



CSCD 核心期刊  
中文核心期刊  
中国科技核心期刊

ISSN 1672-7703  
CN 11-5215/TE

# 中国石油勘探

CHINA PETROLEUM EXPLORATION

**“页岩油勘探开发”专刊**

**新发现:**

**王清华等 塔西南山前地区恰探1井石炭系一二叠系重大突破与勘探前景**



ISSN 1672-7703



中国石油天然气集团有限公司  
中国石油天然气股份有限公司  
油气和新能源分公司  
石油工业出版社有限公司

主 管  
技术主管  
主 办

**2023.4**

第28卷 第4期 (总第147期)  
Vol.28 No.4

# 《中国石油勘探》编委会

主 任 (Chairman):

赵政璋 Zhao Zhengzhang

副主任 (Vice-Chairmen):

赵文智 Zhao Wenzhi      杜金虎 Du Jinhu      李俊军 Li Junjun      冯建辉 Feng Jianhui  
朱伟林 Zhu Weilin

顾 问 (Advisors):

戴金星 Dai Jinxing      罗平亚 Luo Pingya      胡见义 Hu Jianyi      贾承造 Jia Chengzao  
苏义脑 Su Yiniao      童晓光 Tong Xiaoguang      马永生 Ma Yongsheng      胡文瑞 Hu Wenrui

委 员 (Members): (按姓氏笔画排序)

王小军 Wang Xiaojun	王玉华 Wang Yuhua	王学军 Wang Xuejun	王英明 Wang Yingming
邓运华 Deng Yunhua	付金华 Fu Jinhua	付锁堂 Fu Suotang	石 林 Shi Lin
田 军 Tian Jun	匡立春 Kuang Lichun	刘 合 Liu He	刘池阳 Liu Chiyang
刘德来 Liu Delai	任战利 Ren Zhanli	何发岐 He Faqi	何海清 He Haiqing
宋明水 Song Mingshui	吴 奇 Wu Qi	吴永平 Wu Yongping	张 玮 Zhang Wei
张 镇 Zhang Zhen	张以明 Zhang Yiming	张守良 Zhang Shouliang	张道伟 Zhang Daowei
李 岫 Li Xun	李国欣 Li Guoxin	杨 华 Yang Hua	邹才能 Zou Caineng
孟卫工 Meng Weigong	庞雄奇 Pang Xiongqi	范土芝 Fan Tuzhi	范铭涛 Fan Mingtao
金之钧 Jin Zhijun	查 明 Zha Ming	胡启月 Hu Qiyue	胥 云 Xu Yun
赵邦六 Zhao Bangliu	赵志魁 Zhao Zhikui	赵贤正 Zhao Xianzheng	郝 芳 Hao Fang
秦 都 Qin Du	夏义平 Xia Yiping	徐凤银 Xu Fengyin	徐春春 Xu Chunchun
袁选俊 Yuan Xuanjun	梁 兴 Liang Xing	梁世君 Liang Shijun	焦大庆 Jiao Daqing
董月霞 Dong Yuexia	蒋裕强 Jiang Yuqiang	窦立荣 Dou Lirong	漆立新 Qi Lixin
蔡东升 Cai Dongsheng	蔡勋育 Cai Xunyu	樊太亮 Fan Tailiang	潘仁芳 Pan Renfang
薛良清 Xue Liangqing	Ahmed Chaouche(美国)	Bernhard M. Krooss(德国)	Kelli Kane(美国)
Keyu Liu(澳大利亚)	Maowen Li(加拿大)		

主 编 (Editor-in-Chief):

赵文智 Zhao Wenzhi

副主编 (Associate Editors-in-Chief):

何海清 He Haiqing      周家尧 Zhou Jiayao

执行副主编 (Executive Associate Editor-in-Chief):

马新福 Ma Xinfu



# 目次

## 中国石油勘探 (双月刊 1996 年创刊)

第 28 卷 第 4 期 2023 年 7 月 15 日出版

### 勘探战略

中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势····· 赵文智 朱如凯 张婧雅 杨静儒 1

### 勘探管理

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统地质特征与勘探开发实践  
····· 支东明 李建忠 杨帆 康积伦 张伟 马强 陶林本 14

渤海湾盆地沧东凹陷页岩油效益开发探索与突破····· 周立宏 陈长伟 杨飞 崔宇 宋舜尧 官全胜 周凤春 24

### 勘探案例

塔西南山前地区恰探 1 井石炭系—二叠系重大突破与勘探前景  
····· 王清华 杨海军 李勇 蔡振忠 杨宪彰 徐振平 陈才 孙春燕 34

### 石油地质

烃类源内微运移对页理型页岩油差异富集的影响——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长<sub>7</sub>亚段为例  
····· 李士祥 郭茂恒 潘松圻 周新平 郭睿良 46

海陆相页岩型页岩油地质特征的差异与甜点评价——以北美二叠盆地 Wolfcamp D 页岩油与松辽盆地古龙页岩油为例 ····· 刘羽汐 白斌 曹健志 王瑞 朱如凯 孟思炜 侯秀林 55

四川盆地侏罗系凉高山组页岩油地质特征  
····· 方锐 蒋裕强 杨长城 王占磊 孙莎莎 朱讯 李顺 谷一凡 周亚东 刘冬玺 罗垚 罗宇卓 66

鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长<sub>7</sub>亚段页岩油储层特征与勘探前景  
····· 孙建博 石彬 郭超 高潮 白奋飞 刘刚 尹锦涛 徐杰 79

### 工程技术

页岩油水平井穿层压裂先导性试验——以鄂尔多斯盆地庆城油田华 H100 平台为例 ····· 张云逸 92

柴达木盆地西部英雄岭页岩油地质工程一体化压裂技术创新与实践····· 谢贵琪  
林海 刘世铎 刘永 万有余 张成娟 李亚锋 崔荣龙 雷丰宇 隋国杰 邓立本 张涛 刘欢 刘云翼 蒲永霞 105

柴达木盆地英雄岭页岩油 CP1 井压裂后甜点分析 ····· 郭得龙  
申颖浩 林海 熊廷松 赵健 王小琼 伍坤宇 赵文凯 邢浩婷 张静 冯昕媛 肖倩 赵恩东 张少斌 张木杨 117

基于经济效益评价的页岩油水平井加密调整参数优化——以鄂尔多斯盆地 XAB 油田长 7 页岩油藏为例  
····· 杨晋玉 陈晓平 李超 郑奎 张宝娟 陈春恒 129

# Contents

## China Petroleum Exploration

(Bimonthly, Started in 1996)

Vol.28, No.4, Jul. 2023

### EXPLORATION STRATEGY

Classification, exploration and development status and development trend of continental shale oil in China

..... Zhao Wenzhi, Zhu Rukai, Zhang Jingya, Yang Jingru (1)

### EXPLORATION MANAGEMENT

Geological characteristics and exploration and development practice of the Permian full oil and gas system in Jimsar Sag, Junggar Basin

..... Zhi Dongming, Li Jianzhong, Yang Fan, Kang Jilun, Zhang Wei, Ma Qiang, Tao Linben (14)

Research and breakthrough of benefit shale oil development in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin

..... Zhou Lihong, Chen Changwei, Yang Fei, Cui Yu, Song Shun Yao, Guan Quansheng, Zhou Fengchun (24)

### EXPLORATION CASES

Major breakthrough in the Carboniferous-Permian in Well Qiatan 1 and exploration prospect in the piedmont southwestern Tarim Basin

... Wang Qinghua, Yang Haijun, Li Yong, Cai Zhenzhong, Yang Xianzhang, Xu Zhenping, Chen Cai, Sun Chunyan (34)

### PETROLEUM GEOLOGY

Influence of intrasource micro-migration of hydrocarbons on the differential enrichment of laminated type shale oil: a case study of the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin .....

Li Shixiang, Guo Qiheng, Pan Songqi, Zhou Xinping, Guo Ruiliang (46)

Differences in geological characteristics and sweet spots evaluation of marine and continental shale oil: a comparative case study between Wolfcamp D shale oil in Permian Basin in north America and Gulong shale oil in Songliao Basin .....

Liu Yuxi, Bai Bin, Cao Jianzhi, Wang Rui, Zhu Rukai, Meng Siwei, Hou Xiulin (55)

Geological characteristics of shale oil in the Jurassic Lianggaoshan Formation in Sichuan Basin

..... Fang Rui, Jiang Yuqiang, Yang Changcheng, Wang Zhanlei, Sun Shasha, Zhu Xun, Li Shun, Gu Yifan, Zhou Yadong, Liu Dongxi, Luo Yao, Luo Yuzhuo (66)

Characteristics of shale oil reservoir and exploration prospects in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian area, Ordos Basin

..... Sun Jianbo, Shi Bin, Guo Chao, Gao Chao, Bai Fenfei, Liu Gang, Yin Jintao, Xu Jie (79)

### PETROLEUM ENGINEERING

Pilot test of cross-layer fracturing in horizontal shale oil well: a case study of Hua H100 platform in Qingcheng Oilfield .....

Zhang Yunyi (92)

Innovation and practice of geology and engineering integrated fracturing technology for shale oil in Yingxiongling area in the western Qaidam Basin .....

Xie Guiqi, Lin Hai, Liu Shiduo, Liu Yong, Wan Youyu, Zhang Chengjuan, Li Yafeng, Cui Ronglong, Lei Fengyu, Sui Guojie, Deng Liben, Zhang Tao, Liu Huan, Liu Yunyi, Pu Yongxia (105)

Post fracturing shale oil sweet spot evaluation in Well CP1 in Yingxiongling area, Qaidam Basin

..... Guo Delong, Shen Yinghao, Lin Hai, Xiong Tingsong, Zhao Jian, Wang Xiaoqiong, Wu Kunyu, Zhao Wenkai, Xing Haoting, Zhang Jing, Feng Xiyuan, Xiao Qian, Zhao Endong, Zhang Shaobin, Zhang Muyang (117)

Optimization of infill adjustment parameters of horizontal shale oil wells based on economic benefit evaluation: a case study of shale oil reservoir in the seventh member of Yanchang Formation in XAB Oilfield, Ordos Basin

..... Yang Jinyu, Chen Xiaoping, Li Chao, Zheng Kui, Zhang Baojuan, Chen Chunheng (129)



引用: 赵文智, 朱如凯, 张婧雅, 等. 中国大陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 1-13.

Zhao Wenzhi, Zhu Rukai, Zhang Jingya, et al. Classification, exploration and development status and development trend of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 1-13.

# 中国大陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势

赵文智<sup>1</sup> 朱如凯<sup>1,2</sup> 张婧雅<sup>1</sup> 杨静儒<sup>1</sup>

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油油气储层重点实验室)

**摘要:** 通过对国内外页岩油分类现状的综合分析和中美页岩油勘探开发历程、储产量现状、水平井产量特征的对比, 分析了中美页岩油地质条件、资源质量、可开采性、经济性及规模性差异, 提出用“地名+页岩油”或“地名+地层单位+页岩油”定义我国陆相页岩油区带, 在此基础上, 进一步按两个层次划分, 首先根据砂地比(源储比)或沉积相带划分为致密油型页岩油、过渡型页岩油、纯正型页岩油, 然后针对纯正型页岩油, 根据热成熟度或油品性质, 划分中高熟、中低熟类型, 或者轻质油区、稠油区、重油区、稠油区等。针对中高熟陆相页岩油, 在2025年以前, 应集中攻关中高熟高压区页岩油富集区/段评价, 做好试采工作, 攻关最佳开采技术, 最大限度降低成本, 提高单井初始产量和累计采出量, 预计全国页岩油年产量达到 $(600\sim 1000)\times 10^4\text{t}$ ; 2025—2035年, 进一步升级和优化技术, 降低成本, 全国页岩油年产量力争达到 $(1200\sim 1500)\times 10^4\text{t}$ , 成为我国原油年产 $2\times 10^8\text{t}$ 的重要补充。针对中低熟页岩油, 现阶段做好鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>亚段部署页岩油原位转化先导试验, 力争2030年前后实现关键装备与核心技术国产化, 进入规模商业开发阶段, 年产原油能达到千万吨级规模。

**关键词:** 陆相页岩油; 中高熟页岩油; 中低熟页岩油; 原位转化; 发展趋势

**中图分类号:** TE16 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.04.001

## Classification, exploration and development status and development trend of continental shale oil in China

Zhao Wenzhi<sup>1</sup>, Zhu Rukai<sup>1,2</sup>, Zhang Jingya<sup>1</sup>, Yang Jingru<sup>1</sup>

(1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 2 CNPC Key Laboratory of Oil and Gas Reservoirs)

**Abstract:** By comprehensively analyzing the current classification scheme of shale oil at home and abroad, and comparing the exploration and development history, shale oil reserves and output status, and production performance of horizontal wells in China and the United States, the differences in geological conditions, resource quality, recoverability, economy and scale of shale oil between the two countries are analyzed. It is proposed to define the continental shale oil zones in China by using the nomenclature of “geographical location + shale oil” or “geographical location + stratigraphic unit + shale oil”. Furthermore, the shale oil types are classified according to two levels: Firstly, the shale oil is divided into three types based on the sandstone-to-formation ratio (the ratio of source rock to reservoir) or sedimentary facies zones, namely tight oil type shale oil, transitional type shale oil, and pure shale oil; Then the pure shale oil is further subdivided into medium-high mature shale oil and medium-low mature shale oil, or in another way, it is subdivided into light oil, thin oil, heavy oil, and viscous oil zones based on the maturity or oil properties. For the medium-high mature continental shale oil targets, efforts should be focused on the evaluation of enrichment zones/intervals in high-pressure zones, as well as trial production, and research on optimal production technology before 2025, so as to reduce

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“陆相页岩油富集主控因素与有利区带评价方法”(42090020); 国家自然科学基金联合基金项目“中低成熟度陆相页岩油资源形成与原位转化开采机理”(U22B6004)。

第一作者简介: 赵文智(1958—), 男, 河北昌黎人, 博士, 2003年毕业于中国石油勘探开发研究院, 中国工程院院士, 主要从事油气勘探地质综合研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号中国石油勘探开发研究院910信箱, 邮政编码: 100083。E-mail: zzw@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-05-29; 修改日期: 2023-07-07

costs to the maximum extent and improve initial single-well production and cumulative output. It is estimated that the annual shale oil output in China will be  $600 \times 10^4 \text{ t}$  to  $1000 \times 10^4 \text{ t}$ . During the 2025-2035, technology will be further upgraded and optimized to reduce costs, and the annual shale oil output is expected to be  $1200 \times 10^4 \text{ t}$  to  $1500 \times 10^4 \text{ t}$ , growing to be a major supplement to crude oil production with an annual capacity of  $2 \times 10^8 \text{ t/a}$ . As for medium-low mature shale oil, pilot test on the in-situ conversion of shale oil in Chang 7<sub>3</sub> sub-member in Ordos Basin is focused at present; At around 2030, the critical equipment and core technologies will be localized hopefully, and the large-scale and commercial development of shale oil will be achieved, with an annual shale oil output of ten millions of tons.

**Key words:** continental shale oil, medium-high mature shale oil, medium-low mature shale oil, in-situ conversion, development trend

## 0 引言

我国页岩油资源丰富,是推动国内原油增产稳产的重要接替领域<sup>[1-11]</sup>。围绕富有机质页岩的发育环境、有机质富集主控因素、生排烃机理与排烃效率、可动烃富集主控因素、储层岩石类型及组合、纹层结构及纹层组合类型、储集空间与储集性、页岩油赋存状态与富集机理、甜点段/区评价参数指标与评价、勘探开发技术、勘探实践成效等,众多学者开展了大量研究,发表了大量文献<sup>[1-23]</sup>。在实验技术方面,建立了数字岩石智能化定量评价技术、QEMSCAN—拉曼矿物分析技术、孔隙—裂缝多尺度融合—演化模拟技术、微纳米孔石油赋存地球化学表征技术、有机质原位高分辨率定量分析技术、可动流体核磁共振分析技术、微纳米尺度流体流动模拟技术、成岩物理模拟与孔隙保持评价技术、岩石薄片智能鉴定技术与系统等关键技术;在勘探评价技术方面,建立了高精度地震预测甜点区技术、高分辨测井预测甜点段技术、甜点区/段“六性”评价技术等技术系列;在开发工程方面,形成了页岩油体积开发理论与评价技术、大平台—井工厂开发技术、长水平段水平井优快钻井技术、水平井一趟钻技术、页岩油原位转化技术、水平井旋转导向技术、高性能钻井液与体积压裂技术、顶部驱动与安全下套管技术等核心技术<sup>[1,7,10]</sup>,有效指导了我国陆相页岩油的勘探开发。应该说,我国陆相页岩油勘探开发已取得重要进展,中国石油长庆油田公司在鄂尔多斯盆地长7段探明地质储量超  $10 \times 10^8 \text{ t}$  的页岩油整装大油田<sup>[14,18]</sup>;中国石油大庆油田公司在松辽盆地古龙页岩油新增预测地质储量  $12.68 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[6]</sup>;中国石油青海油田公司在柴达木盆地页岩油勘探取得重大战略性突破<sup>[17]</sup>;中国石油大港油田公司在沧东凹陷孔二段及歧口凹陷沙一段实现了中等成熟度页岩油高产—稳产勘探突破<sup>[19,21-22]</sup>;中国石化胜利油田分公司新增预测页岩油地质储量  $4.58 \times 10^8 \text{ t}$ ;中国石化华东石油局在苏北盆地溱潼凹

陷钻探的3口页岩油探井获高产页岩油流<sup>[7,15,20]</sup>;相继设立了吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区、古龙陆相页岩油国家级示范区、胜利济阳陆相页岩油国家级示范区<sup>[10]</sup>,2022年页岩油产量达  $318 \times 10^4 \text{ t}$ 。目前已获得页岩油突破的区带产量差异显著,究其原因页岩油甜点类型、富集规律、流动方式和可改造性存在差异,尤其是与致密油的区分仍存在较大的争议,我国陆相页岩油的发展前景也仍不明朗。

本文通过对页岩油概念发展演化的梳理,同时分析了目前国内外对于页岩油的定义、分类等,继而提出了相关建议,期望能对我国陆相页岩油的发展有所借鉴,有利于国际交流与合作。同时通过对中美页岩油发展历程、储产量情况及水平井产量特征的对比分析,分析了我国中高熟、中低熟页岩油的发展趋势,以期更好地推动我国陆相页岩油的发展进程。

## 1 页岩油类型

页岩油实际是很早就出现了一个术语。早在19世纪中叶就出现了“油页岩”(oil shale)这一术语,20世纪20—30年代出现了页岩油(shale oil)术语。早期的国内外文献中,“shale oil”指从油页岩中依靠人工提炼得到的石油。油页岩加工时有机质(主要是油母质)受热裂解(也称干馏)生成类似天然石油的产物。在21世纪初,“tight oil”“shale oil play”“shale oil”“tight oil/shale oil”等概念开始出现,专指应用物理开采方式从页岩层系中采出的石油;而油页岩油(oil-shale oil)或干酪根油(kerogen oil)专指从油页岩中干馏生产的石油。

### 1.1 国际上页岩油分类

国际上页岩油的分类,主要有两种方式。

一是从非常规资源类型角度进行划分。如美国联邦地质调查局(USGS)一般用连续型油气资源概念,包括致密油和页岩油<sup>[24]</sup>。美国国家石油委员会(NPG)将油页岩提炼的石油称为“页岩油”,将页

岩层系中通过物理方式开采的石油称为“致密油”<sup>[25]</sup>。美国能源信息署(EIA)将产自页岩层系的油气划分为致密油、页岩气两大类<sup>[26]</sup>,致密油主要产自页岩层系中的钙质页岩、粉/细砂岩和碳酸盐岩(多种类型岩相),其中的伴生气统计为页岩气;页岩气主要产自页岩层系中的钙质页岩、硅质页岩(岩相较为单一),其中凝析液统计为致密油。加拿大国家能源委员会(NEB)将致密油区带(tight oil plays)划分为3种类型:裙边型区带(halo play)、地层区带(geo-stratigraphic play)、页岩油区带(shale oil play)，“shale oil play”中的石油指含在页岩中的石油<sup>[27]</sup>。加拿大致密油联盟团体(TOC)将非常规轻质油划分为致密油(tight oil)、裙边油藏<sup>[28]</sup>或裙边型致密油<sup>[29]</sup>或环边油<sup>[14,30]</sup>或边际区油(halo oil)<sup>[9]</sup>、页岩油(shale oil)3种类型。Jarvie等<sup>[31-32]</sup>定义页岩油资源系统为页岩或与其紧邻相关的贫有机质层内

岩相(如碳酸盐岩)中蕴含的可动油,划分为致密页岩(tight shale)、混合页岩(hybrid shale)、裂缝页岩(fractured shale)3类,在该系统中,将Bakken(巴肯组)、Eagle Ford(鹰滩组)、Niobrara(尼尔布拉组)均归为混合页岩的典型实例。

二是从烃源岩类型、岩性组合、储集性等进行分类。如Bohacs等<sup>[33]</sup>认为页岩储层可以按岩相组合特征、孔隙度—渗透率系统、油气流体流动特性、地层格架、运移距离、衰减曲线、盆地沉积演化背景等进行分类,根据孔隙度—渗透率系统和地层结构分为4类(图1)。Donovan等<sup>[34]</sup>首先按渗透率划分常规储层和非常规储层, $K>0.1\text{mD}$ 为常规储层, $K\leq 0.1\text{mD}$ 为非常规储层,进一步将 $K=0.00001\sim 0.1\text{mD}$ 定义为致密区带, $K<0.00001\text{mD}$ 定义为烃源岩区带;同时将烃源岩区带定义为滞留烃系统,常规储层和致密区带定义为运移烃系统。


系统类型	特征	二次运移	孔渗特征	地层
常规致密储层 源储分异	致密砂岩、粉砂岩、碳酸盐岩互层/少量、未成熟生油岩;黑油到干气	大量		Spraberry Lewis Mancos Mesa Verde
多种岩石组合/互层 源储分异	致密砂岩、粉砂岩、碳酸盐岩互层/大量、成熟烃源岩;轻质油到干气	中等		Bakken Bone Springs 2 <sup>nd</sup> White Specs
多孔泥岩 源储一体	在生油至生气/凝析阶段烃源岩发育大量粒间孔隙/粒内孔隙,包括有机质孔	少量		Eagle Ford Haynesville Barnett Woodford
裂缝泥岩储层 储层近似烃源岩	裂缝、孔隙比较发育的成熟烃源岩;重油到干气	少量		Monterey Woodford Austin Chalk Barnett

图1 各类细粒储层的特征和属性图(据文献[33]修改)

Fig.1 Characteristics and attributes of various types of fine-grained reservoirs (modified after reference [33])

## 1.2 我国页岩油分类

我国学者习惯根据中国陆相页岩油特点,从沉积环境、相态、储层类型、热成熟度、岩性组合、源储组合等进行分类。

### 1.2.1 按海、陆相环境的分类

海相页岩油不是一个专门术语,只是近些年里,国内学者为了与陆相页岩油对比并界定二者间的差异而提出,同时也为了借鉴北美页岩油勘探开发的成功经验,提出了“海相页岩油”这个概念,如黎茂稳等<sup>[35]</sup>提到了陆相页岩油、海相页岩油等名词。

### 1.2.2 按热演化程度的分类

赵文智等<sup>[1,3-4]</sup>提出陆相中低成熟度( $R_o<1.0\%$ )富有机质页岩中,滞留液态烃占总生油量最大比例约25%、未转化有机质达40%~100%,可划分为油页岩、中低熟页岩油、中高熟页岩油3类。邹才能等<sup>[10]</sup>提出黑色页岩资源开发可分为油页岩油、中低成熟页岩油、中高成熟页岩油3类。金之钧等<sup>[8]</sup>指出美国目前大规模开发的是高成熟度页岩油资源,并提出了中高成熟度页岩油与中低成熟度页岩油的发展思路和目标,但中低与中高成熟度的分类界限 $R_o$ 值是0.8%、0.9%还是1.0%,需要进一步研究。杜金虎、胡素云



等<sup>[12-13]</sup>指出中国发育的陆相页岩受热演化程度控制，发育中高与中低成熟度两种类型页岩油。

### 1.2.3 按岩性岩相组合、源储组合的分类

我国陆相页岩主要发育于淡水、咸水、碱湖环境，

岩性复杂，非均质性强。同时，由于我国学者在对页岩油的定义及与致密油的区分等方面存在偏差，因而生产单位、研究部门、高校学者为了便于生产组织部署，均提出了地区性或区域性的分类方案（表1）。

表1 国内不同学者页岩油分类方案表

Table 1 Classification schemes of shale oil by domestic scholars

关键要素	类型	代表性文献
赋存条件和经济可采性	基质含油型、夹层富集型和裂缝富集型	[36],[37]
构造、沉积背景	盐间型、泥页岩夹脆性层型、纯泥页岩型	
储集空间	基质孔隙与微裂缝型、薄夹层与微裂缝型、大尺度裂缝与微裂缝型、大尺度裂缝和薄夹层复合型	[38]
能源矿种及经济性	页岩储层中的石油（裂缝不发育、裂缝性、夹层型）和经过短距离运移后赋存于其他致密储层中的石油（邻近、相隔较远）	[39]
储层特征、赋存条件、源储特征	裂缝不发育型、微孔微缝型、夹层型、微裂缝富集型	[40]
岩性组合与页岩油储集空间类型	基质型、裂缝型和混合型	[15]
页岩层系岩性组合差异	源储一体型、源储分异型、纯页岩型	[12],[16]
页岩层系源岩、储层及源储组合类型差异	源储共存型、源储分离型、纯页岩型	[13]
岩性组合等因素	多期叠置砂岩发育型（Ⅰ类）、页岩夹薄层砂岩型（Ⅱ类）和纯页岩型（Ⅲ类）	[18]
岩性组合	Ⅰ型（纯砂岩型）、Ⅱ型（砂泥型）和Ⅲ型（纯泥岩型）	[41]
源储比	互层型、薄层型、纯页岩型	[42]
夹层厚度	纯页岩油和含夹层页岩油	[19]
“甜点”	夹层型、混积型和页岩型	[11]
岩性组合与油气分布特征	致密油型、过渡型、纯正型	[1],[2]

### 1.3 讨论

从上述页岩油工业实践与研究来看，中国石化系统与高校学者在页岩油类型划分上，基本上分为基质型、裂缝型和夹层型（或混合型）等类型。中国石油系统从2018年以来，基本上有两个方案，一是按岩性组合等因素划分，分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类，即多期叠置砂岩发育型、页岩夹薄层砂岩型与纯页岩型；二是按页岩层系岩性组合差异及源储组合类型差异，分为源储一体（共存）型、源储分异（分离）型、纯页岩型3类。这样的划分方案实际上把部分致密油也列入了其中（特别是Ⅰ类，也含部分Ⅱ类）。其中，有几个术语值得讨论。

（1）“基质型页岩油”（matrix shale oil）。“基质”也叫“杂基”，是沉积岩石学教科书中的常用术语，指砂岩中粒度小于0.03mm的非化学沉淀的颗

粒<sup>[43-44]</sup>。通常来讲，基质是指最初在较粗颗粒之间，通过机械作用沉积下来的细粒沉积物，部分定义仅局限在黏土大小物质，部分学者认为其一般包括粉砂和黏土物质，还有细粉砂和碳酸盐灰泥<sup>[45-47]</sup>。这样“基质型页岩油”概念很容易让人误以为是砂岩基质中的页岩油，故建议不用这一概念。

（2）“纯页岩型页岩油”（exclusive shale oil<sup>[12]</sup>, pure shale oil<sup>[18]</sup>）。在国际上，有人用“‘pure’ source-rock reservoirs”“hybrid source-rock reservoirs”<sup>[48]</sup>“pure shale plays”<sup>[49]</sup>“a ‘pure’ shale”<sup>[50]</sup>“a pure-play shale oil”<sup>[51]</sup>。在中文里，“纯”一般指纯正、纯粹，不含杂质，因此建议，中文用“纯正型页岩油”<sup>[2]</sup>，英文用“pure shale oil”。

（3）“夹层型页岩油”（interlayer shale oil<sup>[52]</sup>, laminated shale oil<sup>[40]</sup>, interbedded shale oil<sup>[53]</sup>, sandwich-type shale oil<sup>[54]</sup>）。“夹层”在地质学中是

一个应用很广泛的术语。在开发地质学中,“夹层”指在砂岩层内所分布的相对非渗透层,分布不稳定<sup>[55]</sup>;在沉积岩石学教科书中,一般将单层厚度小于1cm的层定义为纹层(黏土质、长英质、碳酸盐质),单层厚度大于1cm的粉砂岩层、砂岩层、碳酸盐岩层定义为夹层<sup>[56]</sup>。国内部分学者将Jarvie<sup>[31-32]</sup>定义的“hybrid shale”翻译成“夹层型页岩油”,实际上,北美海相页岩油对于夹层厚度没有明确标准,单层厚度最大可至30m,最小可至0.1m,如Williston(威利斯顿)盆地Bakken页岩油,夹层厚度为10~30m;Permian(二叠)盆地Wolfcamp(狼营组)页岩油夹层厚度多为0.1~0.5m<sup>[20]</sup>。综合以上分析,建议不用“夹层型页岩油”这一术语。

(4) 中低熟与中高熟页岩油。从目前勘探生产实践看,中低熟与中高熟页岩油很难有较好的界定。如鄂尔多斯盆地庆城油田、新安边油田长7段页岩油,基本上 $R_o$ 为0.7%~0.9%。吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油 $R_o$ 为0.52%~1.3%,总体处于低成熟—

成熟演化阶段,目前提交的储量区主要位于 $R_o$ 为0.8%~0.9%范围(图2a)。济阳坳陷是中低熟与中高熟页岩油并存,以中低熟页岩油为主,高热演化程度( $R_o>0.9\%$ )、中等热演化程度( $R_o=0.7\%\sim 0.9\%$ )、低热演化程度( $R_o=0.5\%\sim 0.7\%$ )页岩油资源量分别为 $7\times 10^8\text{t}$ 、 $20\times 10^8\text{t}$ 、 $14\times 10^8\text{t}$ <sup>[20,57]</sup>。沧东凹陷孔二段烃源岩热演化程度适中, $R_o$ 平均为0.5%~1.1%,在甜点区评价时,I类最有利区域 $R_o>0.5\%$ ,TOC>1%,II类区 $R_o>0.5\%$ ,TOC>0.5%;III类区 $R_o<0.5\%$ <sup>[19,21-22]</sup>(图2b)。实际上,很多非常规油气系统中均发生过层内运移和层间运移<sup>[48,58]</sup>,实例显示,产油层原油成熟度比烃源岩成熟度高。对于混合型页岩油(国内称为夹层型或互层型页岩油),油气发生了明显的运移聚集作用,没有必要划分中低熟与中高熟页岩油;对于纯正型页岩油,如鄂尔多斯盆地湖盆中心长7<sub>3</sub>亚段(重力流砂体不发育)、松辽盆地湖盆中心青山口组页岩,可以按成熟度划分中高熟与中低熟页岩油,其开采方式完全不一样<sup>[4]</sup>。

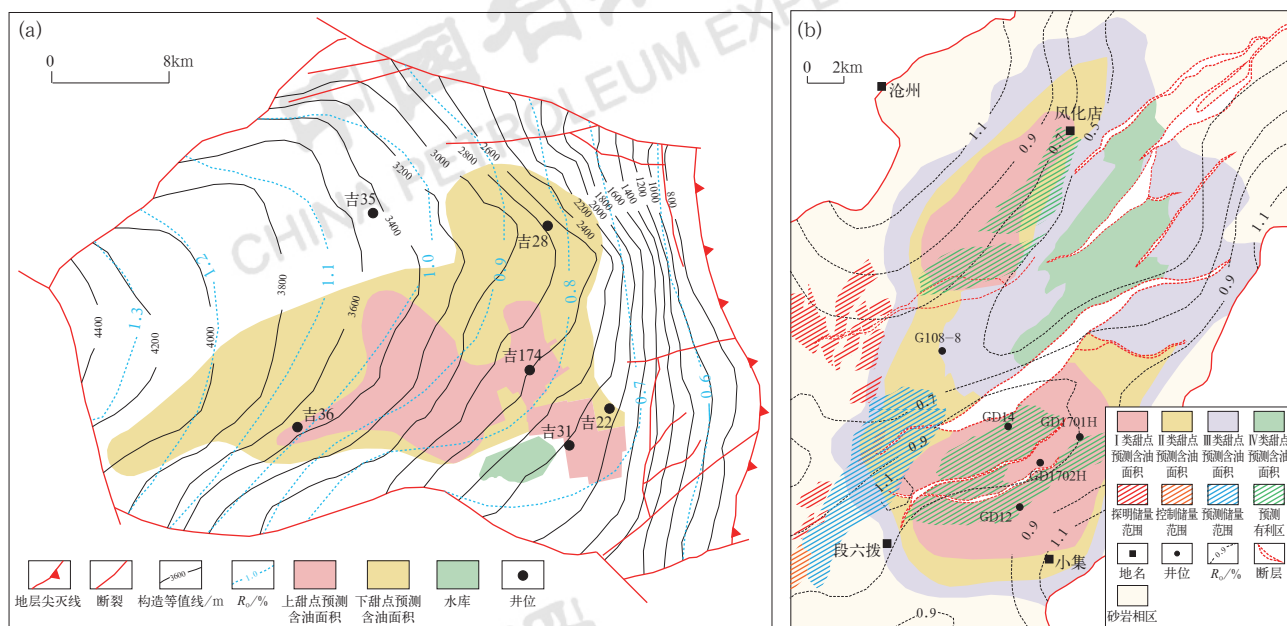


图2 页岩油有利区与 $R_o$ 分布图

Fig.2 Superposition maps of favorable shale oil zones and  $R_o$

(a) 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组; (b) 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段

#### 1.4 建议分类方案

为了规范和便于交流使用,建议参考国际上目前比较通用、并且也比较容易理解的术语体系,用“地名+页岩油”或“地名+地层单位+页岩油”定义

的方式,如巴肯(Bakken)页岩油、鹰滩(Eagle Ford)页岩油、古龙页岩油<sup>[5]</sup>、英雄岭页岩油<sup>[17]</sup>等。在此基础上,可以按两个层次做进一步划分,首先根据砂地比(源储比)或沉积相带进一步划分为致密油型页岩油、过渡型页岩油、纯正型页岩油;在此基础

上,针对纯正型页岩油,根据热成熟度或油品性质,划分中高熟区、中低熟区,或者轻质油区、稀油区、重油区、稠油区等。

## 2 中美页岩油勘探开发现状与生产特征对比分析

目前,世界范围内海相页岩油勘探主要集中在美国、加拿大、阿根廷、俄罗斯等,中国是目前国际上实现陆相页岩油商业规模开发最成功的国家之一。关于中美页岩油地质特征的差异,国内众多学者从岩石类型及组合、TOC、储集性、热成熟度等方面做过大量对比分析,总体看,北美海相页岩层系沉积稳定,油层厚度较大,连续性较好,热成熟度处于轻质油—凝析油窗口,气油比较大,具有较高的地层能量和较好的原油地下流动性,单井可以实现较高初始产量、较高累计产量以及平台式工厂化作业生产,开发效益较好。中国陆相页岩沉积相带横向变化较大,有机质类型虽好但热演化程度普遍偏低;导致原油黏度偏大,气油比偏低,原油地下流动性偏差,且地层能量总体偏低;加之储层黏土矿物含量偏高、脆性指数偏低,虽然可以有较高的单井初始产量,但单井累计采

出量变化较大,如果不能实现低成本开发,经济性面临较大挑战<sup>[1]</sup>。

### 2.1 页岩油勘探历程

自20世纪50年代以来,美国在泥页岩裂缝性油气藏勘探开发中取得了重要进展,发现了圣马丽亚谷油田、卢申油田和鲁兹维利特油田、埃尔克霍恩牧场油田<sup>[59]</sup>。2000年,在威利斯顿盆地巴肯组中段发现了埃尔姆古丽油田,2005年应用水平井与水力压裂技术开发巴肯组中段页岩油,发现帕歇尔油田,2008年“巴肯致密油”被评为全球十大油气发现之一,同年,美国页岩油产量达 $2700 \times 10^4 \text{t}$ ,之后,相继在西部海湾(Western Gulf)盆地鹰滩组(Eagle Ford)、二叠盆地(Permian Basin)狼营组(Wolfcamp)、丹佛(Denver Basin)盆地尼尔布拉组(Niobrara)及阿拉达科(Anadarko)伍德福德组(Woodford)等取得重要进展,实现了规模效益开发,2012年产量跨过了 $1 \times 10^8 \text{t}$ 规模,2015年产量跨过了 $2 \times 10^8 \text{t}$ 规模,2019年跨过了 $3 \times 10^8 \text{t}$ 规模,其增长速度惊人,这主要得益于其水平井数量的成倍增长及技术的进步<sup>[60-61]</sup>(表2、图3)。

表2 美国主要页岩油产区压裂设计、平均井产量及经济性对比表<sup>[61]</sup>

Table 2 Comparison of fracturing design, average well output and economy in the main shale oil production areas in the United States<sup>[61]</sup>

参数	单位	2012 年平均值	2017 年平均值	变化率
水平段长度	ft	5580	7652	37%
压裂段数		19.3	38.6	100%
压裂段长	ft	296	208	-30%
支撑剂量	lb	3506284	11891000	239%
水平段每英尺支撑剂量	lb	677	1632	141%
注入液量	bbl	74411	243983	228%
水平段每英尺注入液量	bbl	14.4	33.2	131%
平均支撑剂浓度	lg/gal	1.17	1.21	3%
最大注入速率	bbl/min	57.6	81.7	42%
水平段每英尺最大注入速率	bbl/min	0.2	0.42	105%
年累计产油量	bbl	61044	108209	77%
水平段每英尺年累计产油量	bbl	12.2	17.7	46%
年产油当量	bbl	91465	159942	75%
水平段每英尺年产油当量	bbl	18.2	25.7	41%
井费用	百万美元	7.2	5.1	-29%



续表

参数	单位	2012 年平均值	2017 年平均值	变化率
每桶油当量费用	美元	86	32	-63%
每桶油费用	美元	128	46	-64%

注：数据来自以下 10 余个盆地 / 油层组的平均值。Williston 盆地 Bakken 和 Three Forks 油层组，PRB Niobrara 和 Frontier/Turner 油层组，DJ Codell 和 Niobrara 油层组，Delaware 盆地的 Wolfcamp、Bone Spring 和 Eagle Ford 油层组；共 2016 口井的生产数据。

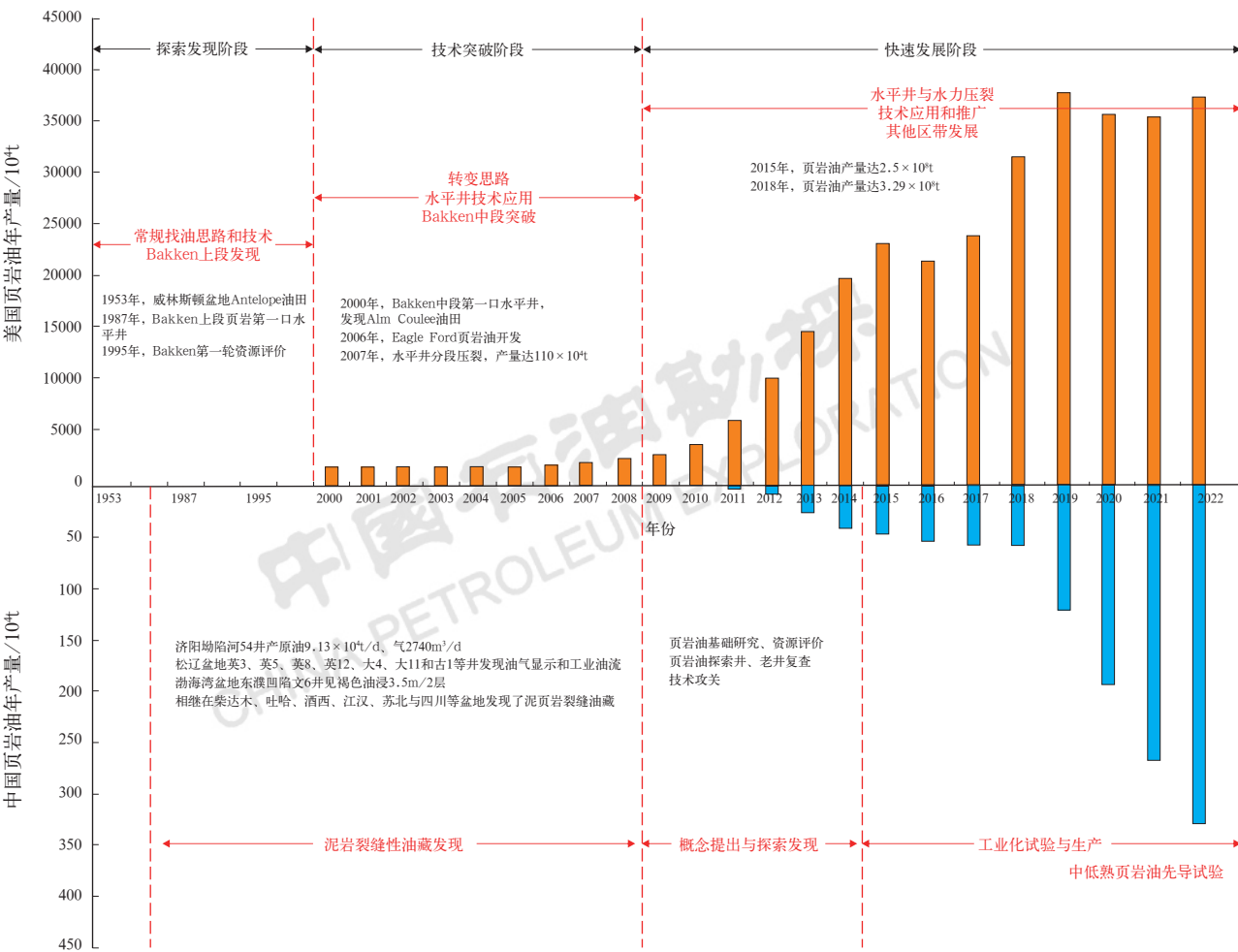


图 3 中美页岩油勘探开发历程对比图

Fig.3 Comparison of shale oil exploration and development history between China and the United States

自 20 世纪 70 年代以来，中国在陆相沉积盆地泥页岩段也发现了多个裂缝性油藏，如渤海湾盆地济阳拗陷东营中央隆起带沙河街组三段下亚段、东濮凹陷沙河街组三段中下亚段、松辽盆地北部的青山口组、柴达木盆地上干柴沟组、酒西盆地白垩系上沟组、江汉盆地潜江组与四川盆地侏罗系。在 2009 年前后，国内引入“连续型油气聚集”“致密油”“页岩油”等概念，开展了地质基础研究、资源评价、甜点评价、工业化试验等探索<sup>[1]</sup>，相继在准噶尔盆地吉木萨尔凹

陷二叠系芦草沟组、玛湖凹陷风城组，三塘湖盆地芦草沟组，渤海湾盆地黄骅拗陷古近系孔店组二段和沙河街组一段、济阳拗陷古近系沙河街组三、四段，松辽盆地白垩系青山口组一、二段，四川盆地川中侏罗系，柴达木盆地英雄岭地区古近系下干柴沟组上段等陆相富有机质页岩层系获得一批重要突破，展示了陆相中高熟页岩油良好的发展前景。2019 年，我国页岩油产量跨过了 100×10<sup>4</sup>t 大关。中低熟页岩油原位转化先导试验也在鄂尔多斯盆地积极推进之中。

## 2.2 页岩油资源量、储产量特征

白国平等<sup>[62]</sup>根据EIA发布的数据指出,截至2018年底,美国页岩油总技术可采资源量为 $205 \times 10^8 \text{t}$ ,其中累计探明可采储量为 $49.7 \times 10^8 \text{t}$ (累计产油 $17.9 \times 10^8 \text{t}$ +剩余探明 $31.8 \times 10^8 \text{t}$ ),探明率为24.2%。2022年美国页岩油产量为 $3.9 \times 10^8 \text{t}$ ,占美国原油产量的65.6%,其中,Permian、Bakken、Eagle Ford、Niobrara是4个主产区,占页岩油产量的90%。

近年来,中国石油、中国石化和自然资源部等权威机构均开展了陆相页岩油资源潜力评价。2013年国土资源部估算全国页岩油地质资源量为 $153 \times 10^8 \text{t}$ ;2014年中国石化评价我国页岩油地质资源量为 $204 \times 10^8 \text{t}$ ;2016年中国石油评价我国页岩油地质资源量为 $145 \times 10^8 \text{t}$ ;2019年自然资源部评价我国页岩油地质资源量为 $283 \times 10^8 \text{t}$ 。近期,赵文智等评价我国陆上10个重点盆地中高熟页岩油(按 $R_o > 0.9\%$ 取值,部分地区放宽至 $R_o > 0.8\%$ )地质资源总量为 $(130 \sim 163) \times 10^8 \text{t}$ ,其中在布伦特油价60美元/bbl条件下,有利富集区经济性尚好的资源总量为 $(67 \sim 84) \times 10^8 \text{t}$ ;中低熟页岩油通过人工转质生成

的页岩油资源总量为 $1016.2 \times 10^8 \text{t}$ (油当量),其中液态烃为 $704.2 \times 10^8 \text{t}$ ,气态烃为 $312 \times 10^8 \text{t}$ (油当量),按65%的采收率计算,中低熟页岩油人工转质的总可采量达 $660.4 \times 10^8 \text{t}$ (油当量)<sup>[1]</sup>。截至2022年底,中国陆相中高熟页岩油已探明地质储量 $14.98 \times 10^8 \text{t}$ ,控制+预测储量 $43.52 \times 10^8 \text{t}$ 。2022年我国陆相页岩油产量约为 $318 \times 10^4 \text{t}$ ,占我国原油产量的1.6%。

## 2.3 美国页岩油水平井产量特征与我国中高熟页岩油试油试采特征

Laura Freeman<sup>[60]</sup>根据68025口页岩油水平井生产数据分析(Midland盆地14447口井、Delaware盆地14850口井、Eagle Ford组22420口井、Bakken组16308口井),总体上,37%~83%的美国页岩油井日产油低于50bbl,不同盆地产量差别大;22%~68%的美国页岩油井日产油当量低于50bbl(图4)。结果显示,即使在美国最活跃的页岩油生产区,低产水平井仍占有较高的百分比,大多数井的产量降至50bbl/d。这些井的经济性取决于修井作业费用、商品价格、价差、营业费用、管理费用等,但从现今的油价来看,很多非常规井在10~20bbl/d的范围内仍然显示出较好的效益。

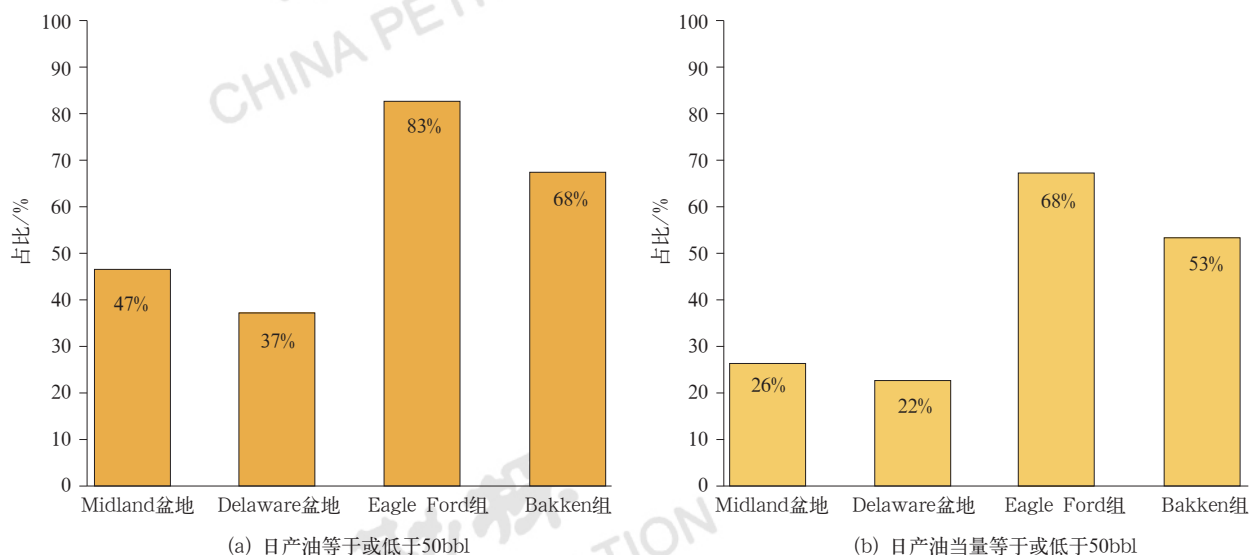


图4 美国典型区带页岩油水平井产量特征

Fig.4 Production performance of horizontal wells in typical shale oil zones in the United States

目前,中国石油页岩油水平井完钻1875口。本文重点针对准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油、鄂尔多斯盆地长7页岩油、渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩油、松辽盆地古龙页岩油进行分析。

中国石油新疆油田公司立足准噶尔盆地吉木萨尔

凹陷二叠系芦草沟组页岩油,累计完钻水平井209口,建成产能 $178 \times 10^4 \text{t}$ ,2022年生产原油 $60.7 \times 10^4 \text{t}$ ,累计生产原油 $153 \times 10^4 \text{t}$ 。典型井JHW172井投产第一年平均日产油26.2t,第二年较第一年年递减率为62.7%,第三年受转抽影响年递减率较小,

为 10.4%，第四年递减率为 20.6%，第五年递减率为 16.5%，第六年递减率为 13.8%，递减率逐年降低，生产井在较低的产油水平上有一个较长的稳产期。该井目前累计生产时间为 3089 天，累计产油  $2.85 \times 10^4$  t，预计 15 年可累计产油  $4.02 \times 10^4$  t。

中国石油大港油田公司主攻渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段页岩油，自 2018 年官东 1701H 井、官东 1702H 井获得突破以来，沧东页岩油已完钻水平井 44 口，歧口页岩油完钻水平井 5 口，目前沧东凹陷已累计产油  $31.6 \times 10^4$  t。

中国石油长庆油田公司立足鄂尔多斯盆地延长组长 7 段致密油型页岩油，强化成因机理研究与关键技术攻关，已落实地质储量规模约  $30 \times 10^8$  t，探明储量  $12.55 \times 10^8$  t。2018—2022 年完钻水平井 672 口，水平段长度平均为 1500 m，建产能  $245.9 \times 10^4$  t，2022 年产油  $221 \times 10^4$  t。

中国石油大庆油田公司立足松辽盆地北部古龙凹陷白垩系青山口组纯正型页岩油，开展试采，获得重要突破，目前完钻水平井 90 多口。古页岩油平 1 井是古龙页岩油的突破井，试采层位为青一段下部的  $Q_2$ 、 $Q_3$  油层，岩性以黏土质长英页岩为主，试油期间最高产量为 30.5 t/d，见油生产 867 天，累计产油 9625.7 t、产气  $528.9 \times 10^4$  m<sup>3</sup>，合计为  $1.38 \times 10^4$  t 油当量，目前日产油 7.1 t、日产气 2912 m<sup>3</sup>，合计为 9.4 t 油当量。轻质油带核心区 11 口井控压生产 20 t/d 以上，试采 196~867 天，产量基本稳定，预测平均单井 EUR 为  $2.4 \times 10^4$  t，预测总 EUR 为  $3.2 \times 10^4$  t 油当量。

从上述页岩油发展历程、储产量情况及水平井产量情况看，首先，中美页岩油地质条件及资源质量有巨大的差异，导致页岩油资源的可开采性及经济性有大的差异；其次，也必须清醒地认识到，美国页岩油勘探开发技术确实取得了巨大的进步。据二叠盆地美德兰地区(Midland)近年来(2015—2021年)页岩油水平井产量情况的统计分析，初期产量从 550 bbl/d 增加到 850 bbl/d，日产油增加了 300 bbl；第三年日产量从平均 70 bbl 增加到 100 bbl，提高采收率的技术包括注气吞吐、表面活性剂吞吐、新型泡沫、微生物法等<sup>[60]</sup>。应该认识到，页岩油井产量递减是客观规律，美国的页岩油水平井高产井占少数，多数井为低产井，不能将发现一两口高产工业油流井作为重要突破，也不要因发现了低产井就否定页岩油的潜力。

### 3 中国陆相页岩油发展趋势

#### 3.1 中高熟陆相页岩油发展趋势

我国陆相中高熟页岩油因热成熟度不够高(多数层段  $R_o < 1.0\%$ )，油质偏稠，加之气油比低，总体地下流动性偏差，单井日产量和单井累计采出量较低，在现阶段技术和成本条件下，页岩油的经济性不够理想。结合准噶尔、渤海湾、鄂尔多斯、松辽、江汉、苏北等盆地正在进行的页岩油勘探开发实践，总体认为目前我国陆相页岩油主要开发试验区在现有管理与技术条件下，要实现大规模发展面临较大挑战。

为把陆相中高熟页岩油变成效益可动用的储量，成为我国原油稳产和上产的资源基础，建议：一要加强基础研究，为页岩油富集区/段选择、开发方式与生产制度落实与合理的建产节奏制定等提供基础。二要设立中高熟页岩油勘探开发先导试验区，且要以落实页岩油富集区/段选择评价标准，落实资源经济可利用性、优化开发技术与工艺流程，建立合理的开发程序与制度等为前提，而不是以尽快建产能、上规模为目标。只有这样，才能围绕基础问题做研究，围绕关键技术进行攻关。经一段时间准备，才能回答页岩油资源能不能用、能用多少与能有多大规模等问题。三是围绕加快中高熟页岩油勘探进程，做好跨学科人才培养。中高熟页岩油的富集成藏与最佳开采已经偏离了经典的石油地质理论与油田开发理论，需要用全新的视角，审视页岩油的留滞机理、富集特征、地下流动性与最佳采出问题。认识这些问题涉及有机质转化动力学、黏土对烃物质吸附性与解吸特征、多组分烃物质混相导致的流动能力变化，以及在地下温压条件下，不同组分烃物质在通过由黏土颗粒与有机物组成的微纳米孔隙流动时，分子结构几何变形特征等领域，仅有地质学与地球化学知识难以准确而全面回答这些问题，需要跨学科交叉的知识体系才能更科学合理地回答问题。

根据中国陆相中高熟页岩油特殊性，按照先易后难、先肥后瘦的原则，坚持评价标准不打折扣；坚持先试采后上产、不减工序；坚持具备上产条件的能搞多快搞多快的路子，分阶段稳步推进中高熟页岩油发展。

2025 年以前，集中攻关中高熟高压区页岩油富集区/段评价，做好试采工作，攻关最佳开采技术，最大限度降低成本，提高单井初始产量和累计采出量，



预计全国页岩油年产量达到  $(600 \sim 1000) \times 10^4 \text{t}$  (含致密油型页岩油产量)。

2025—2035年,在已有技术攻关基础上,进一步升级和优化技术,持续降低成本,扩大提高采收率技术应用规模。全国页岩油年产量力争达到  $(1200 \sim 1500) \times 10^4 \text{t}$ ,成为我国原油年产  $2 \times 10^8 \text{t}$  的重要补充。

### 3.2 中低熟页岩油发展趋势

陆相中低熟页岩油地下原位转化资源潜力巨大,如果突破稳定技术关与经济关,将带来我国页岩油革命,对改善我国能源供应安全发挥重大支撑作用。2013年以来,中国石油勘探开发研究院针对鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长  $7_3$  亚段富有机质页岩,开展了中低成熟度 ( $R_o < 1.0\%$ ) 页岩油原位加热转化潜力与技术可行性研究与评价,得出两方面重要结论:一是评价认为长  $7_3$  亚段页岩具备良好的原位转化条件,可以利用原位转化技术实现规模开采;二是基于模拟数据,评价鄂尔多斯盆地长 7 段转质页岩油总量为  $494 \times 10^8 \text{t}$ 。针对松辽盆地嫩江组页岩,开展了选区评价研究,得出 3 点重要结论:一是嫩江组发育的富有机质页岩,虽然 TOC 不如鄂尔多斯盆地高,但生烃潜力 ( $I_H$ ) 却比鄂尔多斯盆地长  $7_3$  亚段高很多,大约是 1.7 倍以上,加之热成熟度更低 ( $R_o < 0.7\%$ ),原位转化生烃潜力更好,满足页岩油原位转化的基本条件,页岩  $R_o$  介于  $0.4\% \sim 0.7\%$ ,埋深小于 2000m,连续厚度为  $6 \sim 22 \text{m}$ ,TOC 平均为  $5.5\% \sim 9\%$ ,其中  $\text{TOC} > 6.0\%$  的页岩分布面积为  $3.02 \times 10^4 \text{km}^2$ ;二是基于新钻井岩心分析资料,评价嫩一段核心区转化页岩油总量为  $377 \times 10^8 \text{t}$ ;三是根据页岩油原位转化选区标准,优选了两个页岩油甜点区供原位转化先导试验选择。

中低熟页岩油颠覆了传统开发方式,依靠地下原位转化技术进行开发,在国外也仅有较浅层的试验先例,是尚缺乏完整工业开发试验的全新领域,面临的挑战和不可预测风险较大。首先,把加热工具放置垂深 2000 多米井下,并维持持续加热时间至少 3 年以上,加热工具的稳定性,加热器与电缆连接的稳定性,以及长时间加热至高温以后,井筒内发生的物理化学变化均无实际案例证明。此外,地层受热以后,产生  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  等有害气体的数量以及高温气、液体采出过程中对装置的腐蚀与安全控制等问题,均尚无实际案例检验以达到优化和完善。我国在原位转化技术

研究和现场试验等方面起步较晚,很多关键技术需要从头开始,开展攻关研究,基础理论基本处于空白。因此,需要把中低熟页岩油勘探开发上升为国家战略,国家应出台扶持政策,设立若干国家级先导开发试验区,以推动中低熟页岩油的健康发展。

根据中低熟页岩油需要技术革命才能实现规模效益开发利用的现状,按照政策引导、科技先行的原则,坚持自主创新与合作研究并举,推动我国中低熟页岩油技术革命目标的实现。

中国石油已在鄂尔多斯盆地长  $7_3$  亚段部署页岩油原位转化先导试验。如果先导试验能够成功,预计 2025 年前后可进入规模商业开发阶段,形成商业开发示范区。2030 年前后关键装备与核心技术可实现国产化,原位转化技术得到规模化工业应用,预计年产原油可以达到千万吨级规模。2035 年前后,年产油量可能会有较大规模的增长,届时可依据国家能源安全需要和工作量投入,安排产量再增加的规模。应该指出,推进我国中低熟页岩油地下原位转化开发的目的,不是解决我国原油年产  $2 \times 10^8 \text{t}$  稳产问题,而是解决在  $2 \times 10^8 \text{t/a}$  基础上实现规模上产的问题。这个领域的突破发展将直接关系到我国油气供应独立问题,从地位来说颇有重要性,值得上升为国家战略来组织。

因此,中低熟页岩油可能是我国石油工业下一个“革命者”,这场革命不仅会使我国原油年产量  $2 \times 10^8 \text{t}$  长期保持,而且极有可能在  $2 \times 10^8 \text{t/a}$  基础上实现规模增长,不排除原油产量出现倍增的可能性。如能实现,将大大改善我国原油供应安全形势。此外,中低熟页岩油原位转化还产生大量天然气,如果升温过程控制合理,天然气产量还可以更高。据多家预测,我国陆地、海上加在一起,坚持常规和非常规并举,天然气高峰产量预计在  $(2500 \sim 3000) \times 10^8 \text{m}^3$ 。如果页岩油原位转化取得成功,我国天然气产量存在规模增长的机遇,不排除在  $2500 \times 10^8 \text{m}^3$  峰值产量基础上实现倍增,达至  $5000 \times 10^8 \text{m}^3$  的可能性。众所周知,天然气的碳排放比煤炭低 45% 左右,在“双碳”目标下,增加天然气在一次能源消费结构中的比重,不仅可以有效降低  $\text{CO}_2$  排放,而且对确保从化石能源体系向以可再生能源支撑的新能源体系过渡的安全性也意义重大。总之,中低熟页岩油是一个油气资源开发利用的全新领域,值得国家高度重视,期待用 5~10 年准备,让该领域在支撑我国油气安全供应甚至实现能源独立上发挥重要作用。目前,中低熟页岩油地下原位

转化已经引起国内同行的广泛关注,“十四五”期间,如果中低熟页岩油原位转化先导试验能够基本摸清资源的可利用性与潜力,并筛选出相对成熟的转化技术,同时突破工业生产关,那么实现我国能源独立就找到了破解的途径,陆相页岩油革命就将发生,成为与北美海相页岩油革命同等齐观的重大事件,也将对世界地缘政治格局产生重大影响。

## 4 结论

(1) 中国陆相页岩油的主要特征是不同的盆地沉积环境多样、生烃中心多、母质类型多、储层类型多,造成页岩油层系纵向变化快、平面非均质性强。根据我国不同盆地陆相页岩油发育特征,国内众多学者提出了很多页岩油类型划分方案,很难统一。为了规范和交流使用的方便,建议参考国际上目前比较通用的术语体系,用“地名+页岩油”或“地名+地层单位+页岩油”的方式定义页岩油类型或区带,在此基础上可以根据成熟度或储层类型做进一步划分。

(2) 对比分析中美页岩油发展历程、目前的储产量情况及水平井产量,页岩油地质条件及资源质量的巨大差异是导致中美页岩油资源可开采性、经济性、规模性差异的主要原因,页岩油井产量递减是客观规律,水平井高产井占少数,多数井为低产井也是客观事实,勘探开发技术进步与管理效益提升是推动我国陆相页岩油高质量发展的基础和保障。

(3) 针对我国中高熟陆相页岩油,应立足鄂尔多斯盆地长7段页岩油、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油、松辽盆地古龙页岩油国家级示范区或示范基地,最大限度提高单井初始产量和累计采出量,降成本,增效益,使其成为规模增储上产的主要领域;积极评价渤海湾盆地古近系页岩油、柴达木盆地古近系—新近系页岩油、四川盆地侏罗系页岩油,做好页岩油富集区/段评价,做好试采工作,形成产能。中低熟页岩油可能是我国石油工业下一个“革命者”,有望解决我国原油在 $2 \times 10^8 \text{ t/a}$ 基础上实现规模上产的问题。

## 参考文献

- [1] 赵文智, 胡素云, 朱如凯, 等. 陆相页岩油形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.  
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Zhu Rukai, et al. Formation and distribution of nonmarine shale oil in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [2] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. 地学前缘, 2023,30(1):116–127.

- Zhao Wenzhi, Zhu Rukai, Liu Wei, et al. Enrichment conditions and occurrence features of lacustrine mid-high matured shale oil in onshore China[J]. Earth Science Frontiers, 2023,30(1):116–127.
- [3] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. 石油勘探与开发, 2018,45(4):537–545.  
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(4):537–545.
- [4] 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.
- [5] 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. 石油勘探与开发, 2021,48(3):453–463.  
Sun Longde, Liu He, He Wenyuan, et al. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021,48(3):453–463.
- [6] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. 石油学报, 2023,44(1):1–13.  
Sun Longde, Zhao Wenzhi, Liu He, et al. Concept and application of “sweet spot” for shale oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023,44(1):1–13.
- [7] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022,96(1):155–171.  
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022,96(1):155–171.
- [8] 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J]. 石油勘探与开发, 2021,48(6):1276–1287.  
Jin Zhijun, Zhu Rukai, Liang Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021,48(6):1276–1287.
- [9] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015,34(1):1–17.  
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015,34(1):1–17.
- [10] 邹才能, 朱如凯, 董大忠, 等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J]. 石油学报, 2022,43(12):1–12.  
Zou Caineng, Zhu Rukai, Dong Dazhong, et al. Shale oil and gas technology progress, development strategy and policy suggestion[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022,43(12):1–12.
- [11] 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.
- [12] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):560–568.  
Du Jinhu, Hu Suyun, Pang Zhenglian, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):560–568.
- [13] 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.
- [14] 付锁堂, 金之钧, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. *石油学报*, 2021,42(5):561–569. Fu Suotang, Jin Zhijun, Fu Jinhua, *et al.* Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(5):561–569.
- [15] 宋明水. 济阳拗陷页岩油勘探实践与现状[J]. *油气地质与采收率*, 2019,26(1):1–12. Song Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019,26(1):1–12.
- [16] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(2):1–13. Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(2):1–13.
- [17] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. *石油勘探与开发*, 2022,49(1):18–31. Li Guoxin, Zhu Rukai, Zhang Yongshu, *et al.* Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1):18–31.
- [18] 付金华, 牛小兵, 谈卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长 7 段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(5):601–614. Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Dan Weidong, *et al.* The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5):601–614.
- [19] 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 等. 陆相致密油与页岩油藏特征差异性及其勘探实践意义: 以渤海湾盆地黄骅拗陷为例[J]. *地球科学*, 2021,46(2): 555–571. Zhou Lihong, Chen Changwei, Han Guomeng, *et al.* Difference characteristic between continental shale oil and tight oil and exploration practice: a case from Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science*, 2021,46(2):555–571.
- [20] 刘惠民. 济阳拗陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2022,27(1):73–87. Liu Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022,27(1): 73–87.
- [21] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. *石油学报*, 2019,40(9):1013–1029. Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, *et al.* Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin: a case study of member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019,40(9):1013–1029.
- [22] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 歧口凹陷歧北次凹沙河街组三段页岩油地质特征与勘探突破[J]. *石油学报*, 2020,41(6):643–657. Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, *et al.* Geological characteristics and exploration breakthrough of shale oil in member 3 of Shahejie Formation of Qibei subsag, Qikou Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020,41(6):643–657.
- [23] 朱如凯, 张婧雅, 李梦莹, 等. 陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题[J/OL]. *地质学报*, 2023;1–23.[2023–05–09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20230216.1101.003.html>.
- Zhu Rukai, Zhang Jingya, Li Mengying, *et al.* Advances and key issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment[J/OL]. *Acta Geologica Sinica*, 2023;1–23. [2023–05–09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20230216.1101.003.html>.
- [24] U S Geological Survey (USGS). Assessment of undiscovered oil resources in the Bakken and Three Forks Formations, Williston Basin, Province Montana, north Dakota, and south Dakota, fact sheet 2013–3013[EB/OL]. [2013–04–29]. <https://pubs.usgs.gov/fs/2021/3058/fs20213058.pdf>.
- [25] The Unconventional Oil Subgroup of the Resources & Supply Task Group. Potential of north American unconventional oil resource[M]. Texas: Working Document of the NPC North American Resource Development Study, 2011:8–11.
- [26] U S Energy Information Administration. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: an assessment of 137 shale formation in 41 countries outside the United States[EB/OL]. [2023–04–29]. <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/overview.pdf>.
- [27] National Energy Board. Tight oil development in the western Canada sedimentary basin[M]. Calgary: National Energy Board, 2011.
- [28] 湛卓恒, Osadetz K G. 西加拿大沉积盆地 Cardium 组致密油资源评价[J]. *石油勘探与开发*, 2013,40(3):320–328. Chen Zhuoheng, Osadetz K G. An assessment of tight oil resource potential in the Upper Cretaceous Cardium Formation, western Canada sedimentary basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013,40(3):320–328.
- [29] 郭秋麟, 武娜, 陈宁生, 等. 鄂尔多斯盆地延长组第 7 油层组致密油资源评价[J]. *石油学报*, 2017,38(6):658–665. Guo Qiulin, Wu Na, Chen Ningsheng, *et al.* An assessment of tight oil resource in 7<sup>th</sup> oil reservoirs of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017,38(6):658–665.
- [30] 曹喆, 柳广弟, 柳庄小雪, 等. 致密油地质研究现状及展望[J]. *天然气地球科学*, 2014,25(10):1499–1508. Cao Zhe, Liu Guangdi, Liu Zhuangxiaoxue, *et al.* Research status on tight oil and its prospects[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014,25(10):1499–1508.
- [31] Jarvie D, Jarvie B, Courson D, *et al.* Geochemical tools for assessment of tight oil reservoirs[C]. Austin, Texas: AAPG Hedberg Conference, 2010.
- [32] Jarvie D M. Shale resource systems for oil and gas: part2–shale–oil resource systems[J]. *Shale Reservoirs–Giant Resources for the 21<sup>st</sup> Century: AAPG Memoir 97*, 2012,97:89–119.
- [33] Bohacs K M, Passey Q R, Rudnicki M, *et al.* The spectrum of fine-grained reservoirs from ‘shale gas’ to ‘shale oil’/tight liquids: essential attributes, key controls, practical characterization[C]. Beijing: International Petroleum Technology Conference, 2013.
- [34] Donovan A D, Evenick J, Banfield L, *et al.* An organofacies-based mudstone classification for unconventional tight rock and source rock plays[C]. Austin, Texas: SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 2017.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 武晓玲, 高波, 叶欣, 等. 中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探



- 潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013,34(4):455-462.
- Wu Xiaoling, Gao Bo, Ye Xin, *et al.* Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China[J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(4):455-462.
- [38] 宋国奇, 徐兴友, 李政, 等. 济阳拗陷古近系陆相页岩油产量的影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2015,36(3):463-471.
- Song Guoqi, Xu Xingyou, Li Zheng, *et al.* Factors controlling oil production from Paleogene shale in Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2015,36(3):463-471.
- [39] 赵俊龙, 张君峰, 许浩, 等. 北美典型致密油地质特征对比及分类[J]. 岩性油气藏, 2015,27(1):44-50.
- Zhao Junlong, Zhang Junfeng, Xu Hao, *et al.* Comparison of geological characteristics and types of typical tight oil in north America[J]. Lithologic Reservoirs, 2015,27(1):44-50.
- [40] 刘文卿, 汤达祯, 潘伟义, 等. 北美典型页岩油地质特征对比及分类[J]. 科技通报, 2016,32(11):13-18.
- Liu Wenqing, Tang Dazhen, Pan Weiyi, *et al.* Comparison of geological characteristics and types of typical shale oil in north America[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016,32(11):13-18.
- [41] 吴河勇, 林铁锋, 白云凤, 等. 松辽盆地北部泥(页)岩油勘探潜力分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2019,38(5):78-86.
- Wu Heyong, Lin Tiefeng, Bai Yunfeng, *et al.* Analyses of the mudstone (shale) oil exploration potential in north Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019,38(5):78-86.
- [42] 王广韵, 王凤兰, 赵波, 等. 大庆油田公司勘探开发形势与发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021,26(1):55-73.
- Wang Guangyun, Wang Fenglan, Zhao Bo, *et al.* Exploration and development situation and development strategy of Daqing Oilfield Company[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(1):55-73.
- [43] 刘宝珺. 沉积相模式与层控矿床[J]. 地质与勘探, 1981,17(12):1-9.
- Liu Baojun. Sedimentary facies model and strata-bound ore deposit[J]. Geology and Exploration, 1981,17(12):1-9.
- [44] 冯增昭. 中国沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- Feng Zengzhao. Sedimentology in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [45] Ulmer-scholle D S, Scholle P A, Schieber J, *et al.* A color guide to the petrography of sandstones, siltstones, shales and associated rocks[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2014.
- [46] 于炳松, 梅冥相. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- Yu Bingsong, Mei Mingxiang. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [47] 鲁静, 张凤海, 杨敏芳, 等. 模式化煤系露头剖面沉积环境分析方法[J]. 煤田地质与勘探, 2018,46(2):40-48.
- Lu Jing, Zhang Fenghai, Yang Minfang, *et al.* Pattern analysis method of depositional environment from outcrop sections in coal measures[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(2):40-48.
- [48] Zumberge J E, Curtis J B, Reed J D, *et al.* Migration happens: geochemical evidence for movement of hydrocarbons in unconventional petroleum systems[C]. San Antonio, Texas, USA: SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 2016.
- [49] Hardy R. The future of unconventional in Latin America[EB/OL]. [2023-03-06]. <https://www.geoexpro.com/articles/2019/06/the-future-of-unconventional-oil-and-gas-resources-in-latin-america>.
- [50] Curtis A A, Esslinger E, Nickerson R, *et al.* Lithologically controlled pore pressure prediction and geomechanical modelling using probabilistic multivariate clustering analysis and an expert system[C]. Denver, Colorado, USA: SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 2019.
- [51] Slagorsky C. Canadian oil business gets more Canadian as devon exits[J/OL]. Journal of Petroleum Technology, Business/Economics, 2019. [2023-04-26]. [https://jpt.spe.org/canadian-oil-business-gets-more-canadian-devon-exits?\\_ga=2.267456327.890847883.1655773887-963231323.1637639587](https://jpt.spe.org/canadian-oil-business-gets-more-canadian-devon-exits?_ga=2.267456327.890847883.1655773887-963231323.1637639587).
- [52] 朱德顺, 王勇, 朱德燕, 等. 渤南洼陷沙一段夹层型页岩油界定标准及富集主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2015,22(5):15-20.
- Zhu Deshun, Wang Yong, Zhu Deyan, *et al.* Analysis on recognition criteria and enrichment factors of interlayer shale oil of Es1 in Bonan subsag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015,22(5):15-20.
- [53] 唐鑫萍, 许泓, 曹宇畅, 等. 三盆地布二段灰岩夹层型页岩油地质特征[J]. 石油地质与工程, 2022,36(2):48-53.
- Tang Xinping, Xu Hong, Cao Yuchang, *et al.* Geological characteristics of limestone interbedded shale oil in Bu 2 member of Sanshui Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2022, 36(2):48-53.
- [54] 付茜, 刘启东, 刘世丽, 等. 中国“夹层型”页岩油勘探开发现状及前景[J]. 石油钻采工艺, 2019,41(1):63-70.
- Fu Qian, Liu Qidong, Liu Shili, *et al.* Exploration & development status and prospect of sandwich-type shale oil reservoirs in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019,41(1):63-70.
- [55] 张吉, 张烈辉, 胡书勇. 陆相碎屑岩储层隔夹层成因、特征及其识别[J]. 大庆石油地质与开发, 2003,22(4):1-3,75.
- Zhang Ji, Zhang Liehui, Hu Shuyong. The genesis and characteristics and identification of intercalations in reservoir of elastic rock[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003,22(4):1-3,75.
- [56] Potter P E, Maynard J B, Depetris P J. Mud and mudstones: introduction and overview[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2005.
- [57] 刘雅利, 刘鹏. 陆相富有机质泥页岩中夹层特征及其作用: 以济阳拗陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2019,26(5):1-9.
- Liu Yali, Liu Peng. Interlayer characteristics and their effect on continental facies organic-rich shale: a case study of Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019,26(5):1-9.
- [58] Drake W R, Longman M. The distal woodford shale of the central basin platform (Permian Basin): learnings from core collected from a frontier petroleum system[C]. Texas: RMAG Permian Basin Symposium & Core Workshop, 2019.
- [59] 高瑞祺. 泥岩异常高压带油气的生成排出特征与泥岩裂缝油气藏的形成[J]. 大庆石油地质与开发, 1984,3(1):160-167.
- Gao Ruiqi. Characteristics of petroleum generation and expulsion in abnormal pressure shale zones and the formation of fractured shale reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1984,3(1):160-167.
- [60] Freeman L. Aging US shale wells: years of remaining opportunities or growing asset retirement obligations?[J] Journal of Petroleum Technology, 2022,74(3):10-15.
- [61] Weijers L, Pearson M, Wright C, *et al.* The American shale revolution in three stages[J]. Oil-Industry History, 2018, 19(1):107-130.
- [62] 白国平, 邱海华, 邓舟舟, 等. 美国页岩油资源分布特征与主控因素研究[J]. 石油实验地质, 2020,42(4):524-532.
- Bai Guoping, Qiu Haihua, Deng Zhouzhou, *et al.* Distribution and main controls for shale oil resources in USA[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(4):524-532.