

海底喷气(喷流)矿床的现代模式与 含油(气)热卤水迁移成矿

杨振强

(宜昌地质矿产研究所, 宜昌 443003)

摘 要 介绍了沉积盆地中海底喷气(喷流)矿床两种常见的现代沉积模式: 中低温红海热水池模式和中高温瓜伊马斯盆地(加利福尼亚湾)热水双循环模式。根据硫、氧、氢同位素资料, 讨论了含油(气)热卤水迁移过程中产生的金属成矿作用。

关键词 海底喷气(喷流)矿床模式 含油(气)热卤水 金属成矿作用

1 前 言

以沉积岩为容矿岩石的金属矿床在成因上与火山岩为容矿岩石的块状硫化物矿床不同, 可以分为两大类: 即产于沉积岩中的海底喷气(喷流)矿床和产于碳酸盐岩中的密西西比河谷型铅-锌矿床。产于沉积岩中的金属硫化物矿床具有规模巨大和品位高的特点, 往往形成大型和超大型矿床, 具有十分重要的经济价值。按桑斯特博士(1985)的看法, 沉积岩中的金属硫化物矿床比火山岩中块状硫化物矿床的储量大 10 倍, 而品位高 1 倍, 足见此类矿床在国民经济中的重要意义。

海底喷气(喷流)矿床和密西西比河谷型铅-锌矿床的成因, 本质上都与沉积盆地以下及沉积盆地中沉积物内的热水循环有关。海底喷气(喷流)矿床的成因是随 60 年代中期红海海底扩张中心发现热水矿化作用和太平洋中脊发现富金属沉积物而发展和确立起来的新概念, 即海底热水喷气(喷流)矿床^[1,2]。显然, 海底喷气(喷流)矿床的成因观点与海底扩张中心概念的形成息息相关。海底喷气(喷流)矿床的现代模式可分为两种: 即红海式的热水池模式和瓜伊马斯盆地(Guaymas Basin)或 Escanaba 深海槽中的丘(mound)模式。诚然, 现代海底热水作用可作为古代热水沉积矿床的借鉴。前者为中低温海底喷气(喷流)矿床的现代模式, 后者为海底中、高温块状硫化物和含油盆地的现代例子。密西西比河谷型铅-锌矿则具有更复杂的成矿机理, 可能与沉积界面以下热卤水的运移、交代、充填于油气储集层(例如古岩溶、礁、滩)有关, 为同造山期沉积盆地封闭、回返阶段的产物。日益增多的碳、氢、氧、硫同位素资料和流体包裹体测试结果表明, 沉积岩中的含矿介质是高度混合的含油气热卤水, 与沉积盆地内有机的成岩转变和有机成熟度有关, 而不是简单的大气降水渗入和水/岩交换的产物。本文目的是想通过海底喷气作用(Submarine exhalative)研究中取得的成果, 指出含油气热卤水在金属运移和沉淀中的作用, 以便开拓热水成矿研究的思路。

1997 年 7 月 2 日收稿

2 扩张海盆地下的热流系统

现代深海盆地内的金属硫化物沉积是盆地下热流循环系统的产物,也是上升热流与海水或沉积物发生反应的结果。因此,含矿流体反映了深部热流与“封存水”(connate water)和近海底海水的混合结果,而不是单一的岩浆水和单一的海水成分,与大气降水的关系并不十分密切。

2.1 热水池模式(热水与海水混合)

现代红海是始新世末开始分裂的狭窄陆间深海盆地。它提供一个中低温硫化物的热水池模式。红海底以下有 20 m 以上的含金属沉积物,自上而下可分为铁蒙脱石相(绿脱石)、非晶质-针铁矿、硫化物相。对阿特兰蒂斯-Ⅱ海渊考察结果表明,海底卤水温度为 56℃。从含金属沉积物中的锶、硫、碳和氧同位素分析来看,供给热水系统的溶解成分有三种主要来源——海水、中新世蒸发岩层和扩张带的玄武岩^[2]。

进入热水池的热流体温度大于 250℃,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 5‰。热水池中沉积硬石膏的硫同位素指示热水系统有轻的“热水”成分和重的海水成分两种来源,即显示双峰式分布特征。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7070~0.7075)也显示海水和浅成交代的混合结果。碳、氧同位素说明碳酸盐成分来自海水($\delta^{13}\text{C} = -1.5\text{‰}_{\text{PDB}}$)和下层卤水($\delta^{13}\text{C} = -7.0\text{‰}_{\text{PDB}}$)^[2]。热水池中沉积的铁蒙皂石类(绿脱石) $\delta^{18}\text{O}$ 值为 +18.18‰~+8.04‰,代表中低温(78~206℃)卤水条件下的热水沉积物^[3]。含矿介质的水为加热的海水和地下卤水,大气降水对红海(热水池)式成矿模式的影响微乎其微。

2.2 上升热水双循环模式

瓜伊马斯盆地位于太平洋板块和北美板块之间的加利福尼亚湾走滑拉张沉积盆地中,是一个被现代沉积物覆盖的含油和含金属盆地。沉积物厚达 500 m,并有同沉积期的玄武岩岩株和岩床侵入,盆地内沉积物达到绿片岩相,因此,是中、高温热水沉积作用最理想的现代例证。特别引人注目的是盆地内出现类似矽卡岩矿物的同生沉积物,如绿帘石、绿泥石、角闪石、钠长石和滑石等。热水沉积的磁黄铁矿、闪锌矿、重晶石常见。矿物形成温度为 190~326℃(Koski 等,1985)^[3,4]。该沉积盆地可以辨认出两种热水系统:(1)温度大于 300℃的深部封闭来源的热水循环系统;(2)温度小于 200℃的浅部岩床驱动的流体热水系统(图 1)。盆地内部大范围的对流是由瓜伊马斯盆地底部水通过沉积物和盆地边界向下补给,在深部穿过岩浆岩基底(深约 500 m 以上),加热后向上在 500 m 厚的软沉积物中流动,形成绿片岩相(钠长石-绿帘石-绿泥石-石英)矿物组合,与沉积物在高温(>300℃)条件下产生强烈反应(蚀变),并作为还原的、微酸性(pH=5.9)但具有高碱性的高温溶液(>325℃)喷出而存在于海底之上。因此,由瓜伊马斯盆地底部水通过沉积物和深盆地边界断裂带的补给系统构成大规模的热对流。整个盆地中的热流体通过两种方式溢出海底:(1)通过烟囱构造,当热流体与海水混合时形成硅质、硫酸盐和金属硫化物;(2)通过扩散渗透出沉积物,与浅部岩床侵入有关的小规模热水循环系统^[5]。沉积在海底上的块状硫化物的硫同位素值显示为深部玄武岩硫($\delta^{34}\text{S} = 0.35\text{‰} \sim 2.92\text{‰}$)和沉积物中细菌还原作用的硫($\delta^{34}\text{S} = -3.94\text{‰}$)两种不同来源^[4],与上述热水循环系统的解释相吻合。该盆地是一个既含油气和块状硫化物沉积又有同沉积期岩浆活动的断陷盆地。它是沉积盆地热水双循环系统模式、成油成矿作用和热水蚀变作用极好的现代例证。很显然,该成矿作用与海底海水沿同生断裂下降到盆地基底再由深部热源驱动而上升

的含油气热卤水活动有关,而与盆地周围陆地大气降水的渗透和加入无关。

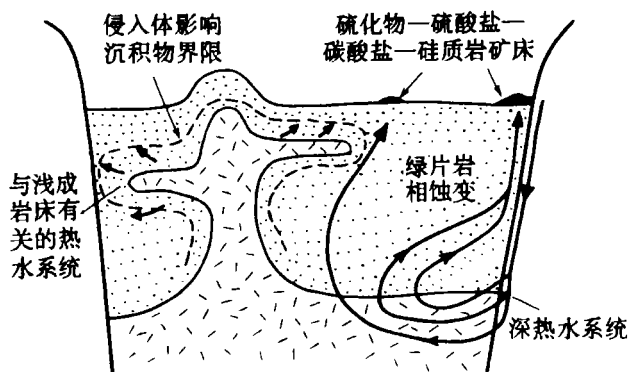


图1 瓜伊马斯盆地热水系统活动略图

(据 Koski 等, 1985)^[4]

Fig. 1 Schematic illustration of the hydrothermal systems

active in Guaymas Basin (after Koski et al., 1985)^[4]

2.3 现代海底热水沉积的地质意义

到目前为止,现代大洋中脊和裂谷盆地中已经发现的矿化产地有102个以上^[2]。其中,上述两种模式是沉积盆地中常见的热水成矿作用。

红海热水池模式的含矿体在地质剖面上常呈碗状,含矿围岩为黑色页岩、硅质岩、泥灰岩、白云岩和蒸发岩。其大地构造位置多见于陆间裂谷和大陆边缘裂陷槽。红海阿特兰蒂斯-Ⅱ海渊的底层卤水由另外一个与其相通的热热水喷流盆地迁移而来。

因此,加拿大 D.F Sangsler(1997)认为,世界上相当一部分喷流沉积铅锌矿床下面并没有覆盖指示矿液到达海底通道的不整合蚀变带或网脉状喷流口复合体。根据矿体底部缺失喷口复合体并伴随容矿组合交代硫化物的事实,不少专家认为矿床是由沿着透水层侧向迁移的矿液形成^[6],或者从喷流口喷出的卤水沿沉积盆地沉积界面流动,迁移到三级沉积盆地中沉积下来。因此,红海热水池模式是世界上许多大型、超大型海底喷气(喷流)铅锌矿床的成矿模式,包括“下沉卤水”侧向迁移而沉积(或交代)的成矿作用。诚然,该模式也可供研究密西西比河谷型铅-锌矿床成因时参考。

瓜伊马斯盆地的热水双循环模式成矿作用常常见于陆内裂谷、弧后盆地、走滑拉张盆地和火山岩盆地。盆地内部同生岩浆活动和来自盆地内部的循环海水,对中、高温层状砂卡岩矿床和绿岩型块状硫化物矿床成矿富集起了很大的控制作用,因而,具有相当的指导意义。

3 热水沉积矿床中硫同位素特征及其对金属成矿作用的启示

3.1 海底喷气(喷流)矿床硫同位素特点

海底喷气(喷流)矿床的硫同位素变化很大。以粤北泥盆纪海底喷气(喷流)矿床为例,反映硫源变化、热水与海水混合程度和生物有机硫的影响程度一般可分几种情况:(1)重硫型, $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $+17\text{‰} \sim +20\text{‰}$ 附近,反映硫源为海水或者硫化物为硫酸盐矿物还原而成;(2)负值型,反映以生物硫源为主的特征;(3)正值窄分布型, $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $+1\text{‰} \sim +5\text{‰}$ 狭窄范围内分布,反映以深部热水提供硫源为主(顾连兴、徐克勤,1986)^[7]。大宝山矿区热水成因硫同位素的变化范围为 $-5\text{‰} \sim +7.16\text{‰}$ (陈好寿,1985)^[8],显示深部硫源和生物硫源的双重作用,而且该矿床上部矿带还明显有海水还原的重硫型特征($\delta^{34}\text{S}=15\text{‰}$,葛朝华等,1987)^[9]。粤北连县小带铅-锌-锰喷流矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $+1.5\text{‰} \sim -2.5\text{‰}$ 范围内,反映出硫源为深部来源与生物硫源的混合。

凡口铅锌矿硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化为 $+13\% \sim +25\%$, 众值为 $+16\% \sim +20\%$, 与泥盆纪海水硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($+17\% \sim +22\%$) 相似, 充分说明其成矿过程中海水和生物的还原作用。与此相似, 在英德红岩硫铁矿的矿石和围岩中, 硫同位素值变化很大 ($\delta^{34}\text{S} = -21\% \sim +20\%$), 明显具有生物还原海水硫酸盐同位素的特征。

3.2 密西西比河谷型铅-锌矿床硫同位素特征的启示

尽管密西西比河谷型铅-锌矿床不属于海底喷气(喷流)矿床, 但是产于碳酸盐中的密西西比河谷型铅-锌矿床, 总的看来与上升热卤水的沉积、交代和充填作用有关。在区域上, 这类矿床与油气田热卤水的运移和沉淀有关。

与海底喷气(喷流)矿床相比较, 密西西比河谷型铅-锌矿床硫化物中的硫同位素值变化也很宽。 $\delta^{34}\text{S}$ 值主要集中在 $-9\% \sim +9\%$ 和 $+17\% \sim +20\%$ 两个范围, 这与上述粤北地区的海底喷气(喷流)矿床十分相似。

不久以前, Kesler 等(1994)对比研究了美国密西西比河谷型铅-锌矿床硫化物的硫同位素值和辛辛纳提穹窿油田中石油的硫同位素值, 惊讶地发现两者的 $\delta^{34}\text{S}$ 值几乎相同(前者 $\delta^{34}\text{S} = -9\% \sim +9\%$; 后者 $\delta^{34}\text{S} = -12\% \sim +9\%$)。许多具有低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的密西西比河谷型铅-锌矿床与油密切共生, 而具有高 $\delta^{34}\text{S}$ 值的密西西比河谷型铅-锌矿床常常含有沥青质^[10]。因此, 许多人认为密西西比河谷型铅-锌矿床中的还原硫是由沉积盆地中挤出来的具有高 $\delta^{34}\text{S}$ 值的含油气热卤水, 经热化学还原的硫酸盐(TRS)演变而成。由甲烷气体还原海相硫酸盐所得到的 H_2S 气体与由生物细菌还原而产生的 H_2S 气体 $\delta^{34}\text{S}$ 值差别很大。前者产生的硫化氢气体 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+17.8\% \sim +22.4\%$ (Krouse 等, 1988)^[11], 与海水中的硫同位素值大体相同。因此, 有机质热分解作用对成矿发生巨大的影响。

4 含油气热卤水成矿

4.1 沉积盆地中含油气水可能是重要的成矿流体

石油作为金属运载体观点不仅限于 Pb-Zn 矿, 还包括了汞矿(Peabody & Einaudi, 1992)^[14]、卡林型金矿和铜、钼、镍矿等。V 和 Ni 在石油中高度富集已为人们所共识。石油中 V 最高含量见于委内瑞拉 Boscan 原油, 达 1580×10^{-6} ; Ni 最高含量为 155×10^{-6} ; Co、Cu、Pb、Zn 在原油中最大浓度分别为 13、12、21、 160×10^{-6} 。我国胜利油田石油中 Au 含量大于 100×10^{-9} , Ag 为 $2.3 \sim 10.1 \times 10^{-6}$, 而油灰分中含金量为 17.5g/t。毫无疑问, 某些原油中金属元素的最大浓度已经超过了成矿流体中有成矿意义金属元素丰度的下限值。因此, 从这个意义上讲原油可以成为成矿流体的重要组成部分^①。基于类似观点, 近年来, 有人提出贵州丹寨汞-金矿是 Hg-Au-油气不同性质的成矿作用叠加在一起而形成的层控矿床(陈庆年, 1992)。可以说, 该汞-金矿是被断裂构造破坏了的油气田水运移和沉淀的产物。由此可见, 成油气过程就是金属富集过程, 对 Hg-Sb-Au 组合矿带的形成起了富集作用。

4.2 甲烷气还原成矿作用

近年来, 在解释密西西比河谷型层控铅锌矿成矿理论方面出现了一种叫做“硫酸盐-还原加混合”理论, 但存在许多缺陷。后来经改进又发展成为甲烷气还原作用的新观点(Anderson,

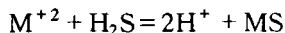
① 庄汉平, 银、锗、金大型超大型矿床的有机地球化学研究(中国科学院地球化学研究所申请博士学位论文), 1996。

1991)^[12]。这种理论观点的核心即认为含矿热卤水运移过程引起沉积围岩中有机质热成熟度的升高,从而释放大量的烃气(CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 等)。烃气在一定的地质构造中聚集,成为硫酸盐的还原剂储集层。甲烷烃气使金属从溶液中沉淀下来成矿。过去尽管人们花了很多时间和物力、财力去研究和探索有机固体残留物对金属的富集作用,现在看来真正重要的成矿作用过程是甲烷烃气的产生、运移、储集和还原作用,而沥青和残余干酪根的富集作用十分有限,只是起到指示成矿古地温的作用。

甲烷气还原作用成矿观点认为:上升热水使围岩中的有机质发生热解,产生 CH_4 气。甲烷气还原含硫酸盐水,放出大量热解的 H_2S 气,反应过程表示为下列方程式:



硫化氢气使金属发生沉积:



式中 M^{+2} 为金属阳离子。

还原剂甲烷气在气/水面上遇到含金属硫酸盐溶液,混合作用在储气层里进行,并在孔隙度好的灰岩中沉淀金属矿体。这就是甲烷气还原剂成矿的最新解释(Anderson, 1991)^[12]。

4.3 含油气水——成矿介质性质的新思考

既然沉积盆地中的金属成矿与含油气水的运移和储集有关,那么油田水的来源又如何呢?可以说,这是一个迄今为止仍存在争议的问题。

70年代当矿床学家们研究火山喷气成因的金属矿床时,发现生成于海底扩张环境中的块状硫化物矿床普遍发生氢、氧同位素负偏移的现象。例如,著名的日本黑矿氢氧同位素组分表明,其包裹体水落在一个很窄的变化范围: $\delta\text{D} = -28\text{‰} \sim -18\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -1.6\text{‰}$ 。因此,Ohmoto 和 Kye(1974)^[15]认为日本黑矿的成矿流体是由海水、岩浆水($\delta^{18}\text{O} = +8\text{‰}$, $\delta\text{D} = -70\text{‰}$)和淡水($\delta\text{D} = -54\text{‰}$)混合而成。然而,当 White(1974)分析了 36 个热水矿床的含矿流体以后,提出了各种不同水混合的成因^[16]。针对加利福尼亚 Coast Ranges 地区油田水氢、氧同位素特征($\delta\text{D} = -11.4\text{‰} \sim -23.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = +2.93\text{‰} \sim +5.93\text{‰}$),他提出一种与众不同的看法,油田水并不是许多人所认为的那样是由大气降水演变而来,而是由粘土矿物成岩过程放出的压实水和结晶水(粘土矿物 $\delta\text{D} = -50\text{‰} \sim -80\text{‰}$)以及深部卤水混合演变而来,即所谓非大气水成因的热水和矿物水观点。更令人费解的是,由深海钻探计划取出的深海燧石粹取出来的水 δD 显示很强烈的分馏作用, $\delta\text{D}_{\text{K}}$ 为 $-78\text{‰} \sim -95\text{‰}$,显然也是与非大气水成因有关,并且不是深海温度的函数^[17]。这种非大气水成因的 δD 是否与深海底的早期成岩作用有关,不得而知。因此,海相沉积物中具有低的 δD 值不能完全归因于大气降水成因,而应与深海沉积盆地内部的热卤水演化过程中有机质的热分解阶段有关。

由此可见,过去人们习惯地将氢氧同位素负偏移的现象归因于蒸发海水的大气分馏效应及大气降水渗入作用的岩/水交换,而对沉积盆地内部的有机物质随成岩作用过程发生热化学演化却考虑甚少。其实,沉积盆地中沉积物的有机质从未成熟至超成熟阶段中,不断析出天然气。这些天然气具有碳、氢同位素负值($\delta\text{D} = -200\text{‰} \sim -150\text{‰}$, $\delta\text{C} = -25\text{‰} \sim 70\text{‰}_{\text{PDB}}$)^[18]。天然气与深部的循环海水和岩浆热水不断混合并进行同位素的气/水交换,是造成油田水碳、氢、氧同位素负偏移的根本原因(图2)。图2表示北美五大盆地油田水 $\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{D}$ 的变化及与其成因有密切联系的密西西比河谷型铅锌—萤石矿矿石流体包裹体 δD 的变化范围。可以认为,由于沉积盆地中产生的 CH_4 气体的加入(图上用虚线表示),致使地层中的各种水(包括

封存海水、建造水、矿物水、变质水、岩浆水)混合后发生 $\delta D - \delta^{18}O$ 的负偏移,并且分布于大气淡水、海水(标准平均海洋水)和变质水的过渡范围内。

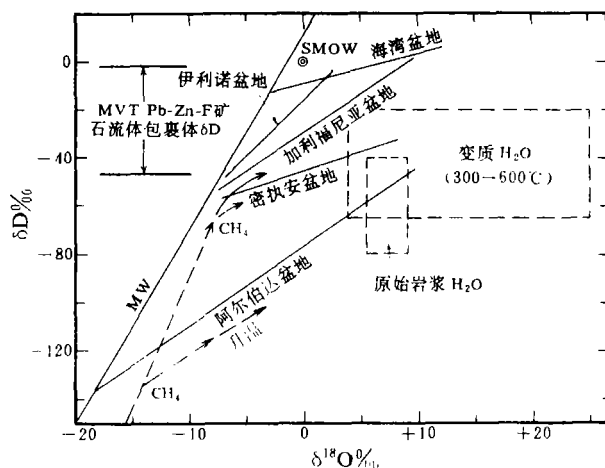


图2 北美油田卤水的 $\delta^{18}O - \delta D$ 图解(据 H. P Taylor, 1979 修改)^[18]
虚线箭头表示含甲烷卤水运移。

Fig.2 Plot of δD vs. $\delta^{18}O$ for oil-field brines from North America(after H. P Taylor, 1979)^[18]

众所周知,在 Taylor (1979)的矿物-水系统的氢同位素平衡分馏曲线上,显示 300℃ 以下 H_2O 将比 CH_4 富集 70% ~ 90% 的氘同位素^[19]。理论上讲,在还原条件下热水流体应该更富集 δD 值,而在氧化条件下,平衡热水的 $H_2O - CH_4$ 分馏系数应该大于 75‰,导致油田水 $\delta D - \delta^{18}O$ 值向大气淡水线靠拢。在这种情况下,要分辨出到底有多少成分为大气降水,多少成分为 $CH_4 - H_2O$ 反应的水,简直就不太可能。可以毫不夸张地说,大多数海底喷气(喷流)矿床、密西西比河谷型铅-锌矿床以及卡林型金矿的包裹体水都落在油田水 $\delta D - \delta^{18}O$ 值范围内^[20,21]。

矿石包裹体水的成分及同位素研究将有助于含矿流体性质的重新认识。例如,与热水沉积成因有关的广东长坑金银矿包裹体水的 $\delta D - \delta^{18}O$ 值呈线性关系,落在油田水氢氧同位素组成的范围内^[22],表明成矿作用与三水盆地油气水的运移和储集作用有关。

4.4 同造山期含油气水的运移和金属成矿

热水沉积矿床一般形成于沉积盆地发育早期张裂扩张阶段,并且可以归因于沉积热事件的控制^[20]。金属成矿作用是盆地内部张性断裂诱发热循环的结果。

沉积盆地回返封闭引起的同造山期热水运移也是很重要的热水成矿作用。许多金属矿床的形成与造山隆起带的挤压有关。有一种观点认为:会聚板块大陆边缘与逆冲推覆体相碰撞,迫使沉积物中的流体被挤向前陆盆地或大陆内部。这些流体被称为“构造卤水”(tectonic brine)^[23]。构造卤水在断裂、岩浆活动、碳氢化合物迁移、矿物搬运和变质等现象中起了重要作用。当沉积物受到挤压,沉积物中的孔隙水、海水、矿物水、有机质碳氢化合物和成矿物质等通通被推覆体挤到前陆盆地和大陆内部,形成气、油和 Pb-Zn 矿。Oliver(1986)研究了北美油、气田和 Pb-Zn 矿的空间分布与阿巴拉契亚、科迪勒拉、落基山造山带的关系以后指出:推覆体推进过程中,挤压出下覆沉积物中大量的封存海水(约占软沉积物体积的 1/3 至 1/2),在近造山带的前陆盆地中形成气田,再远处形成油田,在大陆内部则形成铅锌矿床和沥青。因此,矿产分布与有机质的镜质组反射率的分布模式(Vitrinite reflectance pattern)有关。铅锌矿的分布模式与油气的分布模式相似,但矿床产于盆山之间(见 Oliver, 1986, 图 4 和图 5)。因此,推覆构造、走滑断裂、盆-岭构造常常诱发沉积盆地中热水循环加剧,形成大型的金-银、汞矿和密西西比河谷型铅锌矿。

关于牵涉到造山带和前陆盆地之间大规模横向流体流动的大多数海底喷气(喷流)和密西西比河谷型铅-锌矿床模式来说, Bjorlykke(1997)更倾向于强调来自深部盆地热卤水与浅部盆地卤水的垂向混合而不是横向流动^[24]。因此, 他提出海底喷气(喷流)和密西西比河谷型铅-锌矿床彼此具有可以表明它们成因之间的相似之处。在大多数海底喷气(喷流)矿床模式中, 含矿流体是垂直地向上沿断裂构造被带到海底的。他认为在沉积盆地中如果一股海底喷气(喷流)型矿溶液不能上升到达海底, 而是在渗透性好的白云岩或砂岩中被盖层盖住, 那么是否会形成一个密西西比河谷型铅-锌矿床呢? 因此, 密西西比河谷型铅-锌矿床可以当成一种广义的热水沉积矿床进行研究。

参 考 文 献

- [1] Carne K C & Cathro K J. Sedimentary exhalative (SEDEX) zinc-lead-silver deposits, northern Canadian Cordillera. *Can. Mining Metallurgic Bull.* 1987, 75(1): 66—75
- [2] Barrett T J & Jamber J L (eds.). Sea-floor hydrothermal mineralization. *The Canadian Mineralogist*, 1988, 26 (3/4): 1—888
- [3] Cole T G. Oxygen isotope geothermometry and origin of smectite in the Atlantis II Deep, Red Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1983, 66: 166—176
- [4] Koski R A, Lonsdale P F, Shanks W C. Mineralogy and geochemistry of a sediment-hosted hydrothermal sulfide deposit from the southern Trough of Guaymas Basin, Gulf of California. *J. Geophys. Research* 1985, 90 (B8): 6695—6707
- [5] Magenheimer A J & Gieskes J M. Hydrothermal discharge and alteration in near-surface sediments from the Guaymas Basin, Gulf of California. *Geochim. Cos. Acta*, 1992, 56(6): 2329—2338
- [6] Sangster D F. The role of “sinking brines” in the formation of sediment-hosted exhalative lead-zinc deposits (abs.). *Formation and Metamorphism of Massive Sulphides. Abstracts, NTNU, Trondheim, Norway*, 1977
- [7] 顾连兴、徐克勤. 论大陆地壳断裂拗陷带中的华南型块状硫化物矿床. *矿床地质*, 1986, 5(2): 1—13
- [8] 陈好寿. 粤北大宝山层状多金属矿床的铅、硫、氧同位素地球化学研究. *宜昌地质矿产研究所所刊*, 1985, 第10号
- [9] 葛朝华、韩发. 广东大宝山矿床喷气-沉积成因地球化学特征. 北京: 科学出版社, 1987
- [10] Kesler S E, Jones H D, Sassen K, et al. Role of crude oil in the genesis of Mississippi Valley-type deposits: Evidence from the Cincinnati arch. *Geology*, 1994, 22(7): 609—612
- [11] Krouse H R, et al. Chemical and isotopic evidence of Thermochemical sulphate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs. *Nature*, 1988, 333: 415—419
- [12] Anderson G M. Organic maturation and ore precipitation in southeast Missouri. *Econ. Geol.*, 1991, 86(5): 909—926
- [13] Anderson G M & Garven G. Sulfate-sulfide-carbonate associations in Mississippi Valley-type lead-zinc deposit. *Econ. Geol.* 1987, 82(2): 482—488
- [14] Peabody C E & Einaudi M T. Origin of petroleum and mercury in the Cuherbar Cinnabar deposit, Mayacmas District, California. *Econ. Geol.*, 1992, 87(4): 1078—1108
- [15] Ohmoto H & Rye R O. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of fluid inclusions in the Kuroko deposits, Japan. 1974, 69(6): 947—953
- [16] White D E. Diverse origins of hydrothermal ore fluids. *Econ. Geol.* 69(6): 934—973
- [17] Kolodny Y & Epstein S. Stable isotope geochemistry of deep sea cherts. *Geochim. Cosmo. Acta*, 1976, 40:

1195—1209

- [18] Schoell M. Genetic characterization of nature gases. Am. Assoc. Petro. Geol. Bull, 1983, 67(12):2225—2238
- [19] Taylor H P. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. In: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits(2nd Edition, by Barnes H L). John Wiley & Sons, New York, 1979
- [20] 杨振强、陈开旭、杨卫东等. 粤北海西早期沉积盆地扩张与热水成矿. 岩相古地理, 1996, 16(3):58—70
- [21] 刘家齐. 广东梅县玉水富铜多金属矿床温压地球化学特征、成矿时代及成因研究. 华南地质与矿产, 1997 (1):37—46
- [22] 郭新生、杜均恩. 广东长坑金银矿床流体包裹体及同位素地球化学研究. 广东地质, 1996(3)
- [23] Oliver J. Fluids expelled tectonically from orogenic belts: Their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena. Geology, 1986, 14(2):99—102
- [24] Bjorlykke A. Sediment-hosted lead-zinc deposits and their relationship to underlying basement (abstr.). Formation and Metamorphism of Massive Sulphides. Abstracts, NTNU, Trondheim, Norway, 1997

MODERN MODELS FOR SEDEX DEPOSITS AND METALLOGENESIS OF OIL(GAS)-BEARING THERMAL BRINE

Yang Zhenqiang

(Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443003)

Abstract

Two modern sedimentary models for SEDEX deposits are introduced in this paper, one is the low-to-moderate temperature hot brine sedimentary model(the Red Sea hydrothermal pool model), the other is low-to-high temperature hydrothermal bicycling model(Guaymas basin, California Bay). Besides, in the light of sulfur, oxygen and hydrogen isotopic data, metallogenesis of oil(gas)-bearing thermal brine during migration is also discussed.

Key words SEDEX deposit models oil(gas)-bearing thermal brine metallogenesis