

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.841>



中国为什么可以实现陆相“页岩油革命”?

邹才能¹, 杨智^{1*}, 李国欣², 李建忠³, 刘显阳⁴, 唐勇⁵, 江涛⁶, 杨雨⁷,
白雪峰⁸, 潘松圻¹, 卢明辉¹, 雷征东¹, 才博¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国石油青海油田分公司, 甘肃敦煌 736202
3. 中国石油吐哈油田分公司, 新疆哈密 839009
4. 中国石油长庆油田分公司, 陕西西安 710018
5. 中国石油新疆油田分公司, 新疆克拉玛依 834000
6. 中国石油吉林油田分公司, 吉林松原 138000
7. 中国石油西南油气田分公司, 四川成都 610000
8. 中国石油大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163712

陆相页岩油是保障国家石油供应安全和提升工业创新水平的战略接替资源. 中国是陆相石油资源大国, 占陆上石油资源总量的 90%; 也是陆相石油生产大国, 陆相石油产量约占石油总产量的 93% (贾承造等, 2018; 杨智和邹才能, 2019). 中国源岩层发育多种类型非常规油气资源(图 1), 其中陆相页岩油是中国陆上未来剩余石油资源的主要接替领域. 确立中国特色陆相页岩油理论技术攻关的科学问题, 有利于推动实现中国陆相页岩油革命和石油工业持续发展. 目前, 中高成熟度页岩油在松辽、鄂尔多斯、渤海湾、准噶尔、四川等盆地已实现工业性突破与发展, 中低成熟度页岩油已经开展大量前期基础理论与技术储备攻关, 即将在鄂尔多斯、松辽等盆地进行工业性试验, 有望取得革命性突破(表 1, 杨智等, 2022).

1 核心内容

不同于美国海相, 中国陆相页岩油具有“构造变动大、岩性复杂、黏土含量偏高、热演化偏低、油质偏重、气油比偏低、甜点区/段偏小”等地质特征, 无法照搬美国模式, 勘探开发难度很大. 成熟度对原油品质、地层压力、流体组成、矿物孔隙演化等均具重要影响. 按照成熟度参数划分, 中国陆相页岩油可划分为中低成熟和中高成熟两种类型页岩油, 需要采用完全不同技术路线, 中高成熟度页岩油采用水平井、人工水力加砂与二氧化碳等增能压裂技术开发, 中低成熟页岩油需要采用水平井、人工加热等原位熟化转化技术才能开采, 针对性有效人工干预可以实现“人造油藏”规模开发利用(焦方正等, 2020; 赵文智等, 2020; 邹才能等, 2020; 金之钧等, 2021)(图 2).

对于中高成熟页岩油, 目前主体技术是水平井

基金项目: 中石油页岩油重大科技项目(No. 2021DJ18); 国家高层次特殊人才支持计划(第四批次).

作者简介: 邹才能(1963—), 男, 博士, 中国科学院院士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师、博士生导师, 主要从事常规—非常规油气地质学理论研究与实践、新能源与能源战略等研究. E-mail: zcn@petrochina.com.cn

* 通讯作者: 杨智, E-mail: yangzhi2009@petrochina.com.cn

引用格式: 邹才能, 杨智, 李国欣, 李建忠, 刘显阳, 唐勇, 江涛, 杨雨, 白雪峰, 潘松圻, 卢明辉, 雷征东, 才博, 2022. 中国为什么可以实现陆相“页岩油革命”? 地球科学, 47(10): 3860—3863.

文章来源: Zou Caineng, Yang Zhi, Li Guoxin, Li Jianzhong, Liu Xianyang, Tang Yong, Jiang Tao, Yang Yu, Bai Xuefeng, Pan Songqi, Lu Minghui, Lei Zhengdong, Cai Bo, 2022. Why Can China Realize the Continental “Shale Oil Revolution”? *Journal of Earth Science*, 33(5): 1324—1327. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1745-7>

油气类型	岩性	R_o (%)	理论基础	主要技术路线
油页岩油		0.4	干酪根成油	地表加热干馏“人造石油”
页岩油				地下原位加热转化“人造炼厂”
煤岩油				
页岩油气		1.8	连续烃聚集	水平井水力压裂“人工油藏”
煤层气				水力压裂增产改造“人工气藏”
煤制气		1.8	干酪根成气	地下原位燃烧气化“人造气厂”
页岩气				连续气聚集

未熟—低熟富有机质页岩
 成熟页岩
 煤层
 人造石油
 天然石油
 人造燃气
 天然燃气

图1 中国非常规源岩油气类型与主要技术路线

体积压裂,核心是发掘高孔渗储层的储集层属性信息,找准“甜点区”、压开“甜点段”、开发“甜点体”,目前技术体系基本成熟,需要加大力度工业化发展.重点攻关6方面的核心内容:(1)陆相页岩油富集规律、资源潜力与有利区带目标评价研究,重点形成资源潜力分级评价方法和成藏主控因素地质评价工业图件,明确有利资源规模和区带分布;(2)陆相页岩细粒沉积源储特征与页岩油有利区段评价研究,重点形成源储组合配套实验方法、细粒沉积模式和孔缝介质模型,解决页岩层系形成分布基础理论方法难题;(3)陆相页岩油储层甜点地球物理关键参数优选与评价预测研究,重点形成岩石物理响应模型和测井地震参数标准体系,优选出勘探甜点靶区;(4)陆相页岩油藏流体赋存机制、流动机理与提高采收率技术研究,重点形成页岩油藏流体赋存渗流模型和提高采收率关键技术,优化有效动用方法技术;(5)陆相页岩油储层复杂缝网形成机制与高效体积改造技术研究,重点研发裂缝形成支撑机制及储层压裂改造技术,支持“人工油藏”高效开发提高采收率;(6)重点盆地深地陆相页岩油勘探开发理论与关键技术研究,重点推进地质认识深化和关键技术应用.

对于中低成熟页岩油,水平井电加热原位熟化转化等是革命性主体技术,核心是发掘富有机质页岩的烃源岩属性信息,找准“页岩区”、加热“页岩段”、开发“页岩体”,重点攻关5方面的核心内容,目前技术体系处于探索初期,需要加快工业性试验,中国石油已准备在鄂尔多斯、松辽盆地等开展先导试验.(1)揭示原位转化反应动力学及相平衡机制;

(2)形成原位熟化转化的热力—应力—物质动态平衡开发理论与技术体系;(3)研发集成小井距高精度水平井钻井及导向技术、快速钻井及防坍塌技术、套管热膨胀预防技术;(4)研发原位转化高效加热方法;(5)研发原位转化开发生态环境评价技术与指标.

2 科学价值

黑色页岩看似简单却是最复杂的岩石,看似易采却是最难开发的油气类型.陆相页岩油如能实现革命发展,主要具有两方面的科学价值:(1)细粒沉积模式、液态烃微纳米尺度赋存、运聚及渗流等科学问题的揭示,将为预测非常规页岩层系石油资源分布、全面透视含油盆地剩余石油资源分布提供科学依据;(2)低品位、非常规石油储量难以大规模动用的难题有望迎刃而解.页岩油是石油资源开发利用最具挑战性的类型,攻克页岩油瓶颈技术,将为特低渗乃至致密储层石油、高黏度石油等石油资源规模开发提供有效的技术手段.

3 应用前景

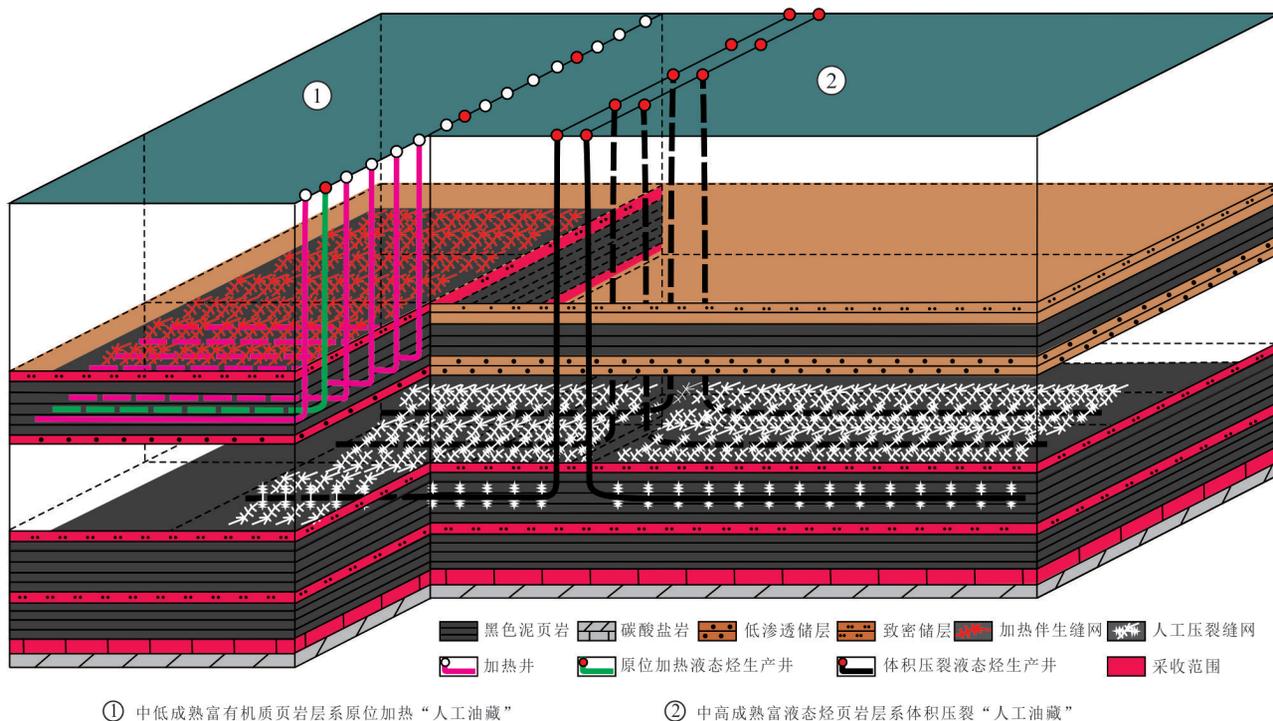
任何一种资源,只有完成大规模工业化效益开发,才能形成革命性战略接替.中国陆相页岩油正处在局部突破与初步探索阶段,新理论、新技术、新方法的诞生,有利于开启陆相页岩油革命新时代.过去十余年,成熟探区积极探索利用体积压裂技术解放富有机质页岩段孔隙型石油资源,多层系页岩段取得重要突破,实现了从油页岩及裂缝型泥岩油

表 1 中国典型源岩油气层系的有利储集层和有利烃源岩属性参数(杨智等, 2022)

资源类型	代表层系	有利储集层属性	有利烃源岩属性
油页岩油	抚顺盆地 古近系计 军屯组	湖沼相油页岩, 面积 37 km ² , 单层厚度 70~190 m	湖沼相油页岩, 面积 37 km ² , 埋深 17~634 m, 单层厚度 70~190 m, 有机碳含量 8.5%~13.1%, 平均含油率 5%~8%, 灰分平均值 78%, 油页岩油技术可采资源量 1.68×10 ⁸ t
页岩油	鄂尔多斯盆地三叠系延长组 7 段	湖盆中心夹层砂岩储层, 面积 20 000 km ² ; 油层厚度 10~40 m, 孔隙度 7%~13%、主流喉道半径大于 100 nm; 含油饱和度大于 60%, 游离烃占比大于 30%; 烃源区 R _o 大于 0.9%, 压力系数大于 0.7, 气油比大于 70 m ³ /m ³ , 原油密度 0.8~0.86 g/cm ³ , 有一定储层基质渗透率; 纹层及天然裂缝较发育, 岩石脆性矿物含量大于 50%, 水平应力差小于 10 MPa; 埋深小于 3 000 m, 地质资源量约 40×10 ⁸ t	深湖相黑色页岩, 面积 30 000 km ² ; TOC 大于 6%, 有机质类型为 I 型、II ₁ 型; 富有机质页岩集中段厚度 10~60 m、净地比大于 0.8, 连续分布面积大于 2 000 km ² ; R _o 为 0.5%~1.0%; 埋深小于 2 000 m; 顶底板封闭性好, 断层不发育, 且地层含水率小于 5%; 原位加热转化潜在生烃量约 500×10 ⁸ t 油当量
页岩油	松辽盆地白垩系	青山口组一段湖盆中心富砂质、碳酸盐质等储层, 面积 10 000 km ² ; 油层厚度 20~100 m, 孔隙度 5%~12%、主流喉道半径大于 100 nm; 含油饱和度大于 50%, 游离烃占比大于 30%; 烃源区 R _o 大于 1.2%, 压力系数大于 1.2, 气油比大于 20 m ³ /m ³ , 原油密度 0.76~0.85 g/cm ³ , 有一定储层基质渗透率; 纹层页岩及天然裂缝较发育、岩石脆性矿物含量大于 50%、水平应力差小于 10 MPa; 埋深小于 2 500 m, 地质资源量约 30×10 ⁸ t	嫩江组深湖相黑色页岩, 面积 20 000 km ² ; TOC 大于 2%, 有机质类型为 I 型、II ₁ 型; 富有机质页岩集中段厚度 20~100 m、净地比大于 0.8, 连续分布面积大于 1 000 km ² ; R _o 为 0.5%~1.0%; 埋深小于 2 000 m; 顶底板封闭性好, 断层不发育, 且地层含水率小于 5%; 原位加热转化潜在生烃量约 200×10 ⁸ t 油当量
页岩油	准噶尔盆地二叠系芦草沟组	湖相富砂质、富云质等混积岩, 面积 5 000 km ² ; 油层厚度 20~50 m, 孔隙度 5%~16%、主流喉道半径大于 150 nm; 含油饱和度大于 70%, 游离烃占比大于 20%; 烃源区 R _o 大于 0.8%, 压力系数大于 1.2, 气油比大于 10 m ³ /m ³ , 原油密度 0.88~0.92 g/cm ³ , 有一定储层基质渗透率; 纹层及天然裂缝较发育、岩石脆性矿物含量大于 70%, 水平应力差小于 10 MPa; 埋深小于 4 000 m, 地质资源量约 20×10 ⁸ t	深湖相黑色页岩, 面积 3 000 km ² ; TOC 大于 6%, 有机质类型为 II 型; 富有机质页岩集中段厚度 100~200 m, 净地比大于 0.8, 连续分布面积大于 500 km ² ; R _o 为 0.5%~1.0%; 埋深小于 3 000 m; 顶底板封闭性好, 断层不发育, 且地层含水率小于 5%; 原位加热转化潜在生烃量约 150×10 ⁸ t 油当量
煤岩油	西北地区侏罗系	湖沼相、低孔低渗煤岩, 面积大, 埋深较浅	湖沼相煤岩, 面积大, 富含烛煤、藻烛煤等低等植物, 褐煤、长焰煤等中低阶煤, 煤焦油产率普遍在 8%~17%, 埋深较浅, 煤中潜在石油资源约 500×10 ⁸ t
煤层气或煤制气	沁水盆地石炭系一二叠系	海陆过渡相、湖沼相煤岩, 向斜构造, 含气面积 5 169 km ² ; 有效孔隙度 1.1%~7.7%, 含气丰度大于 2×10 ⁸ m ³ /km ² , 含气量 4~32 m ³ /t, 吸附饱和度大于 80%; 压力系数 0.7~0.9, 煤层原始渗透率相对较大; 有效应力小于 15 MPa, 一般割理、天然裂缝较发育; 埋深小于 1 200 m, 地质资源量约 1.2×10 ¹² m ³	海陆过渡相、湖沼相煤岩, 分布面积 8 800 km ² ; 煤层集中段厚度 4~17 m, 连续分布面积大于 500 km ² ; R _o 为 2.6%~3.8%, 热成因气为主, 甲烷含量大于 98%, 含气量 4~32 m ³ /t; 埋深小于 1 000 m, 原位地下煤炭气化潜在生气量约 10×10 ¹² m ³
页岩气	四川盆地奥陶系五峰组一志留系龙马溪组	深水陆棚相黑色页岩, 高产段厚度 10~40 m, 面积 50 000 km ² ; 孔隙度大于 3%, 主流喉道半径大于 20 nm, 有机孔为主; 含气量大于 2.5 m ³ /t、游离气占比大于 60%; 超压系统, 甲烷含量超过 96%, 储层基质渗透率相对较高; 纹层及层理、天然裂缝较发育, 岩石脆性矿物含量大于 50%, 泊松比 0.1~0.3; 埋深小于 4 200 m, 地质资源量约 20×10 ¹² m ³	深水陆棚相页岩, 厚度 30~85 m, 面积 50 000 km ² ; TOC 大于 2%, 有机质类型为 II 型, R _o 为 1.7%~3.5%; 生气量超过 50×10 ¹² m ³

藏向成熟基质型页岩油的重要转变。截至 2021 年底, 在鄂尔多斯、松辽、四川、准噶尔等盆地发现多个规模储量区, 正在建设鄂尔多斯盆地陇东、松辽

盆地古龙、准噶尔盆地吉木萨尔、渤海湾盆地济阳等国家级页岩层系石油示范区/基地。陆相页岩油是国内石油稳产与上产的战略接替石油资源, 陆相



页岩油革命是中国石油工业的一个愿景,也许很快实现,或许路途艰难,只有不断求索科学真理,不断研发工程技术,探索出一条成熟的技术路线,才能完成“页岩油革命”的历史使命。

目前预判,我国地下中低熟页岩原位熟化转化油气革命、地下中深层煤岩原位燃烧气化油气革命,这两场“页岩煤岩革命”对我国乃至世界油气工业都具有重大战略意义(焦方正等, 2020; 赵文智等, 2020; 邹才能等, 2020; 金之钧等, 2021; 王双明等, 2021)。

参考文献

Yang, Z., Zou, C. N., Wu, S. T., et al., 2019. Formation, Distribution and Resource Potential of the “Sweet Areas (Sections)” of Continental Shale Oil in China. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.11.049>
 贾承造, 邹才能, 杨智, 等, 2018. 陆相油气地质理论在中国中

西部盆地的重大进展. *石油勘探与开发*, 45(4): 546–560.
 焦方正, 邹才能, 杨智, 2020. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践. *石油勘探与开发*, 47(6): 1067–1078.
 金之钧, 王冠平, 刘光祥, 等, 2021. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题. *石油学报*, 42(7): 821–835.
 王双明, 师庆民, 王生全, 等, 2021. 富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发. *煤炭学报*, 46(5): 1365–1377.
 杨智, 邹才能, 2019. “进源找油”: 源岩油气内涵与前景. *石油勘探与开发*, 46(1): 173184.
 杨智, 邹才能, 吴松涛, 等, 2022. 造缝产烃还是改质造烃? : 论含油气源岩层系的储集层属性和烃源岩属性. *地质学报*, 96(1): 183–194.
 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等, 2020. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界. *石油勘探与开发*, 47(1): 1–10.
 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等, 2020. 页岩油气革命及影响. *石油学报*, 41(1): 1–12.