

盆地流体及其成矿作用

刘建明¹, 叶杰¹, 刘家军², 谭骏¹, 应汉龙¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 盆地流体指在大陆性地壳基底上的沉积盆地演化过程中活动于沉积柱内的有机/无机复杂流体相, 包括来自盆地内部由有机/无机沉积物压实和相变所释放出的自生流体和外来流体(盆地边缘隆起区补给的大气水和基底补给的流体)。盆地演化早期的沉积水文地质阶段很可能以压实驱动流为主的自生流体占优势, 而在晚期的渗入水文地质阶段则以重力驱动流为主的外来流体。典型的低温热液地球化学特性和丰富有机组分的广泛参与, 乃是盆地流体的两大突出特征。盆地流体广泛参与了沉积物的成岩-后生和成烃成矿过程。它既可以上升到达海底以沉积喷流的方式成矿, 也可在海底以下的沉积柱中运移时遇到合适的地球化学障而发生沉淀卸载。文献中报道的典型矿床类型主要包括沉积喷流型矿床, 密西西比式铅锌矿床和大陆砂页岩型矿床。但在我国却发现了一批具有复杂成矿元素组合的重要矿床类型, 包括沉积岩容矿的微细浸染型金矿床等。

关键词: 盆地流体; 流体运移; 盆地流体成

中图分类号: P544⁺.4:P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2000)02-0085-10

近年来人们认识到, 沉积盆地演化过程中沉积柱内有大量地质流体强烈活动, 不仅构成了盆地动力学演化的重要环节, 而且形成了绝大多数的石油天然气和相当多的金属/非金属矿床^[1-5]。本文以盆地流体为主线考察发生在盆地沉积柱中的成矿作用过程。

盆地流体指在大陆性地壳基底上的沉积盆地演化过程中活动于沉积柱内的各种流体(包括烃类和水)。盆地流体广泛参与了沉积物的成岩、后生、成油和成矿过程。油气地质学家们曾从成油成气角度对盆地流体作了大量工作, 但对其成矿效应所知甚少。迄今为止对盆地流体成矿的研究工作都集中在一些经典矿床类型, 包括沉积喷流型(Sedex型)、密西西比型(MVT)和大陆砂页岩型矿床, 涉及矿种主要有铅-锌(-银)、铜、铀、重晶石等。但对盆地流体成矿的普遍性、成矿与盆地演化及盆地结构的关系、对盆地内成油与成矿的关系等重要问题均缺乏

认识, 有必要从盆地动力学的高度开展全方位的多学科综合研究。

1 盆地中流体的来源

本文的盆地是指发育于大陆性地壳(或至少是过渡性地壳)基底之上的正常沉积盆地。“盆地流体”是指活动于这类沉积盆地演化过程中参与了沉积物的各种成岩-后生变化的复杂流体相, 包括盆地内部的自生流体和盆地外部进入的外来流体。前者指无机/有机沉积物压实和相变释放出的各种流体, 包括不同比例的沉积物间隙水(海水为主)、沉积物颗粒吸附水(海水为主, 部分大气降水)、粘土矿物的层间水和结构水, 以及由沉积有机物质热解而成的各种气态/液态烃类有机流体(石油天然气)等; 外来流体则包括由盆地边缘大陆隆起区补给的下渗大气降水、下渗海水、沿基底断裂上升的基底流体甚或地幔深部流体, 以及当有岩浆活动时尚可能有岩浆流

收稿日期: 2000-02-14

基金项目: 本文受科技部攀登预选项目(95-预-39)和国家重点基础研究项目(GI99043210)的资助

第一作者简介: 刘建明(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿床学研究。

体的加入。

本文定义的盆地流体是广义的,它全部或部分覆盖了文献中经常出现的盆地热卤水、油田卤水、地层水、建造水、粘土水、烃类(石油天然气)、有机成因水、渗滤卤水、渗滤热液、地下水热液、天水热液等流体,还可能有部分变质热液、岩浆热液、地幔深部流体、造山带流体的局部加入。尽管盆地流体具有如此复杂多来源的特征,而且这些流体的数量和活动特征随盆地的时空演化而变化,但是它们都是在盆地动力学框架下(共同的背景)、盆地演化的过程中(时间上)、通过与盆地动力学演化有关的各种作用(机制上)进入了沉积盆地这个共同的活动空间(空间上)。而且一旦进入沉积盆地,它们自身的活动和演化就成了盆地动力学演化的重要内容。因此,有必要将它们放进沉积盆地演化这个统一的背景中来考察研究。尤其要探讨盆地内不同类型的金属矿床间的关系和规律时更是如此。

盆地流体中成矿组分的来源也可分为“流体自身带入”和“从盆地获得”两方面,前者指流体(主要指外来流体)自身带来的,后者则是指流体在沉积体系内活动过程中通过流/岩反应从固体沉积物颗粒获得的。由于金属成矿主要与以水为主的流体相有关,因此后文中的“盆地流体”一词,除非特别指明,一般不包括以碳氢化合物为主的石油天然气。

2 盆地流体的运移

盆地中可能出现以烃类为主和以水溶液为主的两大类流体。烃类以多相分离的独立相态运移(液态烃或气态烃)。它从生烃源岩析出的初次运移机制乃是从干酪根转变成油气过程中的体积增加,并在毛细管吸力的作用下进入高孔渗率的储运层,然后在浮力驱动下沿局部汇聚路径向上运移(二次运移),并可能进入油气圈闭构造而与水相分离。盆地沉积体系中流动的油气相总是局部的,主要受浮力的驱动;而水溶液相则是相对连续的,最有可能受区域压力梯度的驱动^[1-2]。水溶液相流体的运移机制主要有重力驱动流和压实驱动流。

重力驱动流:在重力势头(海平面与地下水之间的高差)驱动下大气降水沿盆地边缘出露的透水层向下渗入盆地,主要取决于沉积体系内砂岩和灰

岩等透水层的连续性和空间分布^[1-3]。因此,在滨岸地带或被沉积物埋藏的海底孤岛地段,常有下渗的淡水浮在盐度较高的孔隙水之上。在重力驱动下盆地流体呈连续流动并向较低部位排出。若排出受阻,则含水层的压力上升,可能形成超压,结果既阻碍了天水的下渗,又迫使盆地流体穿过低透水层向上运移。流体流动的总方向是从盆地边缘指向中心,因此又被称作“向心流”。压实驱动流:上覆沉积层的加厚而引起的压实作用驱动的流体运移,是促使沉积物中孔隙水排出的主要因素。其速度很低,常低于上述渗入大气降水流动速度一个数量级以上。压实流动遵从 Darcy 定律,但压力、渗透率及与压实作用之间的相互作用使其大大复杂化^[1,2]。压实作用下排出的水将向压力较小(即覆盖较薄)的部位流动,即主要向上、向盆地边缘、向盆地内部的水下高地部位流动,而且往往具有脉动式(阵发式)流动的特征。总体上是从盆地中心流向盆地边缘、从凹陷中心指向相对突起的正地形,因此又被称为“离心流”。

由于相对透水层和隔水层的存在(尤其是相间互层),流体密度差驱动下的对流在盆地内较局限,尤其是大规模的垂向对流很难实现^[1,4]。含油气盆地储集层的渗透率一般为 1~1 000 毫达西,而作为封闭盖层的粘土和粘土页岩的渗透率仅为 10^{-4} ~ 10^{-6} 毫达西,相差达数百万倍至数十亿倍(帕夫洛夫等,1988)。显然,盆地流体的运移在很大程度上受控于沉积体系的空间分布特征,而且沉积柱内平行层理的侧向渗透率总是大于垂直层理的垂向渗透率^[3]。因此经常出现顺层的层间流动。当然,在稳定盆地厚度很大的高渗透率砂岩层系内也可能出现一定规模的对流体系^[5]。在盆地边缘的造山带或逆冲带一侧,尚可能有构造力驱动的流体运移进入盆地系统,并与中立驱动机制联合作用,可能会造成流体大规模长距离迁移,如某些前陆盆地就是如此^[5]。因此,在盆地周缘的盆山转换地段,由于强烈的构造变形产生良好的流体运移通道和矿石沉淀就位空间,更重要的是以离心流为特征的盆地自生流体和受侧向压力驱动的造山带流体可能在此相遇,从而成为矿床富集地段。

总之,控制盆地流体运移的主要因素有:控制盆

地发生和演化的盆地构造(尤其是同生断裂体系)、盆地充填特征(主要是透水层和隔水层的空间配置)、盆地及其周缘的古地形以及盆地热结构。4个因素在盆地动力学框架下是相互密切关联的。一方面,盆地构造类型在宏观上决定了盆地内流体运移的基本特征。如在快速沉降的被动大陆边缘压实流和超压囊广泛发育;在前陆盆地中以长距离的重力驱动流为特征;在聚敛型构造条件下,沉积物加积楔受到巨大的变形作用,流体流动主要通过滑脱带和冲断层进行,构造力的驱动十分重要;岩石圈的挠张弛可能造成区域广泛的重力驱动流动体系^[4,5]。另一方面,盆地构造制约了盆地沉积充填体系和盆地内部流体输导体系的空间构架,进而制约着盆地流体的具体运移路径和聚集场所。因为盆地流体的输导系统实际上就是盆地流体运移的主要通道(路径),包括高渗透率的地层、界面(如不整合面)和断裂(同生断裂)。

沉积盆地演化过程中发育的同沉积断裂(同生断裂)体系在很大程度上控制着盆地中流体的运移及有关的金属成矿和油气聚集。1980年Large制定的Sedex型矿床的成矿参数,半数以上与同沉积断裂作用有关。翟裕生等^[6]也撰文讨论过同生断层对超大型矿床的控制作用。而油气地质学界关于盆地中同沉积断裂体系控制油气生成、运移、聚集、保存的论述更是比比皆是(如文献[7])。笔者等^[8,9]也曾强调同沉积断裂体系对盆地流体运移和成矿的特殊重要意义。认为同沉积断层与其所控制的盆内高地一道,不仅可能构成盆地流体运移的良好通道,而且是盆地深凹处排出的流体运移聚集的目的地,同时发生强烈的差异性压实。因此,这种部位乃是盆地流体同生-准同生成矿最有利的地段,很多矿床都显示了与同沉积断裂体系及其所控制的水下高地的密切空间关系;众所周知,同沉积断裂体系及其所控制的水下高地经常也构成良好的油气圈闭(如古潜山油气藏)。

同沉积断裂究竟对流体起通道作用还是遮挡作用,这取决于它的开启程度。力学研究显示,断层带内的空隙渗透性比围岩低得多。尤其是当周围介质是尚未固结的沉积物时,同沉积断裂具有与一般断裂不同的特征。众所周知,静岩压力在断裂面上的

垂直分量总是力图使断裂愈合。已固结的岩石由于抗剪强度高,能抵抗这一作用力;软沉积物则不能,此时同沉积断裂很易闭合。因此在通常情形下,只有在活动时同沉积断裂才是开启的,断层活动停止后将在多种因素的联合作用下很快闭合。换言之,同沉积断裂在活动时是流体运移的通道,而在静止时则主要起遮挡作用而使流体在其下盘或一侧发生聚集。流体聚集到一定程度往往由于水力压裂而引发断裂活动,使流体阵发性集中排泄。

泥质隔水屏蔽层的存在使流体排出受阻,使孔隙水具有高于静水压力的异常高流体压力,出现欠压实异常高压(或称超压)现象,使相邻岩层间存在一个压力差,这是促使盆地流体、尤其是石油天然气运移的主要动力之一。欠压实异常高压带的高孔隙率使盆地流体相对聚集,甚至经常会有流体聚集的压力封隔体/超压流体囊的出现^[10,11],盆地流体在超压囊中的聚集对于这以后油气和金属的工业聚集具有极为重要的预富集意义。超压流体聚集到一定程度会由于水力压裂而引发断裂活动,与上述同生断裂活动相辅相成,导致流体阵发性集中排泄。

可见,作为一个力学上的不稳定系统,超压流体囊经常成为促使同沉积断裂发生并活动的重要因素。这种低密富水带的可塑性(流动性)极高,是沉积柱内的弱化带,沿此带很容易发生变形、破裂、流体强化排放等灾变性过程,从而引发断裂、平缓逆掩、水力压裂、不协调褶皱、软变形、包卷层理、液化层理、泄水构造、碎屑岩墙、含包体岩层、甚至泥火山等。流体排放过程中若有合适的地球化学障,就可能产生成矿金属元素的沉淀聚集。可见,同沉积断裂及与超压流体囊有关的流体间隙性排放可能是金属矿床就位的有效机制,也可能是油气二次运移甚或导致油气藏破坏的机制。

当异常高压带的孔隙流体压力升高到一定程度时,出现水力微裂缝是必然的。因为作用到岩石骨架三个主应力方向上的有效压应力等于相应方向上的压应力减去孔隙流体压力。因此,如果孔隙流体压力升高至与岩石的最小压应力相等时,在该方向上的有效压应力(即围限压力)就等于零,此时若上覆负荷压力大于岩石的破裂强度,势必产生垂直张开裂隙,这是盆地流体运移的重要机制之一^[12]。解

刁农等^[13]对我国南海莺歌海盆地现代超压流体囊的研究就是一个很好的例证。水力压裂技术已经成为低渗透油气田勘探开发的重要技术^[14]。

由于水的热导率远小于矿物颗粒的,而且此时水体处于封闭不流动状态,因此,无论是热传导还是热对流都比正常地层要差,所以欠压实带也具异常高的温度。温度升高使体积膨胀,加剧了异常高压效应,即所谓的水热增压作用。由此形成的地压型地热资源,可以同时回收流体的热能和机械能。如美国墨西哥湾盆地北部的一些地热系统,热储内的流体温度为 140~170℃,压力为 80~110 MPa^[15]。此外,蒙脱石的脱水作用也将增强异常高压效应,因为蒙脱石层间水的密度比自由水大,泥岩的总体积可能因此增加 2%左右。若此时泥岩含孔隙水 20%,则将使孔隙水的体积增加 10%。生烃源岩中干酪根转变成烃类并析出的过程伴随着体积的急剧增加。若孔隙度为 5%的页岩含 10%的干酪根,当半数干酪根转变为原油且未被及时排出时,孔隙度将至少增大 200%^[1],这也将大大加剧地层超压现象。

3 盆地流体的特征

尽管盆地流体的来源各异,但通常情况下盆地流体显示典型的低温热液地球化学特性:80~150℃为主,可达 200~250℃。流体温度主要受盆地热演化史和盆地热结构控制。在正常地温梯度下,埋深 1 500~2 000 m 时温度可达 60~70℃,沉积物完成第一次脱水。埋深 3 000~4 000 m 时温度可达 100~160℃,粘土矿物完成第二次脱水并进入第三次脱水,沉积有机质的演化则进入主要生烃窗。但超压流体囊内的温度和压力都异常高。而且当有岩浆活动或地幔上隆等造成异常地温梯度时,盆地的热结构将发生变化。

盆地流体的盐度变化很大,矿化度大多为 5 000~35 000 mg/L。盐度随深度的增加而有所增加,但在以页岩和粉砂岩为主且又不含蒸发膏盐时,盐度到一定深度以下常有降低的趋势。通常在作为储水层的砂岩中比相邻泥岩(常作为屏蔽隔水层)要高、在超压流体囊中比在正常压实带中高。盆地流体的 pH 值主要受流体中有机酸阴离子(以醋酸为主)的浓度和 CO₂ 浓度的制约。25℃ 时的中性纯水

(pH=7)在被 CO₂ 饱和后,pH 值降到 5。但在 80~140℃,当有机酸浓度很高时,其作用远大于 HCO₃⁻^[16]。有机酸能在较宽的 pH 值范围内起缓冲作用,而且有机酸热解和菌解均能产生 CO₂。水与油气发生广泛的地球化学作用(如 SO₄²⁻ 还原作用等),使孔隙水中有机酸、CO₂、CH₄、H₂ 及 H₂S、NH₃ 等的浓度增高,SO₄²⁻ 浓度则大大降低,水的还原性增强。

盆地流体与活动于地壳内部的其它流体的最主要区别是含有丰富的有机组分。各种成熟度的沉积有机质广泛参与各种流—岩反应,随时改变盆地流体及其周围环境的物理化学参数,深刻影响着成矿金属组分在盆地流体中的迁移能力、迁移形式及沉淀就位机制,主要表现在:沉积有机质对盆地流体物理化学特征的制约;有机组分对金属成矿元素在盆地流体中的迁移能力、迁移形式及沉淀就位机制的制约;富有机质的地层作为地球化学还原障和 H₂S 障对于流体中金属沉淀就位的制约;沉积有机质的演化对于盆地流体的运移的制约(主要通过油气的阵发性析出和二次孔隙的产生)。关于盆地流体中有机质的成矿效应将另文专述。

盆地流体的流/岩反应与其它流体的流/岩反应有较大的不同:1)新鲜沉积物是高度分散的颗粒体系,从沉积伊始至固结成岩,自始至终都被浸泡在盆地流体之中。由于盆地流体与沉积物颗粒长时间充分接触,成矿组分的萃取率将远远高于循环天水或海水在已固结的岩石中沿裂隙带流动而可能达到的淋滤萃取率。2)成分复杂的各种沉积物颗粒混杂,不同岩性的沉积体系的不均匀分布,都使盆地流体可能与成分和特征迥然不同的围岩反应,从而在同一盆地内出现多种性质不一的盆地流体。正如 Sverjensky^[17] 所论述的,同一来源的盆地流体经与不同的沉积物反应,可能形成不同的矿床。而且,流体之间的相互混合或者某一种流体流经与其特性不相容的岩层(矿捕层)时,都可能发生流体的卸载成矿。3)大量的沉积有机物使沉积柱中发生的化学反应除无机水/岩反应外,还包括沉积有机物自身的有机反应、有机物—水—岩石多相反应及有细菌参与的生物有机化学反应。与盆地流体演化有关的重要有机反应包括热降解、缩聚、氧化还原、加成及腐解

反应(微生物分解)等。

盆地流体具有多来源特征,不同来源的流体经不同程度的流/岩反应同位素交换后又以不同比例相互混合,再加上有机物和粘土矿物的相变水在不同阶段以不同比例加入,使盆地流体的氢氧同位素组成十分复杂。众所周知,水岩反应使大气降水的氢和氧同位素均变重,在 $D-^{18}O$ 图解上勾绘出一条从雨水线出发的上升线;但对海水而言,水岩反应却只使氧同位素变重,而氢同位素可能变轻,在 $D-^{18}O$ 图解上勾绘出一条从海水源区出发的下降线。盆地流体成因的硫化物(包括矿石中硫化物和沉积岩中的成岩硫化物)的硫来源主要有二:具正 ^{34}S 值的海水硫酸根热化学还原硫和具负 ^{34}S 值的生物成因硫。二者不同比例的混合造成一个很宽的数值分布区间。矿石中的硫同位素比值经常与围岩中散布的成岩硫化物相似。盆地流体中的 CO_2 可能主要来自沉积碳酸盐矿物的溶解作用或沉积有机物质的脱羧基作用,正如笔者^[18]在研究我国南方微细浸染型金矿床所得出的结论一样。

4 盆地流体的沉淀卸载成矿方式

(1) 盆地流体上升到达海底,以沉积喷流方式成矿。当流体进入水深较大的海底时由于其低温、高密特性,一般不发生沸腾,而是在局部洼地中汇聚成相对稳定的卤水池。由于与海水之间发生物质和能量交换,卤水的温度降低、 Eh 值和 pH 值升高,于是沿物理化学条件变化方向发生各种热液矿物的沉淀聚集(热水沉积)。结果在喷口附近较还原的条件下以热水沉积方式形成层纹状、条带状热水沉积矿石和热水沉积岩。而在喷口附近和下部的流体通道系统内则往往生成较高温的网脉状矿石,由此形成典型的 Sedex 型矿床^[19]及部分沉积岩容矿的微细浸染型金矿床^[8,20]。Lydon^[21]曾对不断接受碎屑沉积的热卤水池中的主要矿物——黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、重晶石的共同沉淀过程作了理论模拟,结果与实际观察到的矿石特征相当吻合。但当盆地流体上升进入浅水海底时,由于上覆水柱的压力太小,流体可能尚未到达海底就已经沸腾,因此可能主要形成产于流体通道系统内的网脉状矿石,而缺失热水沉积的层纹状矿石。

(2) 盆地流体未到达海底还在海底以下的沉积柱中运移时,遇到合适的地球化学障发生沉淀卸载,包括不同性质的流体相遇发生流/流反应,如一些具卷筒状构造的红层铜矿^[22,23];流体流经富硫岩层发生硫化物固定的流/岩反应,如萨布哈成矿^[24];流体流经碳酸盐岩层与围岩反应引发沉淀卸载可能是部分 MVT 型铅锌矿石的生成机制^[25];温度、压力、 pH 、 Eh 等物理化学条件变化等。由于盆地流体的多来源,这种流/流反应经常发生在不同来源(具有不同特征)的流体相遇处,此时的矿石定位发生在沉积柱的某些边缘地段,如基底流体进入盆地沉积体系的地段,盆地沉降中心的流体向盆地边缘运移途中与下渗的浅部流体相遇等。沉积物的极不均一性经常导致不同演化路径的盆地流体也具有不同的物理化学参数,在相遇处也会发生重要的流/流反应引起成矿组分的沉淀卸载,这种情形经常发生在沉积相变界限附近。如巴黎盆地深部两层盆地流体分别贫醋酸和富醋酸,二者混合时就产生碳酸盐矿物的溶解以及铝硅酸盐矿物和硫化物的过饱和沉淀^[26]。

如果从严格同生/后生成矿的角度看,只有沉积喷流成矿系统中喷口以上的热水沉积矿石是同生矿化,其余均属后生范畴。实际上,简单的同生/后生概念对于讨论盆地流体的成矿作用已不适用,因为沉积喷流成矿系统本身就包括了同生/后生两个部分,即使发生在沉积柱内部的矿石沉淀过程也经常是与沉积物的成岩过程同时进行,应属准同生期范畴。

5 盆地流体成矿的时间演化特征

根据沉积盆地时间演化与流体活动的关系,有人划分盆地演化水文地质旋回:如卡尔采夫^[27]将一个完整的海侵海退过程划为一个水文地质旋回:早期的沉积水文地质阶段和晚期的渗入水文地质阶段,前者以自生流体为主,后者外来流体(尤其使下渗大气降水)的比重越来越大,重力流逐渐占据主导地位。

与强烈的构造变动相联系的盆地沉降初期是盆地与基底沟通的最佳时段,可能有基底流体甚或地幔深部流体较大规模的注入,并在与盆地水体接触的地带发生沉淀卸载,可能形成热水沉积岩和矿石。

这可能是某些出现在盆地沉积柱底部的 sedex 型矿床的成因。

油气钻探获得的大量油田卤水的资料^[28,29],揭示了盆地演化晚期以下渗大气降水为主的流体甚或是古盆地流体的特征。而大洋钻探获得的现代盆地沉积物中孔隙水的资料(参见:“Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project”以及“The Ocean Drilling Program”。如《Presley and Stearns》,1985),则显示沉积水文地质阶段的新鲜沉积物中孔隙水的特征,但所涉及的埋藏深度多小于 1 000 m。总的看来流体特性变化很大,且与沉积物关系十分复杂。从浅到深往往 SO_4 被还原、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 作为碳酸盐矿物沉淀而浓度降低, H_2S 增加, pH 值降低。这一变化在深海发生的埋藏深度大于滨岸地段。

边沉降、边沉积、边成岩、边断裂、边变形是沉积盆地及其次级构造单元演化的普遍形式,从而出现众多同生-准同生构造。尤其是同生断裂体系;如前所述,在很大程度上控制着盆地中流体的运移及有关金属成矿和油气聚集。规模较大的同沉积断裂常控制盆地边界或重要沉积相带的展布(断裂控盆),其形成机制主要是地幔上隆引起地壳的拉张裂隙或区域应力场的作用,且往往是基底断裂的继承。而盆地基底斜坡上的重力滑动作用或差异压实作用则能加剧或引发规模较小的同沉积断裂活动。

盆地流体成矿成藏的滞后性暨成矿时间分析:从盆地动力学演化的角度来看,盆地流体活动跨越时间长,可以从盆地开始直到变质或风化阶段。沉积盆地中的油气藏实际上是封存起来的盆地流体,而且相当一部分属古盆地流体的范畴。在此以一个实例来分析盆地流体成矿的时间特征。原油是一种不易保存的流体,地质历史上生成的很多油气藏常常遭到降解破坏,气态烃和轻质油逃逸流失,随降解程度加剧而剩下重油、超重油直至固体沥青,油田水也会流失。显然,这一过程中由于物理化学条件的变化,原油所含的绝大多数金属元素将会残留富集在原地的固体沥青中,这就是流体卸载成矿富集的过程。塔里木盆地志留系地层中有一层分布极广的沥青砂岩,在北部拗陷的隆起地带均有发现^[30],通常认为这是古油藏破坏的遗迹。这层沥青砂岩尽管尚未达到可采金属矿石的程度,但 V、Ni、Cu 等金属

元素明显富集。据研究,这一古油藏的油源层是寒武系和奥陶系地层,大规模的油气生成-运移-封闭成藏发生在志留纪末期和泥盆纪,而油藏的破坏(即盆地流体沉淀卸载和矿石定位)发生在石炭-二叠纪。可见盆地流体的源区地层时代、流体的释放发生时代以及流体的沉淀卸载时间可以相距很远。这表明古盆地流体的良好封存性和成矿的滞后性,很难用简单的“同生”或“后生”概念来表述。

石油地质中“古潜山油藏”的“新生古储”现象,在盆地流体形成金属矿床时也可能出现。例如,右江盆地内一些晚古生代的碳酸盐孤台(水下高地),当被三叠纪碎屑岩系超覆时,碎屑沉积凹陷的盆地流流向水下高地并与碳酸盐岩发生反应生成与硅化碳酸盐岩有关的金/锑矿化,如桂西北的高龙金矿床。

6 与盆地流体有关的主要矿床类型

(1) 沉积喷流型矿床 (Sedex 型):这类矿床赋存于张性盆地的泥砂质碎屑岩建造及碳酸盐岩建造的正常沉积地层中,是由沉积盆地演化过程中伴生的海底热液喷流成矿作用形成的,乃是“沉积盆地正常演化过程中可能出现的多种产物之一”^[31,32]。成矿盆地流体沿同生断裂进入海水深度较大的海底时一般不发生沸腾。在喷口附近较还原的条件下形成黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物,远离喷口的较氧化环境中则沉淀硫盐矿物和重晶石。成矿过程中,若发生脉动喷流和物理化学条件的波动,可导致硫化物、含铁层和燧石层的交替而构成层纹状、条带状矿石。在流体上升的通道系统中常生成较高温的网脉状矿石,伴随较强的蚀变。这类矿床以块状铅-锌-钡矿床为典型,多产于大陆裂谷盆地中^[31]。此外,沉积喷流成矿作用对许多性质不同的金属元素都具有很强成矿能力,可能出现非常复杂的成矿元素共生组合和矿床特征。我国已相继发现一些与经典类型不同的重要的沉积喷流型矿床类型,如广西大厂锡-锑-铅-锌矿床^[33]、辽宁青城子钴-银矿床、云南蒙自白牛厂超大型银-锡-多金属矿床^[34]、湖南锡矿山巨型锑矿床,以及湘西沃溪钨-锑-金建造矿床^[18,35],涉及到多种罕见的复杂成矿元素建造组合,并显示了极大的经济意义。

(2)密西西比式(MVT)铅-锌(钡-氟)矿床。矿床赋存在被动大陆边缘的台地相碳酸盐地层中,定位空间多为不规则的不整合面或板状角砾岩体。矿体呈后生不整合产状,但具层控性(如文献[36]、[37])。矿床是由热卤水形成的^[38]。热卤水温度为80~150℃,可达200℃^[36,37,39],并通过冷却、沸腾、混合、硫酸盐还原、与围岩反应等多种机制卸载成矿^[25]。主要有两种不同的成矿模式:1)压实作用驱使盆地流体沿透水层向盆地边缘迁移^[37,40,41],主要发生在盆地演化早期的沉积水文地质阶段,并涉及欠压实异常高压地层体系。Fowler^[42]认为,邻近碳酸盐台地的砂页岩层中的高温(地温梯度可达10/100m)超压地层可能是成矿热卤水的源地,高流体压力能产生垂向的水力压裂而促使其中的流体向容矿碳酸盐地层迁移;2)上升的造山带边缘下渗的大气降水,在重力驱动下沿盆地深部流动迁移并获得热能和成矿组分,然后在克拉通一侧的盆地边缘台地相碳酸盐地层中卸载成矿^[43~45]。

(3)大陆砂页岩型铜、铀,以及铅、锌、钼、银、钴等矿床。这是一大类非常复杂的金属矿床,包括:1)黑色页岩型铜矿,如非洲铜带、中欧含铜页岩(Kupferschiefer)、美国密西根的White Pine等著名的巨型矿带;2)红层板状砂岩型铀矿,如美国科罗拉多高原铀矿;3)黑色岩系中V、Co、Ag、Au、Pb、Zn及铂族元素矿床^[22],其成矿元素组合和矿床特征均变化很大。也许把它们放在一起并不完全合适,但它们都显示以下共性:都产在大陆内部或大陆边缘的裂谷型盆地边缘;沉积柱下部都有陆相(河流冲积相、湖相、三角洲相)的红色砂岩层覆盖在基底不整合面之上;产在红层上面的砂页岩层或泥质碳酸盐地层中,为典型的层状或层控矿床;含矿地层常是有效的金属沉淀地球化学障(矿捕层),如富有机质的还原障、富硫化物的硫化障等;含矿沉积岩系中经常(但并非总是)有蒸发岩系或典型的萨布哈岩系产出;金属矿物呈浸染状,矿体常有卷筒状构造^[23,24,46~49]。

这类矿床的成因主要有同沉积、早期成岩、晚期成岩三种观点,其中晚期成岩较具倾向性:成岩过程中的盆地流体主要从下部的红色砂岩层中获取成矿金属组分并向上搬运,然后在上部的矿捕层中定位富集,或由于不同来源流体的相互混合而沉淀卸

载^[17,22~24,50]。拉伸性裂谷盆地发育过程中产生的众多同沉积断裂体系及其所伴随的起伏地形都有利于盆地流体的大规模迁移,而沉积建造中的蒸发层又极大地提高了盆地流体搬运金属组分的能力。沉积在氧化条件下的大陆红层砂岩乃是裂陷盆地第一旋回的不成熟沉积,含较多重矿物,具较大的孔隙率和渗透率。整个含矿沉积岩系在化学上极不均匀,其成岩过程中氧化-还原和pH值变化幅度是所有沉积岩系中最大的($\log f_{O_2} = -0.7 \sim -50$, $E_h = +500 \sim -200$ mV, $pH = 5 \sim 10$),有关的盆地流体的物理化学参数、搬运/沉淀金属能力和类型都有很大变化,因此有利于多种金属的迁移和富集成矿,并形成特有的矿化分带,尤其是铜、铀等在氧化条件下迁移而在还原条件下沉淀的变价金属元素。此时,流体的温度已经不是控制金属迁移和沉淀的主导因素^[22]。

(4)沉积岩容矿的微细浸染型金矿床。笔者通过对我国南方众多微细浸染型金矿床及其赋矿地层开展系统的组构学和地球化学研究后首次提出,这类矿床也是盆地流体的产物^[8,51,52]。赋矿的沉积盆地形成于大陆型地壳基底之上的拉伸背景下,盆地的演化主要受控于众多不同级别的同沉积断裂。矿化与盆地内水下高地的密切联系以及丰富的成岩期软变形组构,表明成矿与控制海底地形地貌的同沉积期断裂活动密切相关。而大量泄水构造和液化层理的出现则表明在沉积物成岩阶段曾有大量流体的活动,且这种流体的活动与成矿有密切关系。矿石及其主岩中丰富的有机成因组构告诉我们,成矿与沉积有机质的演化有着密切的内在联系。金的有机络合物可能是促使金从沉积物质点进入盆地流体并迁移聚集成矿的重要机制,而促使这种有机络合物沉淀的主要机制可能是吸附作用,从而造成金呈不可见微细浸染形式产出。成矿流体既可能沿同沉积断裂上升到海底卸载而出现海底热水沉积,也可能直接在断裂系统(热水通道系统)内发生矿质卸载。

7 结 语

盆地流体广泛参与了沉积盆地演化的全过程,包括沉积物的各种成岩后生变化、盆地的热结构和热历史及各种矿床和石油天然气的生成;是当今国

际地质学前沿的重要研究对象之一。

盆地流体成矿研究乃是在盆地动力学框架下,综合运用矿床学、矿床地球化学、沉积学、盆地分析、石油地质学、有机地球化学、低温地球化学、水文地质学、层序地层学(地震地层学)等学科的理论和方法开展的一项多学科综合研究。其研究内容部分覆盖了层控矿床、沉积-改造矿床、沉积喷流/热水沉积矿床、盆地热卤水/渗滤卤水矿床、沉积成岩矿床等。

我国发现了一些与经典类型不同的、与盆地流体有关的重要矿床类型,如华南微细浸染型金矿床、湘中锡矿山锑矿床、湘西沃溪钨-锑-金建造矿床、云南蒙自白牛厂超大型银-锡-多金属矿床、内蒙古大井铜-锡-铅-锌-银矿床、辽宁青城子钴-银矿田、广西大厂锡-锑-铅-锌矿床等,表明盆地流体对许多性质不同的金属都具有很强的成矿能力。它们从不同侧面揭示了盆地流体活动的某些鲜为人知的重要特征,为全面认识盆地流体提供了难得的自然实验室。但是,这些矿床与盆地流体的成因关系大多尚未为人们所认识,而是普遍被看成盆地封闭后某次地质-热事件的产物,或者仅是针对单个矿床和油气田开展了一些相互分离的单项研究。因此有必要从盆地整体演化的盆地动力学角度,开展全方位多学科的系统研究。

值得指出的是,本文仅仅论述了单纯的正常沉积盆地内盆地流体的行为,而未涉及岩浆活动等其它过程的加入。实际上,侵入或火山岩浆活动的叠加,不仅会深刻地影响沉积物和盆地流体的物质组分特征,更重要的可能是改变盆地的热结构和热演化史,从而大大改变盆地流体的流动特征并增进盆地流体的活动性。此外,来自盆地基底或中下地壳甚或来自下地幔的深源流体沿控制盆地发育的深断裂上侵,也将改变盆地流体的特性,并增强其成矿能力。

值得注意的是,盆地流体形成的矿化地质体经常与盆地沉积岩系一道遭受多种后期地质作用的叠加改造,如褶皱变形、断裂剪切、区域变质、岩浆侵入、风化侵蚀及后期热液矿化蚀变等。拉张型盆地后期发生的盆地反转、盆山转换、上叠盆地的发育等经常发生的地球动力学过程,都是很好的实例。结果使其原有特征面目全非而难以辨认,这一直是困扰矿床研究者的一大难题。鉴于地球化学数据经常具有多解性和不确定性,因此地质-组构研究(从野

外到室内、宏观到微观)是鉴别这些早期成矿特征最重要的手段。

参考文献:

- [1] Bjorlukke K. Fluid flow in sedimentary basins[J]. *Sediment. Geol.*, 1993, 86: 137 - 158.
- [2] Bjorlukke K. Fluid - flow processes and diagenesis in sedimentary basins[A]. Parnell J ed. *Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins*[M]. *Geol. Socie. Spec. Publ.* 78, 1994. 127 - 140.
- [3] Klein G V. Diagenesis and fluid movement-basin maturation[J]. Robertson M ed. *Sedimentary and diagenetic mineral deposits: A basin analysis approach to exploration. Rev. Econ. Geol.* 1991. , 5: 91 - 130.
- [4] Dickinson W R, *et al.* The dynamics of sedimentary basins[M]. Washington DC: National Academy Press, 1997. 1 - 43.
- [5] Garven G. Continental-scale groundwater flow and geological processes [J]. *Rev. Earth Planet. Sci.*, 1995, 23: 89 - 117.
- [6] 翟裕生, 张湖, 宋鸿林, 等. 大型构造与超大型矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 8 - 96.
- [7] 王尚文, 张万选, 张厚福, 等. 中国石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1983. 212 - 276.
- [8] 刘建明, 刘家军, 顾雪祥. 沉积盆地中的流体活动及其成矿作用[J]. *岩石矿物学杂志*, 1997, 16(4): 341 - 352.
- [9] 刘建明, 等. 同沉积断裂活动与金属成矿的关系[A]. *流体地球科学论文集*[C]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [10] Ortoleva P J. Basin compartments and seals [J]. *American Association for Petroleum Geology Memir.*, 1994, 61: 1 - 477.
- [11] Law B E, Ulmishek G F, Slavin G F. Abnormal pressures in hydrocarbon environments[J]. *American Association for Petroleum Geology Memir*, 1998, 70: 1 - 456.
- [12] Mandle G, Harkness R M. Hydrocarbon migration by hydraulic fracturing[A]. Johnes M E, Preston M F eds. *Deformation of sediments and sedimentary rocks*[M]. Oxford: *Geol. Soci. Spec. Publ.*, 29, 1987. 39 - 53.
- [13] 解习农, 刘晓峰. 超压盆地流体动力学系统与油气运聚关系[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, (2):
- [14] Gidley J L, Halditch S A, Nierode D E, Veatch Jr R W. Recent advances in hydraulic fracturing[A]. *Monograph Vol. 12, Society of Petroleum Engineers*[R]. Richardson, TXC(1989)12, 1989.
- [15] Dofman M H, Morton R A. Geopressured-geothermal energy[M]. New York: Pergamon, 1985. 1 - 334.
- [16] Lundegard P D, Kharaka Y K. Distribution and occurrence of organic acids in subsurface waters[A]. Pittman E D, Lewan M D eds. *Organic acids in geological processes*[M]. Berlin: Springer Verlag, 1994. 40 - 69.
- [17] Sverjensky D A. Chemical evolution of basinal brines that formed sediment - hosted Cu-Pb-Zn deposits[A]. Boyle R W, *et al* eds. *Sediment-hosted stratiform copper deposits*[R]. *Geol. Ass. Canada Spec. Paper* 36, 1989. 127 - 134.

- [18] 刘建明, 顾雪祥, 刘家军, 郑明华. 华南巨型锑矿带的特征及其制约因素[J]. 地球物理学报, 1998, 41(增刊): 206 - 215.
- [19] 刘建明. 海底喷流型层控矿床[A]. 朱上庆, 郑明华主编. 层控矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 1991. 101 - 120.
- [20] Emsbo P, Hutchison R W, Hofstra A H, *et al.* Syngenetic Au on the Carlin trend: Implications for Carlin-type deposits[J]. *Geology*, 1999, 27: 59 - 62.
- [21] Lydon J W. Chemical parameters controlling the origin and deposition of sediment-hosted stratiform lead-zinc deposits[A]. Sangster D F ed. *Sediment-hosted stratiform lead-zinc deposits*[R]. Min. Assoc. Can. Short Course Handb. 8, 1983. 175 - 250.
- [22] Metcalfe R, Rochelle C A, Savage D, Higgs J W. Fluid-rock interactions during continental red-bed diagenesis: Implications for theoretical models of mineralization in sedimentary basins[A]. Parnell J ed. *Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins*[M]. *Geol. Socie. Spec. Publ.* 78, 1994. 301 - 324.
- [23] Sanford R F. A quantitative model of ground-water flow during formation of tabular sandstone Uranium deposits[J]. *Econ. Geol.*, 1994, 89: 341 - 360.
- [24] Unrug R. Mineralization controls and source of metals in the Lufilian fold belt, Shaba (Zaire), Zambia, and Angola[J]. *Econ. Geol.*, 1988, 83: 1247 - 1258.
- [25] Plumlee GS, *et al.* Chemical reaction path modeling of ore deposition in Mississippi Valley-type Pb-Zn deposits of the Ozark region, U. S. Midcontinent[J]. *Econ. Geol.*, 1994, 89: 1361 - 1383.
- [26] Fouillac C, Azaroual M, Matray J M. Evolution of pH as a result of mixing of two deep water types from the Paris Basin[A]. Kharaka, Chudaev eds. *Water-rock interaction*. Balkema [M]. Rotterdam, 1995. 441 - 444.
- [27] 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991. 1 - 271.
- [28] North F K. *Petroleum geology* [M]. Winchester: Allen Unwin, 1985. 75 - 82.
- [29] Kharaka Y K, Carothers W M. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of deep basin brines[A]. Fritz P, Fontes J C eds. *Handbook of environmental isotope geochemistry*, Vol. 2 [M]. Amsterdam: Elsevier, 1986. 305 - 360.
- [30] 吕修祥, 胡素云. 塔里木盆地油气藏形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. 48 - 58.
- [31] Large D E. Geological parameters associated with sediment-hosted submarine, exhalative Pb-Zn deposits: An empirical model for mineral exploration[J]. *Geol. Jahrb. (Hannover)* 1980, D 40: 59 - 129.
- [32] Large D E. The evolution of sedimentary basins for massive sulfide mineralization[A]. Friedrich G H, Herzig P M eds. *Base metal sulfides deposits*[M]. Berlin: Springer Verlag, 1988. 3 - 12.
- [33] 韩发, 赵汝松, 沈建忠, 等. 大厂锡-多金属矿床地质及成因[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 1 - 213.
- [34] 陈学明, 林棕, 谢富昌. 云南白牛厂超大型银多金属矿床叠加成矿的地质地球化学特征[J]. *地质科学*, 1998, 33(1): 115 - 124.
- [35] 刘建明, 王京彬, 刘伟, 储雪蕾. 我国与盆地流体有关的若干特殊矿床类型[J]. *矿床地质*, 1998, 17(增刊): 47 - 50.
- [36] Anderson G M, Macqueen R W. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits[A]. Roberts R. G, Sheahan P A eds. *Ore deposits models* [M]. *Geosci. Canada, Reprint Series* 3, 1988. 79 - 90.
- [37] Sangster D E, Nowlan G S, McCracken A D. Thermal comparison of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits and their host rocks using fluid inclusion and conodont color alteration index data[J]. *Econ. Geol.*, 1994, 89: 493 - 514.
- [38] Sverjensky D A. Oil field brines as ore-forming solutions[J]. *Econ. Geol.*, 1984, 79: 23 - 37.
- [39] Roedder E. Fluid inclusions[J]. *Rev. Mineralogy* 1984, 12: 1 - 644.
- [40] Dozy J J. A geological model for the lead-zinc ores of the Mississippi Valley, USA[A]. *Institution of Mining and Metallurgy* 79[R], sec. B, 1970. 163 - 170.
- [41] Cachles L M, Smith A T. Thermal constraints on the formation of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits and their implication for episodic basin dewatering and deposit genesis[J]. *Econ. Geol.*, 1983, 78: 983 - 1002.
- [42] Fowler A D. The role of geopressure zones in the formation of hydrothermal Pb-Zn Mississippi Valley type mineralization in sedimentary basins[A]. Parnell J ed. *Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins* [M]. *Geol. Socie. Spec. Publ.* 78, 1994. 293 - 300.
- [43] Bethke C M. Hydrologic constraints on the genesis of Upper Mississippi Valley mineral district from Illinois basin brines[J]. *Econ. Geol.*, 1986, 81: 233 - 249.
- [44] Bethke C M, Marshak S. Brine migration across North America—the plate tectonics of groundwater[J]. *Annual Rev. Earth Plane. Sci.*, 1990, 18: 228 - 315.
- [45] Leach D L. Genesis of the Ozark Mississippi Valley-Type metallogenic province, Missouri, Arkansas, Kansas and Oklahoma, USA[A]. Fontbote L, Boni M eds. *Sediment-hosted Pb-Zn ores*[M]. Berlin: Springer Verlag, 1994. 104 - 138.
- [46] Mendelsohn F. Central/southern African ore shale deposits[A]. Boyle R W, *et al.* eds. *Sediment-hosted stratiform copper deposits* [R]. *Geol. Ass. Canada Spec. Paper* 36, 1989. 453 - 469.
- [47] Vaughan D J, Sweeney M, Friedrich G, *et al.* The Kupferschiefer: An overview with and appraisal of the different type of mineralization [J]. *Econ. Geol.*, 1989, 84: 1003 - 1027.
- [48] Maynard J B. Uranium: Syngenetic to diagenetic deposits in foreland basins[J]. Robertson J M ed. *Sedimentary and diagenetic mineral deposits: A basin analysis approach to exploration*. *Rev. Econ. Geol.*, 1991, 5: 187 - 197.
- [49] Sanford R F. A new model for tabular-type Uranium deposits[J]. *Econ. Geol.*, 1992, 87: 2041 - 2055.
- [50] Maynard J B. Copper: Product of diagenesis in rifted basins[J]. Robertson J M ed. *Sedimentary and diagenetic mineral deposits: A basin analysis approach to exploration*. *Rev. Econ. Geol.*, 1991, 5: 199 - 207.
- [51] 刘建明, 刘家军, 郑明华, 顾雪祥. 微细浸染型金矿床的稳定同位素特征与成因探讨[J]. *地球化学*, 1998, 27(6): 585 - 591.
- [52] Liu Jianming, Liu Jiayun. Basin fluids connected to sediment-hosted micro-disseminated gold[A]. Tucson: Abstracts of 7th Goldschmidt Conference[C], 1997. 126 - 127.

On Ore-Forming Processes of Basin Fluids

LIU Jian-ming¹, YE Jie¹, LIU Jia-jun², TAN Jun¹, YING Han-long¹

(1. *Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100101, China*; 2. *Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China*)

Abstract: In the present paper, basin fluids are referred to extremely complex aqueous/organic solutions that have been very active in all the diagenetic-epigenetic processes of sediments during evolution of sedimentary basins superimposed upon continental basements. Sources of basin fluids mainly include fluids produced by compaction and phase-change of sediments inside the basin as well as meteoric water driven downwards into sedimentary basin by the gravitational potential along uplifting continental margins adjoining the basin and basement fluids ascending along growth faults from the basin basement. The compaction-driven pore water flow and the gravity-driven meteoric water flow approximately correspond to an earlier basin-evolution stage of sediment burial and a later stage of meteoric water permeating in sedimentary basins, respectively.

Basin fluids show typical features of low-temperature hydrothermal geochemistry (80 - 150 °C, may upto 200 - 250 °C), and distinguish themselves from other geofluids by high concentration of organic matters. Basin fluids make very important contributions to diagenetic-epigenetic processes of sediments, as well as to oil-gas production and ore-formation in sedimentary basins. They may reach sea bottom and form sedex-type ores (including hydrothermal sediments), or they just unload their metals in sediment column under the water/sediment interface by fluid/rock and fluid/fluid interaction. Typical reported deposits in genetic relation with basin fluids include sedex-type, MVT, and continental sandstone-shale type. But in China occur some characteristic deposit types with complex and different features, including sediment-hosted micro-disseminated gold deposits.

Key words: basin fluid; fluid migration; ore-formation of basin