

# 复杂性科学在页岩油气勘探 和研究中的应用

于炳松, 阮壮

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083



**内容提要:** 复杂性科学是当今世界科学重要的前沿领域之一。为了促进复杂性科学的基本理论和方法在页岩油气勘探和研究领域的广泛应用,笔者等重点围绕地质系统复杂性的基本内涵,从地质系统构成单元的多重耦合和相互作用、地质作用的复杂时空结构、地质作用过程中的自组织临界过程动力学以及矿产资源形成在混沌边缘等方面,介绍了地质系统复杂性研究的基本理论和研究方法。将上述地质系统复杂性理论运用于页岩油气系统,探讨了利用复杂系统的总体特征通过局域组成单元相互作用的“涌现”机制,来解决目前页岩储层中存在的如何利用微观局域精细表征进行客观刻画宏观储层特征问题;分析了利用地质作用的时空结构理论,建立页岩储层非均质性的静态和分形时空结构的方法;在整体论思想指导下,根据地质系统在混沌边缘分形生长这一规律,探讨了页岩油气在自组织临界态的混沌边缘富集预测方法。复杂性科学的理论和方法,必将在页岩油气的勘探研究中发挥越来越重要的作用。

**关键词:** 复杂性科学;自组织临界性;时空结构;混沌边缘;页岩油气

复杂性科学(Science of Complexity)是一个综合性、交叉性学科,是系统科学发展的新阶段。“非线性”和“复杂性”已成为当今世界科学的重要前沿领域之一(Coveney and Highfield, 1995; 於崇文, 1998a, b; 2003)。复杂性科学研究“复杂性涌现机制”(mechanisms of emergence of complexity),被认为是21世纪的科学(戴汝为, 1997; 於崇文, 1998a, b)。

有关“复杂性”(complexity)的定义至今尚未取得统一的认识。要理解“复杂性”,首先必须明确“复杂系统”(complex systems)的概念。“复杂系统是由大量、不同而且强相互作用(即非线性相互作用)的组成单元构成的系统”(Coveney and Highfield, 1995; 於崇文, 1998a, b; 2003)。复杂系统的构成要具备3个条件,即多个组成单元、每个单元特性不同以及单元之间具有强相互作用。因此,“复杂性”是指“远离平衡的巨大耗散系统中由于组成单元之间局域的非线性相互作用而自发地涌现出(emerge)的系统总体性质、结构与动力学行为”(Coveney and Highfield, 1995; 於崇文, 1998a, b; 2003)。复杂系统总体的特性是由局部构成单元或子系统相互作用所产生的,但又不同于局部构成单

元或子系统的固有特性,这正是“复杂性”的本质。因此“涌现”(emergence)是复杂动力系统内在的基本特征与属性,系统的复杂性是系统自组织的结果(Bushev, 1994; 於崇文, 1998a, b; 2003)。复杂系统的特性、结构与动力学行为是由于系统整体的自组织才“涌现”出来的。

地质系统作为自然系统的重要组成部分,其复杂性已受到了学术界的高度重视。笔者等试图围绕地质系统复杂性的内涵,介绍地质系统复杂性研究的基本理论和研究方法,并将上述地质系统复杂性理论与方法运用于页岩油气系统,以期促进复杂性科学的理论和方法在页岩油气研究和勘探领域的应用。

## 1 地质系统的复杂性

以於崇文院士为代表的地质学家们,在地质系统的复杂性科学领域进行了开拓性研究,明确指出,地质系统的复杂性研究将是21世纪地球科学发展中具有战略地位的学科生长点之一(於崇文, 2003)。地质系统的复杂性主要体现在:多组成耦合的相干与协同及多种过程的耦合与相互作用之多

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42272136, 41572134)的成果。

收稿日期:2022-05-10; 改回日期:2022-09-10; 网络首发:2022-10-20; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.10.001

作者简介:于炳松,男,1962年生,博士,教授,主要从事沉积学、页岩油气和储层地质学研究; Email: yubs@cugb.edu.cn。

重叠加使远离平衡的时空延展耗散系统自发地通过自组织过程演化而归宿于混沌边缘,并呈现自组织临界性(Bushev, 1994; Turcotte, 1997; 於崇文, 2003)。此外值得强调指出的是,自组织临界性的涌现在事物的本质上揭示了非线性动力学与时空分形结构之间的内在联系,因此自组织临界性是阐明物质运动与时间、空间三者之间内在规律的一种统一和普适的理论(Bushev, 1994; Turcotte, 1997; 於崇文, 2003)。

地质系统由多个子系统所构成,分别由各种化学元素、同位素、矿物、岩石、地质体等多种尺度的单元组合而成。不同类型、不同特性物质子系统单元的复杂耦合和相互作用,称之为“多单元的耦合与相互作用”。子系统的耦合可以使各组成单元间发生相互关联、协同和合作,从而在根本上改变组成单元本身的动力学行为并导致系统逐渐转变为宏观的有序状态(Bushev, 1994; 於崇文, 2003)。

自然科学和哲学所探究的关键问题是物质运动、时间和空间的关系。在地质学领域,地质作用的实质是在特定时—空域内地球物质的运动。因此,揭示地质作用时间演化和空间展布的规律性,即“时间结构”和“空间结构”是地质学研究的关键问题之一。地质作用发生在时、空四维结构中,因此,地质作用与时空结构是一切地质现象的本质和核心(Turcotte, 1997; 於崇文, 2003)。

於崇文院士在对复杂系统中的自组织临界性、瞬态混沌、混沌边缘和弱混沌等理论进行系统分析后,指出它们刻画了自然界复杂动力系统时空演化这一命题的本质属性(於崇文, 2003)。基于对地质作用过程的自组织临界性和时—空特点的研究,他总结出了地质系统的复杂性理论,并称之为:“地质作用的自组织临界过程动力学—地质系统在混沌边缘分形生长”(於崇文, 2000a, b, 2003)。该理论指出地质系统是自然界中具有自组织临界性内在基本属性的一种巨大耗散动力学系统;地质系统位于有序和混沌之间的过渡时空域,即混沌边缘,并且地质系统在混沌边缘分形生长(Turcotte, 1997; 於崇文, 2003)。虽然混沌的主要特征是其不规则性,但是混沌源自系统内在的确定性,系统宏观的混沌现象内含着微观的有序结构,即微观分形结构。因此,确定性随机是混沌的本质。地质复杂系统分析的重要方法论就是从混沌寻找有序(Bushev, 1994; 於崇文, 1999a, b, 2000a, b)。运用地质系统复杂性理论研究矿产资源问题,发现了“大型矿床和矿集区

形成在混沌边缘”(於崇文, 1999a, b, 2003)。这一发现对于预测、寻找和评价矿产资源具有十分重要的意义。它为我们提供了一种新的找矿理论、方法和思路。由于这一规律建立在复杂系统和复杂性科学的基础上,因此,它在整个地球系统和地质作用中具有普适性和普遍意义(於崇文, 1999a, b, 2003)。页岩油气系统就是复杂地质系统中的一个子系统,它具有复杂系统的内在属性。

## 2 页岩油气复杂系统

页岩油气作为源储一体的源内油气系统,是一个由多种矿物组分、不同类型和成熟度的有机质、不同结构和成因的孔隙(缝)单元、以及烃类流体等亚系统所组成的一个复杂系统。这些组成单元性质不同且具有强烈的非线性相互作用,通过系统的自组织从而自发地呈现出了页岩油气系统的总体特性、时—空结构和动力学行为。由此可见,受沉积和成岩作用控制的页岩油气系统各组成单元相互作用而涌现出的多尺度的储层非均质性及其时—空结构、页岩油气形成和富集的动力学过程是页岩油气系统复杂性的具体体现。

目前,我们对于页岩油气系统的研究,在方法论上采用的是通过对不同组成单元(岩相、有机质、孔隙、烃类流体等子系统)的分别研究来认识其总体特性,即还原论(reductionism)的方法。而复杂性科学理论明确指出,复杂性和自组织临界性是系统的整体特性,因此须用整体论(holism)这一方法论开展研究,而不能仅用还原论方法认识系统整体的特征(於崇文, 2003)。整体论是对系统的集体性质与行为(collective properties and behaviors)进行研究,也就是把系统作为整体进行研究。由此可见,以整体论为主导,辅以还原论,是研究页岩油气复杂系统的科学和完整的方法论。这将为揭示页岩油气系统非均质性时空结构规律和为页岩油气富集机制提供新的有效途径。

## 3 复杂性科学在页岩油气勘探和研究中的应用

页岩油气作为一个复杂系统,包含了物质组成、结构、构造、孔隙、裂缝、油气的生成和聚集等多个复杂的子系统。这些子系统又由更次一级的子系统组成,构成了一个多类型多层次的复杂系统。本文试图从中选取几个代表性的方面,分析复杂性科学在页岩油气勘探和研究中的应用,以期抛砖引玉,为深

入探索页岩油气系统的复杂性提供借鉴。

### 3.1 页岩储层微观表征对宏观特征的体现

无论是国际上还是国内学界,由于页岩细小的微纳米孔隙体系,决定了在页岩气储层复杂孔隙系统的表征上,一方面,对其复杂性的定量刻画有待进一步探索和深入;另一方面,目前对于孔隙体系的表征主要集中在微观层面上,缺少其在宏观储层特征的体现。因此,如何利用页岩微观孔隙表征结果来定量刻画孔隙体系不同方面的复杂性,并据此体现和描述宏观储层特征及其非均质性,目前尚缺乏有效的评价方法。页岩储层是由不同的矿物组分、有机质类型、不同的孔隙类型和孔隙结构等单元所组成的复杂系统。这些组成单元的多重耦合、相互关联和相互作用,“涌现”出不同于上述组成单元特征的储层宏观性质。复杂系统的这种总体特征通过局域组成单元相互作用的“涌现”机制,为我们解决目前页岩储层中存在的如何利用微观局域精细表征客观刻画宏观储层特征问题提供了重要的理论支持。

由于页岩储层的特殊性和孔喉结构的复杂性,导致常规的孔隙度和渗透率参数对宏观储层特征的表达力明显下降。为此,人们探索了基于微、纳米孔喉结构特征的复杂性参数,如孔喉分形维数、表观渗透率、谱维数等来刻画页岩储层的宏观特征。

#### 3.1.1 孔喉分形维数和迂曲度分形维数

(1)孔喉分形维数( $D_p$ )。根据孔喉分形的概念和定义,则有:

$$N(L \geq \lambda) = \left( \frac{\lambda_{\max}}{\lambda} \right)^{D_p}$$

上式中 $\lambda$ 为孔径, $\lambda_{\max}$ 为最大孔径, $L$ 为标度, $D_p$ 则为孔隙分维数。它反映了孔喉大小及其空间分布的不均匀程度。

Yu Boming 等(2009)建立了孔隙度、孔隙直径与孔隙分维数的关系:

$$D_p = d_E - \frac{\ln \varphi}{\ln \left( \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)}$$

上式中: $d_E$ 是欧几里得维数(在三维空间中为3,在二维空间中为2), $\varphi$ 为孔隙度, $\lambda$ 为孔隙直径。由此可见,用不同方法测得孔隙度和最大、最小孔径后,即可求得孔隙分维数。

(2)孔喉迂曲度分维数( $D_\tau$ )。孔喉迂曲度分维数反映了孔通道轴线的弯曲程度。迂曲毛细管通道的长度与直径之间存在以下关系(Zheng Qian and Yu Boming, 2012):

$$L(\lambda) = \lambda^{1-D_\tau} L_0^{D_\tau}$$

式中: $\lambda$ 是毛细管直径, $L_0$ 是毛细管直线长度, $D_\tau$ 即为孔道迂曲度分维数。而 $D_\tau$ 具有如下表达式:

$$D_\tau = 1 + \frac{\ln \bar{\tau}}{\ln \frac{L_0}{\bar{\lambda}}}$$

上式中: $\bar{\tau}$ 为毛细管通道平均迂曲度, $\bar{\lambda}$ 为平均孔径。而平均迂曲度可由下式求得(Yu Boming and Liu Wei, 2004):

$$\bar{\tau} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \varphi} + \sqrt{1 - \varphi} \cdot \frac{\sqrt{\left( \frac{1}{\sqrt{1 - \varphi}} - 1 \right)^2 + \frac{1}{4}}}{1 - \sqrt{1 - \varphi}} \right]$$

平均孔径可通过孔隙分维数由下式求得:

$$\bar{\lambda} = \frac{D_p \lambda_{\min}}{D_p - 1}$$

综上,即可求得孔通道的迂曲度分维数。

#### 3.1.2 页岩储层表观渗透率

关于页岩油储层的表观渗透率模型目前尚处于初期探索阶段(Zhang Qi et al., 2017; Feng Qihong et al., 2019; Wang Han et al., 2019)。下面以页岩气储层表观渗透率为例说明页岩储层表观渗透率模型的建立。

在页岩微—纳米级孔隙中,页岩气的迁移主要存在黏性流动、努森扩散和表面扩散等几种机制(图1)。

因此,描述页岩储层中气体宏观迁移的表观渗透率模型要考虑不同迁移方式的气体迁移情况。近年来,许多学者都探讨了基于孔隙分维数的表观渗透率模型(Yu Boming and Liu Wei, 2004; Zheng

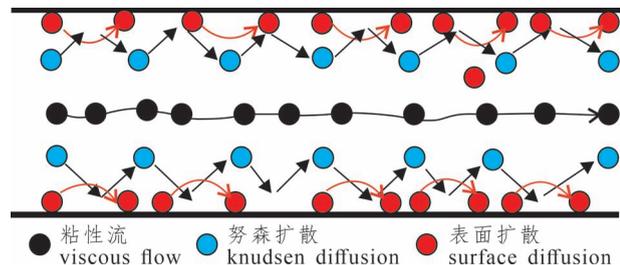


图1 页岩微—纳米孔隙中页岩气迁移机制示意图

(据 Song Wenhui et al., 2016)

Fig. 1 Schematic map of individual gas transport in porous media (from Song Wenhui et al., 2016)

Qian and Yu Boming, 2012; Darabi et al., 2012; Wu Keliu et al., 2016; Song Wenhui et al., 2016; Cai Jianchao et al., 2018, 2019; Xu Jinze et al., 2018)。Cai Jianchao 等(2018)提出的分析模型具有良好的参考价值。

对于黏性流渗透率,有:

$$k_v = \frac{\pi \lambda_{\max}^{3+D_\tau} D_p}{128 L_0^{D_\tau+1} 3 - D_p + D_\tau}$$

式中: $k_v$ 为黏性流渗透率, $\lambda$ 为孔径, $L_0$ 为毛细管通道直线长度, $D_p$ 为孔隙分维数, $D_\tau$ 为孔道迂曲分维数。

对于努森扩散渗透率,有:

$$k_t = \frac{\pi \mu}{12P} \cdot \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \cdot \frac{D_p \lambda_{\max}^{D_p}}{L_0^{D_\tau+1}} \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{K_n}{K_n + 1} \lambda^{1-D_p+D_\tau} d\lambda$$

式中: $k_t$ 为努森扩散渗透率, $\mu$ 为气体黏度(Pa·s), $P$ 为气体压力(Pa), $M$ 为摩尔质量, $T$ 为气体温度(K), $K_n$ 为努森数。其他符号的含义同上式。

对于表面扩散渗透率,有:

$$k_s = \pi D_s \cdot \frac{C_L P_L}{(P_L + P)^2} \cdot \frac{D_p \delta \theta \mu M}{\rho L_0^{D_\tau+1}} \cdot \left\{ \frac{\lambda_{\max}^{D_\tau}}{D_\tau - D_p} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{D_\tau - D_p} \right] + \left[ \frac{\delta \theta \lambda_{\max}^{D_\tau-1}}{D_\tau - D_p - 1} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{D_\tau - D_p - 1} \right] \right] \right\}$$

式中: $D_s$ 为表面扩散系数, $\theta$ 为孔壁吸附层覆盖率,可由孔隙压力 $P$ 和朗格缪尔压力 $P_L$ 求得, $\theta = P/(P + P_L)$ ; $\rho$ 、 $M$ 、 $\delta$ 分别为气体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、摩尔质量( $\text{kg}/\text{mol}$ )和分子直径(m); $C_L$ 是页岩样品最大气体容量,可由

$$C_L = \frac{V_L \rho_s}{\varepsilon V_s}$$

求得,其中 $V_L$ 是朗格缪尔体积( $\text{m}^3/\text{kg}$ ), $\rho_s$ 为页岩样品颗粒密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $\varepsilon$ 为总有机碳体积含量, $V_s$ 为标准条件下的气体体积(=  $0.0224 \text{ m}^3/\text{mol}$ )。其他符号的含义同上式。

由上面三式可得页岩气表观渗透率为:

$$k = k_v + k_t + k_s$$

### 3.1.3 谱维数

无序和随机结构是自然界中存在的普遍现象。流体在无序介质中的随机扩散和流动常用统计物理中的逾渗模型来描述。在逾渗模型中,介质本身的无序结构决定了扩散过程的无序性。研究表明,在

逾渗模型中,渗流阈值附近,渗流集团具有统计自相似性和标度不变性,即具有典型的分形结构(张东晖等,2002)。

在逾渗模型中,物质粒子的平均扩散距离 $r^2(t)$ 可表达为:

$$\langle r^2(t) \rangle = t^{\frac{d}{d_m}}$$

上式中, $d$ 即为谱维数,它符合以下这一著名的关系式(张东晖等,2002):

$$d = \frac{2 d_m}{d_w}$$

式中, $d_m$ 为质量分维数; $d_w$ 为分形结构中随机行走的分维数。 $d/d_m$ 越小,表示平均扩散距离就越小。相对于均匀欧几里德空间,分形结构体中存在更多分支岔道,流体在其中扩散过程需走很多弯路,扩散过程就比在均匀欧几里德空间要慢得多,这种扩散特征被称为扩散慢化。

从上述讨论中可见,孔隙质量分形维数 $d_m$ 即为我们前文论述的孔体分维数 $D_p$ ,分形结构中随机行走的分形维数 $d_w$ 即相当于我们前文讨论的孔轴迂曲度分维数 $D_\tau$ 。由此可得:

$$d = \frac{2D_p}{D_\tau}$$

根据上式,通过孔体分维数和孔轴迂曲度分维数,即可获得谱维数。

而这种页岩储层系统宏观状态的基本载体就是页岩岩相。利用页岩矿物组成、结构、构造等参数对孔隙结构的影响,建立以页岩岩相为基础的储层非均质性定量模型,不仅是目前探索揭示页岩储层非均质性时空结构的重要方向(Ilgen et al., 2017),而且也是预测页岩油地质“甜点”分布的关键。

## 3.2 页岩储层非均质性时空结构

地质作用过程及其时一空结构是一切地质现象的本质与核心(於崇文,2003)。页岩油气储层的非均质性及其时空结构是其本质特征。特定沉积和成岩作用条件下形成的沉积体(如页岩储层),通过其内在的自组织作用,各种特征如孔隙系统等必然经历从混沌到有序的演化过程,从而形成与特定沉积和成岩作用条件相对应的特定的储层非均质性时空结构。这种复杂的时空结构,看似杂乱,但从复杂性科学来看,这种混沌现象存在确定性随机,具有内在的规律性,即宏观的混沌内含微观的有序(微观分形结构)(於崇文,2003)。目前,关于页岩储层特征的时空结构及其内在规律不清,预测难度大,是当今

重要的热点和前沿研究领域。

根据地质系统的复杂性理论,地质作用的时一空结构表达有不同层次。在地质作用研究过程中,基于平衡、可逆过程热力学,并用随机过程(马尔科夫过程)和随机场(地质统计学)表达其时一空结构,这是地质作用的静态时空结构。目前,关于页岩储层特征的研究,诸如储层的矿物组成、岩相类型、孔喉类型和结构等,主体处于这一静态描述层次。用非线性动力学和不稳定系统动力学研究地质作用,并用复杂性科学中的时空分形、时空混沌表示时间和空间结构,这是地质作用的分形时空结构(於崇文,2003)。

在常规油气储层研究中,Leary 和 Al-Kindy (2002)对英国北海油田 245 口井的分析发现,其目的层储层岩石物性在纵向上的波动变化呈现出频率标度( $k$ )与波数负相关的功率谱,即  $S(k) \propto 1/k$ 。沉积岩钻井纵向测井中的幂律标度早在 1986 年 Hewett 就已经观察到,此后,Leary (1998)发现不仅在钻井垂向上,而且在平面上也具有幂律标度特征。上述幂律标度特征已得到了更多研究的证实(Wu Rushan et al., 1994; Bean, 1996; Holliger, 1996; Dolan et al., 1998; Shiomi et al., 1997; Leonardi and Kümpel, 1998; Goff and Holliger, 1999)。这种幂律标度特征意味着,沉积地层和储层物性具有自组织的内在特征。

页岩储层作为沉积地层,其矿物组成、TOC 含量、孔喉半径、孔喉分维数、迂曲度和迂曲度分维数等页岩储层关键参数的分数布朗运动、分数 Gauss 噪声、Lévy 尘构成了地层序列中所展示的数据序列的基本时间分形模型,而多重分形谱可被用作地层序列中上述各种储层参数分布特征的指纹(Lenormand, 1989; Muller et al., 1990; 於崇文, 2003)。多重分形是近年来发展起来的,研究某种物质的量或质量如何分布在一种几何物体或支撑上的方法(Feder, 1988; Mandelbrot, 1989, 1999)。它已被成功地应用于湍流和沉积物中孔隙度分布等的研究中(Meneveau and Sreenivasan, 1987; Lenormand, 1989; Muller et al., 1990)。

在等时地层格架的基础上,通过对比不同钻井相同层位页岩储层上述参数的变化特征,可建立储层非均质性的空间结构。然而,在静态地质统计模型中,无法分离上述参数中相对独立的局部信息(噪声)与具有长程关联的空间结构信息。Leary 和 Al-Kindy (2002)在对英国北海油田 245 口井的分析

中,利用单井中储层孔隙度和渗透率的幂律标度特征,即  $S(k) \propto 1/k$ ,对不同频率的孔隙度和渗透率波动幅度的平面分布进行了分析。他们在 8 阶纵向频率孔隙度和渗透率平面分布模拟计算的基础上,又对 3 阶低频带(纵向频率 1~8)和 5 阶高频带(纵向频率 9~256)分别进行了模拟计算,发现高频带波动振幅的平面变化反映了局部的孔隙度和渗透率变化(噪声),而低频带波动振幅的平面变化具有长程关联的空间结构。上述关于储层非均质性空间结构的研究思路和方法,对我们开展页岩储层空间非均质性结构研究、分离并过滤局部信息(噪声)和获取具有长程关联的空间结构具有重要的指导作用。

由此可见,页岩储层非均质性的时空结构极其复杂,但目前对于其复杂时空结构的研究主要是基于地质统计学的静态时空结构描述,对其内在规律及复杂性尚缺乏清晰的科学认识。页岩储层分形时空结构的建立,是揭示页岩储层时空非均质性内在规律的有效方法和途径。科学地刻画和认识这一复杂系统,是指导页岩油气“甜点”预测的重要基础。

### 3.3 页岩油气的混沌边缘富集模型

目前,关于页岩油气富集机制的研究主要基于源内生成、原位滞留富集原理(金之钧等,2016;赵文智等,2021)。对于源内迁移富集的研究相对薄弱。页岩油气在储层介质中的迁移问题是页岩油气成藏理论中的核心问题之一。

在页岩气储层中,气体储藏在纳米到微米级的有机和无机孔隙中,储层的渗透率极低。一般而言,页岩储层的孔隙大小在 1~300 nm,其基质内在渗透率在  $10^{-9} \sim 10^{-3} \times 10^{-15} \text{m}^2$  (Loucks et al., 2009; 邹才能等,2012)。因此,页岩气中吸附气和游离气的质量迁移机制可以认为主要是在这些孔隙介质中的扩散作用(Fathi and Akkutlu, 2009, 2012)。努森数(Knudsen number)是分子平均自由程与平均孔隙直径的比值。对于在不同孔隙直径和不同努森数( $K_n$ )条件下气体的流动体制已有了较一致的认识。一般而言,当  $K_n < 10^{-3}$  时,为达西流(Darcy flow);当  $10^{-3} < K_n < 10^{-1}$  时,为滑移(Slip flow);当  $10^{-1} < K_n < 10^1$  时,为瞬变流(Transition flow);当  $K_n > 10^1$  时,为自由分子流(Free-molecule flow)(Darabi et al., 2012; Song Wenhui et al., 2016)。可见孔隙结构对页岩气的迁移机制具有十分重要的控制作用。

关于页岩油在页岩储层内的迁移机制研究十分有限,目前仅是概念性的模型和认识,如毛细管压力差通常被认为是油气初次运移及源内油藏成藏的重

要动力,初次运移及源内油藏成藏作用还受储层润湿性的影响等(包友书等,2016,2017)。传统的研究源内石油生成和运移的地球化学参数和指标也常常相互重叠而难于揭示其机制(陈祥等,2011; Lu Shuangfang et al., 2012; 吴红焯等,2014; Song Jinli et al., 2015)。鉴于页岩成分和结构的强烈非均质性,最近, Hu Shouzhi 等(2020)根据源内石油生成和运移既有地球化学同时也有岩石学响应的原理,探索了结合岩石学和地球化学特征研究页岩层系源内石油生成和运移的方法,指出夹层和互层型序列有利于页岩油的聚集(Hu Shouzhi et al., 2020)。

渗透率是表征孔隙介质流体流动和质量迁移行为的关键性宏观参数。但由于页岩储层特殊的孔隙结构(微/纳米孔隙体系),导致其内部流体的流动机制完全不同于常规储层(Javadpour et al., 2007; Javadpour, 2009; Civan, 2010; Civan et al., 2011; Darabi et al., 2012; Zheng Qian and Yu Boming, 2012; Zheng Qian et al., 2013; Ma Jingsheng et al., 2014; Sun Hai et al., 2015)。近年来,根据页岩孔隙结构的复杂性,利用页岩孔隙的分形特征,在建立页岩储层表观渗透率函数(apparent permeability function, APF)分析模型方面,进行了多方面的有益探索,在考虑不同孔隙类型、孔隙结构、孔隙分形特征、流体相态、扩散方式等条件下表观渗透率模型建立方面取得了较大的进展(Yu Boming and Liu Wei, 2004; Zheng Qian and Yu Boming, 2012; Darabi et al., 2012; 吴红焯等,2014; Song Wenhui et al., 2016; Cai Jianchao et al., 2018; Xu Jinze et al., 2018; Cai Jianchao et al., 2019; Zhang Kun et al., 2019)。

上述这些研究均是基于还原论的思路,即通过页岩油气系统中的不同组成单元的特征去认识系统的整体特征。页岩油气系统作为一个复杂系统,其自组织内在属性是系统整体的行为。因此,运用整体论的思路和方法,通过页岩油气系统的自组织临界性来认识页岩油气的富集规律,将是一种全新的思路。

页岩储层与其中的油气构成了一个复杂的地质系统。它具有自组织临界性的内禀基本属性。页岩油气的生成、迁移和富集过程是一种时空延展的“复杂动力学系统”,其时空行为遵循地质作用的自组织临界过程动力学。系统中多组成单元和多种地质作用过程各自内部和相互之间的相互作用和多重叠加过程使页岩油气系统发生自组织,并向临界态

演化,最终呈现“自组织临界性”。也就是说,页岩油气系统自发地通过自组织过程而最终均衡且归宿于混沌边缘,并呈现出自组织临界特性,即页岩油气富集在混沌边缘。根据页岩储层非均质性的时空结构特征及其对页岩油气生成、运移和聚集的制约,从混沌寻找有序,是我们在复杂性科学理论指导下用整体论思路探索页岩油气富集规律的重要方法论。

根据复杂性科学原理,自组织临界态是混沌边缘的本质特征。因此,寻找混沌边缘的关键是要确定自组织临界态的分布。为此,对于页岩油气系统而言,我们首先通过取心井中含气量或含油饱和度( $S$ )与关键储层参数(如孔隙度 $\Phi$ 、 $TOC$ 、 $S_1$ 等)的关系,计算导致含气性或含油饱和度快速增加的临界参数点。以孔隙度为例,参考 Leary 和 Al-Kindy (2002)在北海油田计算导致渗流条件发生快速变化的临界孔隙度的方法,可构筑  $\lg(S) = \frac{\alpha\Phi'}{\Phi_{crit} - \Phi'}$  函数确定页岩含气量或含油饱和度快速增加的临界孔隙度( $\Phi_{crit}$ )。式中, $S$ 为含气量或含油饱和度, $\Phi_{crit}$ 为临界孔隙度, $\Phi' = \Phi - \Phi_{min}$ , $\Phi$ 为孔隙度, $\Phi_{min}$ 为最小孔隙度。其它的临界参数可以通过同样的方法求取。在获得控制含气量或含油性的临界储层参数的前提下,根据储层参数长程关联信息的空间结构,确定页岩油储层参数处于自组织临界态的区域分布。这些区域即为处于混沌边缘的页岩油气富集有利区。

由此可见,将复杂性科学的理论和方法运用于页岩油气系统研究,对于正确认识页岩油气系统的复杂性,揭示页岩油气生成、迁移、富集的时空结构具有重要的理论意义,同时,对于页岩勘探和开发也具有重要的实际指导意义。

## 4 结论

笔者等介绍了地质系统复杂性研究的基本理论和研究方法,探讨了复杂性科学在页岩油气勘探和研究中的应用途径,取得了以下主要结论:

(1)由于页岩储层的特殊性和孔喉结构的复杂性,导致常规的孔隙度和渗透率参数对宏观储层特征的表达力明显下降。利用复杂系统的总体特征通过局域组成单元相互作用的“涌现”机制,探索基于微、纳米孔喉结构特征的复杂性参数,如孔喉分形维数、表观渗透率、谱维数等来了解页岩储层的宏观特征,是解决目前页岩储层中存在的如何利用微观局域精细表征客观刻画宏观储层特征问题的有效途

径。

(2)地质作用与时—空结构是一切地质现象的本质与核心。页岩油气储层的非均质性及其时空结构是其本质特征。从目前利用随机过程和随机场表示静态的页岩油气储层非均质性时空结构,向着运用复杂性科学中的时空分形、时空混沌表示其分形时空结构,将是页岩油气储层非均质性及其时空结构研究的发展方向。

(3)在复杂性科学整体论思想指导下,地质系统在混沌边缘分形生长这一规律,是探讨页岩油气在自组织临界态的混沌边缘富集和预测的全新的方法论。

### 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 包友书,张林晔,张金功,李钜源,李政. 2016. 渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩油可动性影响因素. 石油与天然气地质, 37(3): 408~414.
- 包友书,张林晔,张守春,徐大庆,王宇蓉,张蕾,吴连波. 2017. 毛细管力的初次运移及成藏作用有效性分析. 高校地质学报, 23(2): 296~303.
- 陈祥,王敏,严永新,章新文,罗曦,张永华. 2011. 泌阳凹陷陆相页岩油气成藏条件. 石油与天然气地质, 32(4): 568~576.
- 戴汝为. 1997. 复杂巨系统科学——一门21世纪的科学. 自然杂志, 19(4): 187~193.
- 金之钧,胡宗全,高波,赵建华. 2016. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素. 地学前缘, 23(1): 1~10.
- 吴红烛,黄志龙,杨柏松,柳波,闫玉魁,桑廷义,文川江. 2014. 马朗凹陷低熟页岩油地球化学特征及成烃机理. 吉林大学学报(地球科学版), 44(1): 56~66.
- 於崇文. 1998a. 固体地球系统的复杂性与自组织临界性. 地学前缘, 5(3): 159~174.
- 於崇文. 1998b. 固体地球系统的复杂性与自组织临界性(续). 地学前缘, 5(4): 347~361.
- 於崇文. 1999a. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘. 地学前缘, 6(1): 85~102.
- 於崇文. 1999b. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘(续). 地学前缘, 6(2): 195~217.
- 於崇文. 2000a. 地质作用的自组织临界过程动力学—地质系统在混沌边缘分形生长. 地学前缘, 7(1): 13~42.
- 於崇文. 2000b. 地质作用的自组织临界过程动力学—地质系统在混沌边缘分形生长(续). 地学前缘, 7(2): 555~586.
- 於崇文. 2003. 地质系统的复杂性(上、下册). 1版. 北京:地质出版社: 1~1133.
- 张东晖,杨浩,施明恒. 2002. 多孔介质分形模型的难点与探索. 东南大学学报, 32(5): 692~697.
- 赵文智,张斌,王晓梅,吴松涛,张水昌,刘伟,王坤,赵霞. 2021. 陆相源内与源外油气成藏的烃源灶差异. 石油勘探与开发, 48(3): 464~475.
- 邹才能,朱如凯,吴松涛,杨智,陶士振,袁选俊,侯连华,杨华,徐春春,李登华,白斌,王岚. 2012. 常规与非常规油气聚集类

型、特征、机理及展望—以中国致密油和致密气为例. 石油学报, 33(2): 173~187.

- Bao Youshu, Zhang Linye, Zhang Jingong, Li Juyuan, Li Zhen. 2016&. Factors influencing mobility of Paleogene shale oil in Dongying Sag, Bohai Bay Basin. Oil & Gas Geology, 37(3): 408~414.
- Bao Youshu, Zhang Linye, Zhang Shouchun, Xu Daqin, Wang Yurong, Zhang Lei, Wu Lianbo. 2017&. Effectiveness of capillary pressure on the primary migration of oil and its accumulation. Geological Journal of China Universities, 23(2): 296~303.
- Bean C J. 1996. On the cause of 1/f-power spectral scaling in borehole sonic logs. Geophysical Research Letters, 23: 3119~3122.
- Bushev M. 1994. Synergetics: Chaos, Order, Self-Organization. Singapore: World Scientific, 1~275.
- Cai Jianchao, Lin Duanlin, Harpreet S, Wei Wei, Zhou Shangwen. 2018. Shale gas transport model in 3D fractal porous media with variable pore sizes. Marine and Petroleum Geology, 98: 437~447.
- Cai Jianchao, Lin Duanlin, Harpreet S, Zhou Shangwen, Meng Qingbang, Zhang Qi. 2019. A simple permeability model for shale gas and key insights on relative importance of various transport mechanism. Fuel, 252: 210~219.
- Chen Xiang, Wang Min, Yan Yongxin, Zhang Xinwen, Luo Xi, Zhang Yonghua. 2011&. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang Depression. Oil & Gas Geology, 32: 568~576.
- Civan F. 2010. Effective correlation of apparent gas permeability in tight porous media. Transp Porous Media, 82: 375~384.
- Civan F, Rai C S, Sondergeld C H. 2011. Shale—gas permeability and diffusivity inferred by improved formulation of relevant retention and transport mechanisms. Transp Porous Media, 86: 925~944.
- Coveney P, Highfield R. 1995. Frontiers of Complexity. New York: Ballentine Books: 1~461.
- Dai Ruwei. 1997&. Complex giant system science——A 21st century science. Chinese Journal of Nature, 19(4): 187~193.
- Darabi H, Ettehad A, Javadpour F, Sepehrnoori K. 2012. Gas flow in ultra-tight shale strata. Journal of Fluid Mechanics, 710: 641~658.
- Dolan S, Bean C, Rioulet B. 1998. The broadband fractal nature of heterogeneity in the upper crust from petrophysical logs. Geophysical Journal International, 132: 489~507.
- Fathi E, Akkutlu I Y. 2009. Matrix heterogeneity effects on gas transport and adsorption in coalbed and shale gas reservoirs. J. Transp. Porous Med., 80: 281~304.
- Fathi E, Akkutlu I Y. 2012. Mass transport of adsorbed-phase in stochastic porous medium with fluctuating porosity field and nonlinear gas adsorption kinetics. J. Transp. Porous Med., 91: 5~33.
- Feder J. 1988. Fractals. New York: Plenum Press.
- Feng Qihong, Xua Shiqian, Wanga Sen, Lia Yuyao, Gao Fangfang, Xu Yajuan. 2019. Apparent permeability model for shale oil with multiple mechanisms. Journal of Petroleum Science and Engineering, 175: 814~827.
- Goff J A and Holliger K. 1999. Nature and origin of upper crustal seismic velocity fluctuations and associated scaling properties: Combined stochastic analyses of KTB velocity and lithology logs. Journal of Geophysical Research, 104: 13169~13182.
- Hewett T A. 1986. Fractal distributions of reservoir heterogeneity and their influence on fluid transport. Society of Petroleum Engineers,

- SPE15386.
- Holliger J. 1996. Upper-crustal seismic velocity heterogeneity as derived from a variety of P-wave sonic logs. *Geophysical Journal International*, 125: 813~829.
- Hu Shouzhi, Li Shuifu, Xia Liuwen, Lü Qian, Cao Jian. 2020. On the internal oil migration in shale systems and implications for shale oil accumulation: A combined petrological and geochemical investigation in the Eocene Nanxiang Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184: 106493 (doi: 10.1016).
- Ilgén A G, Heath J E, Akkutlu I Y, Bryndzia L T, Cole D R, Kharaka Y K, Kneafsey T J, Milliken K L, Pyrak-Nolte L J, Suarez-Rivera R. 2017. Shales at all scales: Exploring coupled processes in mudrocks. *Earth-Science Reviews*, 166: 132~152.
- Javadpour F. 2009. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone). *J. Can. Pet. Technol.*, 48: 16~21.
- Javadpour F, Fisher D, Unsworth M. 2007. Nanoscale gas flow in shale gas sediments. *J. Can. Pet. Technol.*, 46: 18~33.
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, Zhao Jianhua. 2016. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng—Longmaxi Formation, southeastern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 1~10.
- Leary P C. 1998. Relating microscale rock - fluid interactions to macroscale fluid flow structures. In: Jones G, Fisher Q J and Knipe R J, eds. *Faulting, Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoirs*. Geological Society, London, Special Publication, 147: 242~269.
- Leary P C, Al-Kindy F. 2002. Power-law scaling of spatially correlated porosity and log(permeability) sequences from north—central North Sea Brae oilfield well core. *Geophys. J. Int.*, 148: 426~442.
- Lenormand R. 1989. Application of fractal concepts in petroleum engineering. *Physica D.*, 38: 230~234.
- Leonardi S and Kumpel H J. 1998. Variability of geophysical log data and the signature of crustal heterogeneities at the KTB. *Geophysical Journal International*, 135: 964~974.
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Jarvie D M. 2009. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale. *J. Sediment Res.*, 79: 848~861.
- Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, Li Jijun, Wang Min, Xue Haitao, Wang Weiming, Cai Xiyuan. 2012. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application. *Pet. Explor. Dev.*, 39: 268~276.
- Ma Jingsheng, Sanchez JuanPablo, Wu Kejian, Gary C, Jiang Zeyun. 2014. A pore network model for simulating non-ideal gas flow in micro- and nano-porous materials. *Fuel.*, 116: 498~508.
- Mandelbrot B B. 1989. Multifractal measures, especially for the geophysicist. *PAGEPH*, 131: 5~42.
- Mandelbrot B B. 1999. *Multifractals and 1/f Noise. Wild Self-Affinity in Physics (1963~1976)*. Selecta Volume N. Berlin: Springer.
- Meneveau C, Sreenivasan K R. 1987. Measurement of  $f(\alpha)$  from scaling of histograms and applications to dynamic systems and fully developed turbulence. *Physics Letters(A)*, 137: 103~112.
- Muller J, Hansen J P, Skjeltorp A T, Mccauley J. 1990. Multifractal phenomena in porous rocks. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 176: 719~722.
- Shiomi K, Sato H and Ohtake M. 1997. Broadband power-law spectra of well-log data in Japan. *Geophysical Journal International*, 130: 57~64.
- Song Jinli, Ralf L, Philipp W, Christian O H, Susannec N. 2015. Shale oil potential and thermal maturity of the Lower Toarcian Posidonia Shale in NW Europe. *Int. J. Coal Geol.*, 150~151: 127~153.
- Song Wenhui, Yao Jun, Li Yang, Sun Hai, Zhang Lei, Yang Yongfei, Zhao Jianlin, Sui Hongguang. 2016. Apparent gas permeability in an organic-rich shale reservoir. *Fuel*, 181: 973~984.
- Sun Hai, Yao Jun, Fan Dongyanm, Wang Chenchen, Sun Zhixue. 2015. Gas transport mode criteria in ultra-tight porous media. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 83: 192~199.
- Turcotte D L. 1997. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press: 1~398.
- Wang Han, Su Yuliang, Zhao Zhenfeng, Wang Wendong, Sheng Guanglong, Zhan Shiyuan. 2019. Apparent permeability model for shale oil transport through elliptical nanopores considering wall—oil interaction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176: 1041~1052
- Wu Hongzhu, Huang Zhilong, Yang Baisong, Liu Bo, Yan Yukui, Sang Tingyi, Wen Chuanjiang. 2014. Geochemical characteristics and hydrocarbon generating mechanism of low-mature shale oil in Malang Sag. *J. Jilin Univ. : Earth Sci. Ed.*, 44(1): 56~66.
- Wu Keliu, Li Xiangfang, Guo Chaohua, Wang Chenchen, Chen Zhangxin. 2016. A unified model for gas transfer in nanopores of shale-gas reservoirs; coupling pore diffusion and surface diffusion. *SPE Journal*, 1921039.
- Wu Rushan, Xu Zhengyu, Li Xiaoping. 1994. Heterogeneity spectrum and scale anisotropy in the upper crust revealed by the German Continental Deep-Drilling (KTB) Holes. *Geophysical Research Letters*, 21: 911~915.
- Xu Jinze, Wu Keliu, Li Ran, Li Zhandong, Li Jing, Xu Qilu, Chen Zhangxin. 2018. Real gas transport in shale matrix with fractal structures. *Fuel.*, 219: 353~363.
- Yu Boming, Cai Jianchao and Zou Mingqing. 2009. On the physical properties of apparent two-phase fractal porous media. *Vadose Zone J.*, 8(1): 177~186.
- Yu Boming and Liu Wei. 2004. Fractal Analysis of Permeabilities for Porous Media. *American Institute of Chemical Engineers AIChE J.*, 50: 46~57.
- Yu Chongwen. 1998a. Complexity and self-organized criticality of solid earth system. *Earth Science Frontiers*, 5(3): 159~174.
- Yu Chongwen. 1998b. Complexity and self-organized criticality of solid earth system (Continued). *Earth Science Frontiers*, 5(4): 347~361.
- Yu Chongwen. 1999a. Large deposits and metallogenic areas (belts) are on the edge of chaos. *Earth Science Frontiers*, 6(1): 85~102.
- Yu Chongwen. 1999b. Large deposits and metallogenic areas (belts) are on the edge of chaos. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 195~217.
- Yu Chongwen. 2000a. Dynamics of self-organized critical processes of geological processes — fractal growth of geosystems at the edge of chaos. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 13~42.
- Yu Chongwen. 2000b. Dynamics of self-organized critical processes of geological processes — fractal growth of geosystems at the edge of chaos. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 555~586.
- Yu Chongwen. 2003. *Complexity of Geosystems (Volumes I and II)*. First edition. Beijing: Geological Publishing House: 1~1133.
- Zhang Donghui, Yang Hao, Shi Mingheng. 2002. Important problems

- of fractal model in porous media. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 32(5): 692~697.
- Zhang Kun, Song Yan, Jiang Shu, Jiang Zhenxue, Jia Chengzao, Huang Yizhou, Liu Xiaoxue, Wen Ming, Wang Xin, Li Xin. 2019. Shale gas accumulation mechanism in a syncline setting based on multiple geological factors: An example of southern Sichuan and the Xiuwu Basin in the Yangtze Region. *Fuel*, 241: 468~476
- Zhang Qi, Su Yuliang, Wang Wendong, Lu Mingjing, Sheng Guanglong. 2017. Apparent permeability for liquid transport in nanopores of shale reservoirs: Coupling flow enhancement and near wall flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115: 224~234.
- Zhao Wenzhi, Zhang Bin, Wang Xiaomei, Wu Songtao, Zhang Shuichang, Liu Wei, Wang Kun, Zhao Xia. 2021. Differences in source kitchens for lacustrine in-source and out-of-source hydrocarbon accumulations. *Petroleum Exploration And Development*, 48(3): 464~475.
- Zheng Qian and Yu Boming. 2012. A fractal permeability model for gas flow through dual-porosity media. *Journal of Applied Physics*, 111: 1~7.
- Zheng Qian, Yu Boming, Duan Yonggang, Fang Quantang. 2013. A fractal model for gas slippage factor in porous media in the slip flow regime. *Chem. Eng. Sci.*, 87: 209~215.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, Yang Zhi, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Hou Lianhua, Yang Hua, Xu Chunchun, Li Denghua, Bai Bin, Wang Lan. 2012. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance. *Acta Pet. Sin.*, 33: 173~187.

## Application of complexity science in the shale oil and gas research and exploration

YU Bingsong, RUAN Zhuang

*School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083*

**Objectives:** Complexity science is one of the important frontier fields of science in the world now. We introduce the connotation of the complexity of geosystems to promote the application of the theories and methods of complexity science in the field of shale oil and gas research and exploration.

**Methods:** Based on a literature review, this paper introduces the basic theories and research methods of the complexity of geosystems from the aspects of multiple coupling and interaction of multiple components of geological system, space—time structure of geological process, self-organized critical dynamics of geological processes and the formation of mineral resources on the edge of chaos.

**Results:** Applying the above complexity theory of geological system to shale oil and gas system, this paper discusses how to use the overall characteristics of complex system and the "emergence" mechanism of local component unit interaction to solve the problem of how to objectively describe the macroscopic reservoir characteristics by using microscopic local fine characterization in shale reservoir; analyses the method for establishing static and fractal space—time structure of shale reservoir heterogeneity with use of the space—time structure theory of geological process; explores the prediction method of shale oil and gas enrichment at the edge of chaos in self-organized critical state under the guidance of holism, according to the fractal growth law of geological system at the edge of chaos.

**Conclusions:** The theories and methods of complexity science will play a more and more important role in the exploration and research of shale oil and gas.

**Keywords:** complexity science; self-organized criticality; spatio—temporal structure; edge of chaos; shale oil and gas

**Acknowledgements:** This work was supported by the Program of National Natural Science Foundation of China (No. 42272136, 41572134).

**First and corresponding author:** YU Bingsong, male, born in 1962, Ph. D., professor, mainly engaged in Sedimentology, shale oil and gas geology and reservoir geology; Email: yubs@cugb.edu.cn

**Manuscript** received on: 2022-05-10; Accepted on: 2022-09-10; Network published on: 2022-10-20

**Doi:** 10. 16509/j. georeview. 2022. 10. 001

**Edited by:** LIU Zhiqiang

