

渤海湾盆地沙河街组页岩油 储层微观特征研究

田同辉 陆正元 王 军 著
冯明石 刘 毅 戚明辉



科学出版社

渤海湾盆地沙河街组页岩油 储层微观特征研究

田同辉 陆正元 王 军 著
冯明石 刘 毅 戚明辉



科学出版社
北京

内 容 简 介

本书以济阳拗陷沙河街组的4口页岩油密闭取心井作为研究对象,系统研究了页岩油储层岩石学特征、页岩油储层微观孔隙特征和流体赋存特征。提出页岩油储层岩石学分类方案,利用场发射环境扫描电子显微镜、氮气等温吸附实验和高分辨率图像定量分析等分析技术手段定量表征页岩油储层的微观储集空间特征,分析页岩油储层物性特征及其控制因素,探讨页岩油储层的流体赋存特征。

本书可供非常规油气地质评价和页岩油开发等研究方向的技术人员及大专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

渤海湾盆地沙河街组页岩油储层微观特征研究/田同辉等著. —北京:科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-058565-3

I. ①渤… II. ①田… III. ①渤海湾盆地—油页岩—储集层特征—研究
IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 195668 号

责任编辑: 万群霞 崔元春 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第一版 开本: 787×1092 1/16

2018年8月第一次印刷 印张: 9 1/2 插页: 4

字数: 223 000

定价: 156.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

北美地区页岩油气的商业性开采的成功使页岩油气成为重要的接替资源。我国在松辽、渤海湾(辽河、濮阳、济阳等拗陷)及南襄等中生代盆地中,均不同程度地获得了工业性页岩油流(李吉君等,2014;姜在兴等,2014;薛海涛等,2015;聂海宽等,2016)。截至2016年年底,在胜利油田渤海湾盆地主力烃源岩沙河街组沙四上亚段—沙三下亚段泥页岩中有320口探井见油气显示,其中40余口井获工业油气流,以沾化凹陷和东营凹陷居多(王勇等,2016)。

现有研究证实渤海湾盆地沙河街组页岩油储层具备形成页岩油气的条件和勘探潜力(王永诗等,2013a;张林晔等,2014)。但与北美地区海相地层页岩油气不同,渤海湾盆地沙河街组页岩油储层为陆相沉积,受物源方向多、物源区近、母岩类型多等影响,湖相页岩油具有岩石类型多、非均质性强和储集空间类型多样等特征。页岩油储层的矿物岩石学特征、储集空间类型、孔径分布和储集空间结构等特征将直接影响储层的有效孔隙度、渗透率、流体赋存运移和储层岩石力学性质(Wang and Reed, 2009; Nelson, 2009; Ambrose et al., 2010; Kuila and Prasad, 2013)。系统研究渤海湾盆地沙河街组页岩油储层的岩性特征、微观储集空间特征、物性特征和烃类赋存特征是客观评价页岩油储集条件及可改造条件的关键基础问题。

本书依托国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“陆相页岩油储集性能与流动机理”(2014CB239103)、中国石油化工股份有限公司重点科技攻关课题“页岩油开发基础研究”(P13059)和四川省教育厅基金重点项目“致密储层微观结构定量表征方法研究”(17ZA0038),以济阳拗陷沙河街组的4口页岩油密闭取心井作为主要研究对象,在页岩油储层岩石学特征研究的基础上,着重分析页岩油储层的微观孔隙特征和流体赋存特征。系统研究渤海湾盆地沙河街组页岩油储层的岩石学特征及其岩石分类,利用场发射环境扫描电子显微镜、氮气等温吸附实验和高分辨率图像定量分析等分析技术定量表征页岩油储层的微观储集空间特征,分析储层物性特征及其控制因素,研究页岩油储层的流体赋存特征,建立了不同岩性页岩油储层的储集空间分布、物性参数及其流体赋存特征的关系,这些成果为页岩油资源评价和有效开发提供了基础的科学依据。

本书由田同辉和陆正元统稿定稿。其中第1章由刘毅和王军撰写,第2章由田同辉和王军撰写,第3章由冯明石、田同辉和刘毅撰写,第4章由田同辉、陆正元、刘毅和戚明辉撰写,第5章由田同辉、刘毅和王军撰写。

本书在研究过程中得到了中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司刘显太副总地质师、中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院杨勇院长和杜玉山副院长的指导和支持,中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院滩海研

究室的徐耀东和晁静参与了部分研究工作；本书的出版得到了油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学)的资助；王兴建、孟祥豪等完成了部分测试工作，成都理工大学研究生姜自然、温仁均、张磊磊、张凤伟、刘高才、孙冬华和田玉敏等参与了部分取样、测试和分析工作，在此一并表示感谢！

由于水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017年12月

于山东东营

目 录

前言

第 1 章 页岩油研究现状	1
1.1 细粒沉积岩岩石学分类	1
1.2 页岩油储层特征研究	2
1.2.1 储层微观分析的技术手段	2
1.2.2 储集空间分类	5
1.2.3 储层物性影响因素	7
1.3 页岩油流体赋存研究	8
1.4 胜利油区页岩油的相关研究	9
第 2 章 区域地质概况	11
2.1 区域构造背景	11
2.2 地层沉积体系	12
2.2.1 沙四段	13
2.2.2 沙三段	14
2.2.3 沙二段	14
2.2.4 沙一段	14
2.3 地球化学特征	15
第 3 章 页岩油储层岩石学	16
3.1 储层矿物学特征	16
3.1.1 碳酸盐矿物	18
3.1.2 黏土矿物	19
3.1.3 陆源碎屑	21
3.1.4 其他矿物	21
3.2 细粒沉积岩分类方案	22
3.3 储层岩性特征	25
3.3.1 单井岩石类型	25
3.3.2 主要岩性特征	31
3.3.3 岩性组合特征	34
第 4 章 页岩油储层特征	41
4.1 储集空间特征	41
4.1.1 样品及观察手段	41
4.1.2 储集空间类型	45
4.2 基于高分辨率背散射图像的孔隙特征表征	54
4.2.1 高分辨率背散射图像分析技术	54
4.2.2 不同类型孔隙的孔径与面孔率特征	55

4.2.3	不同岩性的孔隙发育特征	60
4.3	基于氮气等温吸附的孔隙结构表征	71
4.3.1	氮气等温吸附实验原理	72
4.3.2	氮气吸附等温线特征	74
4.3.3	孔径分布	79
4.3.4	孔隙结构特征参数表征	83
4.4	储层物性特征	87
4.5	物性影响因素分析	93
4.5.1	矿物成分	94
4.5.2	有机质生烃	102
4.5.3	成岩作用及埋藏演化	107
4.5.4	构造作用	109
4.5.5	热液作用	110
第 5 章	页岩油流体赋存特征	113
5.1	页岩油流体的赋存空间	113
5.2	页岩油含油性分级	117
5.2.1	参数的校正	118
5.2.2	页岩油含油性分级标准	120
5.2.3	$\Delta \lg R$ 模型计算参数	124
5.3	页岩油流体赋存特征	128
参考文献	参考文献	135
彩图		

第1章 页岩油研究现状

页岩油 (shale oil) 的早期概念是指浅埋藏的富低熟有机质及高灰分的固体可燃油页岩, 经过露天开采、碎裂研磨和催化加氢等工序而获得的一种人造石油 (Trager, 1920)。随着非常规油气勘探开发研究的深入, 页岩油一词有了新的内涵, 专指以游离态 (含凝析态) 和吸附态等方式赋存于有效生烃泥页岩层系中, 且具有勘探开发意义的非气态烃类, 其特点是“源储一体、滞留聚集” (邹才能等, 2012)。页岩油所赋存的主体介质是曾经有过生油历史或现今仍处于生油状态的泥页岩地层, 也包括从源岩中排出并短距离运移至相邻的致密砂岩、石灰岩、白云岩等薄层中的石油资源 (邹才能等, 2011a, 2013; 张金川等, 2012; 周庆凡和杨国丰, 2012), 如北美地区 Bakken、Monterey、Barnett、Eagle Ford、Duvernay 等页岩油聚集 (Angulo and Buatois, 2012; Milliken et al., 2012; Jennings and Antia, 2013) 及中国的鄂尔多斯延长组、松辽盆地白垩系、江汉盆地潜江组、辽河拗陷沙河街组等的页岩油聚集 (贾承造等, 2012a, 2012b; 李吉君等, 2014; 卢双舫等, 2016; 王芙蓉等, 2016)。

本书中渤海湾盆地沙河街组页岩油是指以游离态和吸附态等方式赋存于富有机质泥页岩层系, 也包括其中的少量粉砂岩和碳酸盐岩薄层, 一般不能获得自然产能, 但通过水平井多段压裂等技术手段可能实现规模经济开采的烃类资源。

1.1 细粒沉积岩岩石学分类

细粒沉积物 (fine-grained sediments) 是指粒径小于 $62\mu\text{m}$ 的黏土级和粉砂级沉积物, 成分主要包括黏土矿物、碳酸盐、粉砂、生物硅质、有机质等 (Tucker, 2001; Aplin and Macquaker, 2011)。由细粒沉积物组成的沉积岩称为细粒沉积岩, 其中具有页理发育特征的称为页岩, 不具有页理发育特征的称为泥质岩, 在油气勘探开发研究中笼统称为泥页岩 (冯增昭, 1994)。

目前国际通用标准中, 将粒级小于 $1/256\text{mm}$ 的细粒沉积物称为黏土质, 其成分以黏土矿物为主。粒级为 $1/256\sim 1/16\text{mm}$ 的细粒沉积物称为粉砂质。岩石分类定名中的泥质包括伊利石、蒙脱石、高岭石等黏土矿物, 也包括粒径小于 $62.5\mu\text{m}$ 的石英、长石等陆源碎屑 (赵澄林和朱筱敏, 2001; 郝运轻等, 2012)。

随着页岩油勘探开发的深入, 细粒沉积岩的分类、岩相划分等方面的研究逐渐引起重视。James (2007) 依据页岩结构、矿物成分和化石特征将美国 Fort Worth 盆地 Barnett 泥页岩划分为有机质黑色页岩、化石页岩、白云石页岩和磷酸页岩 4 类。鄢继华等 (2015) 基于 X 射线衍射数据提出以碳酸盐矿物、长英质矿物和黏土矿物作为端元的三端元四组分细粒沉积岩定名方法, 另外一种组分为方沸石。董春梅等 (2015a) 提出了考虑有机质组分的“四组分三端元”分类方法。依据黏土矿物、碳酸盐矿物和长英质矿物作为三端元

的划分方案中,毛俊莉等(2016)结合不同成分的含量进一步对混合型泥页岩进行划分,陈世悦等(2016)结合构造层理特征将细粒沉积岩划分为8类岩相17个小类。

目前,针对非常规页岩油气细粒沉积岩的分类命名方案,均是在碎屑岩分类方案(石英、长石和岩屑作为三端元)及碳酸盐岩类分类方案(黏土岩、石灰岩和白云岩作为三端元)的基础上,结合地区实际的矿物成分、沉积构造、有机质等特征改进而来的,尚未形成统一的标准和认识。

由于泥页岩层系细粒沉积岩岩石定名方案较多,多以碳酸盐矿物、黏土矿物、粉砂(陆源碎屑或长石+石英)作为三端元进行岩石定名,同时加入岩石构造特征或有机质特征进行综合命名,在混合沉积岩区区分不明显,缺少适用于渤海湾盆地沙河街组页岩油储层矿物岩石分类、储层微观及宏观分析的细粒沉积岩命名方案。

1.2 页岩油储层特征研究

对于微纳米级孔径的页岩油储层而言,储层的微观储集空间类型、孔隙的孔径分布与结构、储层物性等方面的研究尤为重要。泥页岩层系孔隙特征的探索和观察开始于20世纪70年代,O'Brien(1971)观察高岭石和伊利石絮状物,首次发现在絮状的黏土矿物内,片状颗粒通过边缘与边缘、边缘与面、面与面之间的定向接触形成“纸房构造”(card-house)。O'Brien和Slatt(1990)列举了一些具有微层理构造的黏土矿物集合体实例,认为这种“纸房构造”和开放孔隙能够提供大于甲烷分子直径的孔隙空间。Katsube(1992)认为在深埋藏条件下,直径大于25nm的孔隙较少,孔隙主要分布在2.7~11.55nm。Jarvie等(2007)发现泥页岩有机质生烃可以形成纳米级孔隙,它能够为岩石提供更多的孔隙空间。Singh等(2009)提出微观储层的“纳米级孔隙”概念。我国邹才能等(2011b)在四川盆地须家河组和鄂尔多斯盆地延长组发现了小于1 μm 的纳米级孔隙。

随着科技的发展与进步,一些先进的技术手段逐渐被引入微观特征的研究中。进入21世纪后,针对泥页岩储层的相关概念体系和系统的储集空间分类方案逐步建立起来,同时对于微观孔隙成岩演化的研究也初见成效。

1.2.1 储层微观分析的技术手段

北美地质人员率先运用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、X射线衍射成像、透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)、原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)、共聚焦激光扫描电子显微镜(confocal laser scanning microscope, CLSM)、核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)、氩离子抛光-环境扫描电子显微镜(Ar-environmental scanning electron microscope, Ar-ESEM)、低压 N_2 和 CO_2 吸附、纳米CT扫描光谱、小角散射(small angle scattering, SAS)背散射电子成像、高压压汞等技术方法,研究泥页岩储层微观孔隙结构、连通性和孔隙密度等,取得了许多创新性认识和成果(Bustin et al., 2008; Javadpour, 2009; Smith et al., 2009; Sondergeld et al., 2010; Bernard et al., 2012; Slatt et al., 2013; Saidian et al., 2014)。储层微观特征的代表技术大致可分为以下三大类。

1. 直接观测法

扫描电子显微镜是储层微观特征研究中最常用的图像学观测研究工具。由于页岩油储层主要由微纳米级孔径的孔隙组成,在高分辨率的场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscope, FESEM)的基础上对孔隙进行观察并获取图像加以分析,结合X射线能谱进行定性评估,能有效获得页岩油储层中孔隙的颗粒接触关系、孔隙形态和孔隙大小等信息,结合统计学方法还能定量获取孔径分布、面孔率等信息(Giffin et al., 2013; 焦堃等, 2014)。氩离子抛光技术能够有效避免颗粒遮挡造成的孔隙假象,与场发射扫描电子显微镜的联用也是目前主流的图像学研究手段,此种技术在国内外已有大量应用(Passey et al., 2010; Liu et al., 2011; Chalmers et al., 2012; Klaver et al., 2012)。目前,针对页岩油储层运用场发射扫描电子显微镜图像的研究多停留在描述微纳米级孔隙的形态与结构性分析,高分辨率图像定量分析的研究较少。鉴于图像定量分析能够获取的信息量和实用性,如何建立页岩油储层图像定量分析方法,并与储层评价与勘探开发等实际问题相结合,是油气开发地质工作者亟待解决的问题。

2. 间接测定法

将 N_2 、 CO_2 、 CH_4 等气体或使用汞等非润湿性流体在不同温压条件下注入样品并记录流体注入量,获得连续的实验数据值,通过理论模型计算能够获取样品微观孔隙的孔径分布、比表面积(specific surface area)等信息,这些方法在储层孔喉研究中应用广泛。

1) 低温气体等温吸附法

低温气体等温吸附法是在等温条件下将吸附质(N_2 或 CO_2)气体注入吸附剂(样品)内,通过记录不同压力条件下吸附质在介质表面的气体吸附量,根据理论模型解译并计算出吸附剂内表面和孔隙性质的方法。该方法所能测定的最小理论孔径为吸附质气体的分子直径,最大直径一般不超过100nm。一般而言, N_2 吸附适用于孔径为0.4~50nm的孔隙测定, CO_2 吸附适用于孔径为0.4~2nm的孔隙测定^①。

在表征多孔介质的储层特征时,选取适当的模型能够提高孔隙的解译精度。Langmuir(1917)假设表面只存在一种吸附位并且只吸附单个吸附质分子,从动力学角度推导出了单分子层吸附状态方程。当吸附质气体温度低于正常沸点时往往发生多分子层吸附,Brunauer等(1938)假设表面吸附作用远大于吸附质分子间的相互作用,提出了多分子层吸附模型并建立了BET等温方程,该理论适用于表面化学性质均匀的固体表面吸附。以Kelvin方程为基础的BJH法(Barrett, et al, 1951)与毛细管凝聚现象有关,能够有效表征孔径范围中孔(2~50nm)的孔径分布,但对于微孔的表征准确率较低。由Horvath和Kawazoe(1983)建立的HK方法和Saito-Foley建立的SF方法是致力于计算微孔样品有效孔径分布的半经验分析方法,分别适用于裂缝状微孔(如活性炭、层状黏土等)和孔截面

^① 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2008. 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度第2部分: 气体吸附法分析介孔和大孔: GB/T21650.2-2008/ISO 15901-2: 2006.

呈椭圆状的微孔材料(如沸石分子筛等)。相对于宏观热力学方法,密度泛函理论(density functional theory, DFT)和计算机模拟方法(如 Monte Carlo 拟合)的结合不仅真实反映了孔中受限流体的热力学性质,而且更适用于表征微孔和中孔全范围孔隙结构的分析(杨正红和 Thommes, 2005)。经过实验验证,采用 N_2 低温吸附得到的吸附等温线与非定域密度函数理论(nonlocal density functional theory, NLDFIT)的模拟结果重合,应用 BJH 法分析得到的孔径结果明显比 NLDFIT 得到的小(陈永, 2010)。

近些年,低温气体等温吸附法在非常规泥页岩储层孔隙研究领域得到了广泛应用,通过分析泥页岩中孔隙的分布和比表面积,建立孔隙特征与矿物组分、有机碳含量(TOC)和有机质成熟度(R_o)间的相互关系,探寻微观孔隙演化的控制因素(郭为等, 2013; 刘国恒等, 2015; 何斌等, 2015; 赵靖舟等, 2016)。同时,低温气体等温吸附法与其他微观孔隙研究手段的综合使用,也达到了良好的表征效果(张先伟和孔令伟, 2013; 杨峰等, 2014)。

2) 高压压汞法

压汞法(水银注入法)是利用压汞仪在不同压力条件下,将汞压入多孔介质以获取孔隙结构特征的方法,也是国内外用以测定毛管压力最常用的方法。压汞仪工作压力为 33000psi^①或 60000psi,理论上可测量的孔隙喉道分布范围为 0.004~440 μm 。

压汞法在研究常规储层孔隙喉道分布方面具有较大优势,但对于泥页岩样品的测试和分析,压汞法具有一定的限制及分析误差。一方面,根据 Wardlaw(1976)的理想模型,进汞和退汞毛管压力曲线能综合反映岩石孔隙结构特征。当孔喉比较大时,测量结果才具有较高的精确度。页岩油储层黏土矿物含量较高,孔隙内表面粗糙且孔喉比小,测量结果易产生误差。另一方面,根据 Washburn 方程计算,对于半径为 7.26nm 的孔隙需要施加 101.3MPa 的压力才能将汞压入。应用压汞法时,测试的孔隙越小,需要的压力越大。泥页岩具有低孔低渗、微纳米级孔径的特点,高压下孔结构会发生可逆和不可逆变形,许多纳米级孔都会变形甚至压塌,卸压后样品内存有残留汞,致使结果偏离理论值(陈永, 2010)。因此,高压压汞法对纳米级孔的测定不够准确。基于以上原因及研究区实际储层地质条件,本书不采用高压压汞法进行储层特征分析。

3. 数值模拟法

高分辨率电镜图像在孔隙形态观察时便捷直观,对兴趣点进行深入观察后,可获取高分辨率平整截面对一定区域构建孔隙空间三维模型,实现储层的三维结构表征(Keller et al., 2011; Curtis et al., 2012; Dewers et al., 2012; Bai et al., 2013)。此外,国内利用微计算机断层扫描技术(microcomputed tomography, Micro-CT)对储层三维结构特征进行表征,在泥页岩及致密储层微孔三维空间展布研究中取得了较好的结果。鉴于数值模拟法表征技术对设备硬件要求较高,成本投入高,应用并不广泛。

^① 1psi=6.89476 $\times 10^3$ Pa。

1.2.2 储集空间分类

纵观国内外针对泥页岩储层微观储集空间的研究进展,储集空间的划分依据及标准繁多,目前尚未达成统一的认识。储层微观孔隙分类方案较多,具有代表性的分类方案主要包括基于微孔隙大小(孔径)的分类方案、基于孔隙产状和结构的分类方案和基于孔隙成因的分类方案3种。

1. 基于微孔隙大小(孔径)的分类

基于微孔隙大小(孔径)的分类方案较多(图1.1)。霍多特(1996)针对煤层气储层微观孔隙提出的分类方案:微孔($<10\text{nm}$)、过渡孔($10\sim 100\text{nm}$)、中孔($100\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$)、大孔($>1\mu\text{m}$)。Chalmers等(2009)建议泥页岩地质工作者采用国际理论和应用化学协会(International Union of Pure and Applied chemistry, IUPAC)(Sing et al., 1985; Rouquerol et al., 1994)针对化学材料物理吸附特征提出的分类方案,即微孔($\leq 2\text{nm}$)、中孔($2\sim 50\text{nm}$)和大孔($\geq 50\text{nm}$)。邹才能等(2010a, 2010b)认为我国致密砂岩气的主体微观孔隙集中分布在 $300\sim 900\text{nm}$,泥页岩主体微观孔隙为分布在 $80\sim 200\text{nm}$ 的纳米级孔隙,因此将微观孔隙进一步划分纳米级孔隙($\leq 1\mu\text{m}$)和微米级孔隙($1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$)。Loucks等(2009)发现颗粒内的有机纳米孔通常具有不规则、气泡状和椭圆形横截面,孔径范围为 $5\sim 750\text{nm}$,主要分布在 100nm 左右。Loucks等(2012)认为相比于Rouquerol的分类方案,Choquette和Pray(1970)针对碳酸盐岩的孔隙分类方案更适用于泥页岩微观孔隙划分,即皮米孔($\leq 1\text{nm}$)、纳米孔($1\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$)、微孔($1\sim 62.5\mu\text{m}$)、中孔($62.5\sim 400\mu\text{m}$)和大孔($\geq 400\mu\text{m}$)。钟太贤(2012)在中国南海相页岩孔隙结构研究中,将储集空间分为微孔($<10\text{nm}$)、过渡孔($10\sim 100\text{nm}$)、中孔($100\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$)、大孔($1\sim 10\mu\text{m}$)和裂缝($>10\mu\text{m}$)。张廷山等(2014)在四川盆地南部泥页岩微观孔隙特征研究中,基于孔隙大小将储集空间划分为微孔($<10\text{nm}$)、小孔($10\sim 100\text{nm}$)、中孔($100\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$)、大孔($>1\mu\text{m}$)。根据渤海湾盆地沙河街组页岩油储层微观孔隙孔径分布特征,本书采用IUPAC的孔隙孔径分类方案。

2. 基于孔隙产状和结构的分类

Bennett等(1991)将“纸房构造”的概念引入泥页岩储层的研究中。因此,黏土矿物集合体间的粒间孔隙被认为是泥页岩储层中最早发现的储集空间。随着将光学显微镜、氩离子抛光-环境扫描电子显微镜、CT扫描等先进观察技术引入储层微观特征研究,可以在获取高分辨率图像的基础上直观分析微纳米孔隙的大小、形状及颗粒成分,发展出以孔隙产状-结构为依据的分类方案。

Milner等(2010)在研究东得克萨斯盆地Haynesville泥页岩时提出了基质晶间孔与有机质孔。Slatt和O'Brien(2011)在Barnett和Woodford泥页岩孔隙网格研究中提出了颗粒内孔、泥质絮状孔、粪球粒内孔、化石碎屑内孔、有机质孔和微裂缝。Loucks等(2012)提出了以粒(晶)间孔、粒(晶)内孔和有机质孔为主的三端元泥页岩孔隙分类方案,该方案被广大学者借鉴,并基于此进一步提出了适合不同地区的分类方案。陈一鸣等(2012)

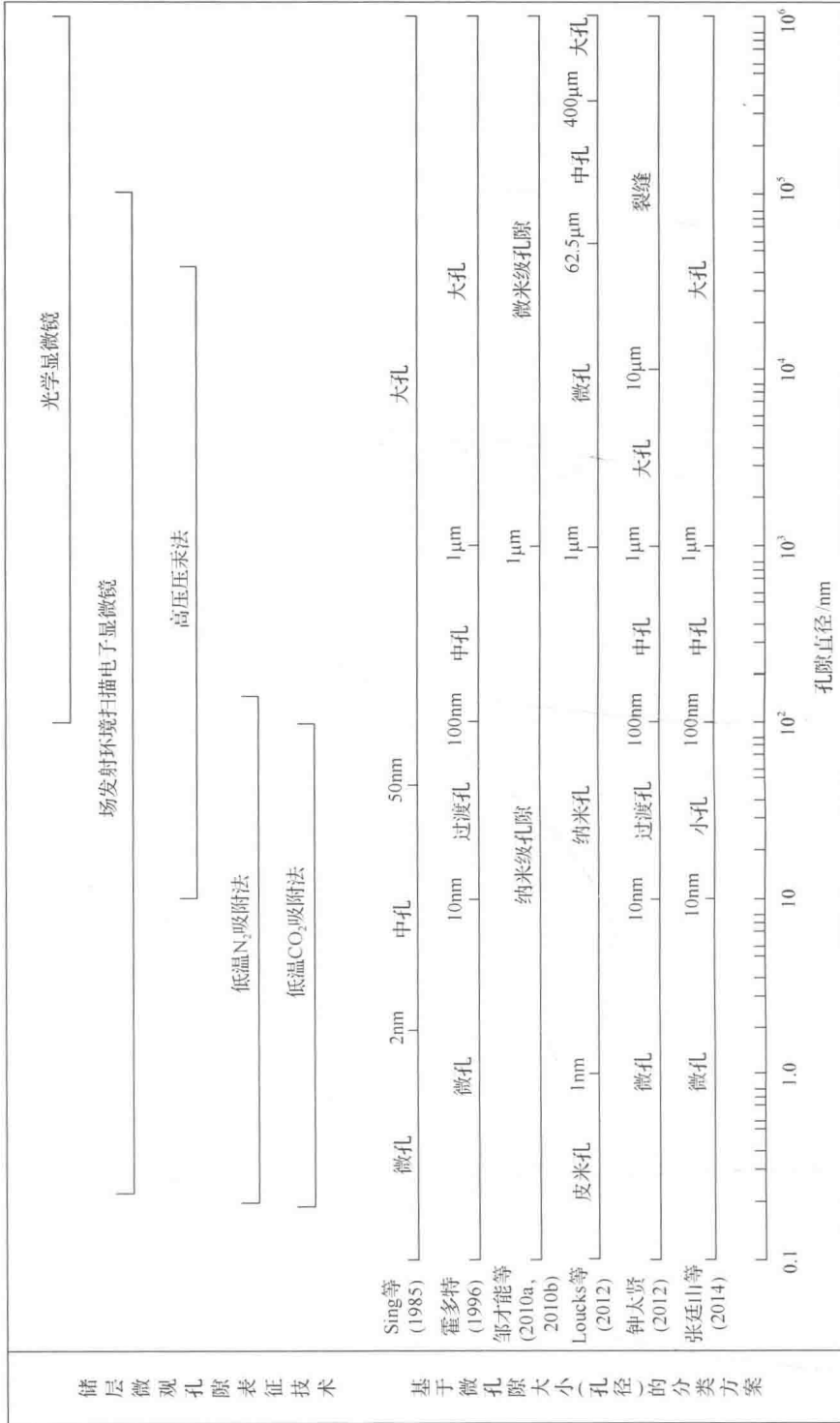


图 1.1 页岩油储层微观孔隙表征技术及孔径分类方案

对比了北美泥页岩储层孔隙类型研究方法,综合了多名学者的研究观点后,将孔隙类型划分为有机质孔、化石孔、矿物质孔、粒间孔和微孔道5种类型。崔景伟等(2012)认为泥页岩孔隙分为粒间孔、粒内孔和有机质孔3种类型,不仅能够兼顾油气流动差异和油气润湿性。杨元等(2012)观察了不同岩性样品中孔隙的大小、形态和分布特征,以孔隙形态和成因为基础,将微观孔隙划分为9种类型:沥青孔、有机质孔、絮凝成因孔、生物孔、草莓状黄铁矿晶间孔、黏土矿间孔、矿物溶孔、粒屑孔和微裂缝。胡琳等(2013)基于泥页岩孔隙结构的分形特征角度,将孔隙划分为凝聚-吸附孔隙、渗透孔隙和吸附孔隙3种类型。杨峰等(2013)依据孔隙发育位置将孔隙类型划分为5种类型,分别为烃类纳米孔、黏土矿物粒间孔、岩石骨架矿物孔、古生物化石孔和微裂缝。

3. 基于孔隙成因的分类

朱筱敏等(2007)通过对比济阳拗陷不同次级凹陷古近系孔隙演化分布特征,将页岩油储层孔隙类型分为原生孔隙和次生孔隙两大类。原生孔隙包括压缩原生粒间孔、胶结剩余粒间孔和杂基微孔隙,次生(溶蚀)孔隙包括粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔和超大孔。朱如凯等(2013)从孔喉成因与分布位置角度进行微观孔隙结构表征研究,认为中国南海相泥页岩孔隙分布范围为20~890nm,包括有机质纳米孔与粒内孔;陆相泥页岩孔隙主体介于30~200nm,孔隙类型为有机质孔和基质孔;致密灰岩层孔隙类型包括粒间溶孔、方解石粒内溶孔与微裂缝。何建华等(2014)以孔隙成因与孔隙发育位置作为主要的分类依据,将微观孔隙分为原生沉积型、成岩后生改造型及混合成因3个大类,并将其进一步划分为古生物化石孔、粒间孔、粒内孔及有机质孔等10个亚类。

4. 裂缝的分类

在泥页岩储层微观特征的研究中,裂缝的分类方案较少,主要具有以下几种分类方式。①根据裂缝的发育规模分类。聂海宽和张金川等(2012)将裂缝划分为5类:巨型裂缝(宽度>1mm;长度>10m)、大型裂缝(宽度为毫米级;长度为1~10m)、中型裂缝(宽度为0.1~1mm;长度为0.1~1m)、小型裂缝(宽度为0.01~0.1mm;长度为0.01~0.1m)和微型裂缝(宽度为<0.01mm;长度为<0.01m)。②根据裂缝成因分类。魏祥峰等(2013)、蒲泊伶等(2014)和郭旭升等(2014)将裂缝划分为构造裂缝、成岩收缩缝、层间页理缝、溶蚀缝和超压破裂缝。袁静等(2016)将裂缝划分为构造裂缝和非构造裂缝,其中非构造裂缝包括风化缝、成岩缝、超压缝和溶蚀缝。③根据裂缝发育位置和与周围基质关系分类。杨峰等(2013)根据裂缝角度将其划分为高、中、低3种倾角类型,根据充填情况将其划分为充填缝、半充填缝和无充填缝3种裂缝类型。

1.2.3 储层物性影响因素

储层物性是构造格局、沉积环境和成岩作用共同控制的结果。济阳拗陷古近系多个次级凹陷深部储层具有不同的岩石和成因类型,埋藏过程中经历了压实作用、溶蚀作用、胶结作用和交代作用等多种成岩作用,受所处构造背景、地层压力和流体环境的影响,

渤海湾盆地沙河街组页岩油储层发育多种成岩演化模式(钟大康等, 2004; 朱筱敏等, 2006; 张林晔等, 2011; 李钜源, 2015)。

由于页岩油储层的储集空间能够为流体提供储集场所, 储集空间类型、储集空间结构网格与矿物组成、有机质演化、成岩作用等密切相关(Slatt and O'Brien, 2011; Loucks et al., 2012)。随着埋藏成岩及温度的升高, 黏土矿物、碳酸盐矿物、有机质等物质均会发生转化作用。黏土矿物中的蒙脱石转变为伊利石或高伊利石的伊/蒙混层(Hower et al., 1976)。有机质与地下环境介质发生化学及物理作用, 随着介质条件的变化发生相应的演化。对储层孔隙成因的研究发现碱性和酸性成岩环境均可形成次生孔隙, 干酪根热解生烃实验发现酸性流体导致的溶蚀孔增加是泥页岩储集空间增加的主要原因(Sherer, 1987; 张响响等, 2011; 孟元林等, 2012; 袁静等, 2012)。碳酸盐矿物晶体大小、结晶形态、胶结物等不仅受到有机质成熟过程中有机酸的影响, 也受到沙四段碳酸盐矿物溶解的影响, 进而孔隙类型及孔径分布发生改变(姜在兴等, 2013; 郭佳等, 2014)。因此, 本书从储层的矿物岩石特征出发, 在微观储集空间类型、孔隙分布与结构特征分析的基础上, 结合物性特征、有机质变化等分析结果, 研究渤海湾盆地沙河街组页岩油储层的物性影响因素。

1.3 页岩油流体赋存研究

泥页岩体系中既包括滞留烃, 也包括干酪根。滞留烃包括轻烃和重烃。依据轻烃及介质作用的本质进行划分, 轻烃的赋存状态分为游离态、溶解态、物理吸附态、化学吸附态和水合态, 对页岩油产能起贡献的主要是游离态的轻烃(李广之等, 2007; Saraji and Piri, 2015)。页岩油储层具有岩性种类多样、孔隙网格复杂、孔隙类型较多及孔径小等特点, 在以往的研究中, 对页岩油储层中残留油气量、赋存特征及可动油比例研究较少, 常规岩心测定方法对泥页岩都存在一定的局限性, 如何能够准确地表征页岩油流体的赋存特征存在诸多难点。

在页岩油储层流体微观赋存方面, 通过光学电镜荧光分析及扫描电子显微镜观察发现, 页岩油储层中的粒间孔、有机质孔、晶间孔及裂缝中可赋存烃类(梁超, 2015)。游离态烃类可赋存于构造缝、页理缝、重结晶晶间孔和溶蚀孔中, 其中赋存于较大孔隙中的烃类可形成连续的烃类聚集, 在较小的纳米级粒间孔中存在游离态烃和部分吸附态烃(Zou et al., 2013)。Wang 等(2015)应用分子动力学模型研究 Bakken 储层纳米孔隙时发现 13%的原位油为吸附态烃。王森等(2015)基于 OPLS(optimized potentials for liquid simulation)力场模拟发现泥页岩孔缝内的液态烃密度分布并不均匀, 固体壁面的烷烃密度为游离态流体密度的 1.9~2.7 倍。通过扫描电子显微镜观察和 X 射线能谱相结合, 在分析微纳米孔喉中的有机质元素及含量的基础上, 能够探讨不同有机质赋存类型的差异, 分析有机质与无机矿物间的相互关系(樊馥等, 2011; 朱如凯等, 2013; 公言杰等, 2015)。侯建等(2014)借助 CT 微观驱替实验系统分析岩心中剩余油的微观赋存状态。

我国也陆续开展了页岩油储层含油气量、可动油率、滞留烃资源评价等方面的诸多探索。赵文智等(2015)对我国15个海相和陆相不同类型烃源岩进行生烃模拟实验与岩石热解参数分析认为,烃源岩的排油率与有机质丰度、类型、演化程度和烃源岩岩性、厚度及输导层发育程度密切相关。由于我国页岩油研究起步较晚,目前无成熟的可动油率或滞留烃资源评价方法,常见的3种研究方法为:①利用核磁共振岩心分析实验研究;②利用热解参数 S_1 (游离态烃)计算;③利用原始氯仿沥青“ A ”含量计算(包友书等,2016)。通过核磁共振技术能够计算泥页岩或致密砂岩储层中液态烃的轻质油含量,研究可动油比例及分布特征(李钜源,2014;王瑞飞等,2014;李海波等,2015;周尚文等,2015)。王明磊等(2015)结合核磁共振及CT扫描技术确定流体在储集层中的赋存量,该方法能够满足页岩油储层微纳米级孔隙流体赋存表征的需要,并在孔喉表征方面具有一定的成效,但成本花费较高,人力设施投入较大。

应用有机地球化学方法获取的TOC含量、热解参数 S_1 和氯仿沥青“ A ”等参数来衡量滞留烃量的方法在我国多地页岩油储层研究中取得了良好的效果,该参数也可用于储层含油丰度评价(宋国奇等,2015;刘伟新等,2016;卿忠等,2016)。因这些参数均与有机质丰度、类型和成熟度有关,样品实测的有限数据点并不能反映储层含油特征的纵向连续性,基于泥页岩固有物理和化学性质对应不同的测井响应特征,可以通过 ΔIgR 模型构建测井曲线与实测数据的关系模型,获取游离态烃含量的垂向变化规律(王文广等,2015;陈小慧,2017)。通过对热解参数 S_1 和氯仿沥青“ A ”的数据校正,以这两种参数进行页岩油分级,能够指示有利油气区段,为页岩油资源的评价工作奠定基础(王敏,2014)。因此,将扫描电子显微镜、氩离子抛光技术、X射线能谱等微观研究手段与矿物岩石学、有机地球化学实验(TOC、热解参数 S_1 和氯仿沥青“ A ”等)相结合,为页岩油流体赋存表征提供了新思路(张林晔等,2015;王勇等,2016)。

1.4 胜利油区页岩油的相关研究

在常规油气勘探阶段,渤海湾盆地沙河街组页岩油层段就频繁见到气测异常和油气显示。1973年,在东营凹陷中央隆起带钻探河54井沙三下亚段2928~2964.4m页岩油层段中途测试,5mm油嘴放喷,产油91.4t/d,产气2740m³/d,这是济阳拗陷沙河街组第一口工业页岩层段的油气井(王永诗等,2013a)。2010年年底,在沾化凹陷渤南洼陷罗69井沙四上亚段—沙三下亚段密闭取心229.8m。2012年,在东营凹陷博兴洼陷、牛庄洼陷和利津洼陷内相继部署了页岩油储层系统密闭取心井樊页1井、牛页1井和利页1井。截至2013年年底,经过老井复查,济阳拗陷共有300余口探井在页岩油储层中见油气显示,70余口探井见油气流,其中38口探井获得工业油气流,并且大多为异常高压(王鸿升和胡天跃,2014)。这38口获得工业油气流或低产油气流的探井中,24口探井的页岩油储层中夹薄层砂岩或碳酸盐岩,同时,有26口探井的页岩油储层仅产油而不产气,10口探井的页岩油储层段既产油又产气,2口探井仅产气。页岩油主要产出层系为沙三下亚段和沙四上亚段,沙一下亚段也有发现。平面上沙四上亚段页岩油气主要分布于东

营凹陷,沙三下亚段页岩油气以沾化凹陷和东营凹陷最多。已投产的探井初期产能为12~72t/d,东营凹陷的河54井累积产量已达27896t,东营凹陷的永54井、沾化凹陷的新义深9井、罗42井累积产量均在万吨以上,这就表明在沾化凹陷和东营凹陷页岩油储层中可以获得较好的产能(宁方兴等,2015;宋国奇等,2015)。

前人研究已明确渤海湾盆地济阳拗陷沾化凹陷和东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段这两套页岩油储层中存在可供开采的油气资源(张林晔等,2005,2008,2012;张善文等,2012),开展了不少基础性研究。李志明等(2010)利用X射线衍射分析了渤海湾盆地东营凹陷有效烃源岩的矿物组成特征。樊馥等(2011)通过检测透射光、荧光和X射线衍射对比了不同密度组分有机质赋存类型的差异性。朱日房等(2012)根据干酪根生烃过程中的体积变化讨论了东营凹陷页岩油储层生烃演化对储集空间的贡献。刘惠民等(2012)通过岩心观察、薄片鉴定和荧光观察划分了沾化凹陷沙三下亚段的岩相类型。李钜源(2013,2015)分析了东营凹陷页岩油储层的矿物组成和脆度,进而研究了孔隙特征及孔隙度演化规律。王永诗等(2013a)、宋国奇等(2013)分别建立了适用于页岩油气资源的评价技术方法。王永诗等(2013b)、张磊磊等(2016)在岩心观察、薄片鉴定和扫描电子显微镜观察的基础上,对沾化凹陷古近系沙河街组页岩油层段的储集空间进行划分并进行定性观察描述。张顺等(2015)综合矿物成分、沉积构造、有机质丰度、颜色等因素,建立了一套东营凹陷泥页岩的岩相划分方案。宁方兴(2014,2015)根据页岩油的赋存空间和赋存岩石类型,对比了东营凹陷沙河街组基质型和裂缝型页岩油的差异性,明确了页岩油富集的主控因素。张林晔等(2015)分析了东营凹陷沙河街组储集空间的成因机制。宋国奇等(2015)利用分析测试实验、录井、试油和测井资料分析了影响古近系陆相页岩油产量的地质因素。张琴等(2016)在对沾化凹陷富有机质页岩的矿物组成和微观孔隙研究的基础上,应用 N_2 吸附实验对中孔(2~50nm)进行了定量表征。郝运轻等(2016)通过系统的岩心观察和高密度薄片鉴定分析,对渤海湾盆地沙河街组页岩油储层的成因相进行划分。王永诗等(2016)对东营凹陷沙河街组页岩油储层的形成机理和油气成藏过程进行了分析。