

文章编号: 1001-6112(2000)01-0003-06

试论成烃的地球化学场

刘文汇

(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室, 甘肃兰州 730000)

摘要: 本文从场的基本概念出发, 简述了地球化学场的特征, 着重论述了成烃过程中地球化学场的演化及其特征, 并探讨了其他地质场(地热场和应力场等)与有机地球化学场在成烃过程中的耦合作用。认为各种场的相互匹配是形成油气藏的关键因素。

关键词: 沉积成岩演化; 成烃演化; 地球化学场

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

场是物质存在的一种形态, 是由场源物质引起的物质的时空分布^[1]。大量的理论和实践都证明了场的物质性, 从而人们终于认识到了自然界的两种客观存在: 实物和场。场的分布变化规律是与称作场源的实物(如引力场的引力体、电场的带电体和磁场的磁性体)的物理、几何特征密切联系着的。

1 场及地球化学场的基本概念

1.1 场的类型

撇开各种物理场的具体内容, 从数学角度看, 所谓场就是一个时空函数, 即以位置 (x, y, z) 及时间 t 为自变量的四元函数。自然界有两种场, 标准量函数:

$$\Phi = \Phi(x, y, z, t)$$

为标量场, 如温度场 $T(x, y, z, t)$ 、密度场 $\sigma(x, y, z, t)$ 都是标量场, 而称向量函数:

$$\vec{a} = \vec{a}(x, y, z, t)$$

为向量场或矢量场, 引力场强度 $\vec{G}(x, y, z, t)$ 、电场强度 $\vec{E}(x, y, z, t)$ 、磁场强度 $\vec{H}(x, y, z, t)$ 都是矢量场, 构造应力场应属矢量场范围。不随时间变化的场称稳定

场, 而不随时间变化的场叫均匀场。

1.2 标量场的等值面和梯度

研究稳定标量场 $\Phi = \Phi(x, y, z)$ 时, 为了形象地表示其空间变化特征, 可划出一系列由场值相同的点所构成的曲面, 称为等值面, 其方程是:

$$\Phi(x, y, z) = C$$

当常数 C 取不同值时, 便得到不同等值面, 构成等值面族。如温度相等的面 $T(x, y, z) = C$ 构成的等值面族。给出等值面族, 便可得到空间各点的场值。如果按照固定的场值差绘制等值面族, 即取 $\Phi(x, y, z) = \Phi_0 + n\Delta$, 其中 Φ_0, Δ 为常数, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 这样就能直观地反映出场值的变化强弱。而标量场场值变化最快的方向就是梯度方向。标量场中每一点都有一个梯度矢量, 它的方向是该点场值变化最快的方向。知道了梯度矢量就可以计算出在该点沿任意方向的场值变化率。梯度矢量与等值面垂直, 并指向场值增加的方向。掌握了标量场中的梯度场, 则该标量场的空间变化率就很清楚了。因此, 梯度场是讨论标量场中最为重要的内容。

1.3 地球化学场

按场的特征, 地球化学场应属于标量场。目前为止, 还未见到对地球化学场的确切定义。我们认为, 由不同相态的化学元素及其化合物构成的地球, 在

收稿日期: 1999-05-04; 修订日期: 1999-11-09.

基金项目: “九五”国家重点科技攻关项目(96-101-01-06-02)研究成果.

作者简介: 刘文汇(1957-), 男, 甘肃靖远人, 研究员, 主要从事天然气地质学、地球化学的研究工作.

其各个圈层的分异形成以及各种岩石、矿物、土壤、生物等的形成、发展和破坏转变过程中,始终贯穿着化学元素的迁移运动。元素不断地进行组合(结合)、分解和再组合、分配和再分配、集中和分散,这些过程改变着地球各圈层和地壳不同区域的化学成分及物质形式,这种彼此有关联的化学成分分布的一定空间就称为地球化学场。地球化学场中元素及其化合物的分布和变化是连续而有规律的。研究地球化学场的目的就在于揭示一定范围内元素及其化合物分布的规律及引起这种分布变化的制约关系,进而阐明元素及其化合物的演变特征。

地球化学场可按其研究对象的规模划分为局部地球化学场和区域地球化学场,也可以按时间划分为古地球化学场和今地球化学场。应该说,区域地球化学场是局部地球化学场的叠加,也是全球地球化学场的基本构成单元;而今地球化学场是古地球化学场演化的结果,也是地球化学场进一步演化的基础。

地球化学场元素及其化合物的分布可以用元素及其化合物的等丰度线表现,元素等丰度线的具体形式反映了一定地球化学场中元素的分布规律。而元素及其化合物的分布规律受元素的原子结构、物理、化学、晶体化学等基本特征的影响,也受元素作用过程的物理化学条件的控制。因此,元素及其化合物在各种地质体中的分布、元素及矿物的共生组合以及元素的赋存状态是保留下来的元素活动的遗迹,是恢复元素活动历史的地球化学标志。

在地球的形成演化过程中,受地质作用的影响,地球化学场在时间和空间上不断地发生转化,从而引起地球化学特征发生变化,而正是这些变化,控制着成矿物质的分散、聚集、再分配等。在漫长的地质发展历程中,一个局部的或区域的地球化学场受多种地质作用的影响,造成不同时期地球化学场的时空变化,而正是地球化学场的这种连续的规律性的变化,造成了元素的富集成矿,成为我们研究和勘探的主要目标。烃类的形成演化、运移聚集,正是这种沉积盆地中地球化学场在其它地质作用场(应力场、温度场等)的复合作用下的产物。因此,油气的形成、运移、聚集,始终处于一个综合的变化的地球化学场中。

2 沉积成岩及成烃的地球化学场演化

没有盆地,就没有石油。因此,在讨论成烃地球

化学场时,必须先全面地认识沉积盆地的形成演化及其对成烃地球化学场的控制。控制烃类形成聚集的地质参数有:构造特征、沉积条件、有机质数量和类型、有机质转化条件和烃类运移聚集场所。这些参数无疑均受不同的地质场所控制,其中,沉积盆地的物源、沉积环境、成岩演化、有机质丰度类型、有机质与无机矿物之间以及液态-固态-气态之间的化学反应和在演化过程中的化学变化受地球化学场的控制;沉积盆地的类型、油气运移等受构造应力场的控制,而有机质成烃转化的条件则包括温度场、应力场等能量场。事实上,烃类的成藏是不同物理场和化学场相互作用、相互促进,最终使烃类化合物富集的复合作用,而这种复合作用在成烃演化和成藏过程的不同阶段所表现出的作用主次有差别。

沉积岩形成演化的整个过程大概可分为母岩的风化、沉积物质的搬运和沉积、沉积物埋藏后的成岩及后生变化几个阶段^[2],狭义的沉积作用系指沉积物被埋藏以前所发生的作用,而成岩作用系继沉积作用后在被埋藏沉积物中所发生的作用。对成烃的沉积盆地而言,有机质的沉积、演化过程是其地球化学场演化的主要研究内容。

2.1 沉积期的地球化学场

对成烃而言,由于有机母质的丰富程度和数量是成烃的先决条件,因此,作为含油气盆地,必须有足够的有机母质的堆积。在该阶段,大地构造背景、盆地所处的气候环境、自然界含碳化合物的循环以及盆地所处的地质时代均成为沉积盆地有机质沉积的控制因素。这一类的研究成果已积累了很多,总体上,这一阶段沉积有机质先质——各种有机生命结构物质决定着有机地球化学场的分布。例如在不同沉积相中有机质的数量和类型有所变化,深水环境以菌藻类为主,而滨湖相和湖沼相以高等植物为主。

在沉积深水区中,水体的化学组成和无机矿物等构成了无机地球化学场,特别是水体的氧化还原性控制着有机质的保存和消耗。在正常的沉积盆地中,底层水一般为氧化条件,在水循环很差的盆地中,水处于停止状态而导致底层水缺氧而缺乏底栖生物。在水循环良好的盆地中,可发育喜氧性细菌,这些细菌对腐殖型母质的氧化改造使其成为后期成烃演化的良好母质。在喜氧细菌活动阶段中,有机质破坏的反应非常快,通过这一过程而残留下来的物质进入了早期埋藏阶段。在富含细菌的还原条件下,许多较大的有机分子和无机分子都要破坏,有机物质要分解并只保存最稳定部分,这些部分成为以后

演化成烃类的物质基础。而这些有机质一般保存在粘土级泥质岩或碳酸盐岩中。同期沉积的粘土矿物等, 成为后期成烃演化的主要催化剂。如果沉积物是粗粒的, 则比粘土更容易受氧化, 其中有机质可能会完全分解, 残留下有机质非常有限, 所以, 作为烃源岩受到限制。总体上, 沉积期有机地球化学场的分布受有机先体特征、沉积水体化学性质和沉积相多方面的控制。沉积期的时间和在沉积柱中分布的深度取决于物质成分、结构、构造、有机组分、沉积速率以及水深等因素。

2.2 成岩作用过程成烃地球化学场的演化

成岩作用是指沉积物堆积之后至变质作用之前这一过程中沉积物经历的变化, 包括狭义的成岩作用和后成作用阶段。有机质的成烃演化主要发生在成岩作用阶段。另外, 固体的矿物颗粒、自生矿物以及充填在孔隙中的流体是成岩作用的重要研究对象。因此, 成岩作用的地球化学场包括有机地球化学场演化、无机地球化学场演化和水的地球化学场演化。

2.2.1 有机质的演化

成岩作用是有机质地球化学转变最剧烈活跃的阶段, 也是烃类形成和聚集的关键时期。有关该阶段有机质的演化论述甚多^{[3]、[4]}。总体上, 进入沉积物

的有机混合物包括生物上的不稳定有机微粒和惰性的有机微粒, 它们均由生命物质的生物聚合物组成, 包括烃类、蛋白质、木质素和其它亚族如壳质、蜡质、树脂、甙、色素、脂肪和香油精等。有机质在各个成岩作用阶段所经历的主要变化为: 在成岩作用早期, 主要转变作用之一是微生物的活动, 需氧微生物消耗了游离氧, 厌氧细菌还原碳酸盐以得到所需氧, 有机质的分解提供能量。在沉积物中有机质的继续演化也趋向于平衡, 生物聚合物被降解为分子量较低的脂肪酸、氨基酸、醌酚等生物化学单体, 其中有些不再变化, 大部分重新聚合形成腐殖酸、富非酸和腐殖质等复杂的高分子地质聚合体。

随着演化程度的进一步增加及高能量场(温度场或应力场)的参与, 有机质逐步在高能量作用下而发生分解, 包括裂解、聚合、异构、芳构、分子重排等多种化学-物理反应过程。有机质向两个方向变化, 一方面聚合成更大的高芳构化的不溶有机质, 另一方面形成分子量小的可溶的气态和液态烃, 在演化的最后阶段, 不溶有机质石墨化, 小分子形成仅以甲烷为主的稳定气体。有机质中元素的演化是从富含杂原子 H/C 原子比和 H/C 原子比相对较高的有机质变为杂原子趋于耗尽、高度富集碳原子的石墨, 有机地球化学场的演化可用下框图(图 1)示之:

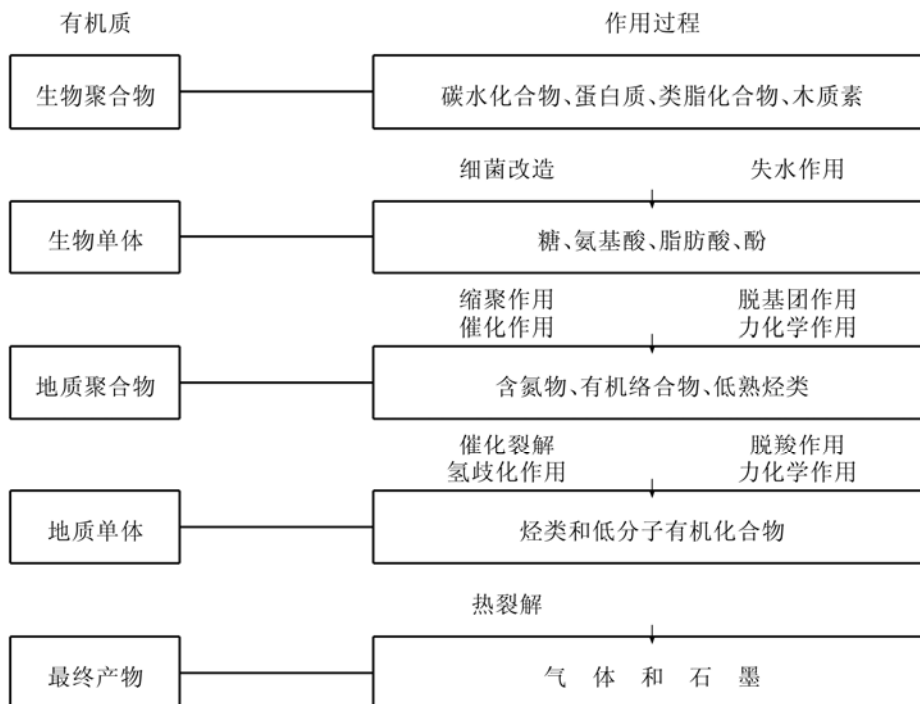


图 1 有机地球化学场演化示意图

Fig. 1 Evolutionary sketch map of the organic geochemical field

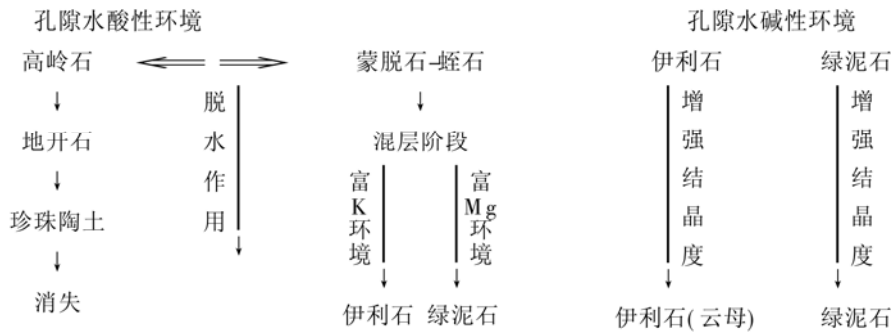


图 2 成岩作用粘土矿物转变示意图

Fig. 2 Change of clay minerals during diagenesis

2. 2. 2 无机物质的演化:

在无机物质的演化中,赋存在泥质岩中的烃源岩对成烃地球化学场的变化影响最为明显。因此,泥质岩,特别是粘土矿物的成岩演化是最有意义的。泥质沉积物一旦被后来的沉积物覆盖埋藏后,就开始逐渐转变,随物理化学环境的变化、层间水的释放及层间阳离子的移出,都会使矿物晶体结构与成分产生变化,这种变化影响着有机地球化学场的变化。在成岩作用过程中,泥质沉积物的粘土矿物的组合及转变主要取决于温度及孔隙水的性质,刘宝珺等^[2]将它们的变化概括如图 2。

从图中粘土矿物的转变规律中可以看出,随深度增加,压力加大,粘土矿物发生转化。如果地球化学条件是连续递变的,则粘土矿物的转化发生着量的递变,当到达一定阶段则发生质的转变。量的递变主要表现为混层比和无序度的递变,质变主要表现为由一种矿物转变为另一种矿物,从一种多型转变为另一种多型。正是无机粘土矿物的这种转变,为有机质的成烃转化提供了催化作用,加速了有机质的分解,从而改变了有机地球化学场。

2. 2. 3 水的演化

沉积演化各阶段的变化几乎都是在水的参与下发生的。纯粹的固相对固相的反应是可以忽略的^[2]。水是地壳中分布最广泛的物质之一,也是地壳中各种元素进行运移和富集的强大动力。水化学场不仅有自身的特点,也是控制其它化学场变化的重要因素。沉积源岩中的水不仅是成岩过程中排出、作为油气运移成藏的重要介质,现代研究认为,其离子状态的 H⁺ 也是烃类形成中 H 原子的重要来源。因此,水化学场的演化既作为一个独立的体系,又作为有机地球化学场与无机地球化学场之间的媒介,在烃类形成演化、聚集成藏过程中起着不可低估的作用。水中溶解的物质与有机质和无机物质共同沉积后,成

为活跃的地球化学转化因素。

在淤泥沉积中,水的含量可达 90%,当其压固成岩后,在砂岩中可有 30% 的孔隙赋存水,泥岩中也可有 10% 的孔隙水^[2]。泥质沉积物沉积时,水可占体积的 70%~80%,主要为粘土矿物颗粒之间的孔隙水。粘土矿物内的水有三种形式,即吸附水、层间水和结构水。排出吸附水对晶体构造并无影响,但层间水和化合水的排出会使晶体构造发生变化。

在早成岩阶段,泥质沉积物在上覆地层压力下快速脱出大量孔隙水,孔隙度迅速减少到 30% 左右。排出的这一部分水对烃类的形成运移无大的影响。随着泥岩的排水压实,孔隙水排出缓慢,孔隙度则相对稳定。由于大量孔隙水排到层间溶液,伴随的吸附阳离子也可被排出,因此使层间溶液的矿化度增高,含有更多的阳离子。由于层间溶液在泥质沉积物内连续地迁移和循环,会使粘土矿物产生一些变化,引起无机地球化学场的变化。随着泥质岩的进一步演化,孔隙度减少到 10% 左右,不仅排出孔隙水,而且也排出了粘土矿物层内的层间水,粘土矿物体积缩小,发生蒙脱石通过脱水作用及伊利石化形成伊利石。这时脱出的层间水具有高活性,加之蒙/伊混层对有机质的催化作用,从而对有机地球化学场发生改造。

在地下水中,除了溶解有大量的天然气外还有大量的以胶体、离子和分子形式存在的有机组分,它们在地下水的成岩作用过程中、在油气形成和迁移过程中都起着重要作用。在地下水中,水的碱性愈高有机组分浓度也愈大,其组成主要是有机酸的阴离子和有机酸盐等。在地下水中还含有丰富的氨基酸、C₁-C₈ 的脂肪酸以及以游离分子存在于水中的 C₈ 以上的脂肪酸,它们不仅对地下水的酸碱度产生影响,而且在一定条件下可作为早期低演化阶段烃类的直质。

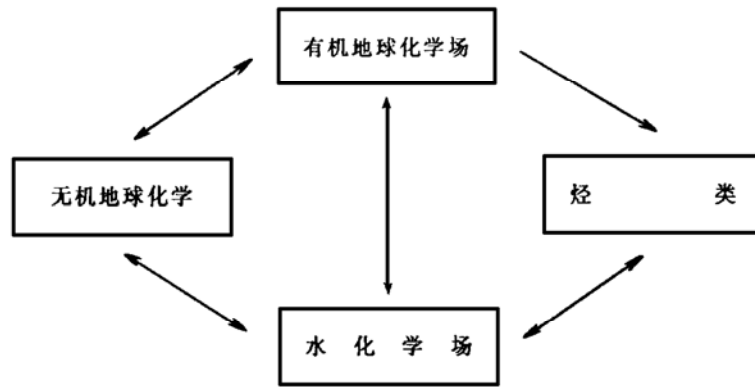


图 3 地球化学场演化成烃示意图

Fig. 3 General sketch of hydrocarbon formation in the evolution of the geochemical field

总之, 沉积盆地中有机地球化学场、无机地球化学场和水化学场的三位一体相互作用、相互促进, 构成了沉积地球化学场的成烃演化。演化结果如图 3 所示, 即, 有机-无机-水相互作用形成烃类, 部分烃类可溶于水中。

3 影响成烃地球化学场变化的主要地质作用场

在沉积盆地的成烃演化过程中, 温度、压力(构造作用导致的应力)、时间和壳幔间的能量和物质交换等因素直接控制着成烃、成藏的地球化学场演化。在这些因素中, 壳-幔间的能量交换控制温度场的变化因素, 而物质交换是区域性地球化学场对局部地球化学场的影响, 我们不作进一步讨论。时间是描述的四元函数中的自变量之一, 就是说时间是场变化的因素之一, 不能作为单独因素考虑。因此, 在影响沉积盆地成烃的地球化学场变化的因素中, 最主要的就是温度场和应力场。温度场主要控制有机质成烃演化的能量来源, 而应力场影响着成烃的全过程, 包括控制沉积盆地的类型、沉积相带分布以及提供有机质成烃演化的能量和烃类运移聚集的动力。

3.1 温度场(亦称地温场)

温度是影响有机质成烃演化最积极和最长期的作用之一。地温条件对烃源物质成烃和初期运移有相当大的影响。温度每增加 10°C , 大部分化学反应速度增加两倍和三倍。生烃量的增加与时间仅为线性关系, 而与温度成指数关系。因此, 传统的干酪根晚期成烃理论认为, 温度是有机质成烃演化的几乎是唯一的能量来源, 从而将成烃作用称为热解作用, 对烃类资源量的计算和成烃机理都以热模拟的方式

加以实现。盆、热、烃观点^[5]的提出, 也证实了人们对成烃中的热能给予的重视。这些认识, 对高温作用下的成烃无疑是正确的。而这些演化的能量, 正是温度场所研究的内容。温度场是一种标量场, 而对沉积盆地烃类形成起重要作用的是地温场在沉积盆地中的分布和变化。

成烃演化主要发生在沉积壳层, 地壳浅层热状况是地球内部深处热作用过程和热演化历史的反映。地壳浅层的热流主要由两部分组成, 一部分源于地壳放射性元素衰变产生的热能, 通常称地壳热流, 另一部分来自地壳深处及上地幔的热, 即深部热流或地幔热流^[6]。就一地区或构造单元而言, 后者一般较为稳定, 其值能够表征一个地区构造的活动性。例如在古老长期稳定区相对低, 而新的活动带可以相当高。因此, 不同地区的等温面是分布变化较大(相对深度参数)的曲面。影响地热场的主要地质因素包括: ①盆地结构、演化及幔源热的供给, 主要涉及地壳厚度, 与莫霍面深度关系密切。沉积盖层愈厚, 地温梯度愈低, 等温面深度愈大; ②盆地构造环境和热事件。地壳中的岩浆和火山活动使深部热流上升而使地壳温度增加, 影响仅限于近期发生较大规模岩浆活动区; ③盆地基底构造形态。盆地内热流的分布及热的再分配受基岩构造形态和上覆地层的岩性、厚度控制, 地壳浅部地温分布与基岩面的起伏呈正相关关系; ④沉积盖层中放射性生成热可作为局部热流的附加热; ⑤浅层地下水。地下水易于流动且热容量大, 对地温场有重要影响。通常在受冷水源补给的地下水强径流区, 往往出现地温负异常, 即等温面偏深, 而在热水排泄区或某些断裂带附近, 则出现正异常, 等温面偏浅^[7]。在上述因素控制下, 沉积盆地具有各自的地温场分布, 而这种地温场的分布,

控制着有机地球化学场的演化,从而控制着烃类形成与聚集。

3.2 应力场

地质体构造变形中的动力学驱动机制早就引起了地质学家的广泛注意。在构造变形中,动力学驱动机制、应力的组合和作用形式、应力-应变关系和边界条件等因素,直接控制和影响着构造变形特征^[8]。石油地质学家^{[9]、[10]}认为,在地壳和岩石变形中,烃源岩中的烃类由分散到集中、由无序到有序重新分布。地壳运动可以导致油气赋存于有利的构造部位。现代的成烃地质研究表明,构造应力亦是有机质成烃演化的重要能量来源和作用方式。因此,构造应力场控制了石油地质中的成盆系统、成烃系统和成藏系统。

一定范围内的岩石在地壳运动产生的力作用下,其内部出现不同性质和不同方向的应力以抵抗外力作用,这些彼此有关联的应力所作用的一定范围的空间称为构造应力场。就含油气盆地的形成和演化而言,区域构造应力场控制着盆系统,而局部构造应力场控制着有机地球化学场成烃的成烃系统,但局部和区域构造应力场均控制着油气的成藏系统。

哈斯特^[11]对岩石绝对应力的测量表明,在地壳中存在一个普遍的水平应力场,而水平应力场的应力值随深度的增加而增加,且在任何一个深度上通常总比覆盖层净重大几倍。岩石水平应力具有很强的方向性,也就是两个水平应力很少大小相等,从而构成地壳垂直剖面内有水平剪应力作用,而剪应力造成了岩石的变形和破坏。由于哈斯特着重工程地质方面的地壳应力值测定,最深达 1000m 左右,所以地壳水平应力大于垂直应力的结论只在有限深度内有效。而深部测量资料显示,在地壳深处水平应力小于垂直应力^[12]。因此,完整的地壳应力分布应该是从地表向下,水平应力大于垂直应力并不断增加到一定深度达到最大,而后变小,到一门限深度(或应力状态转换深度)后垂直应力大于水平应力。这一门限深度一般在 3000~4000m。总之,在沉积盆地烃类形成与聚集的深度范围内,地壳具有强大的水平应力,由于应力场分布的不均一性,构成了它们对烃类形成和聚集的不同控制作用。应力集中区或应力

高值区往往是构造上的强烈变形区,这些区域机械能参与了有机质的演化,有机质在力化学作用下形成烃类。而应力低值区一般为稳定区,它是油气在应力壳作用下发生运移的目标区,因此一般应是烃类聚集区。应力场对地球化学场的另一影响作用是使无机矿物,如粘土矿物等发生变形、晶格错位、缺陷形成而提高其催化活性,提高了有机质向烃类的转化。

总之,烃类的形成过程是应力场和地温场对有机和无机地球化学场复合作用的结果。能否形成烃类并聚集成藏,关键在于这些场相互之间的适时匹配。因此,在时间参数下研究各种场之间的相互作用和对应关系,是今后油气形成演化理论研究的重要课题。

参考文献:

- [1] 张秋光. 场论(上册)[M]. 北京:地质出版社,1983.
- [2] 刘宝珺,张锦泉主编. 沉积成岩作用[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [3] E T Degens, K Mopper. Early diagenesis of sugars and aminoacid in sediments[A]. Development in Sedimentology [M]. 1975.
- [4] J M Hunt. Petroleum Geochemistry and Geology[M]. San Francisco: W H Freeman and Company, 1979.
- [5] 冯福刚. 中国天然气地质攻关十年[A]. 石油与天然气地质文集,第4集[C]. 中国天然气地质研究[M]. 北京:地质出版社,1994. 43~50.
- [6] 汪辑安,汪集扬,熊亮萍,王永玲,张忠义,张菊明,樊志成. 辽河断陷地热特征与油气资源[A]. 中国科学院地质研究所集刊第5号[C], 1992: 1~77.
- [7] 陈墨香主编. 华北地热[M]. 北京:科学出版社,1988.
- [8] A M Johnson. Physical Processes in Geology[M]. California: Freeman, Cooper and Company, 1970.
- [9] C Barker. Oil and Gas on Passive Continental Margin[J]. AAPG, Memoir, 1982, 34: 549~567.
- [10] 王尚文主编. 中国石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社,1983.
- [11] N 哈斯特. 绝对应力的全球性泛湿[Z]. 1973. 地壳上部的应力状态(二)[Z]. 1967. 国家地震局地震地质大队情报室编译. 岩石和地壳的应力测定[M]. 北京:地质出版社,1980. 67~74, 86~95.
- [12] 王喜双,关德爱. 挤压型盆地油气聚集与地应力场[J]. 天然气地球科学, 1997, 8(1): 1~6.

(下转第 21 页)