

doi: 10.12029/gc20230105002

包书景, 葛明娜, 徐兴友, 郭天旭, 林燕华, 牟德刚, 梁宏波. 2023. 我国陆相页岩油勘探开发进展与发展建议[J]. 中国地质, 50(5): 1343–1354.
Bao Shujing, Ge Mingna, Xu Xingyou, Guo Tianxu, Lin Yanhua, Mou Degang, Liang Hongbo. 2023. Progress and development proposals in the exploration and development of continental shale oil in China [J]. Geology in China, 50(5): 1343–1354(in Chinese with English abstract).

我国陆相页岩油勘探开发进展与发展建议

包书景^{1,2}, 葛明娜^{1,2}, 徐兴友^{1,2}, 郭天旭^{1,2}, 林燕华^{1,2}, 牟德刚^{1,2}, 梁宏波³

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江 大庆 163712; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:【研究目的】中国页岩油资源丰富且快速发展, 但仍存在探明率低、开采难度大、产量低等关键问题, 因此需要分析中国陆相页岩油勘探开发进展与形势, 提出页岩油发展建议, 服务国家能源安全保障。【研究方法】通过梳理国内外页岩油发展历程, 分析近些年我国陆相页岩油勘探开发取得重大突破、重要进展的方向与领域, 总结页岩油储量增长特点。【研究结果】鄂尔多斯盆地探明了国内首个 10 亿 t 页岩油大油田, 松辽盆地古龙凹陷新增页岩油预测地质储量 12.68 亿 t, 渤海湾盆地古近系多口探井试获高产工业油流, 准噶尔盆地吉木萨尔页岩油三级地质储量达 5 亿 t 等 8 项重大进展; 形成了具有中国特色的页岩油富集理论和勘探开发技术; 截至 2021 年底, 全国页岩油探明地质储量 12.2 亿 t, 待探明地质资源量 271.06 亿 t, 探明率为 4.3%, 勘探潜力巨大; 八大中型含油气盆地取得多个层系页岩油调查勘探的重大突破, 展示了中国陆相页岩油广阔的发展前景。【结论】鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、松辽盆地、准噶尔盆地、四川盆地、江汉盆地是页岩油未来勘探开发主要地区, 有望成为“十四五”油气现实接替领域; 渤海湾盆地济阳拗陷渤海地区古近系、鄂尔多斯盆地陇东和伊陕斜坡三叠系、松辽盆地古龙凹陷白垩系、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系、四川盆地川东地区侏罗系、江汉盆地潜江凹陷古近系为增储上产的有利目标区; 大型盆地页岩油资源潜力动态评价、不同类型页岩油成藏机理和不同成熟度页岩油勘探开发技术、中小型盆地页岩油调查评价是中国陆相页岩油下一步工作的重点方向。

关键词: 陆相页岩油; 重要进展; 重大突破; 大中型含油气盆地; 理论与技术; 资源潜力; 发展建议; 油气勘查工程
创新点: (1) 分析八大中型盆地陆相页岩油重大突破, 总结页岩油储量增长特点。(2) 提出中国陆相页岩油未来勘探开发重点盆地、有利目标区和四项发展建议。

中图分类号: F426.22; P618.13; TE34 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2023)05–1343–12

Progress and development proposals in the exploration and development of continental shale oil in China

BAO Shujing^{1,2}, GE Mingna^{1,2}, XU Xingyou^{1,2}, GUO Tianxu^{1,2},
LIN Yanhua^{1,2}, MOU Degang^{1,2}, LIANG Hongbo³

收稿日期: 2023–01–05; 改回日期: 2023–04–07

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221852、DD20230257)和国家自然科学基金项目(42130803)联合资助。

作者简介: 包书景, 男, 1964 年生, 硕士, 教授, 主要从事油气资源调查评价与油气战略规划研究; E-mail: 415530248@qq.com。

通讯作者: 葛明娜, 女, 1988 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事非常规油气地质与油气战略规划研究; E-mail: 610144368@qq.com。

(1. *Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 2. *National Key Laboratory for Multi-resource Collaborated Green Development of Continental Shale Oil, Daqing 163712, Heilongjiang, China*; 3. *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China*)

Abstract: This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

[Objective] In China, shale oil resources are abundant and developing rapidly, but there are still key issues such as low exploration rate, high extraction difficulty, and low production. Therefore, it is necessary to analysis the progress and situation of the exploration and development of continental shale oil, and suggestions for the development of shale oil are put forward to serve the national energy security. **[Methods]** By combing the development history of shale oil at home and abroad, this paper analyzes the direction and field of the major breakthrough and important progress of continental shale oil exploration and development in recent years, and summarizes the growth points of shale oil reservest. **[Results]** Eight major developments were made, mainly including the Ordos Basin proved the first one billion ton shale oil field in China, the estimated new shale oil reserves in Gulong Sag of Songliao Basin are 1.268 billion tons, a number of exploratory Wells in the Paleogene in Bohai Bay Basin have been tested to produce high industrial oil flow and the Jimsar shale oil third-level geological reserves of 500 million tons in Junggar Basin, which form the shale oil enrichment theory and exploration and development technology with Chinese characteristics. By the end of 2021, China had proven geological reserves of 1.22 billion tons of shale oil, with 27.106 million tons of unproven geological resources, representing a discovery rate of 4.3 percent and huge exploration potential. Eight large and medium-sized oil and gas basins have made major breakthroughs in the investigation and exploration of multiple layers of shale oil, which shows the broad development prospect of continental shale oil in China. **[Conclusions]** Ordos Basin, Bohai Bay, Songliao Basin, Junggar Basin, Sichuan Basin and Jiangnan Basin are the main areas for shale oil exploration and development in the future and is expected to become a realistic replacement field for oil and gas during the 14th Five-Year Plan. The Paleogene formation in Bonan area of Jiyang depression in Bohai Bay basin, the Triassic formation in Longdong and Yishan slopes of Ordos basin, the Cretaceous formation in Gulong sag of Songliao basin, the Permian formation in Jimusar sag of the Junggar Basin, the Jurassic formation in eastern Sichuan basin, and the Paleogene formation in Qianjiang sag of Jiangnan basin are favorable target areas for increasing reserves and increasing production. The dynamic evaluation of shale oil resource potential in large basins, research on shale oil theory and exploration and development technologies with different maturities, and investigation and evaluation of shale oil in small and medium-sized basins are the key directions for the next development of continental shale oil in China.

Key words: continental shale oil; important progress; a major breakthrough; large and medium-sized petroliferous basins; theory and technology; potential of resources; proposals for development; oil and gas exploration engineering

Highlights: (1) Analyzes the major breakthrough of continental shale oil in eight large and medium-sized basins and summarizes the growth point of shale oil reserves. (2) Put forward the key basins, favorable target areas and four development suggestions for the future exploration and development of continental shale oil.

About the first author: BAO Shujing, male, born in 1964, master, professor, mainly engaged in oil and gas geology; E-mail: 415530248@qq.com.

About the corresponding author: GE Mingna, female, born in 1988, master, senior engineer, mainly engaged in the unconventional oil and gas geological and oil and gas strategic planning study; E-mail: 610144368@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20221852, No.DD20230257) and National Natural Science Foundation of China (No. 42130803).

1 国内外页岩油勘探开发进展

1.1 国外页岩油发展概况

全球页岩油资源丰富,分布广泛。截至2017年底,全球页岩油地质资源总量为9368.35亿t,技术可采资源量为618.47亿t,主要分布在北美和欧亚大

陆。北美地区页岩油技术可采资源量为185.54亿t,占比30%;其次为包括俄罗斯在内的东欧地区,技术可采资源量为117.51亿t,占比19%;亚太地区可采资源量为111.32亿t,占全球的18%(方圆等,2019)(图1)。排名前三的国家依次为美国(21%)、俄罗斯(14%)和中国(7%);全球超过100个盆地赋

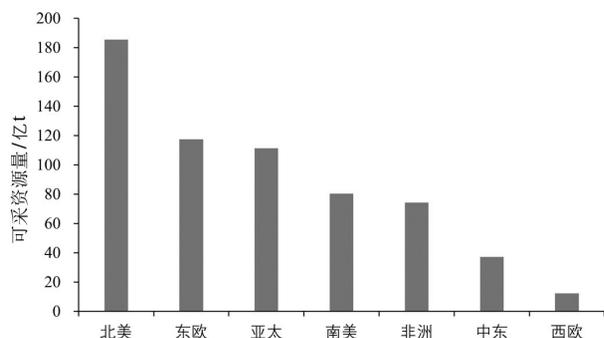


图1 世界各大区页岩油技术可采资源量

Fig.1 Technical recoverable resources of shale oil in major regions of the world

存有页岩油,其中排名前三的为西西伯利亚盆地(16.5%)、二叠系盆地(10.5%)和西墨西哥湾盆地(5.1%)。

2000年以来,随着水平井和分段压裂技术在页岩油勘探开发中的探索应用,美国先后实现了Bakken、Eagle Ford、Permian、Niobrara、Anadarko等多个层系页岩油商业性开发(IEA, 2018; Tim Gould et al., 2019)。2020年,美国页岩油产量达3.5亿t,占其石油总产量的50%以上,石油年产量超过沙特阿拉伯,居世界第一。页岩油生产直接使美国从石油净进口国变成了石油出口国。美国通过“页岩革命”,初步实现了1973年尼克松政府提出的“能源独立”目标,重塑了世界石油市场格局(Marianne, 2018; Philip et al., 2018)。此外,加拿大的页岩油产量也在不断增加,其他国家如中国、俄罗斯、阿根廷等,对页岩油的开发仍然处于早期阶段(杨雷和金之钧, 2019)。

1.2 中国页岩油发展历程

中国页岩油调查勘探起步较晚,目前尚处于勘查开发探索阶段(邹才能等, 2023)。

2006年以前,油气公司在松辽、渤海湾等盆地的常规油气勘探过程中,多口钻井在烃源岩层系钻遇强烈油气显示,但由于传统油气成藏理论的束缚,将其划为泥页岩裂缝油藏(Chen et al., 2022)而未能引起重视。

2008年以来,受美国页岩油快速发展影响,国土资源部、中国石油和中国石化组织开展了页岩油资源评价(葛明娜等, 2018)、早期选区评价及专探井试验(梁兴等, 2020)。如2010年中石化胜利油田

分公司部署的L69井全段取芯并获得关键参数,推动了该油田页岩油勘探开发进程;泌阳凹陷的AS1井、BYHF1井通过大型压裂,初始产量较高但产量下降较快;四川盆地、三塘湖盆地等多口钻井通过水力压裂改造获得页岩油流,但单井日产量较低,稳产时间较短。

2014年以来,通过加强对陆相页岩油赋存机理和分布规律的地质理论研究、地球物理“甜点”识别预测技术、针对性水平井钻完井技术及复杂缝网体积压裂技术攻关(管保山等, 2019),页岩油勘探开发快速发展(印森林等, 2022)。尤其是近年来,中国地质调查局和油气企业加大了页岩油勘查投入力度,接连取得多盆地多层系页岩油重大突破,为我国陆相页岩油大规模商业开发奠定了坚实基础。

2 中国陆相页岩油多领域获得重大突破

我国陆相页岩油虽然起步晚,但发展快。页岩油资源主要分布在鄂尔多斯、松辽、准噶尔、四川、渤海湾5个大型盆地和柴达木、江汉、苏北等8个中小型盆地,其中陆域盆地12个,海域盆地1个;层系分布上,主要分布在二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系5个层系8套富有机质页岩层段(图2)。

近年来,中国陆相页岩油主要在鄂尔多斯盆地三叠系延长组、松辽盆地白垩系青山口组、准噶尔盆地二叠系芦草沟组、渤海湾盆地古近系沙河街组和孔店组、四川盆地侏罗系凉高山组和自流井组、柴达木盆地古近系干柴沟组、苏北盆地古近系阜宁组、南海北部湾盆地(海域)涠西南凹陷古近系流沙港组等8个盆地、5个层系有机质页岩层段、10个层组取得重大突破与进展(表1)。

2.1 鄂尔多斯盆地探明了国内首个10亿t页岩油大油田

鄂尔多斯盆地延长组页岩油有利勘探面积为1.2万km²(黄振凯等, 2020)。中国石油在陇东地区探明了我国第一个超10亿t页岩油大油田—庆城油田,评价资源量35亿t,累计落实地质储量18.37亿t,探明地质储量11.53亿t,建成陇东百万吨整装国家示范基地(付锁堂等, 2021)。目前,已完钻水平井504口,投产水平井383口,平均初始日产油超过15t, 2021年页岩油产量达到133.7万t。其中,城页



图2 中国陆相页岩油主要盆地和层系分布
Fig.2 Distribution of major basins and formations of continental shale oil in china

1井(张家强等,2021)、黄14H2井、岭页1井测试求产分别获日产121.38 t、138.21 t和116.8 t高产工业油流。2022年,新获工业油流井13口,预计新增探明储量8500万t。预计“十四五”末,庆城油田页岩油产能将超过500万t,产量超300万t。

此外,延长石油在伊陕斜坡多口探井获工业页岩油流,其中,吴页平1井、罗探平19井、富探平1井初始日产油分别为163t、91 t和27 t,落实了定边、吴起、志丹、富县、下寺湾等5个页岩油规模发育区(陈林和牟鹏飞,2022),累计落实地质储量1.92亿t,探明地质储量6600万t。

2.2 松辽盆地古龙凹陷新增页岩油预测地质储量12.68亿t

2016年以来,中国地质调查局联合大庆油田实

施了松辽盆地陆相页岩油科技攻坚战,针对青山口组部署实施的7口钻井均获工业油气流,其中,松辽盆地北部松页油1HF井、松页油2HF井日产页岩油分别为14.37 m³、10.06 m³(杨建国等,2021),松辽盆地南部吉页油1HF井日产页岩油16.4 m³(Lu et al., 2020),引领带动了松辽盆地的页岩油勘查(张君峰等,2020;白静等,2020)。

近年来,中国石油依靠科技进步加强页岩油勘探,部署钻探的古页油平1、英页1H、古页2HC等重点探井获日产油35 m³以上高产且试采稳定,其中古页油平1井生产超500 d,累产油气当量近万吨,在古龙凹陷已有43口直井出油、5口水平井获高产,落实了含油面积1413 km²,青山口组新增石油预测地质储量12.68亿t,实现了松辽盆地陆相页岩油重

表1 中国陆相页岩油取得主要进展
Table 1 Major progress made of continental shale oil in China

序号	盆地	盆地规模	层系	进展	代表钻井	测试日产量	矿权
1	鄂尔多斯	大型	三叠系延长组	探明了国内首个10亿t页岩油大油田	城页1井	121.38 t	中国石油
				落实三级地质储量1.92亿t	吴页平1井	163 t	延长石油
2	松辽	大型	白垩系青山口组	7口钻井均获工业油气流	吉页油1HF井	16.4 m ³	中国地质调查局
				古龙凹陷新增页岩油预测地质储量12.68亿t	古页油平1井	超35 m ³	中国石油
3	渤海湾	大型	古近系沙河街组	济阳拗陷,中国首个陆相断陷湖盆页岩油国家级示范区	樊页平1井	超100 t	中国石化
				黄骅拗陷歧口凹陷	歧页10-1-1井	115.2 m ³	
			古近系孔店组	黄骅拗陷沧东凹陷,开辟了渤海湾盆地页岩油勘探开发新区新层系	4口超百吨井	最高达208 m ³	中国石油
4	准噶尔	大型	二叠系芦草沟组	吉木萨尔页岩油三级地质储量达5亿t	JHW025井	81.4 t	中国石油
5	四川	大型	侏罗系凉山组	拓展了四川盆地油气勘探新层系新类型,实现重大突破	泰页1井	58.9 m ³	中国石化
					平安1井	112.8 m ³	中国石油
6	柴达木	中小型	古近系下干柴沟组	开辟古近系页岩油勘探新领域	柴9井	121.12 m ³	中国石油
7	苏北	中小型	古近系阜宁组	页岩油勘探取得突破性进展	溱页1HF井	55 t	中国石化
8	北部湾海域	中小型	古近系流沙港组	首口页岩油探井获高产油气流	涠页-1井	20 m ³	中国海油

大战略性突破(孙龙德等,2021),大庆古龙陆相页岩油国家级示范区建设启动。

2.3 渤海湾盆地古近系多口探井试获高产工业油流

中国石化按照“直斜井试油侦察、水平井专探突破”的思路,在济阳拗陷组织实施沙河街组页岩油勘探(沈云琦等,2022)。牛斜55、义页平1井等37口井试采获得工业油流,樊页平1井、牛页1-1井等6口井日产超过100 t,初步测算该地区页岩油资源量超过40亿t,2021年首批上报预测地质储量达4.58亿t,成为中国首个陆相断陷湖盆页岩油国家级示范区。预计到“十四五”末,新建产能100万t,年产页岩油当量50万t。

中国石油黄骅拗陷2021年页岩油产量突破10万t,已形成页岩油开发示范区。沧东凹陷孔二段接连获得4口日产超百吨高产井、最高日产达208 m³。累计投产井35口,平均单井日产油10.3 t,预计全年产油8万t,近期,沧东凹陷5号平台已正式投入生产,9口页岩油井日产能力稳定在280 t左右,整体形成10万t年生产能力,标志着我国首个10万t级陆相页岩油效益开发示范平台在大港油田建成投产。歧口凹陷沙河街组歧页10-1-1井、歧页1HF井

分别试获日产115.2 m³、41.2 t高产工业油流,开辟了渤海湾盆地页岩油勘探开发新格局(周立宏等,2022)。

2.4 准噶尔盆地吉木萨尔页岩油三级地质储量达5亿t

中国石油积极推进地质工程一体化攻关与开发先导试验。2021年,在吉木萨尔芦草沟组累计落实页岩油地质储量超5亿t。继吉25页岩油勘探突破后,吉174等多口井获高产稳产工业油流,完钻水平井187口,平均单井日产油14.7 t,建成产能135万t,2021年产油50万t,2022年上半年产油22.6万t。

中国地质调查局在博格达山前带实施钻探的博参1井在芦草沟组发现良好页岩油显示,油迹62.54m/25层,油斑66.22m/19层,富含油18.91m/11层,该重要发现为山前带油气勘查提供了新方向。

2.5 四川盆地侏罗系陆相页岩油气实现重大突破

四川盆地侏罗系发育自流井组东岳庙段、大安寨段和凉山组三套富有机质页岩(何文渊等,2022),中国石化在川东南针对凉山组部署的泰页1井水平井测试日产油58.9 m³、气7.35万m³,累计试采53天累产油1208 m³、气164万m³;针对东岳庙段部署的

涪页10井试获日产油17.6 m³、气5.58万 m³。

中国石油在川东北平昌构造带部署的平安1井试获日产油112.8 m³、气11.45万 m³高产页岩油气流,拓展了四川盆地油气勘探新层系新类型。

2.6 柴达木盆地开辟古近系页岩油勘探新领域

柴达木盆地英雄岭构造带位于柴西富烃凹陷内,发育古近系下干柴沟组厚层富有机质页岩(李国欣等,2022)。中国石油针对下干柴沟组Ⅱ油组钻探的柴9井测试日产油121.12 m³、气50337 m³,实现了柴达木盆地页岩油勘探重大突破。目前已投产的7口探井,单井平均日产油28.7 t,预测单井EUR预计3.0~4.3万t,新增地质储量3923万t,建成产能5.45万t;2021年针对下干柴沟组Ⅲ-Ⅵ油部署15口探井,完钻试油4口5层,均获工业油流,展现出源内大面积、多层段整体含油的特征。截至目前,10万t页岩油先导试验平台8口钻井全部完钻。

2.7 苏北盆地阜宁组页岩油勘探取得突破性进展

中国石化华东油气分公司按照“常规与非常规油气兼探”的思路,在苏北盆地溱潼凹陷部署实施的常规油气风险探井沙垛1井在阜宁组试获日产油51 t,已累产油1.1万t,预测单井EUR2.23万t;溱页1HF井、帅页3-7HF井分别试获日产油55 t、20 t,初步落实页岩油有利区面积420 km²,提交预测地质储量3186万t。2022年中国石化江苏油田花2侧HF井获日产油超30 t、天然气超1500 m³的突破,标志着高邮、金湖凹陷11亿t页岩油资源或被激活。

2.8 北部湾海域流沙港组首口页岩油探井获高产油气流

2022年,中国海上首口页岩油探井——涸页-1井压裂测试成功,日产原油20 m³、天然气1589 m³,标志着中国海上页岩油勘探取得重大突破。据预测,北部湾盆地页岩油资源量约12亿t,其中涸西南凹陷页岩油资源量达8亿t,展现了我国海域良好的页岩油勘探前景。涸页-1井的突破,实现了中国海上页岩油气资源勘探开发装备和技术的“本土化”,拉开了海上非常规油气勘探开发的序幕。

3 页岩油地质理论与技术创新

与美国以古生界海相页岩油层系为主不同,中国页岩油资源主要赋存在中、新生界陆相富有机质页岩层系中,具有热成熟度低、黏土矿物含量高、可

动性差等特征,勘探开发难度较大。油气企业针对中国陆相页岩油地质特征和地质-工程一体化特点,通过加强地质理论与技术工艺攻关,创新形成了中国特色的陆相页岩油形成富集理论认识和配套的勘探开发关键技术,支撑了中国陆相页岩油多领域实现重大突破。

3.1 创新形成了陆相页岩油形成富集理论认识

陆相“页岩产油”理论创新,开辟了非常规石油重大战略新领域。在页岩油形成机理与可动性方面,主要有以下认识:页岩油具有源储一体、基质孔隙与微裂缝赋存、游离与束缚兼有的地质特点;页岩油赋存在富有机质页岩中,属于自生自储油气藏,可划分为夹层型、纯页岩型页岩油储层(杨智等,2021);页岩油主要赋存在纳米-微米级的页岩基质孔隙中,具有游离与束缚两种赋存方式(Ge et al., 2020);与页岩气相比,页岩油烃类分子直径大,页岩成熟度低、黏土矿物含量高,页岩油可动性与页岩的可压性相对较差(Liu et al., 2020; Li et al., 2022)。

页岩油大规模连续成藏、甜点段(区)富集地质理论认识。与构造油气藏高部位油气聚集不同,页岩油具有大规模连续成藏特点,具有一定成熟度和保存条件的富有机质页岩均有页岩油赋存(聂海宽等,2016),构造对页岩油分布的控制作用不明显;大面积连续分布的页岩油藏同样具有非均质性,甜点段、甜点区富集是其主要特征(邹才能等,2013),初步研究认为页岩油形成富集关键指标为:TOC > 2%、S₁ > 2 mg/g、R_o > 0.7%、压力系数 > 1.2、厚度 > 10 m、黏土矿物含量 < 30%,顶底板封闭性好。针对中国陆相页岩油富集基础地质认识,创新形成陆相富有机质页岩细粒沉积模式,提出“陆相页岩生油模式”;发现页岩纳米级孔喉储油系统,提出页岩油流动孔喉下限和“微纳米孔储油、微页理与裂缝渗流”机理;揭示页岩油“连续型”页岩油甜点区/段富集规律(邹才能等,2023)。综合沉积旋回、纹层结构类型、岩性组合、含油气性、储集性、可压性、可动性、可采性等资料,应用5~8个关键参数,采用三分法划分出Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类富集层,并根据不同盆地、不同类型、不同成熟度进行“甜点”的优选(孙龙德等,2023)。

深盆湖相区作为中国陆相页岩油的主要分布

区,“优势组构相—滞留烃超越效应”富集理论揭示了深盆湖相区页岩具有“三高一低”(高频纹层结构、高有机质丰度、高长英质含量、低黏土含量)的优势组构特征,为深盆湖相区页岩油的勘探开发奠定了理论基础与依据(赵贤正等,2021)。富有机质页岩体系中生烃层、储集层的“双层结构”与成烃、成储的“二元耦合”使页岩中大孔径、高孔渗的优势岩相与游离油富集区组成无机-有机的有效匹配(刘惠民等,2022)。

3.2 创新形成了“甜点”评价预测、长水平井段和体积压裂关键技术

针对中国陆相页岩油工业发展面临的一系列重大科技难题,如需要针对性突破“甜点区”评价优选、水平井体积压裂工程技术、布井方式与开采工艺、原位加热转化技术装备等核心理论技术(胡素云等,2020;邹才能等,2023)。经过多年技术攻关和实践,中石油已初步形成适合中国陆相页岩油地质开发特征的页岩油开发评价方法与技术,主要包括岩相评价、储集性表征、可动性评价、可压性评价、产能评价及地质建模-数值模拟一体化“甜点”分析技术(李阳等,2022)。此外,中石化已经形成了陆相页岩油选区评价、甜点地球物理预测、长水平井钻完井与分段压裂改造技术系列,为页岩油的勘探突破提供了有效支撑(马永生等,2022)。其中,页岩油地球物理“甜点”识别与预测技术、水平井和大规模体积压裂技术为页岩油勘探开发的核心技术,该技术有效指导和推动了准噶尔盆地吉木萨尔、渤海湾盆地沧东凹陷孔二段、鄂尔多斯盆地长7段、三塘湖盆地二叠系等陆相页岩油的勘探突破与规模建产,助推引领页岩油成为中国石油重要的战略接替领域。

页岩油地球物理“甜点”识别与预测技术。应用三维地震高精度曲率、井控地震相、高分辨率反演等技术精细刻画微构造和页岩分布,形成了三维地震岩性、含油性、变系数脆性等多信息融合甜点预测技术(刘喜武等,2022),水平井甜点段钻遇率提高10.5%,单井产量提升86%;综合页岩油储层厚度、物性、视电阻增大率等参数构建了视储能系数模型,进行测井产能预测,庆城油田82口试油井图版符合率达到81.7%,有效支撑了庆城油田探明储量提交。

长水平井段优快钻完井技术与大平台丛式井立体开发技术模式。地质工程一体化全生命周期管理,已成为页岩油规模效益开发的重要理念。水平井与大规模体积压裂成为中高熟陆相页岩油开发重要手段(邹才能等,2023)。针对大面积连续分布的页岩油资源丰度较低和储层物性较差特征,创新采用三维地震多属性精细刻画与旋转地质导向相结合技术,实现了长水平井段钻探控制更大面积的目标。中国石油在鄂尔多斯盆地实施的华H90-3井水平井段长达5060 m,刷新亚洲陆上最长水平井纪录;针对中国复杂的地表地貌条件和地下构造特征,以及陆相页岩油层段多、厚度大的特点,创新形成了水平井小井距、大平台和丛式井立体开发技术模式;庆城页岩油田华H100平台布井数达31口,纵向上实现了单平台三层系的一次性动用,节约土地面积217.84 hm²,平均钻井周期降至18 d,为庆城300万t页岩油产能建设提供了有力支撑。

细分切割体积压裂技术工艺与“一段一策”差异化压裂模式。中石油长庆油田针对鄂尔多斯盆地长7段页岩储层裂缝条带状分布和低压特点,研发了以“多簇射孔密布缝+可溶球座硬封隔+暂堵转向软分簇”为核心的细分切割压裂技术工艺,创建了“造缝、补能、渗吸”一体化体积压裂模式,单井平均初期产量由前期的9.6 t/d提升到18.6 t/d,单井EUR由前期1.8万t提升2.6万t;针对页岩油储层物性差、非均质性强的特点,通过精细评价储层岩石力学参数和可压性指数,制定了“一段一策”差异化压裂施工模式,采用超密切割、连续铺砂和多级暂堵转向等工艺技术,提高裂缝导流能力,实现致密页岩油储层的有效改造。创新形成了以“水平井+体积压裂”为核心的页岩油“甜点”优选、三维丛式水平井优快钻完井等五大技术系列,催生了10亿t规模页岩油探明储量顺利发现,建成了亚洲陆上最大水平井平台华H100平台,创造了亚洲陆上最长水平段5060 m纪录。

4 陆相页岩油有望成为常规油气现实接替领域

4.1 陆相富有机质页岩层系多、分布广,页岩油资源潜力大

中国陆相富有机质页岩主要发育在渤海湾、鄂

尔多斯、松辽盆地、准噶尔、四川5个大型盆地和柴达木、江汉、苏北等9个中小型盆地中。从层系上看,主要分布在古近系、三叠系、白垩系、二叠系和侏罗系。2013年,国土资源部油气资源战略研究中心评价页岩油有利区地质资源量为402.67亿t,技术可采资源量为37.06亿t,同年国土资源部评价中国页岩油地质资源量153亿t;2014年,中国石化评价全国页岩油地质资源量为204亿t;2016年,中国石油评价全国页岩油技术可采资源量为145亿t;EIA(2017)发布中国页岩油技术可采资源量43.93亿t;2019年自然资源部评价页岩油地质资源量为283亿t(赵文智等,2023)(图3)。2021年底,页岩油产量240万t,同比增长29%;探明地质储量12.2亿t,待探明地质资源量271.06亿t,探明率为4.3%,勘探潜力巨大。

4.2 陆相页岩油有望成为“十四五”油气接替重要阵地

从国家层面来看,页岩油作为中国油气增储上产的重要领域,对于满足国家能源安全的需要非常重要。习近平总书记高度重视油气勘探开发,提出“四个革命、一个合作”能源发展与安全新战略,要求大力提升油气勘探开发力度、保障国家能源安全,为中国新时代能源改革发展指明了前进方向。此外,国家“十四五”和2035年远景目标提出,集中优势资源攻关油气勘探开发等领域关键核心技术,实现油气核心需求依靠自保,保持原油和天然气稳

产增产。从页岩油资源潜力来看,我国陆相页岩油资源潜力大、分布广,具备加快发展的资源基础。EIA(2017)发布中国页岩油技术可采资源量43.93亿t,位居世界第三位;不同机构资源评价我国页岩油地质资源量大,层系多、分布广。从页岩油提效增产降本关键技术进展来看,通过持续理论技术攻关和反复现场实践,创新形成了具有中国特色的陆相页岩油形成富集理论认识和配套的地球物理“甜点”识别预测、水平井优快钻井、细分切割体积压裂等关键技术,具有加快发展的理论和技术支撑条件。从目前中国陆相页岩油开发现状来看,通过对陆相页岩油调查勘探不断探索,在多个含油气盆地实现了多个层系页岩油重大突破,地质储量超过30亿t,2021年产量超过240万t,页岩油的大规模开发已呈现出蓄势待发之势。因此,随着我国陆相页岩油勘探开发快速发展,有望成为“十四五”油气接替重要阵地。

5 发展建议

(1)强力推进大型盆地地质结构与数字盆地建设,动态评价页岩油资源潜力。加强公益性油气地质调查与油气企业勘探开发深度合作,统筹基础地质调查与油气勘探开发数据资料,充分发挥科技创新与信息化双引擎作用,强力推进大型盆地地质结构与数字盆地建设,实现含油气盆地沉积、构造演化和油气资源分布的三维可视化,动态评价页岩油

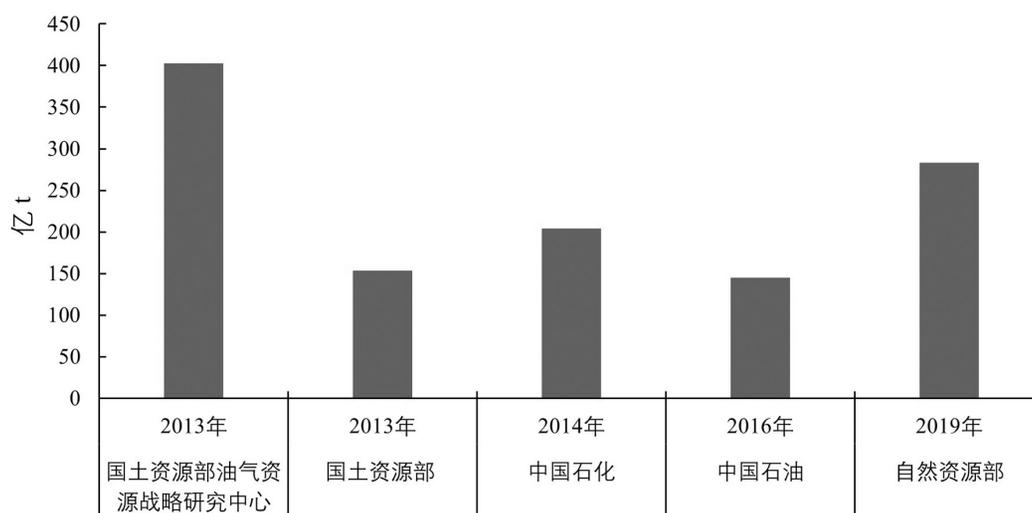


图3 中国不同阶段陆相页岩油地质资源量评价结果

Fig.3 Evaluation results of continental shale oil geological resources at different stages in China

资源潜力,支撑服务页岩油勘探开发。

(2)持续加强页岩油富集机理研究和勘探开发关键技术攻关。针对中国陆相页岩纵向厚度大、横向相变快、热演化程度低、黏土矿物含量高,以及地表地貌和地质构造复杂等特点,设立不同类型的页岩油勘探开发示范区,依靠科技重大专项等,开展地质—工程—一体化科技攻关,丰富和发展中国陆相页岩油成藏理论,优化完善陆相页岩油勘探开发技术体系,加快推动大型盆地中高成熟度页岩油(第一梯队)的大规模商业开采。

(3)不断加大中低成熟度页岩油和油页岩原位改质技术攻关力度。中国页岩油资源主要蕴藏在中生界陆相地层中,中低成熟度页岩油资源超过总量的50%,未成熟的油页岩资源量为3156.84亿t(折合油页岩资源为223.02亿t),二者在空间上呈连续共生(过渡)关系,地质资源潜力巨大,但动用难度较大,需要不断加强原位改质技术攻关探索,为中低成熟度页岩油和油页岩(第二梯队)有效开发提供技术支撑。

(4)组织开展中小型沉积盆地页岩油和油页岩资源调查评价。中国西部和东部地区发育的三塘湖、雅布赖、酒泉、江汉、南襄、百色等数十个沉积盆地,页岩油地质资源量超过30亿t,且油页岩资源丰富;此外,中国海域页岩油勘探已获得突破。需要尽快开展页岩油和油页岩调查评价,提高地质工作程度,进一步落实资源潜力,可作为接续补充资源(第三梯队),为后期开发利用做好资源储备。

6 结 论

(1)“十三五”期间,中国陆相页岩油在8个盆地和10个层系取得重要进展。其中,渤海湾盆地济阳坳陷渤南地区古近系、鄂尔多斯盆地陇东和伊陕斜坡三叠系、松辽盆地古龙凹陷白垩系、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系、四川盆地川东地区侏罗系、江汉盆地潜江凹陷古近系是页岩油未来勘探开发主要地区,也是油气增储上产的有利目标区。

(2)针对中国陆相页岩油热成熟度低、黏土矿物含量高、可动性差、勘探开发难度较大等特点,创新形成了页岩油源储一体、基质孔隙与微裂缝赋存、大规模连续成藏、甜点段(区)富集、地球物理“甜点”评价预测技术、长水平井段和体积压裂等具

有中国特色的陆相不同类型页岩油成藏机理和不同成熟度页岩油勘探开发技术,支撑了中国陆相页岩油多领域实现重大突破。

(3)中国陆相富有机质页岩层系多、分布广,页岩油资源潜力大,有望成为“十四五”现实接替领域。依据中国页岩油地质条件与勘探开发实践,提出推进大型盆地地质结构与数字盆地建设,动态评价页岩油资源潜力、加强页岩油富集机理研究和勘探开发关键技术和中低成熟度页岩油和油页岩原位改质技术攻关、开展中小型沉积盆地页岩油和油页岩资源调查评价四项发展建议。

References

- Bai Jing, Xu Xingyou, Chen Shan, Liuweibin, Liu Chang, Zhang Changsheng. 2020. Sedimentary characteristics and paleo-environment restoration of the first member of Qingshankou Formation in Qian'an area, Changling sag, Songliao basin: A case study of Jiyeou 1 well[J]. *Geology in China*, 47(1): 220–235(in Chinese with English abstract).
- Chen Lin, Mou Pengfei. 2022. Analysis of surface engineering scheme of shale oil capacity construction in Shuanghe West well area of Yanchang oil field[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 42(19): 143–145(in Chinese with English abstract).
- Chen Xijie, Jia Liqiong, Jia Ting. 2022. China achieved fruitful results in oil–shale gas–coalbed methane exploration and development in 2021[J]. *China Geology*, 5: 355–356.
- Fang Yuan, Zhang Wanyi, Ma Fen, Cheng Lifang, Shi Feizhou. 2019. Research on the global distribution and development status of shale oil[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(5): 126–134(in Chinese with English abstract).
- Fu Suotang, Jin Zhijun, Fu Jinhua, Li Shixiang, Yang Weiwei. 2021. 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*, 42: 561–569(in Chinese with English abstract).
- Ge Mingna, Bao Shujing, He Wei, Chen Xianglin, Lin Tuo, Chen Ke. 2018. The discovery of shale gas in Lower Cambrian marine shale gas at Huangdi-1 well in Huangping region of northern Guizhou[J]. *Geology in China*, 45(4): 851–852(in Chinese with English abstract).
- Ge Mingna, Ke Chen, Chen Xianglin, Wang Chao, Bao Shujing. 2020. The influence factors of gas-bearing and geological characteristics of Niutitang Formation shale in the southern margin of Xuefeng Mountain ancient uplift: A case of Well Huangdi 1[J]. *China Geology*, 3: 533–544.
- Guan Baoshan, Liu Yuting, Liang Li, Liu Qian. 2019. Shale oil reservoir reconstruction and efficient development technology[J].

- Oil Drilling & Production Technology, 41(2): 212–223(in Chinese with English abstract).
- He Wenyuan, Bai Xuefeng, Meng Q'an, Li Junhui, Zhang Dazhi, Wang Youzhi. 2022. Accumulation geological characteristics and major discoveries of lacustrine shale oil in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 43(7): 885–898(in Chinese with English abstract).
- Hu Suyun, Zhao Wenzhi, Hou Lianhua, Yang Zhi, Zhu Rukai, Wu Songtao, Bai Bin, Jin Xu. 2020. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(4): 819–828.
- Huang Zhenkai, Hao Yunqing, Li Shuangjian, Wo Yujin, Sun Dongsheng, Li Maowen, Chen Jianping. 2020. Oil-bearing potential, mobility evaluation and significance of shale oil in Chang 7 shale system in the Ordos Basin: A case study of well H317[J]. *Geology in China*, 47(1): 210–219(in Chinese with English abstract).
- IEA. 2018. World Energy Outlook 2018[M]. Paris: OECD/IEA.
- Li Guoxin, Zhu Rukai, Zhang Yongshu, Chen Yan, Cui Jingwei, Jiang Yinghai, Wu Kunyu, Sheng Jun, Xian Chenggang, Liu He. 2022. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 49(1): 18–31(in Chinese with English abstract).
- Li Shizhen, Zhou Zhi, Nie Haikuan, Zhang Leifu, Song Teng, Liu Weibin, Li Haohan, Xu Qiuchen, Wei Siyu, Tao Shu. 2022. Distribution characteristics, exploration and development, geological theories research progress and exploration directions of shale gas in China[J]. *China Geology*, 5: 111–136.
- Li Yang, Zhao Qingmin, Lyu Qi, Xue Zhaojie, Cao Xiaopeng, Liu Zupeng. 2022. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 49(5): 955–964.
- Liang Xing, Zhang Tingshan, Shu Honglin, Min Huajun, Zhang Zhao, Zhang Lei. 2020. Evaluation of shale gas resource potential of Longmaxi Formation in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area in the Northern Yunnan–Guizhou[J]. *Geology in China*, 47(1): 72–87(in Chinese with English abstract).
- Liu Huimin, Li Junliang, Liu Peng, Wang Xin, Wang Yong, Qiu Yibo, Li Zheng, Wang Weiqing. 2022. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 43(12): 1717–1729(in Chinese with English abstract).
- Liu Junping, Song Sicun, Wang Wei, Tang Feng, Li Jing, Duan Xiangdong, Wang Xiaohu, Sun Baidong, Yu Saiying, Hu Shaobin, Duan Wenting. 2020. Protoconodont fossils for refining the Cambrian bottom and the contribution to shale gas formation along the southwest margin of Yangtze Block[J]. *China Geology*, 3: 558–566.
- Liu Xiwu, Liu Yuwei, Guo Zhiqi. 2022. Key sweet spot factors seismic characterization of continental shale oil[J]. *Progress in Geophysics*, 37(4): 1576–1584(in Chinese with English abstract).
- Lu Yunqian, Jiang Youlu, Wang Wei, Du Jianfeng, Liu Jingdong. 2020. Coupling relationship between reservoir diagenesis and hydrocarbon accumulation in Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Dongling, Changling fault depression, Songliao Basin, Northeast China[J]. *China Geology*, 3: 247–261.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, Hu Zongquan, Liu Huimin, Gao Bo, Wang Weiqing, Li Zhiming, Zhang Zilin. 2022. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96 (1): 155–171(in Chinese with English abstract).
- Marianne Kah. 2018. Uncertainties in forecasting US tight oil production [EB/OL]. <https://energypolicy.columbia.edu/research/commentary/uncertainties-forecasting-us-tight-oil-production>.
- Nie Haikuan, Zhang Peixian, Bian Ruikang, Wu Xiaoling, Zhai Changbo. 2016. Oil accumulation characteristics of China continental shale[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 55–62(in Chinese with English abstract).
- Philip H, Pete Stark, Bob Fryklund. 2018. America's energy future reshaped by oil, gas supplies from tight rock formations [EB/OL]. <https://cdn.ihs.com/www/pdf/Americas-Energy-Future.pdf>.
- Shen Yunqi, Jin Zhijun, Su Jianzheng, Li Zhiming, Niu Jun. 2022. Characteristics of horizontal and vertical permeability of continental shale oil reservoirs in China: A case from Jiyang Depression in Bohai Bay Basin and Qianjiang Sag in Jiangnan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 43(2): 378–389(in Chinese with English abstract).
- Sun Longde, Liu He, He Wenyuan, Li Guoxin, Zhang Shuichang, Zhu Rukai, Jin Xu, Meng Siwei, Jiang Hang. 2021. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 453–463(in Chinese with English abstract).
- Sun Longde, Zhao Wenzhi, Liu He, Zhu Rukai, Bai Bin, Kang Yuan, Zhang Jingya, Wu Songtao. 2023. Concept and application of “sweet spot” in shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 1–13(in Chinese with English abstract).
- Tim Gould, Christophe Mc Glade. 2019. Could tight oil go global? [EB/OL]. <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/january/could-tight-oil-go-global.html>(in Chinese with English abstract).
- Yang Jianguo, Li Shichao, Yao Yulai, Xiao Fei, Li Ang, Zhang Liyan, Huang Yiming. 2021. Strategic survey results of shale oil in the first member of qingshankou formation, Upper Cretaceous in Northern Songliao basin [J]. *Geology and Resources*, 30(3): 232–238, 264(in Chinese with English abstract).
- Yang Lei, Jin Zhijun. 2019. Global shale oil development and prospects[J]. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 553–559(in Chinese with English abstract).

- Yang Zhi, Tang Zhenxing, Li Guohui, Jia Xiyu, Wu Yanxiong, Chen Xuan, Huang Dong, Jiang Tao, Fang Xiang, Wang Lan, Wu Yinye, Wu Songtao, Fu Lei, Li Jiarui, Li Qiyan, Zhao Jiahong, Wang Tianxu. 2021. Optimization of enrichment plays, evaluation of sweet area & section and application of key technologies for the continental shale strata oil in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(8): 2257–2272(in Chinese with English abstract).
- Yin Senlin, Xie Jianyong, Cheng Leli, Wu Youxin, Zhu Baiyu, Chen Gongyang, Zhao Junwei. 2022. Advances in continental shale oil research and problems of reservoir geology[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(4): 979–995(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiaqiang, Li Shixiang, Li Hongwei, Zhou Xinping, Liu Jiangyan, Guo Ruiliang, Chen Junlin, Li Shutong. 2021. Gravity flow deposits in the distal lacustrine basin of the 7th reservoir group of Yanchang Formation and deepwater oil and gas exploration in Ordos Basin: A case study of Chang 7 sublayer of Chengye horizontal well region[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 42: 570–587(in Chinese with English abstract).
- Zhang Junfeng, Xu Xingyou, Bai Jing, Liu Weibin, Chen Shan, Liu Chang, Li Yaohua. 2020. Enrichment and exploration of deep lacustrine shale oil in the first Member of Cretaceous Qingshankou Formation, southern Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(4): 637–652(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Zhu Rukai, Liu Wei, Bian Congsheng, Wang Kun. 2023. Lacustrine medium–high maturity shale oil in onshore China: Enrichment conditions and occurrence features[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 116–127(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Zhou Lihong, Jin Fengming, Han Guomeng, Shi Zhannan, Han Wenzhong, Ding Yujiao, Zhang Wei, Wang Guona, Liu Xuewei, Wang Hu. 2021. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: A case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 42(2): 143–162.
- Zhou Lihong, He Haiqing, Guo Xujie, Chen Changwei, Han Guomeng, Yang Fei, Ma Jianying, Zhou Suyan. 2022. Main factors controlling the medium–mature shale oil enrichment and exploration breakthrough in the Paleogene lower E₃st in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 43(5): 1073–1086(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Ma Feng, Pan Songqi, Zhang Xinshun, Wu Songtao, Fu Guoyou, Wang Hongjun, Yang Zhi. 2023. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 128–142(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, Zhu Rukai, Hou Lianhua, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Wu Songtao, Sen Linhu, Wang Lan, Bai Bin, Yao Jingli. 2013. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(1):14–26(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白静, 徐兴友, 陈珊, 刘卫彬, 刘畅, 张昌盛. 2020. 松辽盆地长岭凹陷乾安地区青山口组一段沉积相特征与古环境恢复——以吉页油1井为例[J]. *中国地质*, 47(1): 220–235.
- 陈林, 牟鹏飞. 2022. 延长油田双河西区井区页岩油产能建设地面工程方案分析[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 42(19): 143–145.
- 方圆, 张万益, 马芬, 成丽芳, 史飞洲. 2019. 全球页岩油资源分布与开发现状[J]. *矿产保护与利用*, 39(5): 126–134.
- 付锁堂, 金之钧, 付金华, 李士祥, 杨伟伟. 2021. 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*, 42: 561–569.
- 葛明娜, 包书景, 何伟, 陈相霖, 林拓, 陈科. 2018. 黔北黄平地区黄地1井下寒武统发现海相页岩气[J]. *中国地质*, 45(4): 851–852.
- 管保山, 刘玉婷, 梁利, 刘倩. 2019. 页岩油储层改造和高效开发技术[J]. *石油钻采工艺*, 41(2): 212–223.
- 何文渊, 白雪峰, 蒙启安, 李军辉, 张大智, 王有智. 2022. 四川盆地陆相页岩油成藏地质特征与重大发现[J]. *石油学报*, 43(7): 885–898.
- 胡素云, 赵文智, 侯连华, 杨智, 朱如凯, 吴松涛, 白斌, 金旭. 2020. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. *石油勘探与开发*, 47(4):819–828.
- 黄振凯, 郝运轻, 李双建, 沃玉进, 孙冬胜, 黎茂稳, 陈建平. 2020. 鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系含油气性与页岩油可动性评价——以H317井为例[J]. *中国地质*, 47(1): 210–219.
- 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 陈琰, 崔景伟, 姜营海, 伍坤宇, 盛军, 鲜成钢, 刘合. 2022. 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*, 49(1): 18–31.
- 李阳, 赵清民, 吕琦, 薛兆杰, 曹小朋, 刘祖鹏. 2022. 中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J]. *石油勘探与开发*, 49(5): 955–964.
- 梁兴, 张廷山, 舒红林, 闵华军, 张朝, 张磊. 2020. 滇黔北昭通示范区龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. *中国地质*, 47(1): 72–87.
- 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 王鑫, 王勇, 邱怡博, 李政, 王伟庆. 2022. 济阳拗陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向[J]. *石油学报*, 43(12): 1717–1729.
- 刘喜武, 刘宇巍, 郭智奇. 2022. 陆相页岩油关键甜点要素地球物理表征技术[J]. *地球物理学进展*, 37(4): 1576–1584.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 胡宗全, 刘惠民, 高波, 王伟庆, 李志明, 张子麟. 2022. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. *地质学报*, 96(1): 155–171.
- 聂海宽, 张培先, 边瑞康, 武晓玲, 翟常博. 2016. 中国陆相页岩油富集特征[J]. *地学前缘*, 23(2): 55–62.
- 沈云琦, 金之钧, 苏建政, 李志明, 牛骏. 2022. 中国陆相页岩油储层

- 水平渗透率与垂直渗透率特征——以渤海湾盆地济阳坳陷和江汉盆地潜江凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 43(2): 378-389.
- 孙龙德, 刘合, 何文渊, 李国欣, 张水昌, 朱如凯, 金旭, 孟思炜, 江航. 2021. 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, 48(3): 453-463.
- 孙龙德, 赵文智, 刘合, 朱如凯, 白斌, 康缘, 张婧雅, 吴松涛. 2023. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. 石油学报, 44(1): 1-13.
- 杨建国, 李士超, 姚玉来, 肖飞, 李昂, 张丽艳, 黄一鸣. 2021. 松辽盆地北部上白垩统青山口组一段页岩油战略调查成果综述[J]. 地质与资源, 30(3): 232-238, 264.
- 杨雷, 金之钧. 2019. 球页岩油发展及展望[J]. 中国石油勘探, 24(5): 553-559.
- 杨智, 唐振兴, 李国会, 贾希玉, 吴颜雄, 陈旋, 黄东, 江涛, 方向, 王岚, 吴因业, 吴松涛, 付蕾, 李嘉蕊, 李奇艳, 赵家宏, 王天煦. 2021. 陆相页岩层系石油富集区带优选、甜点区段评价与关键技术应用[J]. 地质学报, 95(8): 2257-2272.
- 印森林, 谢建勇, 程乐利, 吴有鑫, 朱柏宇, 陈恭洋, 赵俊威. 2022. 陆相页岩油研究进展及开发地质面临的问题[J]. 沉积学报, 40(4): 979-995.
- 张家强, 李士祥, 李宏伟, 周新平, 刘江艳, 郭睿良, 陈俊霖, 李树同. 2021. 鄂尔多斯盆地延长组7油层组湖盆远端重力流沉积与深水油气勘探——以城页水平井区长73小层为例[J]. 石油学报, 42: 570-587.
- 张君峰, 徐兴友, 白静, 刘卫彬, 陈珊, 刘畅, 李耀华. 2020. 松辽盆地南部白垩系青一段深湖相页岩油富集模式及勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 47(4): 637-652.
- 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 卞从胜, 王坤. 2023. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. 地学前缘, 30(1): 116-127.
- 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 金凤鸣, 韩国猛, 时战楠, 韩文中, 丁娱娇, 张伟, 王国娜, 刘学伟, 汪虎. 2021. 深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油学报, 42(2): 143-162.
- 周立宏, 何海清, 郭绪杰, 陈长伟, 韩国猛, 杨飞, 马建英, 周素彦. 2022. 渤海湾盆地歧口凹陷古近系沙一下亚段中等成熟页岩油富集主控因素与勘探突破[J]. 石油与天然气地质, 43(5): 1073-1086.
- 邹才能, 杨智, 崔景伟, 朱如凯, 侯连华, 陶士振, 袁选俊, 吴松涛, 林森虎, 王岚, 白斌, 姚泾利. 2013. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 40(1): 14-26.
- 邹才能, 马锋, 潘松圻, 张新顺, 吴松涛, 傅国友, 王红军, 杨智. 2023. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. 地学前缘, 30(1): 128-142.