆起和不断剥蚀的成矿构造背景之中。这种热隆起特征也明显表现在与华南与花岗岩有关的各主要钨、锡矿区（田）内。这些钨、锡矿区（田）大多有二期或更多期次的复式花岗岩侵入，早期往往呈较粗粒的斑状或似斑状结构，而晚期或补期多为中-细到细粒结构。尽管有时早期岩体也可能含矿，但在大多数情况下，主成矿阶段与晚期中、细粒岩体有关。这在许多矿区早已是司空见惯的事实。例如，铁山珑－黄沙岩体早阶段侵入的花岗岩以中粒似斑状结构为主，由深至浅从似斑状黑云母花岗岩转变为似斑状白云母花岗岩，且粒度变细。晚阶段侵入的中-细粒白云母花岗岩是黄沙钨矿的成矿岩体，石英和石榴子石增多且由深至浅粒度变细。尽管对西华山钨矿复式岩体侵入期次的划分有不同观点（吴永乐等，1981❶；1987；穆治国等，1984；刘家齐等，1989；2002），但也都遵循粗粒到细粒的结构演化趋势。此外，更晚的细晶岩脉穿插在早期岩体中也屡见不鲜。这一普遍现象清楚地向我们提示：成矿作用是在不断隆升的过程中发生的。前述柿竹园矿田火成岩从早到晚的岩石化学成分“逆演化”和结构细粒化现象，也提供了同样的热隆起信息。

3 热液矿床成矿流体演化的热隆起成矿特征

对华南与中酸性岩浆作用有关的各类热液矿床流体包裹体和稳定同位素的大量研究表明，成矿流体来源基本遵循从早期岩浆水，经岩浆-大气水混合，到晚期以大气降水为主的演化趋势。大气降水往往在晚阶段成矿热液中占重要比例，由此反映出成矿作用的隆升动态过程。这种热隆起成矿特征在西华山—荡平W-Sn-Be矿和柿竹园矽卡岩W-Sn-Mo-Bi矿等著名超大型矿床中都有明显表现。

西华山钨-锡-铍矿床的稳定同位素研究表明，成矿作用早期，即 W、Sn 和 Be 主要成矿阶段的成矿流体为岩浆水,而晚期成矿流体以大气降水为主，形成晚期的梳状石英脉（刘家齐等，2002）。与其相对应的是，主成矿期（黑钨矿-绿柱石石英脉）云英岩晶洞内一个巨大水晶的包裹体及其氧同位素研究揭示（刘家齐等，1999；2000），晶体核心的流体为岩浆水，向晶体边部环带演变为大气降水。研究者由此认为,在成矿过程中因不断抬升或裂隙更加发育,导致大气降水在岩浆热和与岩浆热液密度差的驱动下循环加强。

对柿竹园矽卡岩钨-锡-钼-铋矿床的石英、石榴子石、符山石、萤石及白钨矿中流体包裹体的系统研究显示（卢焕章等，2004），块状矽卡岩钨-铋矿体形成于岩浆水，面状云英岩型钨-锡-钼-铋矿体为岩浆水-大气降水混合热液成因，而块状矽卡岩和面状云英岩下伏网脉状钨-锡-钼-铋矿体的成矿流体则主要来自大气降水（图1）。在此值得注意的是，以大气降水为主要成矿流体来源的网脉状钨-锡-钼-铋矿体反而位于块状矽卡岩矿体（岩浆水流体来源）和面状云英岩矿体（岩浆水-大气降水混合热液）之下（图1）。这种“逆向分带”现象与不断隆升构造背景下成矿的认识是一致的。尽管多年来对华南与花岗岩有关的热液矿床是“正向分带”还是“逆向分带”一直存有争议，但在华南许多钨锡多金属矿床中确实存在矿物组合的逆向分带现象，如西华山、黄沙、盘古山等著名钨矿，在矿床深部白钨矿、硫化物、碳酸盐和绿色立方体萤石等相对低温的矿物增多。一般来说，大多数矿床石英脉的均一化温度测定结果都是自下而上增高的正向分带。但在有些矿床中，特别是大型超大型矿床，则显示出复杂的情况。例如，对柿竹园矿田的大量包裹体均一化温度测定表明：据柿竹园钨锡铋钼矿段735～385 m 五个中段中415个萤石流体包裹体均一化温度统计，具有最低温度（<150℃）的样品主要分布在中下部（490 m中段），属于硫化物矿化及后期热液阶段，相应的蚀变为绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化（王昌烈等1987）；据野鸡尾矿段755～660 m三个中段中245

❶吴永乐, 梅勇文. 1981. 西华山钨矿田多次成岩成矿及其演化规律. 江西省地质局钨矿地质论文集. 江西省地质局科技处编.

个石英流体包裹体均一化温度统计，具有最低温度（<150℃）的样品则主要出现在最下部的660 m中段（毛景文等，1998）。在两个矿段均不同程度地显示出“逆向分带”的迹象。不断隆升的成矿背景是可能造成这一成矿现象的原因之一。然而，对其成因尚需进一步根据其实际成矿条件作具体分析。

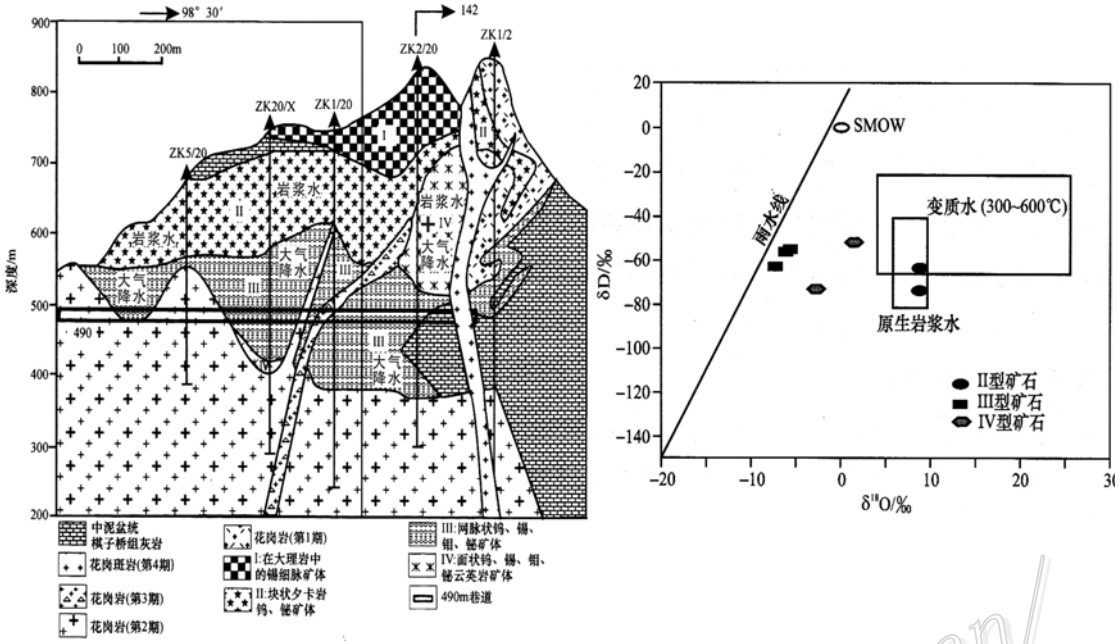

图 1　柿竹园矿区不同类型矿石的空间分布及其成矿流体的氢、氧同位素组成（引自卢焕章等，2004）

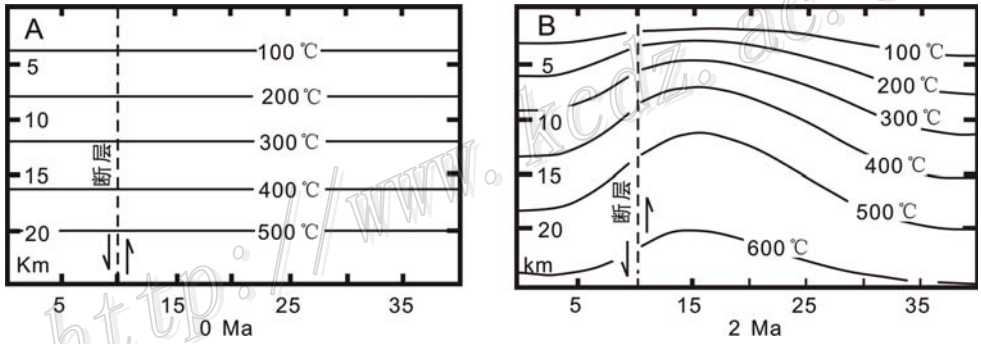

图 2　块断隆升形成的低温高梯度带剖面（据 Craw et al.，1988）

A. 地温梯度为 25 ℃/km 的初始状态；B. 2 Ma 后的地温等值

4　热隆起成矿的岩浆-构造触发机制

地壳中的流体主要受 3 种机制驱动而产生运移，即重力驱动（高差或不透水层起伏）、应力驱动（构造应力和沉降压实）和浮力驱动（热对流和浓差对流）（马东升，1998）。由于隆起带的高势能，成矿流体不可能单靠重力驱动在隆起部位聚集。在应力挤压下，固然可以通过变形产生内应力释放而驱使流体向隆起带集中，但在应力松弛时流动也随之迅速停止，不能稳定持续地为成矿提供热液及矿质来源，也难以形成规模较大的矿床（Garven et al., 1993）。但如果在隆起部位之下存在稳定的地热异常和/或深部流体具有较高的矿化度，隆起带就能持续地获得成矿物质。岩浆侵入或盆地热流以及深部存在隐伏含矿建造的地质背景能满足这些条件。因此，受流体温度和浓度变化制约的浮力驱动是造成隆起带成矿的主要因素。据此，最近已初步提出了用于描述隆起带成矿机制的双扩散对流模型（杨瑞琰等，2004；2005）。该模型表明，成矿元素在隆起部位富集的条件为：①成矿元素在水/岩反应中有较高的活动性；②成矿元素在热液中的溶解度与温度成正比；③深部存在相应的含矿建造构成盆地基底；④深部发育有利于含矿建造或矿源层成矿

元素活化转移的多空隙构造或扩容构造，如断裂带、层间破碎带及不整合面等；⑤存在有利于成矿流体局部聚集的不透水顶盖或构造扩容空间。模拟显示，当隆起上方伴随发育有垂直的高渗透性断裂带时，分别在断裂带上部和和断裂带内部偏下位置出现两个元素富集场，且断裂带垂高越大，上部元素富集场的强度越高。此外，隆起上方断裂带的倾角变化对元素富集场定位位置和形态有明显影响（杨瑞琰等，2005）。

华南热液矿床的成矿时代与燕山期花岗岩强烈活动时代的一致性表明，软流圈上涌产生的玄武岩浆底侵和地壳伸展减压熔融（王德滋等，2002；徐夕生等，1999）是导致华南地壳区域性热隆起，进而触发大规模流体热对流的最有效的驱动能量。此外，在岩浆活动不强或无岩浆作用参与的情况下，地壳迅速块断隆起造成的地温梯度增高也能为热液矿床局部定位提供能量条件。如图 4 所示，设初始地热梯度为 25℃/km（大致相当于正常地温梯度），地表温度和深部（25 km）温度保持不变，分别为 25℃和 625℃（图 2-A）。如果断块的隆升速度为 10 mm/年（世界造山带的隆起速度估计为<0.1～>20 mm/年），根据热传导方程的计算结果（Craw et al.，1988），由于隆起速度高于岩石热传导冷却速率，2 Ma 后最大上升区 5 km 深处的温度将由原来的 125℃上升到 350℃以上（图 2-B）。大致 2.5 Ma 后地温梯度基本达到稳定状态。由此可见，即使在没有岩浆侵入的情况下，快速隆起造成的地温异常也可能在几公里深的浅部产生强烈的地下热水环流，从而使地层中原来分散在空隙和含水层中无序分布的水，自组织产生有序化运动。这种过程对盆地背景的中-低温热液矿床形成，如江南古陆及其周边盆地中的 Au、Sb、Hg 矿床，尤其重要。

值得指出的是，有关华南－西北太平洋海盆 P-波模型地幔地震层析剖面（Kárason et al., 2000）显示，华南中生代大规模花岗岩活动及强烈的热液成矿区域恰好与软流圈上涌的部位相吻合，而下地幔上涌又正好与过渡带缺口及上地幔“地幔岩浆房”相对应（马东升等，2006）。根据地幔地震层析影像（Kárason et al., 2000）及其与地表火成岩岩石地球化学特征（陈卫锋等，2005）的对比，华南中生代软流圈上涌主要与太平洋板块俯冲形成的含水地幔过渡带及大型冷幔柱下沉有关，下地幔具有被动上涌的特征，在动力学性质上不同于流行的地幔柱热侵入机制。下地幔上涌对含水地幔过渡带的破坏和穿透，以及由此造成的地幔矿物相变脱水，可能是启动华南上地幔大规模部分熔融及区域性热隆升的重要因素（马东升等，2006）。

参 考 文 献

陈卫锋, 陈培荣, 徐夕生, 等. 2005. 华南白垩纪玄武质岩石的地球化学特征及其对太平洋板块俯冲作用的制约. 中国科学, D辑, 35(11): 1007~1018.

刘家齐. 1989. 西华山花岗岩及其成矿作用. 中国地质科学院院报, 19: 83~105.

刘家齐, 汪雄武, 曾贻善, 等. 2002. 西华山花岗岩及钨锡铍矿田成矿流体演化. 华南地质与矿产, (3): 91~96.

刘家齐, 曾贻善. 1999. 一个巨大水晶中流体包裹体温压地球化化学特征. 华南地质与矿产, (4): 37~43.

刘家齐,曾贻善. 2000. 一个巨大水晶中流体包裹体稳定同位素地球化学特征. 华南地质与矿产, (2): 1~5.

卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 等. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社. 326~331.

马东升. 1998. 地壳中流体的大规模流动系统及其成矿意义. 高校地质学报, 4(3): 250~261.

马东升, 陈培荣. 2006. 华南中生代热隆起成矿与软流圈被动上涌——华南陆内热液成矿作用能量来源的探讨. 高校地质学报, 待刊.

毛景文, 李红艳, 宋学信, 等. 1998. 湖南柿竹园钨锡钼铋多金属矿床地质与地球化学. 北京: 地质出版社.

穆治国, 黄福生, 陈成业, 等. 1984. 漂塘—西华山石英脉型钨矿床碳、氢、氧同位素研究. 钨矿地质讨论会论文集. 北京: 地质出版社. 153~169.

王昌烈, 罗仕徽, 胥友志, 等. 1987. 柿竹园钨多金属矿床地质. 北京: 地质出版社.

王德滋, 周新民, 等. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社.

吴永乐, 梅勇文, 刘 鹏, 等. 1987. 钨矿地质(地质专报). 北京: 地质出版社.

徐夕生, 周新民, 王德滋. 1999. 壳幔作用与花岗岩成因——以中国东南沿海为例. 高校地质学报, 5(3): 241~250.

杨瑞琰, 马东升, 鲍征宇, 等. 2004. 双扩散对流与成矿元素富集的机制. 自然科学进展, 14(10): 1135~1141.

杨瑞琰, 马东升, 鲍征宇. 2005. 沉积盆地的成矿元素富集与成矿机制研究——以湘中盆地锡矿山体矿床为例. 武汉：中国地质大学出版社.

冶金部南岭钨矿专题组. 1985. 华南钨矿. 北京: 冶金工业出版社.

Craw D and Koons P O. 1988. Tectonically induced gold mineralization adjacent to major fault zones. In Extended Abstracts Oral Programme. Geol. Soci. Of Australian Inc., Abstracts no.22, BICENTENNIAL GOLD 88, Melbourne, 338~343.

Garven G, De S, Person MA, et al. 1993. Genesisi of stratabound ore deposits in the Midcontinent Basins of North America. 1. Therole of reginal groundwater flow. Am. J. Sci., 293: 497~568.

Kárason H and van der Hilst R D. 2000. Constraints on mantle convection from seismic tomography. In: Richards M R, Gordon R and van der Hilst R D, ed. The history and dynamics of global plate motion. Washington D. C: American Geophysical Union. 121: 277~288.