

地学研究中的新思维

——油气储层中的地球化学自组织

梁 卫

(成都理工学院, 610059)

郭建华

(江汉石油学院, 湖北荆沙 434102)

曾凡刚

(中国科学院兰州地质研究所, 730000)

本文介绍了一门新型学科——地球化学自组织在地学领域中的应用、发展及研究方法,并概述了地球化学自组织在碳酸盐胶结砂岩中的指形反应前锋和异常压力流体封存箱形成机制等储层问题的研究现状。

关键词 地球化学自组织 数值模拟 伯纳德实验 反应前锋 流体封存箱

第一作者简介 梁 卫 男 27岁 博士研究生 煤田、油气地质与勘探

地质系统是一个开放的、非平衡和非线性的复杂系统,这就决定了组成地质系统的内部物质在时间和空间上的非平衡有序性。如何描述这种非平衡有序性一直是许多地质学家多年来研究的重要课题。自从尼克里斯、普里高津等人^[1]在现代物理学科的复杂性探索中,提出了“耗散结构(自组织)”这一可能代表下一次科学革命的崭新理论后,就给地质学家们提供了研究非平衡有序性的最有力的武器。于是,随着“耗散结构”理论的引入,便形成了一门称之为地球化学自组织的新型学科。

一、伯纳德实验与自组织

任何一个理论体系的建立都需要有大量实验作为基础。在建立耗散结构理论时,也同样依靠对大量实验的分析,其中关于自组织的经典实验就是伯纳德实验。

1900年法国青年物理学家伯纳德在其博士论文中公布了如下实验:取一薄层流体,上下各放置一块金属平板使其温度在水平方向上无差异。从下方对流体加热,上下温度分别记为 T_1 , T_2 ($T_2 > T_1$)。未加热时,系统处于平衡态;刚开始加热,上下温度梯度不大,从下向上的热量流与温度梯度力之间为线性关系。在水平方向上具有高度对称性的无序状态是系统的稳定状态。继续加热,流体在竖直方向上温度梯度加大,使系统相应热量流加大,逐渐远离平衡态到达非线性区,在温度梯度达到某一阈值时,系统性质发生突然变化,呈现出规则的运动花样,大量流体微团开始有规律地定向运动。侧视构成一个个圆环;顶视则为一个正六边形,互相挨在一起,流体从六边形中心流上来,又从六个边流下去(图1)。依靠流体的流动将更多的热量从下带上来,完成能量传递的任务。人们称其为伯纳德花样。

伯纳德实验反映了系统进化的演化特点,即系统从均匀、单一的状态向复杂、不均匀的有序状态变化。这种远离平衡态,由微观运动构成宏观稳定的结构,必然要依赖外界不断供给物质和(或)能量来维持,因此人们称这种结构为耗散结构。

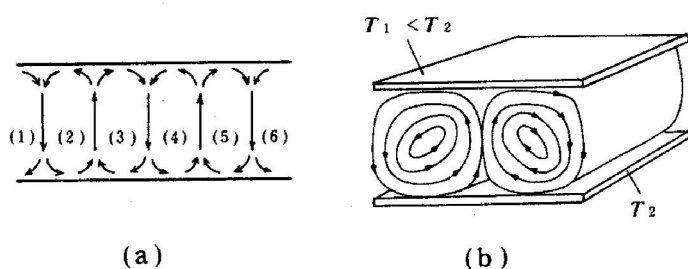


图1 对流(伯纳德)水花图

(据尼科里斯等, 1986^[1])

仔细分析系统从无序状态到有序状态的过程,可以发现其自组织的特点。对

系统加热是使之远离平衡态,创造系统发生转变的条件。真正的转变则是系统内各个流体微团相互作用自组织的结果。加热在水平方向上是均匀的,无法解释它如何能使不同位置上的流体有不同的反应,有的地方向上运动,有的地方向下运动,而且运动在水平方向上呈现出规律性。加热是逐渐对系统进行作用的,而流体微团仅在某一确定的温度梯度阈值下才形成定向运动,更无法解释为什么在某温度梯度下,加热不能使系统发生突变,而在另外梯度下就一定发生突变。不同温度梯度下加热对系统所起不同的作用,无法用一般控制论进行解释,而必须从自组织上考虑。

类似的实验还有很多,化学中的振荡反应,天空中各种形状云的形成,地质学中观察到各类岩石上规则的不同图案,这些都可以按照系统自组织的观点来分析,而从前对这些问题的讨论仅局限在各自具体的领域内,很难得到圆满的解释。

二、地学领域自组织研究的现状和方法

或许由于理论物理化学对李泽冈周期沉淀的解释一直没有多大改进,也可能由于地质思维自17世纪以来一直受到重叠地层原理的影响,对成层(条带)现象的解释、对有规律的空间分布的研究,一直都陷于重叠地层原理的束缚之中,从而严重地影响了地质学的发展。这一状况直到1969年比利时化学物理学家普利高津教授首次提出耗散结构,并逐渐发展形成理论体系之后才有所改善。它使我们有可能研究非线性的系统在远离平衡态时所出现的各种新的有序现象,从而改变了人们对客观世界的许多看法。

80年代以来,地学领域中的自组织研究得到迅速发展。1988年在美国加利福尼亚召开了以地质系统自组织为专题的国际性学术讨论会并出版了论文集。这表明地质系统的自组织研究已引起广大学者的高度重视。

由于地球化学自组织现象的表观例证,不可能与实验上重复出现的规律相同,所以在进行自组织研究时,首先,要确定它们就是自组织作用的真实情况,即确定岩石或体系确实是未曾组合的情况,一般可通过详细的野外调查、岩相学与化学观察相结合的方法。第二,选择与产生自组织作用已知情况有关的机制,以便使这些机制及野外证据,与所涉及岩石形成过程中已知独立发挥作用的全部过程一致起来。第三,根据所选定的机制,建立反应-运移模型,进而建立相应的数学模型进行数值模拟。每个特殊问题,都可按照所确定的目的建立特殊的模式来研究。

由于自组织的形式没有单一机制,这些现象的数学模式反映了产生自组织作用的物化过

程的多变性。从目前的研究成果来看,地球化学自组织作用方程的各种类型,可用下列各条由多种地质原因产生的过程推测。搬运可通过渗透、平移、粘性或塑性岩流、扩散、弥散和热传导。局部过程包括水相反应、吸附、颗粒生长或溶解、凝固和成核作用。从现有地球化学体系工作的经验看,似乎发现自组织现象基本上包括了局部和搬运过程的所有联合作用。因此地球化学自组织作用的研究尚需进一步做大量的野外和室内研究。

三、储层研究中的地球化学自组织

(一) 碳酸盐胶结砂岩中的指形反应前锋

碳酸盐胶结砂岩中的反应前锋具有较大的意义,非平面状前锋可以反映盆地孔隙度和渗透性不均匀性,或许是确定石油运移途径和储集特征的重要因素。

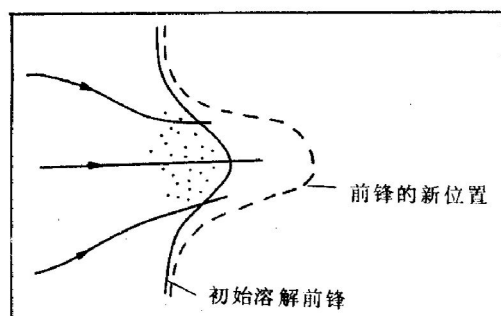


图2 聚流机制图
(据 Wei, Ortoleva 1990^[2])

目前的研究结果表明^[2],碳酸盐胶结砂岩中的水-岩相互反应前锋的形态,可以用地球化学自组织模式来解释。该模式指出,一个体系可以自我组织成不受环境制约的结构。

由于聚流机制,常发生驱流反应前锋形态的不稳定性(图2)。当流体流经岩石时,未蚀变带中的一种或几种矿物发生溶解,而且孔隙度增加,渗透性提高。如果初始岩石结构完全均一,所产生的反应前锋将保持平面状,并随时间沿水流发展。然而,如果初始岩石结构具非均匀性,那么渗透性的增加是不均匀的,并形成了指形反应前锋。尽管聚流作用不断地吸引更多的流体流经

指形锋,但与沿反应前锋的其它部位相比,顶尖部位已逐渐失去了溶解速率的优势。指尖的增长速率减缓,最后变成与反应前锋各部位的速率相等,这样,指形锋的延伸终止。因此,在有限的流渠内,指形锋只能达到有限的长度。

基于以上机制,Wei, Ortoleva 等^[2]概括了用于描述碳酸盐胶结砂岩中水-岩相互作用的反应-运移的数学模型。该模型考虑液相组分的稀释——达西流,并结合方解石、白云石及流体相中相关溶质之间的化学反应进行了数值模拟(图3)。(a)是在未饱和方解石流体侵入之前,初始时刻的孔隙度等值线图。(b)为指形反应前锋形成,并沿流体向前发展时,因为趋于向较高孔隙度域流聚而被弯曲。因为流速缓慢,因而扩散效应相对显著,使得反应前锋轮廓平滑。(c)为注入流体的流速10倍于(b)的流体驱动下,似乎避免了“指尖分裂”机制,在扭曲的指形反应前锋主干的一侧可见两多余的分支,其一在模拟域的顶尖部,另一个则在右底角附近。后一种有助于在整个溶解前锋后形成岛状体。如果继续溶解一段时间,就会在右角形成另一个反应岛。

通过上述模拟研究,不仅可使我们对指形反应前锋形成机制有了进一步认识,同时还为我们其它方面的研究给予了启示:(1)次生孔隙的空间分布(包括古岩溶的空间形态);(2)成层分布的次生白云石的形成机制;(3)在完全理解流体流经情况下,对酸化技术进行改进可大大提高石油产量(采收率)。

(二) 异常压力流体封存箱的形成机制

世界上许多沉积盆地中都有异常压力流体封存箱, 研究表明它们的成因是成岩物质再分配的结果, 即地球化学自组织。那么, 在地球化学自组织过程中, 形成封存箱四周致密岩层的成岩物质以何种方式进行再分配呢? Wood 等^[3,4]提出对流和扩散模式, 但一直未被人们充分重视。Ortoleva 等发展了这一模式, 他认为既然封存箱内部普遍含有次生孔隙带(潜在的油气储层), 因此在箱内失去的物质必然给四周的致密层提供了部分成岩物质, 并且封存箱的“盒形”几何形状必定反映了对流单元的形态(图4)。

Ortoleva 提出引起对流的机制有:(1) 当流体物质密度的垂直梯度发生变化(压溶、温度、溶解度、有机地化反应), 如果 Rayleigh 数超过临界值时, 将发生对流。(2) 流体密度的侧向扰动也可产生对流。

Dewers 和 Ortoleva^[5]在对流机制的基础上, 以一个石灰岩盆地研究对象, 建立了压溶作用驱动平

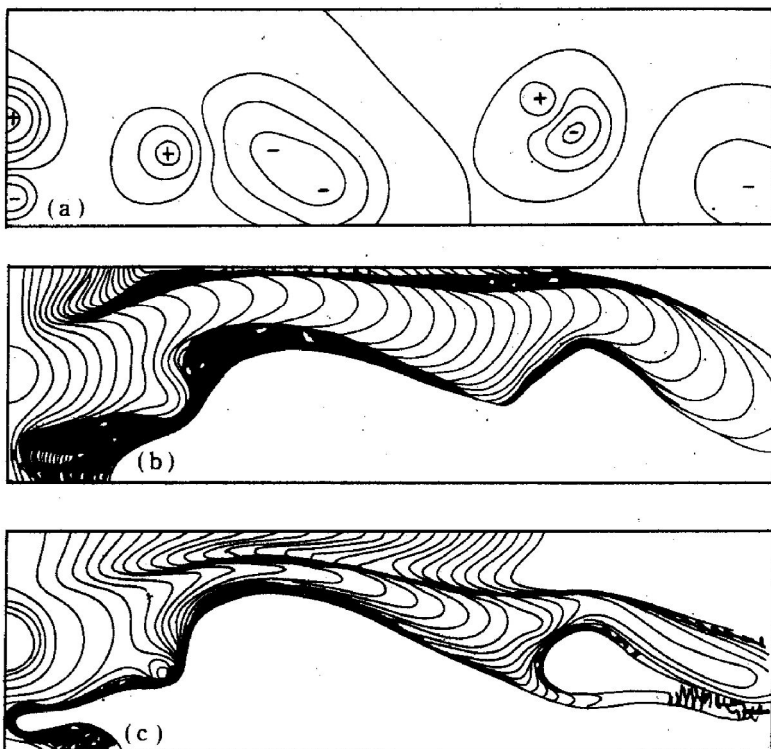


图3 非均匀结构方解石胶结砂岩中反应前锋的时间演化

(据 Wei, Ortoleva 1990^[2])

(a) — 初始时刻 $t_0 = 0$ 时的孔隙度等值线图, (b) — 在流速 $v = 1 \times 10^{-3}$ cm/s 的驱动下, 反应前锋的指形形态, (c) — 流速 $v = 1 \times 10^{-2}$ cm/s 的驱动下, 反应前锋的时间演化, $\Delta t = 2 \times 10^6$ s

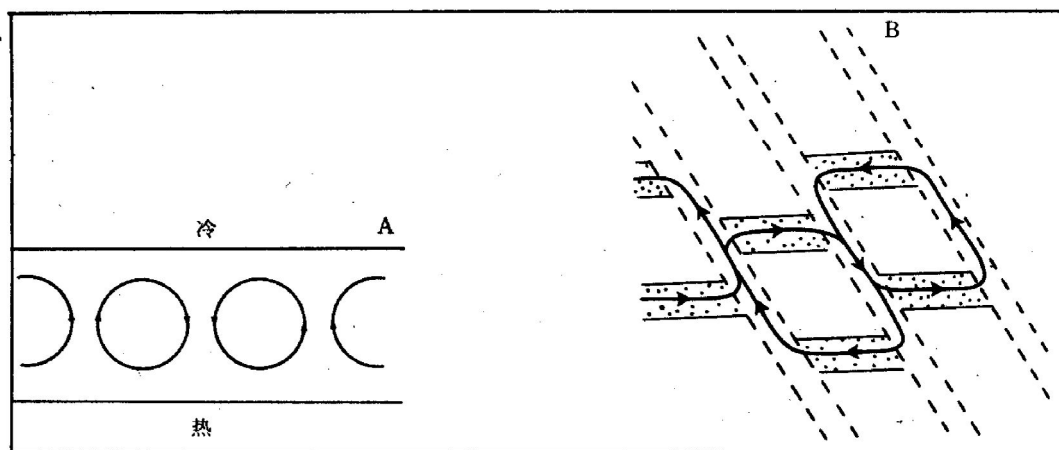


图4 流体对流单元及成岩物质再分配示意图

虚线—断层; 点层—渗透层

(据 Dewers, Ortoleva 1988^[5])

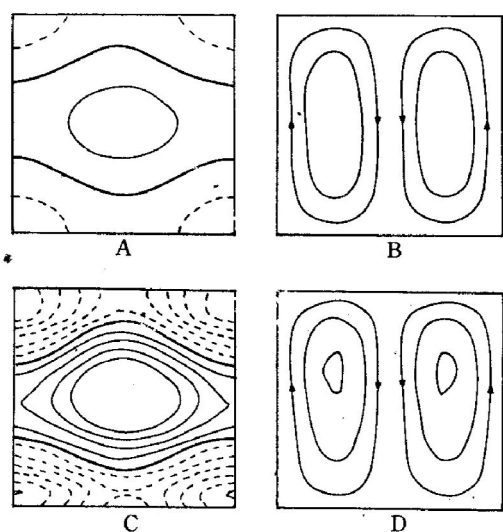


图5 透镜状孔隙度分布的自组织演化图

(据 Dewers, Ortoleva 1988^[5])

流的反应-运移模型,采用数值模拟的方法研究了孔隙度空间分布的演化(图5)。A为原始孔隙度的分布(黑色实线代表平均孔隙度值),当其发生了B的对流以后,随着向下流动穿过中间最大孔隙度两个时间单元(对应于1km深的2Ma或3km深处的20Ma)之后,孔隙度的分布发生了变化:即顶、底形成封隔层,其间形成次生孔隙。此例中顶、底封隔层几乎以相同的速度生长,并从顶、底向对流单元的中心生长。模拟运算获得的最大速度几乎等于孔隙度的最大总偏差,于是将图5-B中的0.02速度单位增至图5-D中的0.1速度单位,即在1km处1.6—8cm/a和3km处0.4—2.0cm/a时,图5A中1km深度处的最大和最小孔隙度值从0.29和0.27分别变为图5-C中的0.32和0.23。可见流速增大后,内部形成更大的次生孔隙,同时周边则胶结更致密。此种对流机制正是形成异常压力流体封存箱的原因。

以上的研究结果清楚地告诉我们,反应驱动对流可以产生盆地范围的自组织现象。而对于压溶现象、温度决定的矿物溶解度、碎屑岩中产生的甲烷和其它有机分子,以及热膨胀作用等问题的研究,将为我们今后在油气运移和圈闭形成等未来的工作中,对于地球化学自组织的研究提供一个广阔的前景。

另外,在石油工业中除了上面所讨论的两个实例外,地球化学自组织还可以用来研究页岩中甲烷的振荡式释放、振荡性自生甲烷的运移,以及选择性溶蚀过程中位错效应的定量测定和缝合线的成因等问题。

我们相信,地学中自组织作用研究的意义,并不全在于得出什么结论,更重要的是它对人们思维的更新,地质学已到了非改革思维不可的时候了。

参 考 文 献

- 1 尼科里斯 G, 普利高津 I. 探索复杂性. 罗久里, 陈奎宁译. 成都: 四川教育出版社, 1986, 1—10
- 2 Wei C, Ortoleva P. Finger-shaped reaction front in reservoir cemented by carbonate. *Earth Science Review*, 1990, 29: 183—198
- 3 Wood J R, Surdam R C. Application of convective diffusion models to diagenetic processes. *SEPM Special Publication*, 1979, 26: 243—250
- 4 Wood J R, Hewett T A. Reservoir diagenesis and convective fluid flow. In: McDonald A, Surdam R, eds. *Clastic diagenesis*. Tulsa: AAPG, 1984. 99—110
- 5 Dewers T, Ortoleva P. The role of geochemical self-organization in the migration and trapping of hydrocarbons. *Applied Geochemistry*, 1988, 13: 287—316

A NEW IDEA OF RESEARCHES IN GEOLOGY: SELF-ORGANIZATION OF GEOCHEMISTRY IN OIL AND GAS RESERVOIR

Liang Wei

(Chengdu Institute of Technology, Chengdu, Sichuan)

Guo Jianhua

(Jiangnan Petroleum Institute, Jingsha, Hubei)

Zeng Fangang

(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

This paper introduces a new branch of sciences—self organization of geochemistry and its application, development and study method in the realm of oil and gas geology. In addition, some current situation on self-organization of geochemistry in oil and gas reservoir is outlined such as finger-shaped reaction front in carbonate-cemented sandstones and the formation mechanism of abnormal pressure com-