

分形理论表征非常规油气储层孔隙结构特征研究进展

张驰¹ 关平^{1,†} 张济华¹ 梁晓伟^{2,3} 丁晓楠¹ 尤源^{2,3}

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018; 3. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018;
† 通信作者, E-mail: pguan@pku.edu.cn

摘要 围绕单重分形和多重分形在非常规油气储层研究中的应用问题, 总结分形理论在定量表征、数字图像和联合多种方法表征全尺度孔隙特征等方面的应用研究成果, 指出现有研究中存在4个方面的不足: 1) 缺乏联合多种实验方法表征全尺度分形几何特征的方法学研究; 2) 缺乏不同分形维数计算模型的适用性研究; 3) 缺乏针对分段的分形孔径控制因素研究; 4) 缺乏应用分形理论对蕴含多类型资源储层的非均质差异性研究。提出分形理论在非常规油气储层研究中的应用的发展方向: 一方面, 应加强分形维数计算模型的方法学和适用性研究, 厘清分段分形孔径变化的控制因素; 另一方面, 应围绕油气生成与分形维数变化的动态耦合关系开展深入的探讨, 加强多重分形理论在非常规油气储层中的应用研究。

关键词 非常规油气储层; 分形; 孔隙结构; 非均质性

A Review of the Progress on Fractal Theory to Characterize the Pore Structure of Unconventional Oil and Gas Reservoirs

ZHANG Chi¹, GUAN Ping^{1,†}, ZHANG Jihua¹, LIANG Xiaowei^{2,3}, DING Xiaonan¹, YOU Yuan^{2,3}

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oil field Branch Company, Xi'an 710018; 3. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018;
† Corresponding author, E-mail: pguan@pku.edu.cn

Abstract Focusing on the application of monofractal and multifractal theory in unconventional reservoir research, the research results on the application of fractal theory in quantitative characterization techniques, digital image techniques and techniques for joint multi-method characterization of full-scale pore structure are reviewed. There are four weaknesses in the existing research results: 1) lack of methodological research on joint multi-method for full-scale fractal geometric characteristics; 2) lack of research on the applicability of different fractal dimension calculation models; 3) lack of research on the control factors of segmental fractal pore size; 4) lack of research on the heterogeneity differences of reservoirs containing multiple types of resources by applying fractal theory. The development direction of the application of fractal theory in unconventional oil and gas reservoirs is proposed. On the one hand, the methodological and applicability research of fractal dimension calculation models should be strengthened, and the controlling factors of segmental fractal pore size should be clarified; on the other hand, more in-depth research should be conducted on the dynamic coupling relationship between hydrocarbon generation and fractal dimension change, and the further application of multiple fractal theory in the study of unconventional reservoirs should be strengthened.

Key words unconventional oil and gas reservoirs; fractal; pore structure; inhomogeneous

1 非常规油气储层孔隙特征研究现状

非常规油气资源具有大面积连续分布、圈闭不明显以及无稳定自然产能的特点^[1],近年来成为全球能源领域关注的热点。我国的非常规油气资源含量丰富,分布广泛,可采资源量约为常规油气的3倍^[2]。2019年全国非常规油气产量占油气总产量的23%,标志着我国已进入非常规油气发展的革命性的新阶段^[3]。相较于常规油气储层,非常规油气储层孔隙结构更加复杂,具有微-纳米尺度孔隙连续分布的特点^[4-6],储层中发育的孔隙类型具有多样性(图1)^[7-8],连通性相对较差,表现出比常规油气储层更强的非均质性,为油气勘探开发带来更大的挑战^[9-10]。

孔隙特征是决定储层的储集性和油气可流动性的关键因素,厘清非常规油气储层孔隙结构的非均质性特征及其控制因素,对非常规油气的勘探开发具有重要意义。近来的研究表明,分形几何学是揭示储层孔隙结构和非均质性的有效工具^[11-12]。油气储层的孔隙具有统计意义上的自相似性,可以用其分形维数表征孔隙空间的几何性质^[13-14]。基于分形理论,对非常规油气储层已开展较多的研究,包括根据分形维数分析孔隙的非均质性^[15-16]、储层分类^[17-18]、预测自然裂缝的分布^[19]以及建立渗透率预测模型^[20]等。

在对储层孔隙的研究中,要根据研究目的和研究对象,合理地选取测试技术,而不同的测试手段又有各自适用的分形计算模型。目前,非常规油气储层的孔隙表征技术可以分为定性-半定量和定量两大类。不同的表征技术基于不同的原理,每种方法都有适用的孔径区间(图2)^[21],使用单一的测试方法很难获得全尺度的孔隙结构特征。针对联合多种技术来表征孔隙结构的问题,已开展大量工作,主要通过多种测试结果的机械拼接^[23-27]或根据曲线变化趋势进行拼接^[28]的方法,实现全尺度的孔隙分析。一些学者也对联合多方法表征全尺度孔隙的测试结果进行分形几何学分析^[29-30]。值得注意的是,不同测试方法的原理、适用孔径的范围以及分形计算模型都不同,不同计算方法的分形维数能否进行直接对比,有待进一步论证。

目前,针对非常规油气储层孔隙的分形几何学研究尚存在较多的不足。例如,全孔径尺度分形几何学表征的方法、不同分形维数计算模型的适用

性、分形维数分段特征控制因素等方面的研究不够深入,制约了分形理论在非常规油气储层孔隙研究中的应用。本文以非常规油气储层中的致密油气储层、页岩油气储层和煤层气储层为例,总结常用孔隙表征技术的分形几何学分析方法,综述分形理论在非常规油气储层研究中的应用现状,总结存在的不足和潜在的发展方向,提出进一步完善孔隙分形几何表征体系的建议。

2 分形理论及其应用

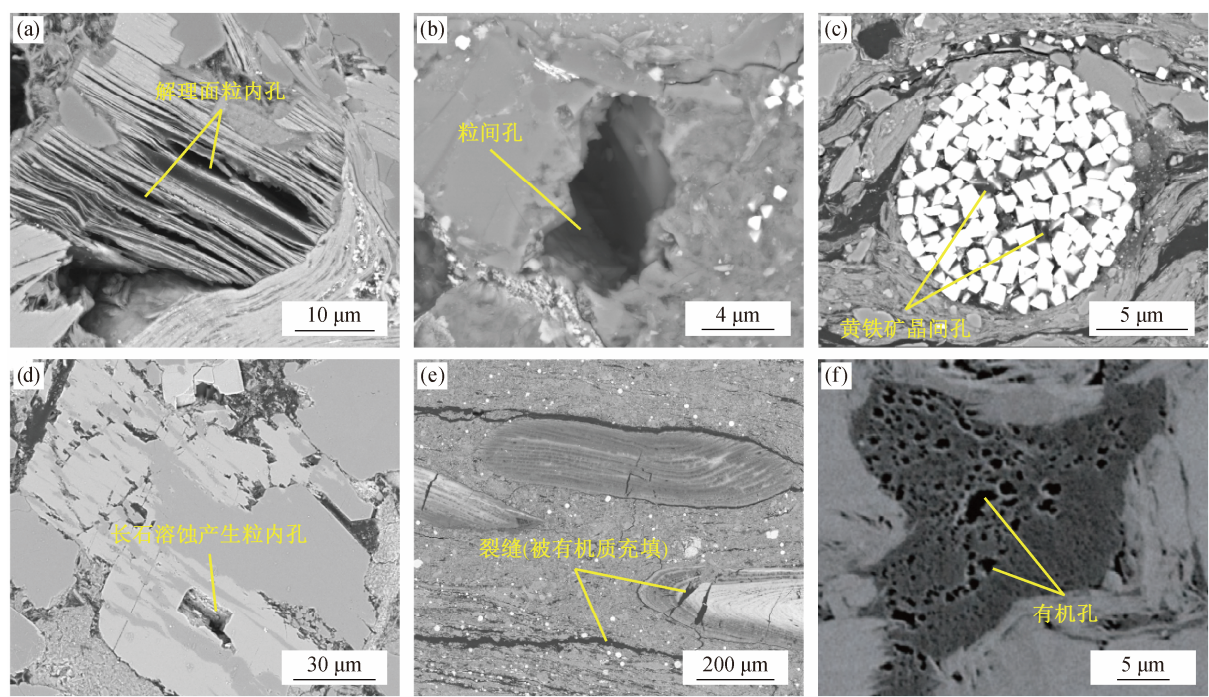
2.1 分形理论研究进展

传统欧几里得几何学的研究对象具有规则和光滑的形状,且具有整数维,其大小可以精确地测量^[31]。但是,对于具有粗糙形状的几何对象,很难用传统欧几里得几何学对其进行准确的表征。Mandelbrot^[32-33]发表的系列专著标志着分形几何作为独立学科诞生,实现对粗糙形状几何体的精确表征。

分形理论的发展历经3个阶段^[34]。第一阶段从1875年至1925年,人们发现连续但不可微的函数,并将其称为病态函数(pathological function)^[35]。1904年,科赫曲线的提出改变了这一看法,科赫曲线是第一个具有局部与整体相似结构的曲线^[33]。1919年,Hausdorff^[36]引入Hausdorff测度和维数(dimension)的概念,指出测量一个几何对象时,要依赖测量方式和测量尺度。第二阶段从1926年至1975年,分形逐渐成为一种理论,但局限于纯数学理论研究,未与其他学科建立联系。同时,很多学科呈现大量与分形几何学相关的问题。1975年,Mandelbrot^[32]系统地阐述了分形几何学的思想。第三阶段从1976年至今,分形理论在多个领域的应用取得全面发展,形成独立学科。目前,在分形理论的应用中,分形维数的计算是核心内容之一。作为几何图形特征量,分形维数是定量刻画自相似性的参数,其数值可以是整数或分数,用于表征研究对象的分布维度和复杂性^[37]。求取分形维数的方法主要有盒维数法^[38]、功率频谱法^[39]、差分法^[40]、尺码法^[41]和结构函数法^[42]。目前,分形理论已经广泛应用于物理学、化学、数学和地质学等诸多领域。

2.2 分形理论在地质学中的应用

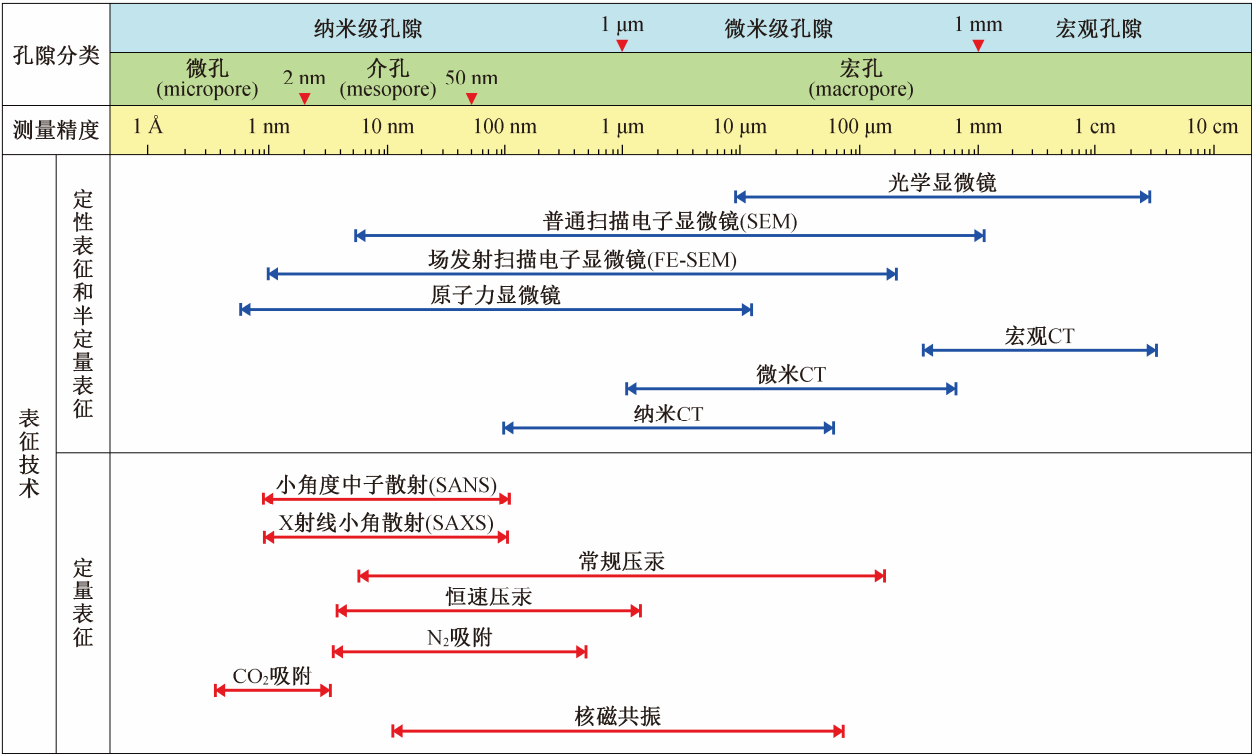
地质学是一门与空间分布密切相关的学科,相关空间维数研究具有重要意义。但是,传统的统计学方法缺乏对样品空间分布的度量。分形理论为地质学在空间分布方面的深入研究提供了有力的工



(a) 鄂尔多斯盆地长 71 井解理面粒内孔, 深度为 2022.97 m^[7]; (b) 鄂尔多斯盆地长 73 井粒间孔, 深度为 2071.45 m^[7]; (c) 鄂尔多斯盆地长 73 井莓状黄铁矿晶间孔, 深度为 2070 m^[7]; (d) 鄂尔多斯盆地长 72 井长石溶蚀产生的粒内孔, 深度为 2037.30 m; (e) 鄂尔多斯盆地长 73 井裂缝型孔隙, 被有机质充填, 深度为 2071.45 m; (f) 鄂尔多斯盆地延长组干酪根中发育的有机孔^[8]

图 1 非常规油气储层的主要孔隙类型

Fig. 1 Major pore types in unconventional oil and gas reservoirs



据文献[21]修改; 孔隙分类标准: 蓝色填充区为邹才能等^[4]提出, 绿色填充区为国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)制订^[22]

图 2 非常规油气储层研究中常见的表征技术

Fig. 2 Common characterization techniques in unconventional oil and gas reservoir studies

具,在地球物理、地球化学、区域构造、成矿作用以及非常规油气储层地质等方面得到广泛的应用。

在地球物理研究方面,将分形理论应用于测井曲线解释和地震数据分析中,可以对地震波初至进行判断^[43-44];结合分形与测井伽马曲线,可以对储层的非均质性进行研究^[45]。在地球化学研究方面,多维分形广泛地应用于地球化学场元素的空间分布等研究中^[46-48]。在区域构造研究方面,Fan 等^[49]根据断裂的分形特征,对有利的油气勘探裂缝带进行预测。在成矿作用研究方面,断裂的分形维数被用来指示矿床流体的运移条件^[50];此外,分形理论为揭示矿床形成的复杂过程以及成矿物质的富集规律等提供了依据^[51-53]。在非常规油气储层地质研究方面,基于铸体薄片、压汞、气体吸附和核磁共振等实验开展了大量的分形研究^[54-58],通过计算储层二维平面或三维体积的单重分形维数,实现对孔隙结构几何非均质性的定量表征。相较于单重分形,多重分形在描述分形集几何特征时更加适用,对非常规油气储层局部特征的刻画更加精细,故对此也开展了较多的研究^[59-63]。

3 分形理论在非常规油气储层研究中的应用

3.1 单重分形在气体吸附实验中的应用

CO₂ 吸附实验和 N₂ 吸附实验分别是微孔(<2 nm)和介孔(2~50 nm)的主要表征手段。人们基于气体吸附的测试数据,对煤岩^[64]、页岩^[65]和致密砂岩^[66]等不同类型储层的微孔和介孔进行单重分形研究。基于气体吸附计算的分形维数常见模型包括 BET 模型^[67]、FHH 模型^[68]和热力学方法^[69]等,其中应用最广泛的 FHH 模型是 Avnir 等^[68]在研究气体分子吸附时提出的。FHH 模型基于 N₂ 吸附数据计算分形维数时,有基于范德华力机制和毛细管聚凝机制两种方法^[70]。基于毛细管聚凝机制的分形维数计算方法更适合多孔介质的非均质性研究,计算公式^[70]如下:

$$\ln V = C + (D-3) \cdot \ln [\ln(P/P_0)], \quad (1)$$

式中, V 表示气体吸附量(cm^3/g), P 表示系统平衡压力(MPa), P_0 表示气体的饱和蒸汽压(MPa), C 为常数(无量纲), D 表示分形维数(无量纲)。在 $\ln V - \ln(P/P_0)$ 散点图中,双对数曲线的斜率 K 对应式(1)中 $D-3$,因此可以根据 $D = K + 3$ 计算介孔的分形

维数。前人的研究中双对数曲线往往具有一个明显转折点,并以此为界,计算不同吸附阶段的分形维数^[71-73]。多数学者选择在相对压力 $P/P_0=0.45\sim 0.5$ 处(即吸附等温线出现迟滞环、发生毛细凝结现象时)进行分段^[53,72],也有学者选择将相对压力 $P/P_0=0.1$ 处作为分界点^[16],或直接基于吸附曲线毛细凝结段($P/P_0>0.45$)的孔径数据计算分形维数^[6]。除 N₂ 吸附实验外,一些学者还利用 CO₂ 吸附实验数据表征微孔的孔隙结构分形特征。戴方尧等^[74]通过研究孔径分布函数 $J(x)$ 与孔隙半径 x (nm)之间的对数关系,推导出微孔分形维数计算模型:

$$\ln J(x) = (2-D) \ln x + C, \quad (2)$$

在 $\ln J(x) - \ln x$ 散点图中,双对数曲线的斜率 K 对应式(2)中 $2-D$,因此可以根据 $D = 2 - K$ 计算微孔的分形维数。针对 FHH 模型和微孔分形模型在微孔尺度上的对比研究表明,应用 FHH 模型处理 CO₂ 吸附实验孔径数据来计算微孔分形维数时,会产生系统性的误差^[75],导致这一误差的主要原因是 FHH 模型的基础吸附理论不适用于微孔尺度^[76]。

将单重分形应用于气体吸附实验数据,可以表征非常规油气储层介孔和微孔尺度的非均质性。N₂ 吸附实验中,在相对压力较低($P/P_0<0.45$)的阶段,N₂ 分子主要为单层吸附,求得的分形维数 D_1 反映孔隙表面的粗糙程度;对压力较高($P/P_0\geq 0.45$)时,N₂ 分子发生毛细管聚凝,求得的分形维数 D_2 反映孔隙空间结构的复杂程度, D_1 和 D_2 越大,储层孔隙表面的粗糙程度和孔隙空间的复杂程度越高^[52]。较高的分形维数表明孔隙的非均质性强,孔隙内表面积大,因此孔隙的表面能较大,阻碍了烃类的流动,不利于油气的开发。对于微孔和介孔的分形维数,纳米级有机孔的发育情况^[77]、总有机碳(TOC)含量^[71]、黏土矿物含量^[72]以及孔隙比表面积^[6]等参数均可能与其具有显著的相关关系。

3.2 单重分形在压汞实验中的应用

高压压汞技术主要用于宏孔(孔径>50 nm)^[63]的表征。利用单重分形对高压压汞孔径数据进行的研究主要包括研究储层孔隙结构的非均质性^[78-79]、建立渗透率预测模型^[20,80]以及根据分形维数进行储层分类^[18,81]等,其中分形维数计算模型有 J 函数模型^[82]、毛管束模型^[15]、热力学模型^[83]和 Menger 模型^[84]等。前人通过对比不同计算模型,发现毛管束模型的分形维数与储层物性及孔隙结构参数具有更

好的相关性,是更有效的计算模型,因此毛管束模型被多数学者采用^[15,18,85-86]。根据毛管束模型计算分形维数的方法有基于含水饱和度^[18,87]和含汞饱和度^[85,88]两种。以基于含水饱和度的毛管束计算模型为例,计算公式为

$$\lg(1-S_{Hg})=(D-3)\lg P_c-(D-3)P_{min}, \quad (3)$$

式中, S_{Hg} 表示进入孔隙中汞的体积占比(%), P_c 表示毛管压力(MPa), P_{min} 表示最大孔喉半径对应的毛管压力(MPa)。在 $\lg(1-S_{Hg})-\lg P_c$ 散点图中, 双对数曲线的斜率 K 对应式(3)中 $D-3$, 因此可以根据 $D=3+K$ 计算微孔的分形维数。文慧俭等^[89]分别根据含水饱和度和含汞饱和度计算分形维数, 指出两种方法之间缺乏可对比性, 但由含汞饱和度算得分形维数与孔径参数有更好的相关性。通常, 应用毛管束模型算得分形维数也具有分段特征, 多以双对数散点图的拐点作为分界点^[56,66,85], 也有学者选择将表征宽、窄连通孔隙的分界压力 P_{capex} 作为分界点^[15]。分段分形孔径是表征不同孔喉配置关系以及不同孔径分布特征的转折孔径, 通常被认为是随样品特征而变化的。但是, 也有学者指出分段分形孔径是固定值^[87]。

在以往的研究中, 不同孔径尺度的分形特征呈现明显的差异。部分研究结果中, 大孔径尺度的分形维数大^[90]; 另一部分研究结果中, 小孔径尺度的分形维数大^[91]。这说明对分段分形孔径两侧的孔隙空间而言, 孔隙结构的非均质性差异不是固定的。此外, 在使用高压压汞数据计算分形维数时, 部分计算结果不满足三维孔隙空间分形维数的定义^[85]。分析其原因, 微裂缝的发育以及汞的注入压力过大均有可能导致分形维数的计算结果异常; 对高黏土矿物含量的储层而言, 汞与黏土矿物的相互作用以及汞注入带来孔隙结构的瞬时变化也会影响分形维数的计算结果^[92]。因此, 通过高压压汞实验研究非常规油气储层的分形特征时, 应结合其他孔隙结构参数进行综合评价, 进一步明确高压压汞分形维数计算模型的不确定性。

3.3 单重分形在数字图像技术中的应用

除气体吸附和压汞实验外, 数字图像技术的发展也为储层孔隙结构的研究提供了思路, 基于各种CT和扫描电子显微镜得到的图像信息, 可以计算储层三维孔隙结构的单重分形维数。Pan等^[93]基于分形理论和场发射扫描电子显微镜(FESEM), 对煤

岩的微裂缝和微孔隙进行定量划分。毛灵涛等^[94]利用工业CT和数字图像处理技术, 对煤岩的三维裂隙进行分形表征, 指出分形维数与内部裂隙发育之间具有正相关关系, 分形维数可以用来解释裂隙的变化过程。通过对氩离子抛光扫描电子显微镜图像进行处理, 可以得到页岩孔隙的等效周长和等效面积, 据此计算页岩的分形维数, 发现其与孔隙分布的均匀程度及孔隙形态密切相关^[95-96]。上述研究都是基于岩石样品进行的分形特征研究。Wang等^[97]基于盒维数模型, 用计算得出的分形维数表征人工岩芯的孔隙结构特征, 为孔隙结构建模的准确性提供了新的研究思路。

结合数字图像技术计算分形维数, 通常根据处理图像信息得到的黑白二值图进行计算, 优点是事先将孔隙结构从CT图像中提取出来, 缺点是二值化的方法可能导致丢失图像细节信息, 从而影响分形维数计算结果的准确性。彭瑞东等^[98]建议直接根据灰度图像计算孔隙空间的分形维数, 提高计算结果的准确性。值得注意的是, 目前根据分形理论和盒维数模型定量表征孔隙结构的研究比较笼统^[99]。随着数字岩芯研究的不断深入, 数字图像信息的获取会更加精确, 加上CT扫描及扫描电子显微镜等技术的分辨率不断提升, 将分形理论与数字图像技术相结合, 可以对储层的孔隙结构进行更精准的分形表征。

3.4 单重分形在联合多种实验方法表征孔隙结构方面的应用

联合多种测试方法, 可以得到全孔径尺度的孔隙结构分布特征。学者们应用分形理论, 对全尺度的孔径数据开展了大量研究。在对致密砂岩储层的研究中, 分别将分形理论应用于压汞实验和核磁共振实验^[28,100], 其中纳米级孔隙的分形维数用压汞实验数据计算, 大孔径尺度的分形维数则用核磁共振测试数据计算。Qiao等^[29]在对低阶煤的研究中, 结合压汞实验与 N_2 吸附实验来表征低阶煤的孔隙结构特征, 发现两种实验方法得出的分形维数均具有分段性, 利用 N_2 吸附实验数据算得分形维数 D_2 以及利用压汞实验数据算得分形维数 D_4 均与低阶煤的吸附能力和渗流能力关系密切, 并用这两个分形维数来表征全尺度分形特征。戴方尧等^[74]考虑到不同气体吸附实验的表征精度存在差异, 分别根据 CO_2 吸附实验和 N_2 吸附实验数据计算有机质页岩微孔和介孔的分形维数, 实现页岩微孔-介孔

尺度分形特征的表征。

3.5 多重分形在表征孔隙结构方面的应用

利用单重分形理论表征非常规油气储层的孔隙结构时,很难实现对不同物性和不同孔喉比的储层进行精确的表征,往往只能得到储层局部的孔隙特征,即便分形维数相同,储层在物性和孔喉比等方面也可能具有很大的差异,并且分形维数的分段特征可能影响分形维数计算效果^[62]。作为单重分形的扩展,多重分形近年来在非常规油气储层孔隙结构的表征中广泛应用^[58,60,101-102]。据 Jelinek 等^[103]的论述, Evertsz 和 Mandelbrot 早在 1992 年就提出多重分形维数是比单重分形维数更适合表征分形集几何特征的参数。多重分形是根据奇异谱 $f(a)$ 、多重分形维数 D_q 、奇异强度 $a(q)$ 和谱宽 Δa 进行数学描述^[60,62,102],其关键步骤基于计盒维数计算原理,定量地描述几何对象内部的分布特征^[104]。

广义分形维数 D_q 的表达式为

$$D_q = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\lg \left[\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon) \right]}{\lg \varepsilon}, \quad (4)$$

式中, q 为统计矩的阶数(无量纲); $p_i(\varepsilon)$ 为质量概率; $N(\varepsilon)$ 为某个盒子内的气体吸附量; ε 为盒子尺寸。同样,可以定义质量函数 $\tau(q)$ ^[105-106]:

$$\tau(q) = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg X(q, \varepsilon)}{\lg \varepsilon} = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon)}{\lg \varepsilon}。 \quad (5)$$

根据式(4)与(5)可知,质量函数与多重分形维数之间的关系为

$$\tau(q) = (1-q)D_q。 \quad (6)$$

根据勒让德变换,可以得到奇异强度 $a(q)$ 和多重分形维数谱 $f(a)$ 与质量函数 $\tau(q)$ 的关系:

$$a(q) = \frac{d\tau(q)}{dq}, \quad (7)$$

$$f(a) = qa(q) - \tau(q) = q \frac{d\tau(q)}{dq} - \tau(q), \quad (8)$$

还可以定义谱宽(Δa):

$$\Delta a = a_{\max} - a_{\min}。 \quad (9)$$

当统计矩的阶数 $q=0$ 时, D_0 表征的是容量维,其值用来判断每个盒子中是否含有孔隙;当 $q=1$ 时, D_1 表征的是信息维,其值用来表征孔体积在不同孔径范围内分布的集中程度;当 $q=2$ 时, D_2 表征

的是关联维,其值用来表征不同孔径范围内孔隙的连通性^[60]。Hurst 指数 H 可以代替 D_2 ,描述研究对象在不同孔径范围内的孔隙连通性,其表达式为

$$H = (D_2 + 1)/2。 \quad (10)$$

一般情况下,多重分形维数越大,表征的孔隙结构越复杂,谱宽越大,多重分形特征越明显^[62]。Wang 等^[60]基于多重分形谱的谱宽 Δa ,精确地评估不同孔隙类型非均质性的细微变化,发现粒间孔的 Δa 最大,非均质性最高;进一步结合扫描电子显微镜图片,得出有机质孔是形成页岩气储层关键因素的结论。Liu 等^[62]对美国 Bakken 页岩的上、中、下段进行多重分形研究,基于 N_2 吸附实验和 CO_2 吸附实验数据,结合多重分形维数 D_q ,发现这3段页岩均具有多重分形的特征,并且通过 H 指数、奇异谱 $f(a)$ 以及多重分形维数 D_0 , D_1 和 $D_{-10} \sim D_{10}$ 等参数研究3段页岩的孔隙结构差异。

与单重分形在全尺度孔隙表征方面的应用类似,学者们应用多重分形理论,对全尺度的孔径数据开展了大量研究。Guan 等^[101]基于 N_2 吸附实验和压汞实验数据,对湖相页岩的多重非均质性进行定量表征,采用多重分形维数 D_q 、奇异强度 $a(q)$ 和奇异谱 $f(a)$,研究两组实验数据反映的孔隙尺寸分布和孔隙结构非均质性,据此得出两种实验方法在数据重叠部分存在差异的原因因为墨水瓶型孔隙和宏孔的发育。Zhou 等^[107]结合 CT 图像和多重分形理论,对准噶尔盆地的砂砾岩储层进行研究,发现多重分形的奇异谱宽度 Δa 越小,储层的物性越好。

综上所述,基于多重分形研究非常规油气储层的孔隙结构,可以更精细地刻画储层的局部特征,也排除了单重分形的分段特征对分形维数计算结果的影响,因此多重分形更适合用来表征非常规油气储层孔隙这类复杂的分形集合体。

4 分形理论在非常规油气储层应用中的不足

分形理论在非常规油气储层的研究中已有较广泛的应用,但存在一些不足,主要体现在以下几个方面。

1) 联合多种方法研究孔隙结构时,需要用不同的分形维数计算模型来处理不同实验方法所得孔径数据,处理结果往往缺乏可对比性。目前主要通过联合恒速压汞、高压压汞、气体吸附和核磁共振等

实验技术,对照不同实验方法的适用孔径区间,分别计算分形维数来表征全尺度非均质特征。这种方法虽然在一定程度上实现了全尺度分形维数的计算,但其本质还是针对不同的实验方法采用不同的计算模型。然而,将不同方法的实验数据以及不同计算模型算得分形维数进行综合研究,尚欠缺相关的方法学依据。

2) 在用不同计算模型处理同样的实验数据时,缺乏对模型适用性的研究。如表1所示,应用分形理论处理压汞实验数据时,计算分形维数的模型有J函数模型、毛管束模型、热力学模型以及Menger模型等;处理气体吸附实验数据时,计算分形维数的模型有FHH模型和热力学模型等。虽然已经有学者对不同模型计算得到的分形维数进行过对比研究^[86,108],但是仅分析其与物性的关系,未结合实验原理和计算模型的数学原理进行方法或模型适用性研究。

3) 分形维数常具有明显的分段特征,多数研究者对分形曲线分段进行拟合,并计算分形维数。分形理论在气体吸附实验中的应用,是将这种分段特征对应为不同的气体吸附模式,并将 $P/P_0=0.45\sim 0.50$ 作为分段的界线。分形理论在压汞实验中的应用,多根据分形图形的形态进行分段,并将这种分段对应为不同孔径尺度的非均质特征,多数情况下为两段分形^[15],也有四段分形^[109]。在横向对比同一区域内多个样品的非均质性时,可以发现分形维数的分段孔径并不是一个固定的孔径,确定分段孔

径时具有一定的主观性。对于分形的分段原理,目前虽然已有较成熟的认识^[71,110],但分段分形孔径是否会随着样品的物性、矿物组成和孔喉比等参数的变化而表现出一定的规律性,有待进一步研究。

4) 对于同一非常规油气储层中的不同资源类型,未结合分形理论对其赋存的孔隙非均质性差异进行研究。以页岩油和页岩气为例,两者同为赋存在富有机质页岩中的油气资源,是烃源岩在不同生烃演化阶段的产物,随着生烃进程的演化,储层的孔隙结构和孔隙类型均会发生明显的改变^[111]。对页岩油储层而言,其孔隙结构分形特征的主控因素为比表面积、孔体积和TOC含量^[101,112-113]。Wang等^[112]指出,分形维数越小,则游离油越多,可以将分形维数作为储油能力的评定指标。白莹等^[114]发现,页岩油储层孔隙结构的分形特征与纹层特征关系密切。对页岩气储层而言,其孔隙结构分形特征的主控因素为TOC含量和矿物含量^[61,101-111,115],表征页岩储层孔隙表面的分形维数越大,孔隙对页岩气的吸附性就越强。对页岩油气储层而言,TOC含量与分形维数关系密切,在有机质生烃演化过程中TOC含量也不断发生变化,页岩孔隙的分形维数也展现动态变化特征。因此,要辩证地看待由分形维数表征的孔隙结构特征对页岩油吸附、解吸特征以及油气运移的影响,如果分形维数小,则孔隙结构比较均一,孔隙连通性好,利于油气的扩散、解吸和渗流;如果分形维数大,则孔隙的渗流性差,有可能封存更多的页岩油气资源。可见,页岩储层的

表1 压汞实验和气体吸附实验中不同的分形维数计算模型及表达式
Table 1 Different models and expression for calculating the fractal dimension in the mercury intrusion porosimetry and gas adsorption

实验方法	计算模型	表达式	参数说明
压汞	J函数模型 ^[82]	$\lg S_{Hg} = \frac{3-D}{2} \lg \frac{f}{2} \cdot \frac{3-D}{5-D} + (D-3) \lg J(p_c, K, \phi)$	S_{Hg} 为汞饱和度(%); f 为毛细管弯曲度; $J(p_c, K, \phi)$ 为实测岩石毛细管压力与参考毛细管压力的比值,简称J函数; D 为分形维数,下同
	毛管束模型 ^[15]	$S_{Hg} = ap_c^{(D-2)}$	S_{Hg} 为非润湿相的累计体积(m^3), a 为常数, p_c 为毛细管压力(MPa)
	热力学模型 ^[83]	$\ln(W_n/r_n^2) = D \ln(V_n^{1/3}/r_n) + C$	W_n 为累计孔隙表面能(J/m^2); r_n 为第 n 次进汞对应的孔喉半径(μm); V_n 为孔隙总体积(m^3); C 为常数,下同
	Menger模型 ^[84]	$D = 4 + \ln\left(\frac{dV_p}{dP}\right) / \ln P$	V_p 为压汞实验测得的大孔孔径段页岩孔隙体积(m^3), P 为压汞实验中施加的压力(MPa)
气体吸附	FHH模型 ^[68]	$\ln V = C + (D-3) \cdot \ln[P_0/P]$	V 为平衡压力下对应的吸附气体量(m^3); P_0/P 为相对压力,下同
	热力学模型 ^[69]	$S = k \left(\frac{2\gamma \times v_m}{RT \times \ln(P_0/P)} \right)^{D-2}$	S 为比表面积(m^2/g), γ 为表面张力(N/m), v_m 为吸附液氮的摩尔体积(L/mol), k 为常数, R 为气体常数($8.314 J/mol \cdot K$), T 为温度($^{\circ}C$)

孔隙结构特征对页岩油和页岩气这两类资源赋存和运移方面的控制作用有一定的差异。对于同一非常规油气储层中的这两类资源类型,目前尚缺乏基于分形理论,结合烃源岩生烃演化阶段和TOC含量变化的非均质性差异研究。

5 分形理论在非常规油气储层应用研究中的发展方向

本文基于现有研究中存在的不足,提出分形理论在非常规油气储层应用研究中的几个发展方向。

1) 加强分形维数计算模型的方法学研究,主要有两个方面。一是加强全尺度分形维数模型的方法学研究,基于联合多种实验方法表征全尺度孔径分布方法较为成熟的现状,建立新的全尺度分形维数计算模型,实现全尺度的分形表征。二是加强不同分形维数计算模型适用性的方法学研究,结合储层岩性和物性等参数,厘清针对各类实验方法最适用的分形维数计算模型。

2) 加强分形维数分段孔径控制因素的研究,结合储层的矿物组成、物性参数和孔径分布等参数,围绕分段分形孔径的变化规律进行研究,进一步掌握分段分形孔径的主控因素。

3) 加强应用分形理论对含不同资源类型的同一储层开展非均质性差异研究,结合生烃演化过程中TOC含量和孔隙结构类型的改变,进一步明确油气生成与分形维数变化的动态耦合关系。

4) 加强多重分形理论在非常规油气储层孔隙结构表征中的应用,更精确地表征非常规油气储层孔隙结构的非均质性特征。作为单重分形的扩展和叠加,多重分形方法能更好表征孔隙局部的复杂程度与差异性,从而更好地辨识孔隙分布的微小局部特征,并剔除单重分形中分段特征对分形维数计算的影响。

参考文献

- [1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 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, 2012, 33(2): 173–187
- [2] 邹才能,杨智,朱如凯,等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展. 地质学报, 2015, 89(6): 979–1007
- [3] 邹才能,邱振. 中国非常规油气沉积学新进展——

- “非常规油气沉积学”专辑前言. 沉积学报, 2021, 39(1): 1–9
- [4] 邹才能,朱如凯,白斌,等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857–1864
 - [5] 杨智,邹才能,吴松涛,等. 含油气致密储层纳米级孔喉特征及意义. 深圳大学学报(理工版), 2015, 32(3): 257–265
 - [6] 杨峰,宁正福,胡昌蓬,等. 页岩储层微观孔隙结构特征. 石油学报, 2013, 34(2): 301–311
 - [7] 王晓雯,关平,梁晓伟,等. 鄂尔多斯盆地长7段页岩油优质储层特征分析. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 459–469
 - [8] 王香增,张丽霞,雷裕红,等. 低熟湖相页岩内运移固体有机质和有机质孔特征——以鄂尔多斯盆地东南部延长组长7油层组页岩为例. 石油学报, 2018, 39(2): 141–151
 - [9] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071–1098
 - [10] 朱如凯,白斌,崔景伟,等. 非常规油气致密储层微观结构研究进展. 古地理学报, 2013, 15(5): 615–623
 - [11] Clarkson C R, Solano N, Bustin R M, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion. Fuel, 2013, 103: 606–616
 - [12] Han C C, Li G, Dan S H, et al. Study of fractal and multifractal features of pore structure in tight sandstone reservoirs of the Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin, Northwest China. ACS Omega, 2022, 7(35): 31352–31366
 - [13] Krohn C E. Fractal measurements of sandstones, shales, and carbonates. Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets, 1988, 93(B4): 3297–3305
 - [14] Yang F, Ning Z F, Liu H Q. Fractal characteristics of shales from a shale gas reservoir in the Sichuan Basin, China. Fuel, 2014, 115: 378–384
 - [15] Lai J, Wang G W, Wang Z Y, et al. A review on pore structure characterization in tight sandstones. Earth Science Reviews, 2018, 177: 436–457
 - [16] Li Z T, Liu D M, Cai Y D, et al. Adsorption pore structure and its fractal characteristics of coals by N₂ adsorption/desorption and FESEM image analyses. Fuel, 2019, 257: 116031

- [17] 刘义坤, 王永平, 唐慧敏, 等. 毛管压力曲线和分形理论在储层分类中的应用. 岩性油气藏, 2014, 26(3): 89–92
- [18] Guo R L, Xie Q C, Qu X F, et al. Fractal characteristics of pore-throat structure and permeability estimation of tight sandstone reservoirs: a case study of Chang 7 of the Upper Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 184: 1–13
- [19] 张庆莲, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 构造裂缝的分形研究. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(6): 853–861
- [20] Song W H, Wang D Y, Yao J, et al. Multiscale image-based fractal characteristic of shale pore structure with implication to accurate prediction of gas permeability. *Fuel*, 2019, 241: 522–532
- [21] 汪贺, 师永民, 徐大卫, 等. 非常规储层孔隙结构表征技术及进展. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 21–30
- [22] Sing K S W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57(4): 603–619
- [23] Hinai A A, Rezaee R, Esteban L, et al. Comparisons of pore size distribution: a case from the Western Australian gas shale formations. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 2014, 8: 1–13
- [24] 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征. 石油学报, 2012, 33(3): 419–427
- [25] Xiao D S, Lu Z Y, Jiang S, et al. Comparison and integration of experimental methods to characterize the full-range pore features of tight gas sandstone — a case study in Songliao Basin of China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 1412–1421
- [26] 曹涛涛, 宋之光, 刘光祥, 等. 氮气吸附法–压汞法分析页岩孔隙、分形特征及其影响因素. 油气地质与采收率, 2016, 23(2): 1–8
- [27] 姜振学, 唐相路, 李卓, 等. 川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构全孔径表征及其对含气性的控制. 地质前缘, 2016, 23(2): 126–134
- [28] Zhang L C, Lu S F, Xiao D S, et al. Pore structure characteristics of tight sandstones in the northern Songliao Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 170–180
- [29] Qiao P, Ju Y W, Cai J C, et al. Micro-nanopore structure and fractal characteristics of tight sandstone gas reservoirs in the Eastern Ordos Basin, China. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2021, 21(1): 234–245
- [30] Fu H J, Tang D Z, Xu T, et al. Characteristics of pore structure and fractal dimension of low-rank coal: a case study of Lower Jurassic Xishanyao coal in the southern Junggar Basin, NW China. *Fuel*, 2017, 193: 254–264
- [31] 贺伟, 钟孚勋, 贺承祖, 等. 储层岩石孔隙的分形结构研究和应用. 天然气工业, 2000, 20(2): 67–70
- [32] Mandelbrot B B. *Fractals: form, chance and dimension*. San Francisco: Freeman, 1977
- [33] Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature*. San Francisco: Freeman, 1982
- [34] 文志英, 井竹君. 分形几何和分维数简介. 数学的实践与认识, 1995(4): 20–34
- [35] Hardy G H. Weierstrass's Non-differentiable function. *Transactions of the American Mathematical Society*, 1916, 17(3): 301–325
- [36] Hausdorff F. Dimension and ausseres mass. *Mathematische Annalen*, 1918, 79(1/2): 157–179
- [37] 葛世荣. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究. 摩擦学学报, 1997, 17(1): 74–81
- [38] Gagnepain J J, Roques-Carmes C. Fractal approach to two-dimensional and three-dimensional surface roughness. *Wear*, 1986, 109: 119–126
- [39] Majumdar A, Tien C L. Fractal characterization and simulation of rough surfaces. *Wear*, 1990, 136(2): 313–327
- [40] Stupak P R, Kang J H, Donovan J A. Fractal characteristics of rubber wear surfaces as a function of load and velocity. *Wear*, 1990, 141(1): 73–84
- [41] Brown C A, Savary G. Describing ground surface texture using contact profilometry and fractal analysis. *Wear*, 1991, 141(2): 211–226
- [42] Ganti S, Bhushan B. Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces. *Wear*, 1995, 180(1/2): 17–34
- [43] Boschetti F, Dentith M D, List R D. A fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces. *Geophysics*, 1996, 61(4): 1095–1102
- [44] 韩小俊, 施泽进, 李亚林. 利用分形维拾取地震波初至的一种改进算法. 石油地球物理勘探, 2002, 37(1): 60–63
- [45] Pang J, North C P. *Fractals and their applicability in*

- geological wireline log analysis. *Journal of Petroleum Geology*, 1996, 19(3): 339–350
- [46] 成秋明, 张生元, 左仁广, 等. 多重分形滤波方法和地球化学信息提取技术与进展. *地学前缘*, 2009, 16(2): 185–198
- [47] 成秋明. 多维分形理论和地球化学元素分布规律. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2000, 25(3): 311–318
- [48] Cheng Q M, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 1994, 51: 109–130
- [49] Fan C H, Qin Q R, Hu D F, et al. Fractal characteristics of reservoir structural fracture: a case study of Xujiahe Formation in central Yuanba area, Sichuan Basin. *Earth Sciences Research Journal*, 2018, 22(2): 113–118
- [50] 谢焱石, 谭凯旋. 断裂构造的分形研究及其地质应用. *地质地球化学*, 2002, 30(1): 71–77
- [51] Bai H Y, Cao Y, Zhang H, et al. Applying data-driven-based logistic function and prediction — area plot to map mineral prospectivity in the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Minerals*, 2022, 12(10): 1287
- [52] Yang F, Wang G W, Santosh M, et al. Delineation of potential exploration targets based on 3D geological modeling: a case study from the Laoangou Pb-Zn-Ag polymetallic ore deposit, China. *Ore Geology Reviews*, 2017, 89: 228–252
- [53] 张哲儒, 毛华海. 分形理论与成矿作用. *地学前缘*, 2000, 7(1): 195–204
- [54] Yao Y B, Liu D M, Tang D Z, et al. Fractal characterization of adsorption-pores of coals from North China: an investigation on CH₄ adsorption capacity of coals. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 73(1): 27–42
- [55] Shan C A, Zhao W W, Wang F Q, et al. Nanoscale pore structure heterogeneity and its quantitative characterization in Chang7 lacustrine shale of the southeastern Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 187: 106754
- [56] Tan Q G, Kang Y L, You L J, et al. A comprehensive insight into the multiscale pore structure characterization of saline-lacustrine tight carbonate reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 187: 106744
- [57] 冯小哲, 祝海华. 鄂尔多斯盆地苏里格地区下石盒子组致密砂岩储层微观孔隙结构及分形特征. *地质科技情报*, 2019, 38(3): 147–156
- [58] 傅雪海, 秦勇, 张万红, 等. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究. *科学通报*, 2005, 50(增刊 1): 51–55
- [59] Zhao P Q, Wang Z L, Sun Z C, et al. Investigation on the pore structure and multifractal characteristics of tight oil reservoirs using NMR measurements: Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Sag, Junggar Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 1067–1081
- [60] Wang P F, Jiang Z X, Ji W M, et al. Heterogeneity of intergranular, intraparticle and organic pores in Longmaxi shale in Sichuan Basin, South China: evidence from SEM digital images and fractal and multifractal geometries. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 72: 122–138
- [61] Ge X M, Fan Y R, Li J T, et al. Pore structure characterization and classification using multifractal theory — an application in Santanghu basin of western China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 127: 297–304
- [62] Liu K Q, Ostadhassan M, Zou J, et al. Multifractal analysis of gas adsorption isotherms for pore structure characterization of the Bakken Shale. *Fuel*, 2018, 219: 296–311
- [63] 李润泽, 王长江, 李伟, 等. 基于铸体薄片的致密岩芯孔隙结构多重分形特征研究. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(6): 66–71
- [64] Yao Y B, Liu D M. Comparison of low-field NMR and mercury intrusion porosimetry in characterizing pore size distributions of coals. *Fuel*, 2012, 95: 152–158
- [65] Li Y, Wang Z S, Pan Z J, et al. Pore structure and its fractal dimensions of transitional shale: a cross-section from east margin of the Ordos Basin, China. *Fuel*, 2019, 241: 417–431
- [66] Li X H, Gao Z Y, Fang S Y, et al. Fractal characterization of nanopore structure in shale, tight sandstone and mudstone from the Ordos Basin of China using nitrogen adsorption. *Energies*, 2019, 12(4): 583
- [67] Pfeifer P, Wu Y J, Cole M W, et al. Multilayer adsorption on a fractally rough surface. *Phys Rev Lett*, 1989, 62(17): 1997–2000
- [68] Avnir D, Jaroniec M. An isotherm equation for adsorption on fractal surfaces of heterogeneous porous materials. *Langmuir*, 1989, 5: 1431–1433
- [69] Neimark A V, Unger K K. Method of discrimination of surface fractality. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1993, 158: 412–419

- [70] Jiang F J, Chen D, Chen J, et al. Fractal analysis of shale pore structure of continental gas shale reservoir in the Ordos Basin, NW China. *Energy & Fuels*, 2016, 30(6): 4676–4689
- [71] Zhang J Z, Li X Q, Wei Q, et al. Characterization of full-sized pore structure and fractal characteristics of marine-continental transitional longtan formation shale of Sichuan Basin, South China. *Energy & Fuels*, 2017, 31(10): 10490–10504
- [72] Wang X M, Jiang Z X, Jiang S, et al. Full-scale pore structure and fractal dimension of the longmaxi shale from the Southern Sichuan Basin: investigations using FE-SEM, gas adsorption and mercury intrusion porosimetry. *Minerals*, 2019, 9(9): 43
- [73] Ji W M, Song Y, Jiang Z X, et al. Fractal characteristics of nano-pores in the Lower Silurian Longmaxi shales from the Upper Yangtze Platform, south China. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 78: 88–98
- [74] 戴方尧, 胡海燕, 张爱华. 有机质页岩孔隙分形模型的适用性研究. *煤炭科学技术*, 2019, 47(2): 168–175
- [75] 熊益华, 周尚文, 焦鹏飞, 等. 基于低温CO₂吸附的煤和页岩微孔结构分形分析. *天然气地球科学*, 2020, 31(7): 1028–1040
- [76] Mahajan O P. CO₂ Surface area of coals: the 25-year paradox. *Carbon*, 1991, 29(6): 735–742
- [77] Bu H L, Ju Y W, Tan J Q, et al. Fractal characteristics of pores in non-marine shales from the Huainan coal-field, eastern China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 24: 166–177
- [78] Zhao J L, Tang D Z, Qin Y, et al. Fractal characterization of pore structure for coal macrolithotypes in the Hancheng area, southeastern Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 178: 666–677
- [79] Wang F Y, Yang K, You J X, et al. Analysis of pore size distribution and fractal dimension in tight sandstone with mercury intrusion porosimetry. *Results in Physics*, 2019, 13: 102283
- [80] 邓浩阳, 司马立强, 吴玟, 等. 致密砂岩储层孔隙结构分形研究与渗透率计算——以川西坳陷蓬莱镇组、沙溪庙组储层为例. *岩性油气藏*, 2018, 30(6): 76–82
- [81] 马立民, 林承焰, 范梦玮. 基于微观孔隙结构分形特征的定量储层分类与评价. *石油天然气学报*, 2012, 34(5): 15–19
- [82] Tao G, Mohan Kelkar. A more general capillary pressure curve and its estimation from production data // SPE108180-MS. Denver, 2007: 124–128
- [83] Zhang B Q, Li S F. Determination of the surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1995, 34(4): 1383–1386
- [84] Washburn E W. The dynamics of capillary flow. *Physical Review*, 1921, 2(17): 273–283
- [85] Song Z Z, Liu G D, Yang W W, et al. Multi-fractal distribution analysis for pore structure characterization of tight sandstone — a case study of the Upper Paleozoic tight formations in the Longdong District, Ordos Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 92: 842–854
- [86] 司马立强, 杨国栋, 吴丰, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组致密砂砾岩孔隙分形特征及影响因素探讨. *测井技术*, 2016, 40(5): 609–616
- [87] 张宪国, 张涛, 林承焰. 基于孔隙分形特征的低渗透储层孔隙结构评价. *岩性油气藏*, 2013, 25(6): 40–45
- [88] 吴浩, 郭英海, 张春林, 等. 致密油储层微观孔喉结构特征及分类——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠统延长组长7段为例. *东北石油大学学报*, 2013, 37(6): 12–17
- [89] 文慧俭, 闫林, 姜福聪, 等. 低孔低渗储层孔隙结构分形特征. *大庆石油学院学报*, 2007, 31(1): 15–18
- [90] Wang F, Cheng Y P, Lu S Q, et al. Influence of coalification on the pore characteristics of middle-high rank coal. *Energy & Fuels*, 2014, 28(9): 5729–5736
- [91] 井康康, 董旭, 蔺广泉, 等. 低渗储层孔隙结构的分形特征研究——以鄂尔多斯盆地永宁油田顺宁–洛河北区长6储层为例. *非常规油气*, 2021, 8(4): 19–25
- [92] Siddiqui M A Q, Ueda K, Komatsu H, et al. Caveats of using fractal analysis for clay rich pore systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 195: 107622
- [93] Pan J N, Wang K, Hou Q L, et al. Micro-pores and fractures of coals analysed by field emission scanning electron microscopy and fractal theory. *Fuel*, 2016, 164: 277–285
- [94] 毛灵涛, 连秀云, 郝丽娜. 基于数字体图像三维裂隙的分形计算及应用. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(6): 1134–1139
- [95] Voss R F, Laibowitz R B, Alessandrini E I. Fractal

- geometry of percolation in thin gold films. New York: Plenum Press, 1985: 279–288
- [96] 徐祖新, 郭少斌, 乔辉, 等. 页岩气储层孔隙结构分形特征研究. 非常规油气, 2014, 1(2): 20–25
- [97] Wang H M, Liu Y, Song Y C, et al. Fractal analysis and its impact factors on pore structure of artificial cores based on the images obtained using magnetic resonance imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 86: 70–81
- [98] 彭瑞东, 杨彦从, 鞠杨, 等. 基于灰度CT图像的岩石孔隙分形维数计算. 科学通报, 2011, 56(26): 2256–2266.
- [99] 张子涵, 魏文, 张杰, 等. 基于CT扫描红层砂岩孔隙多尺度分形维数的确定方法. 地质科技通报, 2022, 41(3): 254–263
- [100] Guo X B, Huang Z L, Zhao L B, et al. Pore structure and multi-fractal analysis of tight sandstone using MIP, NMR and NMRC methods: a case study from the Kuqa depression, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 178: 544–558
- [101] Guan M, Liu X P, Jin Z J, et al. The heterogeneity of pore structure in lacustrine shales: insights from multifractal analysis using N_2 adsorption and mercury intrusion. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104150
- [102] Liu K Q, Ostadhassan M. Quantification of the microstructures of Bakken shale reservoirs using multifractal and lacunarity analysis. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 39: 62–71
- [103] Jelinek H, Karperien A, Corforth D, et al. Micro-mod: an L-systems approach to neural modelling // Sixth Australia-Japan Joint Workshop on Intelligent and Evolutionary Systems. Canberra Australia, 2002: 1–8
- [104] Muller J. Characterization of pore space in chalk by multifractal analysis. *Journal of Hydrology*, 1996, 187: 215–222
- [105] Zhou H, Perfect E, Lu Y Z, et al. Multifractal analyses of grayscale and binary soil thin section images. *Fractals*, 2011, 19(3): 299–309
- [106] Posadas A N D, Giménez D, Bittelli M, et al. Multifractal characterization of soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1361–1367
- [107] Zhou Y, Wu S T, Li Z P, et al. Multifractal study of three-dimensional pore structure of sand-conglomerate reservoir based on CT images. *Energy & Fuels*, 2018, 32(4): 4797–4807
- [108] 陈燕燕, 邹才能, Maria M, 等. 页岩微观孔隙演化及分形特征研究. 天然气地球科学, 2015, 26(9): 1646–1656
- [109] 王志伟, 王民, 卢双舫, 等. 基于高压压汞法的泥页岩储层分形研究——以松辽盆地青山口组湖相泥岩为例. 河南科学, 2015, 33(7): 1206–1213
- [110] Yu Y X, Luo X R, Wang Z X, et al. A new correction method for mercury injection capillary pressure (MICP) to characterize the pore structure of shale. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 68: 102896
- [111] 邓涛, 李勇, 汪正江, 等. 四川盆地乐地 1 井须家河组泥页岩段孔隙结构及分形特征差异性对比. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(6): 709–721
- [112] Wang M, Xue H T, Tian S S, et al. Fractal characteristics of Upper Cretaceous lacustrine shale from the Songliao Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 144–153
- [113] 王民, 焦晨雪, 李传明, 等. 东营凹陷沙河街组页岩微观孔隙多重分形特征. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 72–79
- [114] 白莹, 白斌, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组 7 段页岩孔隙特征及页岩油赋存方式. 石油学报, 2022, 43(10): 1395–1408
- [115] 赵迪斐, 郭英海, 解德录, 等. 基于低温氮吸附实验的页岩储层孔隙分形特征. 东北石油大学学报, 2014, 38(6): 100–108