

地热流体成矿作用分析^{*}

张术根

(中南工业大学资源环境与建筑工程学院, 长沙)

提 要: 依据地热流体成矿作用基本要素的特殊性、成矿控制因素及其控矿特点, 对地壳演化运动的成矿控制及其规律性等方面进行了较系统的分析。研究结果表明, 地热流体是特殊的热液成矿作用类型, 与其它成矿作用类型有明显的区别。

关键词: 成矿作用 控矿因素 地热流体

作者所称地热流体是指由赋存于地壳内部一定含水系统的深度演化地下水, 经地热活动加热而形成的热流体。其通常以大气降水为主体, 亦可为同生水或其它水体, 未经地热活动加热升温的地下水, 不管其水体来源如何, 都不属于地热流体范畴。

虽然许多研究者注意到被加热的地下水成矿现象, 并陆续建立过一些与之相关的成矿模式, 如“下渗热卤水成矿”、“地下水再造成矿”、“盆地源流体成矿”、“大气降水对流成矿”和“地下水环流成矿”等^[1~3, 8~14]。但迄今为止, 对其成矿地位、成矿方式和成矿机理等方面的认识还难以反映其成矿实际。特别是在层控矿床理论盛行之时, 因许多地热流体型矿床具有某些“层控”现象, 它们多被认为是“层控矿床”, 被加热的地下水只视为“改造期”成矿流体的组成部分参与成矿作用。众多成矿地质事实越来越清楚地表明, 地热流体成矿作用是广泛活跃而独具特色的重要成矿作用, 深刻分析其成矿方式、控矿因素、成矿机理和成矿规律, 既具有重要的理论研究价值, 又具有显著的现实找矿指导意义。

1 地热流体成矿基本要素的特殊性

地热流体成矿作用属于内生成矿作用范畴, 系特殊的热液成矿作用类型。就其成矿基本要素而言, 它具有足以区别于其它内生成矿作用的特殊性。

(1) 成矿流体具赋存于地壳内部某些含水系统、经长期水/岩相互作用、具有良好地球化学和动力学分带的高度演化的地下水被地热事件加热升温后所形成的热流体。正象同位素和地球化学研究所证实的那样, 这种热流体通常以大气降水为主体, 亦有同生水等水体参与。例如, 北美科迪勒位造山带产于次绿片岩相碎屑岩和泥质岩的钨、铋、金矿床, 其成矿流体已被许多研究者所证实为深度演化的大气降水^[11, 14, 16]。加拿大新司可舍碳酸盐岩蒸发岩系铅-锌矿床成矿流体被认为是深度演化的同生水^[10]。美国加利福尼亚北海岸山脉含金热泉系统的热

^{*} 本文由湖南省自然科学基金项目——“湖南中西部铋(汞)矿床成矿机理、成矿规律及找矿方向的研究”专题(94-12)资助

张术根, 男, 1958 年生, 副教授, 博士, 主要从事矿床地质地球化学和非金属矿物及相关材料教学、科研工作
1997-03-18 收稿, 1997-09-01 修改回

流体被认为是沉积、准沉积源流体^[12]。广西岑溪金牙二叠系泥质碎屑岩中的微细浸染型金矿床成矿流体也具有同生水的特征^[4]。

(2) 成矿所需热能来自地球内部热能周期性不均匀汇聚所导致的地热事件。虽然常常与岩浆活动或动力-热流变质作用同时出现,但地热事件并不只以后两种形式表现出来,更不只是它们的结果。地热流体的形成与岩浆活动和变质作用没有必然联系,而具有更广泛的时空范围。同样,地热流体的加热升温不是一般意义上以地热增温率获得的随埋深线性增温,地热流体活动场所即是当时的地热场所在。关于这一点,已经从现代地热系统、特别是现代地热成矿系统得到充分说明。例如美国加利福尼亚某些金汞成矿热泉系统^[12]、新西兰 Rotokawa 金成矿系统^[15]。另外,许多地热流体型矿床的成矿温压条件研究表明,在相应压力条件下,其成矿温度明显高于正常地温梯度所能达到的温度,侧面说明地热流体型矿床成矿场所是当时的地热场所在。

(3) 成矿物质是含水系统内部地下水通过长期的、特别是地热活动期间被强化的水/岩相互作用,从含水系统岩石获得的。所获取的成矿物质组分类型取决于含水系统岩石的地球化学特征和地下水的物理化学性状及其演化特点,并不依赖于所谓“矿源层”。事实上,大多数地热流体型矿床,包括那些具有某些“层控”现象的地热流体型矿床,已被越来越多的研究证实没有“矿源层”存在。但是,几乎所有地热流体源区系统岩石相应成矿组分总是有较高的背景含量和易被萃取的存在形式。有些异地成矿的地热流体型矿床,虽然在容矿岩系没有相应成矿组分的相对富集,但查明其流体源区系统后,仍然可以发现其为成矿组分相对富集系统。例如,就位于泥盆系碳酸盐岩的湖南锡矿山巨型锑矿床,虽然 Sb 不是其容矿岩系重要成矿元素,但在其下伏浅变质碎屑岩含水系统、特别是厚度巨大的元古界板溪群含水系统, Sb 则是特征成矿元素。已有许多证据表明,该矿床的成矿流体虽有多源混合特点,但其主体为赋存于板溪群含水系统、经印支-燕山期构造-地热事件加热的地热流体^[7,17]。

(4) 成矿流体运移驱动力既受构造-地热事件所导致的各种直接动力因素制约,又与地热活动期间地壳脆-韧性转换带位置向浅部迁移有关。不难理解,地壳脆-韧性转换带是地下水活动的极限深度。地热活动期间,由于地热活动带的地温梯度增高,地壳局部膨胀,岩石韧性随深度显著增强,导致脆-韧性转换带位置向浅部迁移。相应地,原处于脆-韧性转换带及其附近的深部地下水也因岩石渗透性降低而被排挤出来,向低压高渗透带迁移,成为地热流体运移的重要驱动因素。北美科迪勒拉型钨、锑、金矿床,成矿流体加热前的活动深度被认为达 12~15 km (该深度相当于正常地温梯度下的脆-韧性转换带位置),但其成矿深度则只有 8~10 km,并在纵向上出现 Au—W—Sb—Hg 良好分带^[11]。这种就位不仅与该区成矿期走滑断层的活动有关,还应与地热活动期间岩石脆-韧性界面向浅部迁移所导致的成矿流体向上排挤有关。

(5) 成矿流体的演化和运动可以明确划分为早晚两个阶段:早期阶段系正常地下水演化运动阶段,可称前驱体阶段;晚期阶段为地下水加热升温演化运动阶段,即地热流体阶段。因控制其演化和运动的条件有别,这两个阶段流体的演化和运动各具特色。就运动特点而言,前驱体阶段流体压力低于围岩静压力,主要表现为地下水向下渗透和侧向分配,并出现明显的水动力学分带;而地热流体阶段则流体压力高于围岩静压力,主要表现为沿温压梯度汇聚式向上迁移与再分配。就演化方式而论,前驱体阶段随下渗深度增大,地下水盐度、温度、矿

化度和还原度逐渐增大，水/岩交换反应也逐渐增强，直至永久滞流带达到动态水/岩交换反应平衡；地热流体阶段流体的演化，主要因为流体被加热升温，其原有物理化学性状及其分带特点都发生显著变化，水/岩交换反应得到强化，最终导致流体在运移和再分配过程中卸载成矿。就流体演化运移关键控制因素而言，前驱体阶段是相对稳定、封闭程度较高的水文地质环境；地热流体阶段则主要是构造-地热事件。

2 地热流体成矿控制因素

作为独特的热液成矿作用类型，地热流体成矿控制因素既有热液成矿作用的一般共性，又有其显著的自身特色。

2.1 水文地质条件是前驱体阶段的重要控制因素

它直接决定着此阶段地下水能否稳定赋存、良好分带和深度演化。如果地下水交换积极，水文地质条件动荡频繁，则地下水演化成熟度低，物理化学性状变化迅速。即使水/岩交换反应速度和强度都保持一定水平，也难以形成相对稳定赋存的、矿化程度较高的地下水水体。因此，强烈构造-地热事件前，经历较长期的稳定演化的封闭、半封闭地下水含水系统是成矿地热流体前驱体形成和演化的必备条件。广西泗顶铅锌矿田都存在两套地下水含水系统，即泥盆系以碳酸盐岩为主体的含水系统和寒武系（以及中上元古界）浅变质碎屑岩含水系统，二者都以 Pb、Zn 相对富集为特色。在中泥盆世以前，该区水文地质环境长期相对动荡，浅变质碎屑岩含水系统构造裂隙极为发育，成为相对开放的地下水对流系统。中泥盆世至早、中三叠世，虽然该区地壳逐渐隆起，矿田所处位置于早石炭世沦为陆地，但地壳运动极为和缓，无明显构造变动，也没有同生断裂存在的证据。因此，两含水系统都经历了较漫长的稳定演化时期。印支运动期间，随地壳活动性增强，构造-地热活动强化，相对稳定赋存的前驱体演化成地热流体，各种平衡被打破，水岩交换反应再度强化，受构造-地热驱动力的作用，向减压扩容地带汇聚式迁移分配、卸载成矿。此期间，由于穿切两大含水系统的断裂构造的导通作用，这两个体系的地热流体在适当部位可混合，最终卸载成矿^[3,17]。

2.2 区域地球化学条件决定着地热流体的含矿性和矿化类型

地热流体型矿床的成矿物质是通过水/岩交换反应从地下水流经和赋存岩石、特别是赋存岩石萃取出来的。因此，含水系统岩石的成矿元素含量、赋存形式和分布分配特点，直接控制地热流体及其前驱体能否萃取和萃取哪些成矿物质。例如，湖南中西部广泛出露的板溪群和冷家溪群浅变质（火山）碎屑岩系，Au、Sb 和 W 都相对富集，Au 主要呈吸附状态与粘土矿物密切相伴，与 Sb 和 W 相似，易被中低温含硫 Na-Ca-Cl-HCO₃⁻ 型流体所萃取^[6]，故该区地热流体型矿床多为 Au-Sb-W 型矿床。由于地热流体及其前驱体的演化运动主要限制于其含水系统，故其化学成分和某些重要物理化学参数在较大程度上也受含水系统岩石物理化学性质控制。例如四川自贡地区，地下水主要赋存于富含卤素、且易被萃取的蒸发岩系统，虽然地下水仍处在驱体阶段，但已演化成卤素成矿溶液。从上述分析不难看出，地下水含水系统具有相对较高的矿化剂和成矿组分含量，并且相应成矿组分易被中低温流体萃取，是地热流体成矿的基本前提。

2.3 地热条件是前驱体演化成为地热流体的关键，也是地热流体最终成矿的重要控制因素

前驱体阶段地下水演化的温度受正常地温梯度控制,等温面与等深面近乎重合,进入地热流体阶段后,区域性地热事件使得地下水温度普遍升高,而因热点和热柱等局部异常热源的活动,又使得地下水温度无论横向或纵向都不均匀变化,环绕热源出现温度分带,各种不同规模和强度的热源中心即构成相应级别的地热流体活动中心,地热流体成矿物质的获取得到强化。与此同时,岩石脆-韧性界面位置上移,地热流体活动深度变浅,水动力特征和物理化学性状也相应发生显著变化,沿压力梯度汇聚式和再分配迁移,最终卸载成矿,众所周知,湖南中西部地区是地热流体型锑矿床重要产区,大量古地热研究成果表明,该区上述矿床集中地段恰好对应于中生代地热活动中心地段^[5]。

2.4 地热流体成矿作用的全过程受构造条件制约

地热流体成矿作用的全过程受构造条件制约,这不仅直接表现在矿床就位方面,还表现在成矿流体的演化和运动方面。如果前驱体阶段构造变动频繁,构造变形、特别是破裂变形强烈,则地下水交换积极,难以稳定赋存和演化。因此,此阶段需要相对稳定的构造环境保障。相反,如果在地热流体阶段没有与地热事件相伴相随的构造事件存在,则含矿地热流体难以实现汇聚式和再分配迁移。因此,此阶段构造事件的存在是地热流体成矿的必要条件。许多地热流体型矿床除其矿化就位直接受较低序次的断裂和/或褶皱控制外,还往往与较大规模、较高序次的断裂构造有着极为密切联系,甚至在一定区域范围内可通过其将多个矿床联系起来。例如,湘中城步-桃江断裂,不但控制了世界著名的锡矿山巨型锑矿,还控制着板溪中型锑矿及许多小型锑矿床。

2.5 岩性特征明显影响地热流体成矿作用过程和矿化特点

首先,岩石物理性质,如力学性质、孔隙度和渗透性,明显影响含水系统的水/岩比例、地热流体及其前驱体的渗透迁移规律。其次,岩石化学性质,如化学组成和化学活动性,明显影响地热流体及其前驱体水/岩反应强度、化学成分和物理化学性状。第三,岩性组合不仅控制含水层的层位、数目、分带和产出特点,也影响矿化类型、就位和产出特点。例如,湘西地区源于浅变质碎屑岩含水系统地热流体型钨、锑、金型矿床,主要受裂隙构造控制,以富含硅质组分、呈脉状产出为特色。又如,湘中地区就位于泥盆系碳酸盐岩的锑矿床,整个含水系统的岩性组合复杂。其矿化顶板为透水性能极差的泥质岩层,是地热流体向上运移的天然屏障,容矿岩石是脆性的、化学性质活泼的碳酸盐岩,地热流体及其前驱体可能主要赋存于深部浅变质碎屑岩含水系统和容矿的碳酸盐岩含水系统。区域性的断裂构造则使得两含水系统含矿流体得以汇聚、混合和再分配,最终卸载成矿^[7,17]。

3 地热流体成矿与地壳演化和运动的关系

与其它类型成矿作用比较,地热流体成矿作用与地壳演化和运动的关系具有显著特色。从地洼成矿理解论度分析,地热流体成矿作用是成矿大地构造专属性最典型的代表。

3.1 成矿大地构造特点

从成矿大地构造演化特点来看,地热流体成矿作用全过程所处大地构造环境包括地壳相对稳定和相对活动两个紧密相随的演化时期;相对稳定时期是前驱体充分演化的必要条件,相对活动时期则是地热流体形成的基本条件。由此可见,地洼剧烈期是地热流体最终成矿最为

有利的地壳演化时期。前驱动演化阶段主要处于地台和缓期，部分延续时间可能更长。许多产在地槽构造层的地热流体型矿床，其最终成矿作用发生在地洼型构造活动时期，而不是地槽型构造活动时期，如湘西北地区的钨、锑、金矿床，其主要原因就可能在于整个地槽阶段地壳活动性较强，前驱体演化环境动荡。进入地热流体演化阶段的时间，视地台和缓期之后构造-地热事件发展强度变化而有先有后。有些可能在地台余“定”期即进入地热流体演化阶段，有些可能在地洼初动期或直至地洼剧烈期才进入地热流体演化阶段。由于进入地热流体演化阶段的时间范围较宽，部分在地台—地洼体制转化之初即最终成矿，例如湘南、湘西，粤北、桂北和黔北的部分印支期形成的铅锌矿床就具有该特点，但绝大部分是在地洼剧烈期才最终成矿的。

3.2 成矿大地构造部位

从成矿大地构造部位特点来看，地热流体型矿床主要产于地洼区。这是因为该型矿床最终成矿主要发生在地台—地洼体制转化期至地洼剧烈期，所在区域都已演化成地洼区。例如在中国现存的几个地槽褶皱完成区和残留地台区都缺乏此型矿床，而在地洼区、特别是那些地台阶段演化较完整的地洼区，此型矿床是常见的。在地洼区内部不同级次构造单位，地热流体型矿床的产出也具有明显的规律性：即通常分布于地洼区的正单位或正负单位过渡部位。其原因主要有两点：①除少数情况外，地热流体型矿床的成矿流体主要来自地槽构造层和地台构造层的某些含水系统。虽然矿化就位不一定受相应含水系统的制约，并常常有一定距离的迁移，但往往局限在上述两大构造层、特别是地台构造层的特定岩性和特定岩性组合地层系统。在地洼区的上述部位，地洼构造层不发育，地台构造层或地槽构造层埋深浅，甚至直接出露，处在地下水活动的主要空间范围，有利于地热流体的形成和成矿。②地洼区的上述部位，往往是地台—地洼体制转化期间和地洼剧烈期地壳膨胀最显著、构造-地热事件最强烈部位，既有利于地热流体的形成，又有利于地热流体的迁移再分配和卸载成矿。由于部分地热流体型矿床就位于地洼区正负构造单位转换部位，故一定程度地表现出地壳构造过渡带成矿的特点。

从上述两方面的分析可以发现，地热流体型矿床表现出较明显的成矿大地构造专属性，是地洼区的重点矿床类型，具有多因复成矿床的基本特征。

4 主要结论

(1) 地热流体成矿作用系特殊的热液成矿作用类型。其成矿演化、物质来源、流体来源、热能来源、驱动力来源等都独具特色，可明显区别于其它成矿作用类型。

(2) 地热流体成矿控制因素主要包括水文地质条件、地热条件、构造条件、区域地球化学条件及岩性条件。水文地质条件和地热条件是其独具的重要成矿控制因素。

(3) 地洼区，特别是其中的正单位和正负单位过渡地段，是地热流体成矿的最有利部位；地台和缓期为地热流体前驱体阶段的充分演化创造了有利条件，而地洼剧烈期是地热流体型矿床最终成矿的最有利时期。

参 考 文 献

- 2 姜齐节. 论渗流热卤水成矿作用的意义与成因标志. 地质与勘探, 1980, (1, 2)
- 3 张术根. 泗顶铅锌矿田地下水成矿模式. 矿床地质, 1990, 9 (1): 26~34
- 4 李泽琴, 陈尚迪, 王奖臻等. 桂西金牙微细浸染型金矿床同位素地球化学研究. 矿物岩石, 1995, 15 (2): 66~72
- 5 胡雄伟, 裴荣富, 史明魁. 湘中地区中生代地温场及锑矿分布. 矿床地质, 1995, 14 (3): 220~227
- 6 刘英俊, 马东升, 牛贺才. 湖南益阳—沅陵一带金矿床的成矿作用地球化学. 地球化学, 1995, (1): 1~12
- 7 张术根, 戴塔根, 万方. 湖南中西部锑矿床地热流体成矿. 见: 湖南省地质学会主编. 湖南地学新进展. 长沙: 湖南科学出版社, 1996
- 8 White D E. Diverse origins of hydrothermal ore fluids. Econ. Geol., 1974, 69: 954~973
- 9 Garven G. Theoretical analysis of the groundwater flow in the genesis of strata-bound ore deposits; Mathematic and numerical model. Am. Jour. Sci., 1984, 284: 1085~1124
- 10 Ravenhurst C E et al. Formation of Carboniferous Pb-Zn and barite mineralization from basin-derived fluids, Nova Scotia, Canada. Econ. Geol., 1989, 84: 1471~1498
- 11 Nesbitt B E et al. Genetic implications of stable isotope characteristics of mesothermal Au deposits and related Sb and Hg deposits in the Canada Cordillera. Econ. Geol., 1989, 84: 1489~1506
- 12 Peters E K. Gold-bearing hot spring systems of the Northern Coast Ranges. Econ. Geol., 1991, 86: 1519~1528
- 13 Donnelly-Nolan J M et al. The Geysers-Clear Lake area, California; thermal waters, mineralization, volcanism, and geothermal potential. Econ. Geol., 1993, 88: 301~316
- 14 Guilemette N et al. Genesis of the Sb-W-Au deposits at Ixtahuacan, Guatemala; evidence from fluid inclusions and stable isotopes. Mineral. Deposita, 1993, 28: 167~180
- 15 Krupp R E et al. The Rotokawa geothermal system, New Zealand; an active epithermal gold-depositing environment. Econ. Geol., 1987, 82: 1109~1129
- 16 Madu B E et al. A mesothermal gold-stibnite-quartz vein occurrence in the Canada Cordillera. Econ. Geol., 1990, 85: 1260~1268
- 17 Zhang S G. Ore-bearing groundwater mineralization of Devonian carbonate rock-hosted Pb-Zn and Sb deposits in Nanling, China. Geotectonic et Metallogenia, 1994, 18 (4)

AN ANALYSIS OF GEOTHERMAL FLUID MINERALIZATION

Zhang Shugen

(Department of Geology, Central South University of Technology, Changsha 410083)

Key words: mineralization, ore-control factor, geothermal fluid

Abstract

Based on the particularity of essential factors of geothermal fluid mineralization, factors controlling the ore-forming process, and ore-control characteristics, the present paper has systematically analysed the relationship between metallogenesis and crustal evolution process. It is known from the analysis that the geothermal fluid mineralization is a special type of hydrothermal ore-forming process obviously distinguishable from other mineralization types.