



陆相页岩油研究进展及开发地质面临的问题

印森林, 谢建勇, 程乐利, 吴有鑫, 朱柏宇, 陈恭洋, 赵俊威

引用本文:

印森林, 谢建勇, 程乐利, 吴有鑫, 朱柏宇, 陈恭洋, 赵俊威. [陆相页岩油研究进展及开发地质面临的问题](#) [J]. 沉积学报, 2022, 40(4): 979–995.

YIN SenLin, XIE JianYong, CHENG LeLi, WU YouXin, ZHU BaiYu, CHEN GongYang, ZHAO JunWei. [Advances in Continental Shale Oil Research and Problems of Reservoir Geology](#) [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(4): 979–995.

相似文章推荐（请使用火狐或IE浏览器查看文章）

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[海陆过渡相页岩气层系沉积研究进展与页岩气新发现](#)

Progress on sedimentology of transitional facies shales and new discoveries of shale gas

沉积学报. 2021, 39(1): 29–45 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.002>

[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](#)

Preface: New advances in unconventional petroleum sedimentology in China

沉积学报. 2021, 39(1): 1–9 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.001>

[陆相断陷咸化湖盆有机质差异富集因素探讨——以东濮凹陷古近系沙三段泥页岩为例](#)

Factors Controlling Differential Enrichment of Organic Matter in Saline Lacustrine Rift Basin: A case study of third member Shahejie Fm in Dongpu Depression

沉积学报. 2021, 39(1): 140–152 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.125>

[陆棚海泥岩的岩相特征及沉积过程——以晚白垩世北美西部内陆海道为例](#)

Facies Characteristics and Depositional Processes of Shelf Mudstones: Examples from the Late Cretaceous Western Interior Seaway of North America

沉积学报. 2021, 39(1): 168–180 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.126>

[中国能源沉积学研究进展与发展战略思考](#)

Research Progress and Development Strategic Thinking on Energy Sedimentology

沉积学报. 2017, 35(5): 1004–1015 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.012>

文章编号:1000-0550(2022)04-0979-17

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.109

陆相页岩油研究进展及开发地质面临的问题

印森林¹, 谢建勇², 程乐利¹, 吴有鑫³, 朱柏宇¹, 陈恭洋¹, 赵俊威¹

1. 长江大学录井技术与工程研究院, 湖北荆州 434023

2. 中国石油新疆油田分公司, 新疆克拉玛依 834000

3. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

摘要 针对页岩油开展了广泛文献调研, 在页岩油概念的提出、演化及研究历程基础上, 对陆相页岩油资源量分布、类型和潜力及若干关键问题等研究进展进行了综述, 提出了陆相页岩油效益开发面临的关键开发地质问题。具体如下: 1) 阐述了页岩油概念的由来及最新定义。国内外页岩油均历经三个发展阶段, 对页岩油的理论认识不断深入, 开发效果和水平逐渐提升。我国陆相页岩油资源丰富、潜力巨大, 是今后一个时期的重点攻关对象。2) 陆相页岩油可按不同方式进行分类。按成熟度演化阶段划分固态有机质阶段、滞留烃阶段、液态烃阶段、液态烃裂解天然气阶段等四类; 按源储组合类型划分源储共存型、源储分离型和纯页岩型三类; 按开发方式分为夹层型、混积型、页岩型和裂缝型四类。3) 陆相页岩油在细粒岩分类及沉积模式、源储岩石微观特征、富集机制、“七性特征”和工业化开采技术等方面取得了较大的进展。4) 陆相页岩油源储结构表现出极强的非均质性, 亟待加强细粒页岩沉积超高频基准面旋回对比模式、半深湖—深湖相低级次构型单元成因及分布模式、相控储层质量差异分布模式和地质工程一体化及甜点快速评价等开发地质方面的研究, 以提高页岩油开发经济效益和采收率。

关键词 陆相页岩油; 细粒沉积学; 储层构型; 开发地质; 储层非均质性; 地质工程一体化

第一作者简介 印森林, 男, 1983年出生, 博士, 副教授, 非常规油气田开发地质与录井地质, E-mail: yinxiang_love@qq.com

通信作者 程乐利, 男, 博士, 讲师, 非常规录井地质和旋回地层学研究, E-mail: chengleli@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

页岩油是重要的油气战略接替资源。其效益开发不仅改变了北美能源的供需格局, 也是今后一个时期我国油气资源开发的现实目标。学者们提出了陆相页岩油的6个典型特点: 1) 页岩主要发育于半深湖—深湖强还原环境, 沉积速率低并伴随有不同程度的化学沉积作用^[1-3]。2) 有机质含量高。富有机质含量对页岩油生油潜力、含油量、储集能力及碳酸盐结晶形态控制明显^[4]。3) 页岩矿物组成复杂。其不仅富含有机质, 还常常具有页状或者纹层状层理。其矿物成分主要包括石英、长石、方解石、白云石等脆性矿物和蒙脱石、伊蒙混层、伊利石、高岭石等黏土矿物, 常常含黄铁矿^[2-3,5-8]。4) 页岩油是典型的自生自储和滞留聚集成藏模式, 具有大面积含油、储集体

相对连续分布特征^[9-13]。5) 页岩油储层属于典型的致密储层, 孔隙度较小, 孔喉半径小, 原始渗透率极低, 原油流动性较差, 微观非均质性极强^[14-16]。6) 页岩油储层需要改造后才具有工业产能。页岩油储层一般不具有自然产能, 其可压性取决于天然裂缝发育程度、岩石矿物组成及岩石本身力学性质^[4,15,17]。

与北美海相页岩油不同^[12,18-22], 中国湖相陆源碎屑形成的富有机质页岩油气富集类型十分多样, 广泛分布在我国东部和西部陆相湖盆内^[17,23]。受沉积、沉积后作用和成藏过程中流体性质的影响, 不同页岩油在源储结构模式、油气成藏特征和生产动态上差异性明显, 导致了不同类型页岩油需采用不同的开发对策, 例如, 碳酸盐岩质与碎屑岩质页岩油等。长期的开发实践表明, 面对当前页岩油正从试验向经济效益开发阶段过渡的关键时期, 受多种因

收稿日期: 2021-05-28; 收修改稿日期: 2021-07-28

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05008-006-004-002); 国家自然科学基金(41502126, 41902155); 长江大学地质资源与地质工程一流学科开放基金项目(2019KFJJ0818022) [**Foundation:** National Science and Technology Major Project, No. 2017ZX05008-006-004-002; National Natural Science Foundation of China, No. 41502126, 41902155; Geological Resources and Geological Engineering Top Discipline Subject Open Fund Project of Yangtze University, No. 2019KFJJ0818022]

素的约束,目前陆相页岩油在开采阶段遇到了与常规油田类似却更加复杂的开发地质类难题,例如,页岩油储层超高频基准面旋回对比模式、半深湖—深湖相多级次构型单元成因及分布模式、复杂矿物成分岩性解释、储层参数解释、甜点综合分类评价及地质工程一体化等。这些难题严重制约着陆相页岩油开发效率。因此,本文拟针对陆相页岩油的概念、研究进展和开发地质面临的问题开展探讨,为当前高效开发页岩油提供指导和思路。

1 页岩油的概念及研究历程

页岩油的概念是在长期开发实践中逐步完善的,经历一段时间演化后,结合当前实际提出了符合现场生产开发的定义。以下将针对页岩油的定义、页岩油的研究历程等进行详述。

1.1 页岩油的概念

页岩(Shale rock)是指由粒径小于0.062 5 mm的碎屑颗粒、黏土和有机质等组成,具有页状和薄片状层理,易碎裂的细粒沉积岩^[9]。与此紧密相关的页岩油(Shale oil)概念在国内外被广泛使用,不过国内外关于页岩油的概念并不统一,缺少清晰明确的界定。最早,有人用“页岩油”来表述利用热解、干馏等方法从油页岩生产出的石油,又称其为人造(合成)原油^[24]。随后,学者提出了“页岩油气”的概念,是泥页岩层系烃源岩大规模生烃后未能充分排出而滞留在源岩中或经过短距离运移后就地聚集而成的油气藏,以游离态、吸附态以及油气互溶形式赋存在页岩系统中(泥页岩层以及其他致密岩性夹层)具有连续型油气聚集的特征^[3,25-27]。之后,为了更加明确地区分不同油气资源,国内学者将页岩油与页岩气分开定义。同时,将页岩油细分为广义页岩油和狭义页岩油。广义页岩油泛指以吸附或游离状态赋存于烃源岩或与烃源岩频繁互层、紧密相邻的致密碳酸盐岩、致密粉细砂岩等储集岩石类型中,没有经过大规模和远距离运移的靠近源岩的石油聚集,与国外的致密油概念相当。而狭义页岩油则特指呈吸附或游离状态赋存于烃源岩内富含有机质页岩中的源岩内部石油聚集^[28-29]。研究表明,页岩油与致密油的主要区别如下:致密油主要指赋存于与紧密相邻烃源岩或烃源岩频繁互层的致密碳酸盐岩、致密粉细砂岩等储集岩石或储集层中,烃类仅经过短距离二次运移,未经过大规模长距离运移的原油^[10,30]。而页岩油是

源内就地聚集的,为典型源内成藏,无二次运移。为加快页岩油的评价与勘探开发,2020年3月31日,全国石油天然气标准化技术委员会发布了《页岩油地质评价方法》(GB/T 38718—2020)的标准,正式给出了页岩油的标准定义。页岩油是指赋存于富含有机质页岩层系中的石油。富含有机质页岩层系内的粉细砂岩、碳酸盐岩等储集层单层厚度不大于5 m,累积厚度占页岩层系总厚度比例小于30%,无自然产能或低于工业石油产量的下限,需采用特殊工艺技术措施才能获得的工业石油产量^[31]。

1.2 页岩油的研究历程

目前国外实现页岩油气大规模商业性开采的国家主要有加拿大和美国。美国页岩油的发展经历了60余年的艰辛探索,其页岩油勘探开发大体可分为三个阶段(图1)。第一阶段探索阶段(1953—1986年)。1953年,主要集中开发了威林斯顿盆地Antelope油田Bakken页岩区,产量比较低。第二阶段起步阶段(1987—2006年)。1987年,Bakken上段页岩油第一口成功应用水平井技术为标志,把开发区块拓展到了Eagle Ford页岩油区。1995年,美国地质调查局对Bakken开展了第一轮资源评价。2000年,Bakken中段钻探了第一口水平井,发现了Alm Coulee油田。2006年,Eagle Ford页岩油开始投入大规模生产开发。第三快速发展阶段(2007年至今)。2007年,由于水平井分段压裂的新技术在Bakken组的成功应用,使得产量达 110×10^4 t,促进了开发向其他页岩区快速拓展。2010年,页岩油产量占到美国本土原油产量21%。2016年,页岩油产量 2.055×10^8 t(美国总产量 4.54×10^8 t),占比46%。到2018年,美国页岩油的年产量逐步增加达到了 3.361×10^8 t,占年产石油总产量的64.7%^[1]。

中国的页岩油发展也大致可划分为三个阶段(图1)。第一阶段是学习借鉴阶段(2003—2008年)。2003年,我国学者开始密切关注美国页岩气勘探开发及研究进展,国际动态跟踪美国能源信息署(Energy Information Association,简称EIA)、美国地质调查局(United States Geological Survey,简称USGS)。第二阶段是概念提出与探索发现阶段(2009—2013年)。2010年,提出了致密油概念,同年吐哈油田H18井日产3.58 t/d。2011年,召开了中国石油致密油研究会议,针对致密油的勘探开发开展相关研究。2012年,中国开始与壳牌开展国际合作,并推进中国

石油第一届致密油气大会;同年,三塘湖盆地芦草沟组页岩油风险勘探,T34井区块获突破,QP1井获日产10.2 t/d工业油流。2013年,致密油地质评价行业标准制定,召开了中国石油第二届致密油气勘探推进会;同年,吉木萨尔凹陷页岩油共完钻水平井37口,建产能 22.35×10^4 t;长庆油田页岩油直井体积压裂改造,获工业油流井13口;雷家地区、大民屯凹陷已形成亿吨级规模增储区。第三阶段是工业化试验与生产阶段(2014年至今)。2014年,国家973致密油项目启动,发现新安边致密油田,ST1H、2X、3井等多口井获工业油流;2016年,国家重大专项致密油(页岩油)项目启动,与壳牌开展页岩油原位转化合作研究。SYY1、SYY2井试油3.22 t/d、4.58 t/d。2017年,吉林探井5直1平。2018年,致密油地质评价国家标准制定,召开了中国陆相页岩油技术交流会和中国石油页岩油领域风险勘探研讨会与目标审

查会;同年,沧东凹陷GD1701H日产油75.9 m³,气5 200 m³;2019年,吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区建立;2020年3月《页岩油地质评价方法》国家标准正式颁布,标志国内陆相页岩油开发正式拉开序幕。

2 陆相页岩油资源量分布、类型和潜力

我国陆相页岩油资源丰富、类型多样,其资源评价方法与关键参数还在探索之中。最近勘探显示,占比约60%的页岩油地质资源量分布在松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地等四大盆地(图2),分别为 54.6×10^8 t、 27.4×10^8 t、 60.5×10^8 t和 25.1×10^8 t,资源总量 167.6×10^8 t,是今后我国陆相页岩油勘探开发的核心地区^[32-34]。



图1 国内外页岩油发展阶段划分

Fig.1 Domestic and foreign shale oil development stage division

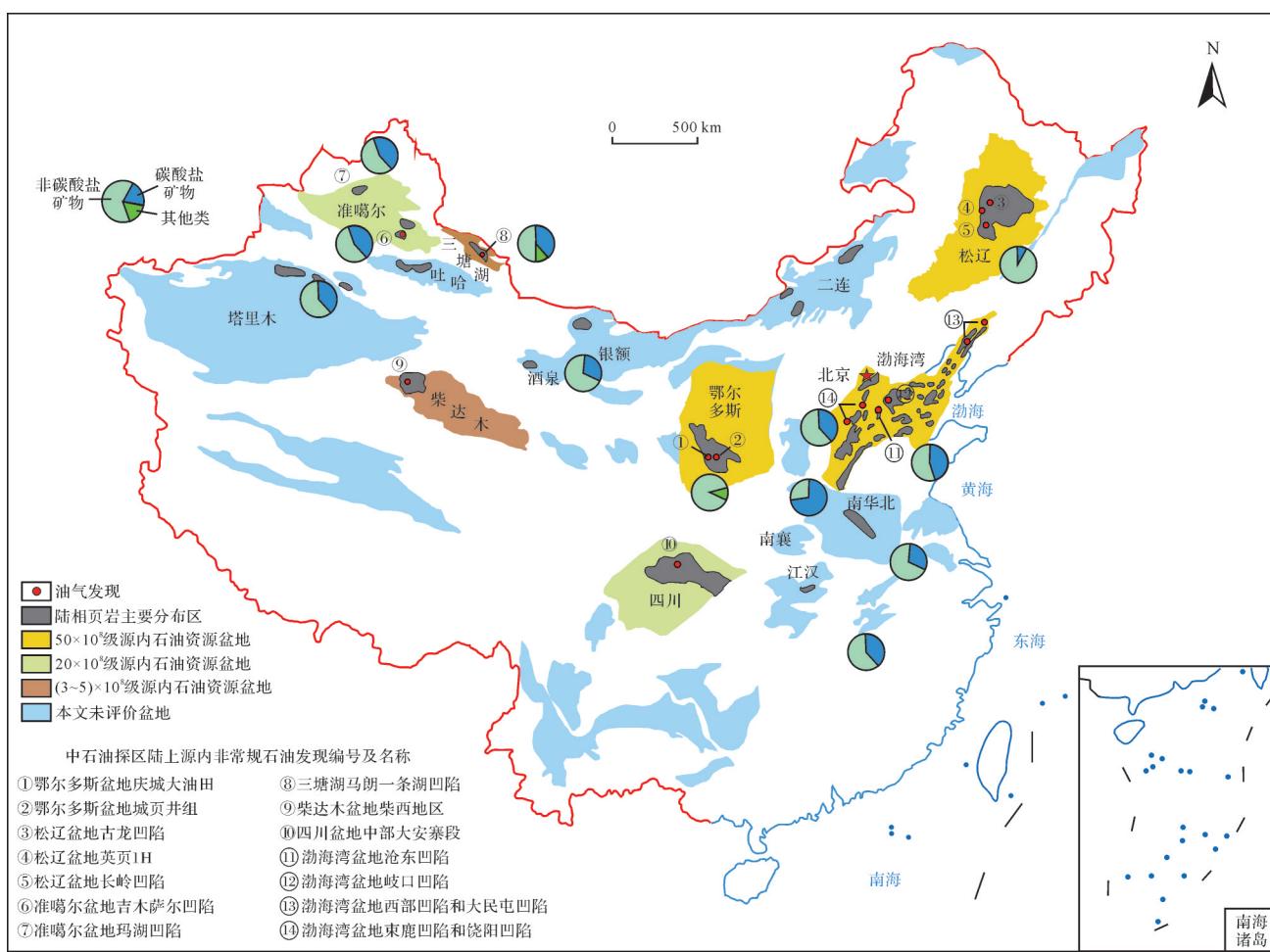


图2 中国陆相页岩油分布区(据文献[17,23,32]修改)
Fig.2 Shale oil areas in mainland China (modified from references [17,23,32])

2.1 陆相页岩油资源量评价方法及潜力

中国陆相页岩油储层与北美地区海相页岩油差异较大,不能完全照搬北美地区的评价模式与关键技术,特别是在陆相页岩油资源评价方法与有利区优选的关键参数方面,暂时还缺少有针对性的、适用的表征方法和参数。当前页岩油资源计算参数仍使用传统概率体积法、类比法及统计法等常规计算方法。其中含油率是体积法计算页岩油资源量的核心参数,可通过岩心实测法、地球化学法、统计法和含油饱和度法等方法获取。页岩油地质资源量与可采系数的乘积就是计算的页岩油可采资源量。页岩油的“可动性”是未来长时间内通过页岩油渗流机理研究亟待解决的关键问题^[29]。针对含油量的计算方法还在讨论,中一高成熟度页岩油采用含烃孔隙度的概念密闭取心分析确定,也可通过岩心标定后的测井资料计算确定;中一低成熟度页岩油用单位

质量油页岩经低温干馏后所得油的百分率含量来表征^[16]。

2019年,中国石化初步估算全国页岩油的技术可采资源量为 $(74\sim372)\times10^8$ t;近期中国石油估算全国页岩油(含油页岩)的技术可采资源量为 145×10^8 t^[34]。在松辽及渤海湾等东部中新生代陆相断陷型盆地中,均已不同程度地获得了页岩油流(图3a, b)。松辽盆地白垩系富有机质页岩层段稳定分布,厚度较大(100~300 m),有机质以腐泥型与混合型为主,TOC含量为0.7%~2.5%, R_o 值在0.7%~2.0%(图3a)。在中部坳陷型盆地,例如,鄂尔多斯盆地三叠系长7段泥页岩广泛发育且规模较大,厚度为50~120 m,TOC含量为0.5%~6.0%, R_o 值为0.7%~1.5%(图3c)。四川盆地与其周缘盆地自上三叠统到下侏罗统的泥页岩层系厚度大、分布范围广、有机质类型多样复杂。此外,在我国南方局部地区,中生界层系

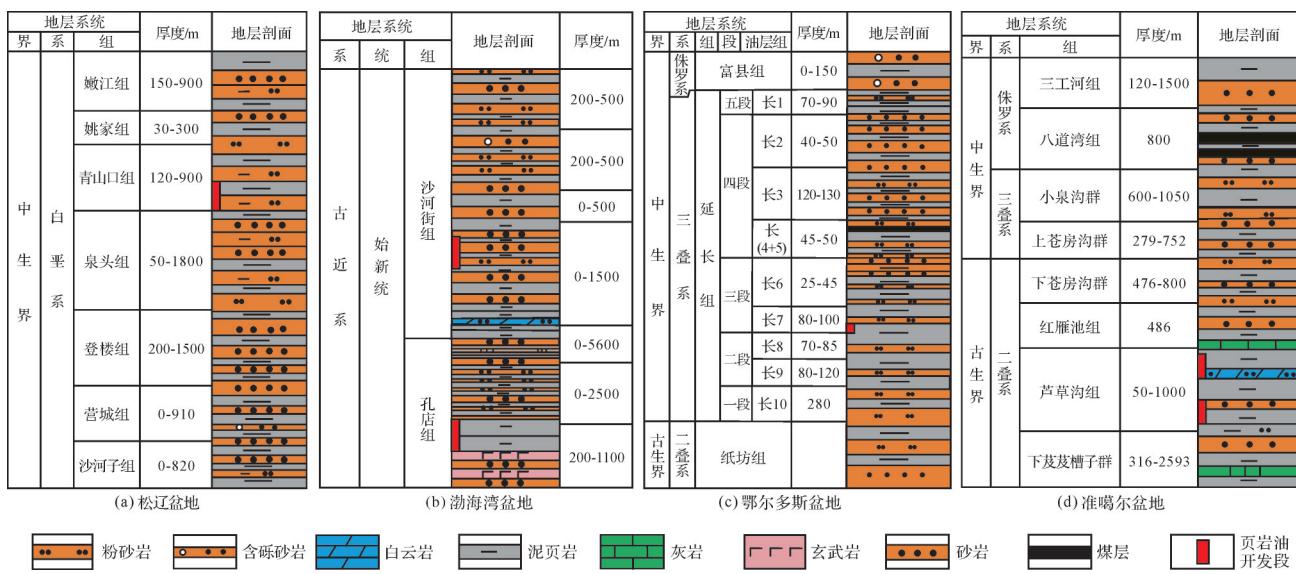


图3 不同盆地页岩油的典型特征(据文献[29]修改)

Fig.3 Typical characteristics of shale oil in different basins (modified from reference [29])

中陆相富有机质泥页岩层系也十分发育,页岩累积厚度虽然较大,但是渗透性砂岩类夹层却发育程度高。在我国西部挤压前陆型盆地,陆相富有机质泥页岩主要发育于中生界层系,累积厚度很大,常常夹含煤层,有机质含量高,成熟度则一般较低。在准噶尔盆地二叠系和侏罗系页岩层系累积厚度超过了300 m,有机质含量较高为偏腐泥—混合型,TOC含量为4.0%~10.0%, R_o 值为0.5%~1.0%^[29](图3d)。

2.2 陆相页岩油不同分类

陆相页岩油按照有机质成熟度、源储结构组合类型和开发生产方式可以分为不同类型。

2.2.1 按有机质成熟度分类

从有机质成藏角度来看,按有机质成熟度演化阶段分段:1) R_o 值小于0.5%为固态有机质分布段为油页岩生成窗口期;2) R_o 值为0.5%~1.0%是液态滞留烃、未转化有机质和多类沥青物排烃共同作用段,为中—低成熟度页岩油生成窗口期;3) R_o 值为1.0%~1.6%是液态烃大量生成阶段,油质较轻、油气比很高,为中—高成熟度页岩油生成窗口期;4) R_o 值大于1.6%是天然气广泛生成和液态烃大规模裂解阶段,直接过渡到页岩气生成阶段^[8]。

2.2.2 按源储结构类型划分

根据页岩层系内致密储集层与烃源岩分布位置特点以及源储构型组合差异,可将我国陆相页岩油划分为源储分离型、源储共存型和纯页岩型3类^[34]。

1)源储分离型:页岩层系源储间互分布,源储压差是

成藏富集页岩油的动力。以松辽盆地白垩系青山口组中上段和鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段中上部为代表,具有砂泥互层、泥厚砂薄、源岩储集层呈分离状且纵向距离较远的特点,夹含于页岩层系内的渗透性条带薄砂岩层物性相对较好,是页岩油的甜点段。2)源储共存型:页岩层系发育生油层系和储油层系岩石,岩性变化迅速、源储互层频繁,甜点段厚度不大、但平面分布较广,聚集主要动力为生烃增压。以渤海湾盆地古近系孔店组和准噶尔盆地中二叠统芦草沟组等为代表。3)纯页岩型:页岩包含生油岩和储集岩双重属性,页岩中滞留于页岩内的液态烃和尚未转化为有机质是主要资源类型。中—高成熟度纯页岩型页岩油以半深湖—深湖相细粒沉积岩为主,其有机质丰度高、类型丰富、纹层构造发育、黏土含量高、物性差等特征,以松辽盆地青山口组下段、鄂尔多斯盆地长7段下部、四川盆地下侏罗统自流井组大安寨段为典型代表。

2.2.3 按开发生产对象分类

除上述两种分类外,还可以按生产开发条件及开发经济效益,参考页岩油赋存空间,将其划分为夹层型、混积型、页岩型和裂缝型4类^[29]。1)夹层型储集层“甜点”可以夹粉细砂岩、碳酸盐岩、凝灰岩或者其他岩性,其中最重要类型是粉细砂岩甜点型,呈现多类型、多层系、较大面积分布的特点,页岩油富集方式主要以源岩内薄互层“甜点层”样式(图4a);2)混积型储集层“甜点”则受气候韵律、水动力和不

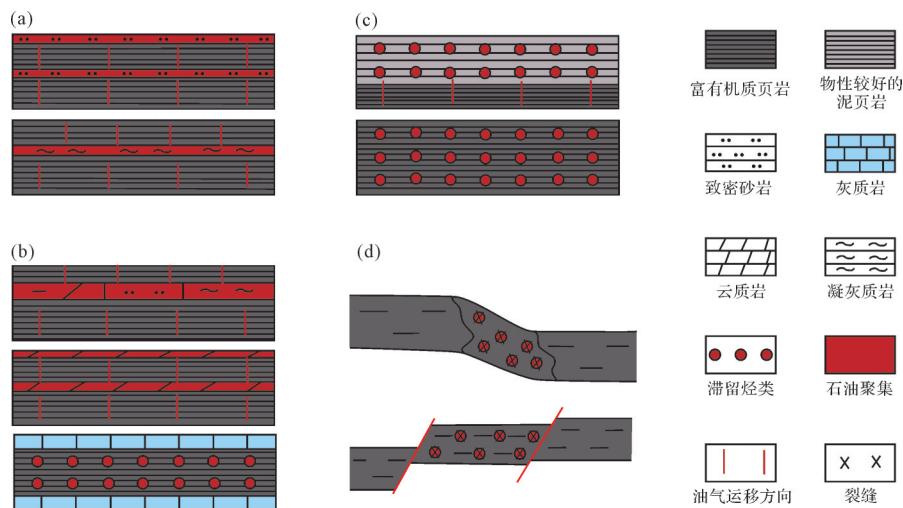


图4 陆相页岩油分类及源储组合样式(据文献[17,29]修改)

(a)夹层型;(b)混积型;(c)页岩型;(d)裂缝富集型

Fig.4 Continental shale oil classification and source-reservoir combination style (modified from references [17,29])

同物源混积、有机质絮凝、水介质环境条件变化等因素综合作用形成的混积型页岩层系(图4b);3)页岩型储集层的“甜点”以纯页岩为主(图4c),具备一定的有效孔隙空间和渗流能力,其包含烃源岩和储集岩双重属性^[17]。4)裂缝富集型,伴随局部断层发育或构造坡折带影响,裂缝十分发育,形成了可以大量储集页岩油的孔隙空间和渗流通道(图4d)。

3 陆相页岩油若干关键问题研究进展

随着国内陆相页岩油的勘探开发逐渐深入,创新建立了沉积学新分支——细粒沉积学,开展页岩、粉砂岩等细粒级岩性沉积物的物理与化学性质及其沉积作用、沉积过程等研究,可以为富有机质泥页岩分布预测、细粒致密储集层、混积细粒岩沉积特征、有利沉积相带和富集区优选提供理论基础。

3.1 页岩油细粒岩分类及沉积模式

3.1.1 页岩细粒沉积岩分类命名

页岩属于细粒沉积岩其中一种,细粒沉积是指由物理、化学和生物沉积作用综合所形成,粒级小于0.01 mm的颗粒含量大于50%的一类沉积岩,主要由陆源碎屑(黏土与粉砂级颗粒)及内生生物微粒以及化学作用沉积组分所组成^[35]。然而,因页岩沉积环境一般处于安静还原环境,因此还伴随一定的化学与生物细粒沉积岩,常称为细粒混合沉积,其是指机械物理作用搬运的陆源碎屑颗粒与化学沉淀成分或生

物成因组混合沉积并以单层(或纹层)混合沉积的方式产出的沉积岩类型^[36]。其组成成分包括:1)碎屑成因组分类,以陆源碎屑矿物(石英、长石、云母等)和黏土矿物(高岭石、伊利石、绿泥石等)为主;2)化学成因组分类,包括铁氧化物、铝氧化物、锰氧化物等构成的硫酸盐、碳酸盐和卤化物等;3)生物成因组分类,包括了硅质和钙质生物微粒;4)有机质成因类。因混合细粒沉积岩成分构成十分复杂,产出形式多样,识别区分难度较大。细粒混合沉积的分类方案与命名十分复杂多样,未取得相对统一方案。例如,以陆源碎屑、碳酸盐组分及火山碎屑为三端元,增加有机质组分四类的方案^[37],刘惠民等^[38-39]提出了长英质矿物—碳酸盐矿物—黏土矿物分类方案,吴靖等^[40]提出了黏土矿物—碳酸盐—粉砂分类法。杜学斌等^[41]考虑了主要结构混合形式的陆相细粒混合沉积扇形分类方案等,已有方案学术意义较大,然而,随着细粒沉积岩勘探开发不断深入,钻井现场地质工程一体化的快速推进,这些方案均因类别繁多且需实验室研究才能准确定名,对现场快速识别和判断细粒混积岩岩性则不利。因此,有学者以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组为例,提出了适用于生产的陆源碎屑类、碳酸盐岩类与过渡类岩性简化混积岩方案,既考虑了成因类别,也考虑了现场需求,且定量定义了不同岩性的主量元素与核心矿物的分布范围与组合特征^[42]。

3.1.2 页岩油源储岩相构型模式

根据细粒沉积岩的物质组成类型,其包括粉砂

质细粒沉积岩、黏土质细粒沉积岩、碳酸盐质细粒沉积岩和混合型细粒沉积岩。它在沉积和沉积后阶段经历了物理、化学及生物等过程的相互作用,导致颗粒成分、颗粒结构、堆积模式与有机质的共存关系和成岩演化途径产生差异化,导致所形成的细粒沉积岩物理属性和烃类富集能力截然不同^[4,23,43]。因此,深化细粒沉积岩岩相类型及其组合样式的研究是评价源储一体化储层的基础和核心。

国内外学者已经开展了富有机质细粒页岩油岩相构型相关研究,初步揭示了微观岩心尺度富有机质页岩层系中的纹层等岩相类型与组合、储集空间特征及页岩油富集模式等^[21,44-47]。国外,在南Oklahoma的Woodford页岩露头区,依据代表塑性岩相(Soft lithofacies)的矿物岩石与刚性岩相(Hard lithofacies)的矿物岩石的厚度比例,建立了高比例Hard岩相、Soft与Hard岩相相当比例、高比例Soft岩相等3种典型岩相组合模式^[21]。在松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段,根据有机质和黏土矿物含量,划分了高有机质薄片状页岩相、中有机质块状泥岩相、中有机质纹层状页岩相、低有机质纹层状页岩相和低有机质夹层砂岩相等5类^[47];在鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组长³亚段,根据纹层的矿物组成和厚度,确定了富凝灰质纹层、富有机质纹层、粉砂级长英质纹层和黏土纹层等4类^[46];在柴达木盆地英西地区始新统下干柴沟组上段,依据成因及储集性能,提出了混积颗粒岩相、块状灰云岩相、斑块状含膏—膏质灰云岩相、纹层状云灰岩相和构造角砾状灰云岩相等5种^[48];在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组,依据混积岩不同组分的含量,把岩石类型划分为4大类18小类^[37]。提出了页岩油烃源岩与储集岩“甜点”纵向组合存在3种模式相对厚层“甜点”夹薄层烃源岩、相对厚层烃源岩夹薄层“甜点”、近等厚互层结构^[49]。在岩相分类与组合识别上,开展岩相成因的分析。例如,对不同来源细粒沉积岩的细粒碳酸盐物质富集的主要成因探讨等^[23]。

3.1.3 页岩油细粒岩沉积模式

湖相细粒物质沉积动力学研究比较薄弱,细粒沉积模式的研究处于探索阶段,各组分的物质来源、形成机制及沉积过程尚不明确。有学者认为,湖相细粒物质的发育受控于水体中碳酸盐补给速率与溶解速率相等的深度面(湖盆碳酸盐补偿深度“CCD”,Carbonate Compensate Depth),虽然陆相湖泊水体物

化条件(如盐度、温度、压力、pH值等)与海洋存在较大,但受水体深度约束的特点则相似。通过有机质及矿物含量的不同可以反映水体深度的变化。滨湖、浅湖、半深湖—深湖环境沉积特征差异较大,形成碳酸盐岩沉积与碎屑沉积的不同分界特点^[4]。国外学者探讨了富有机质页岩成因及分布模式,认为陆棚区局限盆地、滞流海盆、边缘海斜坡与边缘海盆地等低能还原环境为海相富有机质页岩发育提供了有利环境,初步建立了水体分层、海侵、门槛、洋流上涌等4种富有机质页岩沉积模式^[50-52]。国内学者主要基于元素矿物及岩石组合特征,开展了浅湖—半深湖相沉积体系的概念模式研究^[9,32,53]。受物理、化学、生物与事件性沉积作用交互耦合过程导致的矿物成分的差异性和纵向变化的频繁性,针对不同类型富碎屑岩型细粒页岩、富碳酸盐岩型细粒页岩和其他混积型细粒页岩沉积模式分类研究则较少。

3.2 页岩油储岩石微观特征

按照页岩矿物成分与岩石组合类型,可以分为以下三种主要页岩类型:富碎屑岩型细粒页岩、富碳酸盐岩型细粒页岩和其他混积型细粒页岩。对岩心、露头样品采用岩石薄片鉴定、扫描电镜、核磁共振、XRD、XRF、自动矿物参数定量系统(AMICS)、高分辨率激光拉曼光谱仪(HRLRS)、显微红外光谱仪(MFS)、岩石CT扫描和矿物成分扫描(QEMSCAN)等现代先进的分析技术,开展了页岩油源储岩石微观特征研究,揭示了不同类型的页岩微观特征存在较大的差异。

3.2.1 富碎屑岩型细粒页岩

此类以松辽盆地白垩系青山口组一段页岩层系为典型(图2)。发育了5类岩相,包括低有机质砂岩夹层相、低有机质纹层状页岩相、中有机质纹层状页岩相、中有机质块状泥岩相和高有机质薄片状页岩相。TOC值为0.5%~5%,有效孔隙度为3.4%~8.4%、无机孔和有机孔均发育,无机孔又可分为粒(晶)间孔和粒(晶)内孔。以球形介孔为主,基质本身储集物性较差。以孔缝二元孔隙结构为主,水平方向渗透率较高,夹层型砂岩相孔隙最发育^[47]。

3.2.2 富碳酸盐岩型细粒页岩

此类以准噶尔盆地二叠系芦草沟组页岩层系为典型(图2)。目的层芦草沟组为贫氧的弱还原—还原环境的咸(碱)化半深湖—深湖相沉积相,整体是一套受物理、化学、生物和调整白云岩化等综合作用

而沉积下来的混合细粒沉积物,沉积现象具有鲜明特色,具有矿物成分多样、普遍含白云石、岩性/相类型多样且多为过渡性岩类的特点^[49,54-56]。岩性主要包括长英质粉砂岩、长英质粉砂级泥岩、粉砂质白云岩、白云质粉砂岩、白云质泥岩、泥质白云岩、微晶/泥晶白云岩等类型。另外,还见有粒屑灰岩、生屑灰岩、钠长石岩、硅质岩、碳质泥岩、方沸石岩等特殊岩类,这些岩性垂向频繁互层并复杂组合,不仅形成较高生产力的烃源岩,而且形成了细粒混积致密背景下的“甜点”储集层。TOC值多大于3.5%,以Ⅱ型干酪根为主, R_o 值为0.6%~1.1%。其中发育白云质的溶孔、晶间孔、微裂缝和缝合线等。孔隙度大体为6%~14%,空气渗透率多小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含油饱和度为80%~90%,脆性矿物含量为85%以上,常压~弱超压为主,原油密度平均为0.88~0.92 g/cm³,地层条件下原油流动性较差。

3.2.3 其他混积型细粒页岩

此类以鄂尔多斯盆地长³亚段页岩层系分布区为典型类型(图2)。该套地层分布稳定,是盆地主力烃源岩层,其凝灰岩发育程度最高层段。富有机质页岩中主要发育富凝灰质纹层、富有机质纹层、粉砂级长英质纹层和黏土纹层4种纹层类型。整体上,干酪根以Ⅰ~Ⅱ₁型为主,TOC值为8%~16%, R_o 值为0.9%~1.2%。夹于厚层富有机质泥页岩层系的薄层砂质岩类构成了页岩油富集的甜点段,薄砂层厚度约为3.5 m;储集层孔喉尺度小,孔隙半径主要为2~8 μm,喉道半径集中在20~150 nm,微米级孔隙和纳米级喉道呈多尺度分布特征,数量众多^[46,57]。

3.3 页岩油富集机制

针对不同的页岩油区,学者们提出了相应页岩油富集模式和源储结构模式,并认为页岩油富集明显受源储岩相构型的控制^[46-47]。其中岩相组合对不同区块页岩油富集(甜点)模式及控制机制明显,例如页理型、纹层型、缝—孔耦合富集模式^[46-48,58],“富有机质与粉砂级长英质组合”和“富有机质与富凝灰质”纹层组合构成的生运聚模式等,在我国西部盆地“下源上储、上源下储、源储一体、三明治和薄互层”5种源储配置关系,不同配置关系甜点特征具有明显差异性^[13]。物质来源与沉积成因对陆相细粒沉积岩的油气富集具有控制作用。在多源成因体系中,富集类型可包含陆源型、内源型、火山热液型和混源型等^[4]。

3.4 页岩油层“七性特征”及其相互关系

岩性、物性、电性、烃源岩特性、脆性、含油性和地应力各向异性“七性关系”是开发页岩油的关键参数,因页岩岩石成分更加复杂、孔隙类型多样、油气赋存状态差异大,所以其内涵和常规油气评价的“四性关系”有很大的不同。以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油为例,细粒级陆源碎屑岩和碳酸盐岩比例大体相当,整体孔喉半径较小,渗透率低。对研究区富白云质细粒岩而言,源储一体结构,储层与源岩的匹配关系多样化,储层被生油能力较强的源岩包裹。岩性决定岩石的脆性和岩石力学特性,储层与脆性匹配关系好,除长石岩屑粉细砂岩外,储层的脆性好于围岩。黏土含量低、较为纯净的碎屑岩和碳酸盐岩脆性相对较好,黏土含量高的储层往往脆性较差。岩石的结构也对脆性具有一定的控制作用,胶结物的成分、含量对脆性的控制作用尤其明显。在埋深相同的条件下,黏土含量低储层泊松比低、地应力相对较小、闭合应力低、破裂压力小。反之,黏土含量高,泊松比大,地应力数值较大、闭合压高、破裂压力大,这是一般泥岩的闭合应力和破裂压力高于储层的基本成因。当然,物性决定含油性。尽管页岩油与常规油藏的成藏机理有较大的差别,具有非浮力成藏特征。但是,在烃源岩排烃压力一定的情况下,孔喉半径较大物性较好的储层,含油饱和度相对较高。物性与脆性也具有一定关系。对泥质胶结的细粒级的粉细砂岩来说,孔隙度越大,脆性越差。但对以溶蚀孔隙为主的碳酸盐岩或钙质、硅质胶结的粉细砂岩,岩石的脆性一般不受物性的控制,且会出现孔隙度越大,则脆性越好的情况^[54-56]。

从电性的测井响应来说,页岩油储层岩性多变,矿物成分多样,特别是在碎屑岩和碳酸盐岩的过渡性岩类的岩石中,常规测井反映岩性的不确定性增大,岩性反映敏感的自然电位、自然伽马和三孔隙度曲线对岩性和储层的识别均存在较大难度。把常规测井和核磁共振结合起来构建岩性敏感参数具有较好的效果^[59]。

3.5 页岩油工业化开采技术

以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为代表的陆相中—高成熟度页岩油,有机质热演化程度较高。页岩储层孔隙度为5%~12%、资源潜力巨大、可动油所占比例高、脆性矿物含量高、地层流体压力较大,可依靠水平井大规模、长井段的体积压裂

技术实现效益开发。利用人工压裂改造技术水平井生产工厂化作业方式可实现效益单井产量和最终可采储量,具大规模商业开采的潜力,成为我国油气的重要战略接替资源,为目前页岩油开发的主阵地^[60]。

而位于松辽盆地白垩系、渤海湾盆地沧东凹陷古近系及鄂尔多斯盆地三叠系的陆相中—低成熟度页岩油,其有机质热演化程度整体小于1.0%,以沥青、重质油和尚未转化的有机质为主。采用地下原位加热转化技术比人工压裂改造技术适应性更强,在鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段和松辽盆地白垩系嫩江组已开展了先导试验^[34]。

4 陆相页岩油开发地质面临的关键问题

常规油田开发技术主要围绕层间、层内、平面与微观四个层次的非均质性展开^[61]。开发中后期有针对性的开展了中观非均质性(介于层内、平面之间)研究,即储层构型研究^[62-67]。多年来,这套理论与相关技术对常规老油气田提高采收率做出了巨大的贡献。而目前投入开发的中—高成熟度页岩油储层属于特低孔隙度、致密储层,从开发地质的角度上说,比常规砂岩油藏非均质性更强。前已述及,当前对页岩油微观非均质性的研究进展较大,包括页岩岩石矿物组成、储层的物性、孔隙结构、流体性质及流动性、脆性、岩石应力等方面。然而,陆相页岩油开发与常规油藏开发具有明显差异性。主要体现在两个方面,其一是因其属于低品位连续性分布的页岩油藏,勘探开发的阶段性逐步模糊化,与常规油藏按

照勘探—评价—开发分阶段实施部署不同;其二是时效性和经济性要求更高。对渗透性砂岩夹层甜点的开发过程来说,开发地质的非均质性的研究依然十分重要且难度极大。

针对页岩油储层超高频基准面旋回对比模式、半深湖—深湖相低级次构型单元成因及分布模式、复杂混积岩矿物成分岩性分类解释、储层参数解释、源岩与储集层的配比关系、甜点综合分类评价及地质工程一体化等方面研究还存在较大不足。页岩油开发地质的研究十分薄弱,处于起步阶段。从近5年准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油现场生产实践看,页岩油产能的影响因素如表1。表中揭示地质因素影响依然占据主导地位,比例约为50%(源储配置及保存条件、油层品质、力学参数和流体性质),工程因素影响比例约为25%(水平段、钻井工程参数和压裂参数),生产因素影响比例约为20%(合理焖井制度、排采制度优化和合理转抽时机等),异常因素影响比例约为5%。因此,深入开展页岩油开发地质研究至关重要。

(1) 页岩油细粒沉积岩超高频基准面旋回模式

常规老油田开发的理论模式正在逐步建立,对其非均质性的研究越来越重视。不同油田开发条件和开发阶段存在显著差异,呈现“一沙一世界”的特点。油藏不同层次的复杂性决定了地质认识具有长期性和曲折性。对于非常规页岩油开发来说,如何建立泥页岩层内小点层(甜点小层)识别标志、湖平面频繁升降下的超高频基准面旋回模式、敏感特殊矿物元素地质内涵及组合模式,并以此为依据展开泥页岩段小点层的对比等是开展页岩油储层非均质

表1 页岩油产能的影响因素

Table 1 Factors influencing shale oil production capacity

主要影响因素	所占比例	亚类	
		细类	细类
地质因素	50%	源储配置及保存条件	源储比例、盖层条件
		油层品质	物性、含油性
		力学参数	脆性、可压性
		流体性质	黏度
工程因素	25%	水平段	一类油层钻遇率
		钻井工程参数	段间距、簇间距、射孔数
		压裂参数	压裂液、支撑剂、施工排量、
生产因素	20%	合理焖井制度	
		排采制度优化	
		合理转抽时机	
异常因素	5%	套管变形影响因素	
		压裂干扰	
		井筒堵塞	

性研究的基础框架。以吉木萨尔凹陷芦草沟组地下和露头小点层对比为例,约40 m的地层可以细分为15个2~3 m的旋回(图5a),甚至还可以进一步细分为56个次级单元(图5b)。

(2) 半深湖—深湖相低级次构型单元成因及分布模式

以往对冲积扇^[67-68]、河流—三角洲^[64-66,69-70]、滩坝浅湖体系^[71]、海底扇浊流^[72]沉积等含油气富砂体系开展了较为深入的沉积构型研究,业已建立了相应的模式,取得了较大进展。然而,针对半深湖—深湖贫砂沉积体系的相—亚相—微相的层次关系还没有建立起来,几乎未开展沉积微级别沉积机制、沉积过程

与沉积环境的研究。当然,其基础工作是岩石类型划分,前已述及,目前分类方案虽然较多,但仍存在以下几个问题:1)各个页岩油盆地不统一,矿物成分、有机质和其他成分均存在差异性的情况下亟需一套相对统一的方案;2)页岩油开发过程中的随钻实时岩性识别是关键,纵向页岩油岩性体现在厘米尺度矿物成分的差异性,常规测井曲线响应不明显,区分难度很大。目前现场普遍采用XRF和XRD定量微观的方法来判别岩性,取得了较好的效果,是推动细粒沉积学向定量化发展的关键环节。

储层构型研究是从国外露头研究发展到国内，针对开发中后期地下储层构型的研究方法^[73-74]，针对

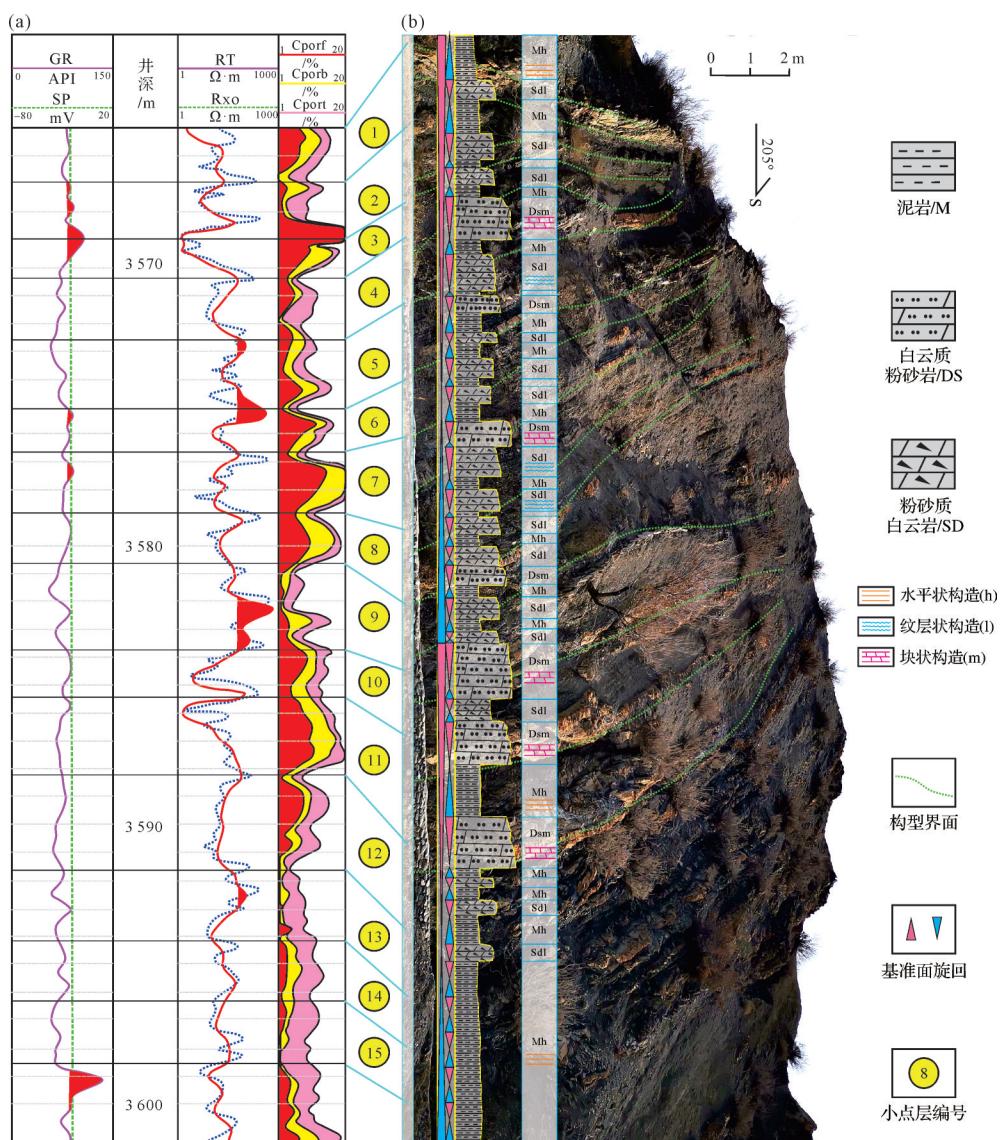


图 5 半深湖—深湖相泥页岩高频基准面旋回对比
 (a)地下工区典型井测井曲线特征;(b)西大龙口二叠系芦草沟组野外露头剖面

Fig.5 High-frequency base-level cycles of fine-grained sedimentary shale

的地质体尺度一般较小,以物理沉积为主,同时对资料及井距要求较高。而浅湖—半深湖相属于大规模沉积体,资料条件还不足,导致储层构型的研究还十分薄弱。相对静水条件下沉积物缓慢沉积与物理、化学、生物及事件性等多重机制耦合作用机理等受资料约束研究难度较大。细粒沉积学的基本理论和方法还未建立,把新技术应用到针对页岩的地质研究中还任重道远,例如,将无人机倾斜摄影与XRF快速测试技术结合起来,对页岩精细露头表征与三维建模技术^[75]。另一方面,如何厘定半深湖、深湖相的亚相—微相类型,并确立其内部不同构型单元成因机制及其识别特征,建立不同构型单元的定性定量模式等也是下步研究重点。

(3) 相控储层质量差异性研究

源储的各类参数界限被逐渐打破,页岩油储层质量的概念对比常规油藏有所拓展,除了岩性、物性、含油性之外还包括了应力性、源岩特性和脆性等。对页岩储层参数的解释显得特别重要,页岩岩矿组合特征和孔隙结构异常复杂,形成致密储层导致流体流动不畅,进而引起井筒与地层流体的信息交换不充分,常规测井响应敏感性遭遇挑战。新的

测井三组合逐步应用到页岩测井解释中来,代表岩性的Lithoscaner、物性核磁测井和介电常数测井是针对页岩的较好手段。另一方面,因目前开发对象是页岩层系内部的长英质砂岩和碳酸盐岩质砂岩等相对粗粒的岩石类型,以吉木萨尔凹陷芦草沟组为例,不同岩相类型依然明显控制着储层质量(图6),白云质粉砂岩相(图6a)、粉砂质白云岩相(图6b)。石英粉砂岩相(图6c)和长石岩屑砂岩相(图6d)岩性等值线分布对核磁孔隙度(图6e)与饱和度(图6f)的控制十分明显。岩性约束物性,物性影响含油性和流动性,岩石矿物组成决定了脆性和流体流动性等。开发实践表明,这些参数特性的优劣是决定页岩油产能的关键。源储一体的薄储层质量的差异是决定高产的主导因素。普遍细粒中相对粗粒岩性依然是物性较好的甜点,岩性对物性、含油性及地质力学参数的控制与常规砂岩油藏具有相似的特点。含油饱和度分布差异性除受岩相控制外,还与构造位置、断层、不整合面和埋藏深度有关,页岩油藏源岩含油比较充分,但是否可以全部充注储层中则受条件限制。因此,不同构型单元控制下储层质量差异机理及模式研究依然十分迫切和重要。

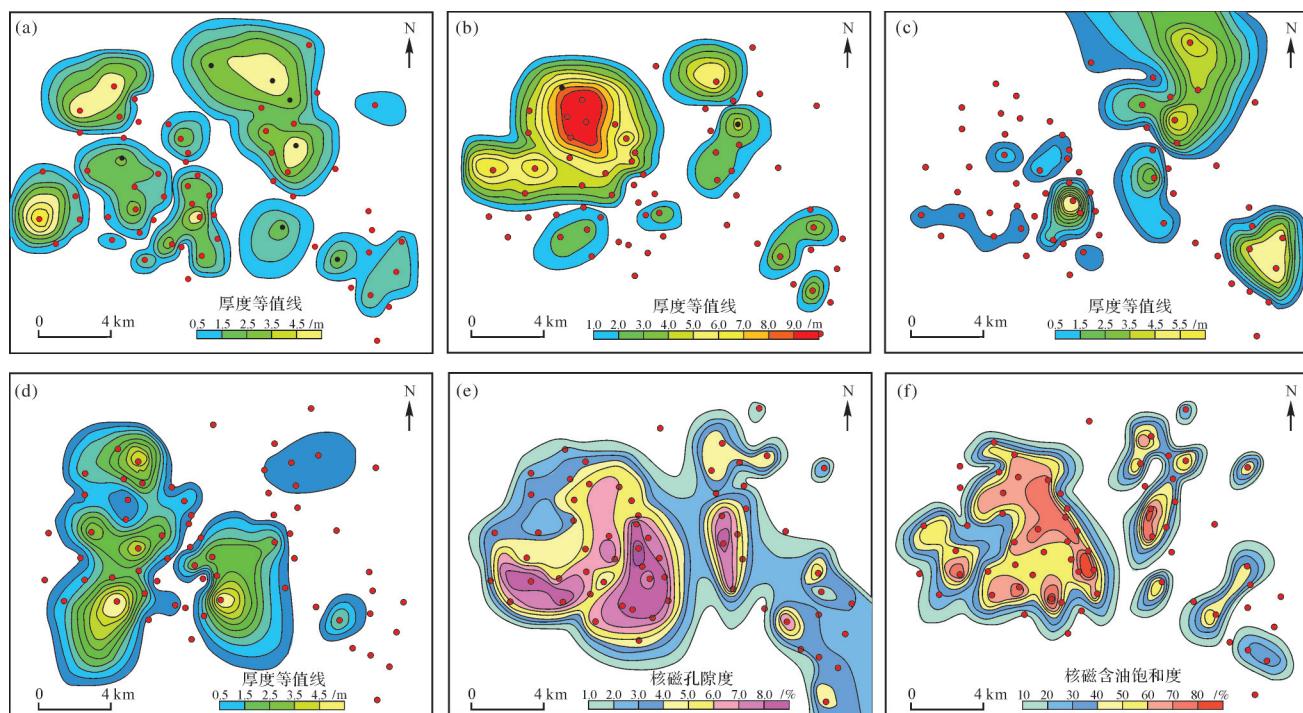


图6 陆相富白云质细粒混积页岩岩相分布及储层质量差异

(a)白云质粉砂岩相厚度等值线图;(b)粉砂质白云岩相厚度等值线图;(c)石英粉砂岩相厚度等值线图;(d)长石岩屑砂岩相厚度等值线图;(e)相控核磁孔隙度分布图;(f)相控核磁含油饱和度分布图

Fig.6 Petrographic distribution of terrestrial dolomite-rich fine-grained mixed shale and reservoir quality differences

(4) 地质工程一体化及甜点综合快速评价

和其他非常规资源比较类似,尽管页岩油具有大面积连续分布的特点,可是资源丰度却很低,下一步怎样寻找资源丰度相对较高、经改造后石油产量较高的“甜点区/段”成为页岩油研究的核心和重点^[16]。“甜点区/段”要求储集层品质、烃源岩品质和工程脆性等品质的最佳叠合匹配区,所以“三品质”分级评价方案的建立意义重大。目前开发的甜点层均是大套页岩夹渗透性砂质(或含砂)夹层类,泥页岩占主导,砂质成分比例较小。甜点的空间分布并不稳定,水平井体积压裂井轨迹的控制十分关键。现场分析表明最大程度追求水平段优质甜点(I类甜点)钻遇率是获得高产的关键。因此,如何通过钻井现场快速识别混积岩岩性,以保证水平井轨迹在I类甜点中穿行显得至关重要。地质与工程的配合越来越紧密,体现在以下几个方面:1)研究人员的配合。与常规油藏分阶段开发不一样,页岩油开发采用滚动方式,即边评价边开发的方式,地质和工程技术结合统筹显得尤为重要。因此,为了最大限度实现页岩油效益开发,特别需要提高科研的时效性,地质与工程相互配合、研究成果前移到钻井现场,井筒各项工种在地质的约束下互动配合将更加紧密有序。2)研究过程的互动。预测地质模型将依靠工程参数与曲线又实时地反馈到随钻模型并对其进行调整,更新后的模型重新应用工程实施中,例如,通过钻井过程中系列工程数据进行现场岩性快速识别以辅助调整井轨迹等。3)工程与地质甜点的互补性。页岩油甜点具有互补性,较好的脆性可以弥补孔渗性的不足,相对好的孔渗性可能脆性一般等,因此地质与工程的甜点可以相互转化和弥补,甜点的评价内涵更加丰富,包容性更强。

5 结论

(1) 梳理了页岩油概念的由来及最新页岩油定义。国内外页岩油均历经三个发展阶段,对页岩油的理论认识不断深入,开发效果和水平逐渐提升。陆相页岩油的资源丰富、潜力巨大,是我国今后一个时期的重点攻关对象。

(2) 陆相页岩油可按不同方式进行分类。按成熟度演化阶段划分固态有机质阶段、滞留烃阶段、液态烃阶段、液态烃裂解天然气阶段等四类;按源储组合类型划分源储共存型、源储分离型和纯页岩型三

类;按开发方式分为夹层型、混积型、页岩型和裂缝型四类。

(3) 陆相页岩油在细粒岩分类及沉积模式、源储岩石微观特征、富集机制、“七性特征”及其相互关系和工业化开采技术方面取得了较大的进展。

(4) 陆相页岩油面临着亟待加强开发地质方面的研究,以提高页岩油开发经济效益和采收率。主要包括,页岩油细粒沉积岩超高频基准面旋回模式、半深湖—深湖相低级次构型单元成因及分布模式、相控储层质量差异性研究和地质工程一体化及甜点综合快速评价等四个方面。

参考文献(References)

- [1] 金之钧,白振瑞,高波,等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451-458. [Jin Zhijun, Bai Zhenrui, Gao Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.]
- [2] 赵文智,朱如凯,胡素云,等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1079-1089. [Zhao Wenzhi, Zhu Rukai, Hu Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1079-1089.]
- [3] 邹才能,杨智,陶士振,等. 纳米油气与源储共生型油气聚集 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-26. [Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.]
- [4] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题 [J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039. [Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.]
- [5] 姜在兴,张文昭,梁超,等. 页岩油储层基本特征及评价要素 [J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184-196. [Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.]
- [6] 卢双舫,李俊乾,张鹏飞,等. 页岩油储集层微观孔喉分类与分级评价 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 436-444. [Lu Shuangfang, Li Junqian, Zhang Pengfei, et al. Classification of microscopic pore-throats and the grading evaluation on shale oil reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 436-444.]
- [7] 袁晓冬,姜在兴,张元福,等. 漾平盆地白垩系陆相页岩油储层特征 [J]. 石油学报, 2020, 41(10): 1197-1208. [Yuan Xiaodong,

Jiang Zaixing, Zhang Yuanfu, et al. Characteristics of the Cretaceous continental shale oil reservoirs in Luoping Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(10): 1197-1208.]

[8] 赵文智,胡素云,侯连华,等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发,2020,47(1):1-10. [Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 1-10.]

[9] 邹才能,陶士振,白斌,等. 论非常规油气与常规油气的区别和联系[J]. 中国石油勘探,2015,20(1):1-16. [Zou Caineng, Tao Shizhen, Bai Bin, et al. Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(1): 1-16.]

[10] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报,2012,33(3):343-350. [Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 343-350.]

[11] 朱如凯,邹才能,吴松涛,等. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. 石油与天然气地质,2019,40(6):1168-1184. [Zhu Rukai, Zou Caineng, Wu Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(6): 1168-1184.]

[12] 黎茂稳,马晓潇,蒋启贵,等. 北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J]. 油气地质与采收率,2019,26(1):13-28. [Li Maowen, Ma Xiaoxiao, Jiang Qigui, et al. Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 13-28.]

[13] 宋岩,罗群,姜振学,等. 中国中西部沉积盆地致密油富集机理及其主控因素[J]. 石油勘探与开发,2021,48(2):421-433. [Song Yan, Luo Qun, Jiang Zhenxue, et al. Enrichment of tight oil and its controlling factors in central and western China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48 (2) : 421-433.]

[14] 宋岩,高凤琳,唐相路,等. 海相与陆相页岩储层孔隙结构差异的影响因素[J]. 石油学报,2020,41(12):1501-1512. [Song Yan, Gao Fenglin, Tang Xianglu, et al. Influencing factors of pore structure differences between marine and terrestrial shale reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41 (12) : 1501-1512.]

[15] 金旭,李国欣,孟思炜,等. 陆相页岩油可动用性微观综合评价[J]. 石油勘探与开发,2021,48(1):222-232. [Jin Xu, Li Guoxin, Meng Siwei, et al. Microscale comprehensive evaluation of continental shale oil recoverability[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 222-232.]

[16] 匡立春,侯连华,杨智,等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. 石油学报,2021,42(1):1-14. [Kuang Lichun, Hou Lianhua, Yang Zhi, et al. Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(1): 1-14.]

[17] 焦方正,邹才能,杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. 石油勘探与开发,2020,47(6):1067-1078. [Jiao Fangzheng, Zou Caineng, Yang Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1067-1078.]

[18] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 579-601.

[19] Singh P. Lithofacies and sequence-stratigraphic framework of the Barnett Shale, Northeast Texas[D]. Norman: University of Oklahoma, 2008.

[20] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(1): 1-22.

[21] Galvis H, Becerra D, Slatt R. Lithofacies and stratigraphy of a complete Woodford Shale outcrop section in South Central Oklahoma: Geologic considerations for the evaluation of unconventional shale reservoirs[J]. *Interpretation*, 2017, 6(1) : SC15-SC27.

[22] 黎茂稳,金之钧,董明哲,等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. 石油实验地质,2020,42(4):489-505. [Li Maowen, Jin Zhijun, Dong Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(4): 489-505.]

[23] 姜在兴,孔祥鑫,杨叶芃,等. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多源成因[J]. 石油勘探与开发,2021,48(1):26-37. [Jiang Zaixing, Kong Xiangxin, Yang Yepeng, et al. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 26-37.]

[24] 单衍胜. 辽河坳陷古近系页岩油气聚集条件与分布[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013. [Shan Yansheng. Shale oil and gas accumulation conditions and distribution in Liaohe Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.]

[25] 邹才能,陶士振,袁选俊,等. 连续型油气藏形成条件与分布特征[J]. 石油学报,2009,30(3):324-331. [Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009 , 30(3): 324-331.]

[26] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6):641-653. [Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of

shale gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.]

[27] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256. [Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.]

[28] 傅成玉. 非常规油气资源勘探开发 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2015. [Fu Chengyu. Exploration and development for unconventional hydrocarbons [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2015.]

[29] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价 [J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331. [Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.]

[30] 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 [J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187. [Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.]

[31] 全国石油天然气标准化技术委员会. GB/T 38718—2020 页岩油地质评价方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. [National Technical Committee of Petroleum and Natural Gas Standardization. GB/T 38718-2020 Geological evaluating methods for shale oil [S]. Beijing: China Standards Press, 2020.]

[32] 杨智, 邹才能. “进源找油”: 源岩油气内涵与前景 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 173-184. [Yang Zhi, Zou Caineng. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Connotation and prospects of source rock oil and gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 173-184.]

[33] 李国欣, 罗凯, 石德勤. 页岩油气成功开发的关键技术、先进理念与重要启示: 以加拿大都沃内项目为例 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 739-749. [Li Guoxin, Luo Kai, Shi Deqin. Key technologies, engineering management and important suggestions of shale oil/gas development: Case study of a Duvernay shale project in western Canada sedimentary basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 739-749.]

[34] 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819-828. [Hu Suyun, Zhao Wenzhi, Hou Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819-828.]

[35] 刘姝君, 操应长, 梁超. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩特征及沉积环境 [J]. 古地理学报, 2019, 21(3): 479-489. [Liu Shujun, Cao Yingchang, Liang Chao. Lithologic characteristics and sedimentary environment of fine-grained sedimentary rocks of the Paleogene in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(3): 479-489.]

[36] 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 931-939. [Dong Guiyu, Chen Hongde, He Youbin, et al. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediments [J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(9): 931-939.]

[37] 葛克来, 操应长, 朱如凯, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层岩石类型及特征 [J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1495-1507. [Xi Kelai, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. Rock types and characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimas Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1495-1507.]

[38] 刘惠民, 孙善勇, 操应长, 等. 东营凹陷沙三段下亚段细粒沉积岩岩相特征及其分布模式 [J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 1-10. [Liu Huimin, Sun Shanyong, Cao Yingchang, et al. Lithofacies characteristics and distribution model of fine-grained sedimentary rock in the lower Es₃ member, Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 1-10.]

[39] 刘惠民, 于炳松, 谢忠怀, 等. 陆相湖盆富有机质页岩微相特征及对页岩油富集的指示意义: 以渤海湾盆地济阳坳陷为例 [J]. 石油学报, 2018, 39(12): 1328-1343. [Liu Huimin, Yu Bingsong, Xie Zhonghuai, et al. Characteristics and implications of micro-lithofacies in lacustrine-basin organic-rich shale: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(12): 1328-1343.]

[40] 吴靖, 姜在兴, 梁超. 东营凹陷沙河街组四段上亚段细粒沉积岩岩相特征及与沉积环境的关系 [J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1110-1122. [Wu Jing, Jiang Zaixing, Liang Chao. Lithofacies characteristics of fine-grained sedimentary rocks in the upper submember of member 4 of Shahejie Formation, Dongying Sag and their relationship with sedimentary environment [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(10): 1110-1122.]

[41] 杜学斌, 刘晓峰, 陆永潮, 等. 陆相细粒混合沉积分类、特征及发育模式: 以东营凹陷为例 [J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1324-1333. [Du Xuebin, Liu Xiaofeng, Lu Yongchao, et al. Classification, characteristics and development models of continental fine-grained mixed sedimentation: A case study of Dongying Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1324-1333.]

[42] 印森林, 李弘林, 许长福, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组混积岩元素特征及水平井导向控制点技术 [J]. 长江大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 16-27. [Yin Senlin, Li Honglin, Xu Changfu, et al. Element characteristics of mixed rocks and horizontal well geosteering control point technique of Lucaogou Formation in Jimas Sag [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2021, 18(2): 16-27.]

[43] 滕建彬, 刘惠民, 邱隆伟, 等. 东营凹陷古近系湖相细粒混积岩沉积成岩特征 [J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3808-3826.

[Teng Jianbin, Liu Huimin, Qiu Longwei, et al. Sedimentary and diagenetic characteristics of lacustrine fine-grained hybrid rock in Paleogene Formation in Dongying Sag [J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3808-3826.]

[44] Schieber J, Zimmerle W, Sethi P. Shales and mudstones: Basin studies, sedimentology, and paleontology [M]. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1998, 1: 13-20.

[45] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91 (4): 523-533.

[46] 蒋克来,李克,操应长,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长³亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式[J].石油勘探与开发,2020,47(6):1244-1255. [Xi Kelai, Li Ke, Cao Yingchang, et al. Laminae combination and shale oil enrichment patterns of Chang³ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47 (6): 1244-1255.]

[47] 柳波,孙嘉慧,张永清,等.松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式[J].石油勘探与开发,2021,48(3):521-535. [Liu Bo, Sun Jiahui, Zhang Yongqing, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, southern Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 521-535.]

[48] 刘占国,张永庶,宋光永,等.柴达木盆地英西地区咸化湖盆混积碳酸盐岩岩相特征与控储机制[J].石油勘探与开发,2021,48(1):68-80. [Liu Zhanguo, Zhang Yongshu, Song Guangyong, et al. Mixed carbonate rocks lithofacies features and reservoirs controlling mechanisms in the saline lacustrine basin in Yingxi area, Qaidam Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 68-80.]

[49] 支东明,宋永,何文军,等.准噶尔盆地中一下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向[J].新疆石油地质,2019,40(4):389-401. [Zhi Dongming, Song Yong, He Wenjun, et al. Geological characteristics, resource potential and exploration direction of shale oil in Middle-Lower Permian, Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(4): 389-401.]

[50] Picard M D. Classification of fine-grained sedimentary rocks [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1971, 41(1): 179-195.

[51] Stow D A V, Huc A Y, Bertrand P. Depositional processes of black shales in deep water [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(4): 491-498.

[52] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].2版.北京:地质出版社,2013. [Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. *Unconventional petroleum geology* [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2013.]

[53] 李书琴,印森林,高阳,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混合细粒岩沉积微相[J].天然气地球科学,2020,31(2):235-249. [Li Shuqin, Yin Senlin, Gao Yang, et al. Study on sedimentary microfacies of mixed fine-grained rocks in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(2): 235-249.]

[54] 匡立春,唐勇,雷德文,等.准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J].石油勘探与开发,2012,39(6):657-667. [Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39 (6): 657-667.]

[55] 马克,侯加根,刘钰铭,等.吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组咸化湖混合沉积模式[J].石油学报,2017,38(6):636-648. [Ma Ke, Hou Jiagen, Liu Yuming, et al. The sedimentary model of saline lacustrine mixed sedimentation in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38 (6): 636-648.]

[56] 支东明,唐勇,何文军,等.准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规—非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J].石油勘探与开发,2021,48(1):38-51. [Zhi Dongming, Tang Yong, He Wenjun, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 38-51.]

[57] 付金华,李士祥,牛小兵,等.鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J].石油勘探与开发,2020,47(5):870-883. [Fu Jinhua, Li Shixiang, Niu Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47 (5): 870-883.]

[58] 赵贤正,蒲秀刚,韩文中,等.细粒沉积岩性识别新方法与储集层甜点分析:以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J].石油勘探与开发,2017,44(4):492-502. [Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Han Wenzhong, et al. A new method for lithology identification of fine grained deposits and reservoir sweet spot analysis: A case study of Kong 2 member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(4): 492-502.]

[59] 匡立春,孙中春,欧阳敏,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组复杂岩性致密油储层测井岩性识别[J].测井技术,2013,37(6):638-642. [Kuang Lichun, Sun Zhongchun, Ouyang Min, et al. Complication lithology logging identification of the Lucaogou tight oil reservoir in Jimusaer Depression [J]. *Well Logging Technology*, 2013, 37(6): 638-642.]

[60] 邹才能,潘松圻,荆振华,等.页岩油气革命及影响[J].石油学报,2020,41(1):1-12. [Zou Caineng, Pan Songqi, Jing Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 1-12.]

[61] 裴亦楠.石油开发地质方法论(一)[J].石油勘探与开发,1996(2):43-47,115. [Qiu Yinan. The methodology of petro-

leum development geology (1) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996(2): 43-47, 115.]

[62] 吴胜和,杨延强. 地下储层表征的不确定性及科学思维方法 [J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(2): 72-80. [Wu Shenghe, Yang Yanqiang. Uncertainty and scientific methodology in subsurface reservoir characterization [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(2): 72-80.]

[63] 于兴河. 油气储层表征与随机建模的发展历程及展望 [J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 1-15. [Yu Xinghe. A review of development course and prospect of petroleum reservoir characterization and stochastic modeling [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15 (1): 1-15.]

[64] 岳大力,王军,王延忠,等. 古河道储层构型层次分析法:以孤岛油田馆陶组曲流河为例 [J]. 地质科学, 2010, 45(3): 832-843. [Yue Dali, Wang Jun, Wang Yanzhong, et al. Hierarchy analysis in paleochannel reservoir architecture: A case study of meandering river reservoir of Guantao Formation, Gudao oil-field [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2010, 45(3): 832-843.]

[65] 马世忠,张永清. 应用遥感信息图像研究现代水下分流河道河流类型 [J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 24-31. [Ma Shizhong, Zhang Yongqing. Research on the channel pattern of present subaqueous distributary channel by remote sensing image [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 24-31.]

[66] 张昌民,刘江艳,潘进,等. 玛湖凹陷百口泉组砂砾岩建筑结构要素层次分析 [J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 23-34. [Zhang Changmin, Liu Jiangyan, Pan Jin, et al. Hierarchical architectural element analysis for sandy conglomerate deposits of Baikouquan Formation, Mahu Sag [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018, 39(1): 23-34.]

[67] 印森林,吴胜和,冯文杰,等. 冲积扇储集层内部隔夹层样式:以克拉玛依油田一中区克下组为例 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 757-763. [Yin Senlin, Wu Shenghe, Feng Wenjie, et al. Patterns of inter-layers in the alluvial fan reservoirs: A case study on Triassic Lower Karamay Formation, Yizhong area, Karamay oilfield, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 757-763.]

[68] 吴胜和,冯文杰,印森林,等. 冲积扇沉积构型研究进展 [J]. 古地理学报, 2016, 18(4): 497-512. [Wu Shenghe, Feng Wenjie, Yin Senlin, et al. Research advances in alluvial fan depositional architecture [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18 (4): 497-512.]

[69] 于兴河. 油田开发中后期储层面临的问题与基于沉积成因的地质表征方法 [J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 1-14. [Yu Xinghe. Existing problems and sedimentogenesis-based methods of reservoir characterization during the middle and later periods of oil-field development [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 1-14.]

[70] 印森林,陈恭洋,戴春明,等. 河口坝内部储层构型及剩余油分布特征:以大港油田枣南断块长轴缓坡辫状河三角洲为例 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 630-639. [Yin Senlin, Chen Gongyang, Dai Chunming, et al. Reservoir architecture and remaining oil distribution in mouth bar: A case study on the braided delta of long-axis gentle slope in Zaonan fault block of Dagang oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36 (4): 630-639.]

[71] 商晓飞,段太忠,侯加根,等. 湖泊滨岸砂坝沉积砂泥空间配置关系及其地质意义 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 902-915. [Shang Xiaofei, Duan Taizhong, Hou Jiagen, et al. Spatial configuration of sand and mud in the lacustrine nearshore sand bar deposits and its geological implications [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 902-915.]

[72] 张佳佳,吴胜和. 海底扇朵叶沉积构型研究进展 [J]. 中国海上油气, 2019, 31(5): 88-106. [Zhang Jiajia, Wu Shenghe. Research progress on the depositional architecture of submarine-fan lobes [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(5): 88-106.]

[73] Miall A D. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. *Earth-Science Reviews*, 1985, 22(4): 261-308.

[74] Miall A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: Anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55 (3/4): 233-262.

[75] 印森林,高阳,胡张明,等. 基于无人机倾斜摄影的露头多点地质统计模拟:以山西吕梁坪头乡石盒子组为例 [J]. 石油学报, 2021, 42(2): 198-216. [Yin Senlin, Gao Yang, Hu Zhangming, et al. Multiple-point geostatistical simulation of outcrop based on UAV oblique photographic data: A case study of Shihetzi Formation in Pingtou township, Lvliang city, Shanxi [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 198-216.]

Advances in Continental Shale Oil Research and Problems of Reservoir Geology

YIN SenLin¹, XIE JianYong², CHENG LeLi¹, WU YouXin³, ZHU BaiYu¹, CHEN GongYang¹, ZHAO JunWei¹

1. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China

2. PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China

3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: The current status of research and several key issues regarding the distribution, types and potential of continental shale oil resources, based on the concept of shale oil, its evolution and research history were assessed following an extensive literature review. This paper addresses the geological problems and prospects for the efficient development of continental shale oil. (1) A definition of shale oil and its development and production significance is proposed. The development of shale oil has undergone three stages in China and elsewhere: the theoretical understanding of shale oil has been deepened, and the development effect and level have been gradually improved. Continental shale oil is a rich resource with abundant potential, so it is a future key target for China. (2) Continental shale oil is classified into four main types, based on maturity level: solid organic matter; stagnant hydrocarbon; liquid hydrocarbon; and liquid hydrocarbon cracked gas. Oil shales are classified into three main types based on their source and reservoir: source-reservoir coexistence; separate source and reservoir; and shale type. Oil shales are also classified into four main types based on their development history: sandwich type; mixed accumulation type; shale type; and fracture type. (3) The study of continental shale oil has progressed considerably in areas such as the classification and deposition pattern of fine-grained sedimentary rocks, microscopic characteristics of source and reservoir rocks, enrichment mechanism, “seven characteristics”, and industrial exploitation technology. (4) The source-reservoir architecture of continental shale oil is strongly heterogeneous, and strengthening four aspects of geological research into its developmental is urgently needed in order to improve the economic efficiency and recovery rate of shale oil delivery. These research areas are (i) targeting ultra-high-frequency base-level cycles of fine-grained sedimentary shale; (ii) low-level sub-configuration unit genesis and distribution models of semi-deep and deep lacustrine deposits; (iii) facies-restrained reservoir quality variability; and (iv) geotechnical engineering emphasis on rapid location of the sweet spot.

Key words: continental shale oil; fine-grained sedimentology; reservoir architecture; reservoir production geology; reservoir heterogeneity; geological engineering integration