

文章编号: 1000-0747(2018)04-0737-12 DOI: 10.11698/PED.2018.04.20

中国陆相致密油效益勘探开发

胡素云^{1,2}, 朱如凯^{1,2,3}, 吴松涛^{1,2,3}, 白斌^{1,2}, 杨智^{1,2}, 崔景伟^{1,2,3}(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 国家能源致密油气研发中心, 北京 100083;
3. 中国石油天然气集团有限公司油气储层重点实验室, 北京 100083)

基金项目: 国家油气重大专项(2016ZX05046, 2017ZX05001); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB239000)

摘要: 在北美致密油勘探开发现状调研基础上, 总结北美致密油规模效益勘探开发的成功经验和做法, 分析中国陆相致密油与北美海相致密油成藏地质条件差异, 提出中国陆相致密油产业发展的技术对策。北美致密油规模勘探、效益开发有 6 方面经验值得借鉴: 在成熟探区寻找新的效益勘探层系; 加强“甜点区”经济评价, 重点开发高收益“甜点区”; 通过重复压裂、立体压裂, 最大限度提高致密油储量动用程度; 优化钻完井技术, 降低工程作业成本; 采用商品套期保值措施确保公司长期持续盈利; 加强不同资源综合利用, 提升整体经济效益。中国陆相致密油有较好的资源基础, 借鉴北美海相致密油勘探开发的成功经验, 针对中国致密油储集层地质条件, 提出 4 方面建议: 评价致密油资源潜力, 优选致密油勘探战略选区; 选准“甜点区”、“甜点段”, 实现精准高效开发; 采用先进致密油压裂改造技术实现经济效益开发; 通过管理体制创新, 推进致密油规模效益开发。图 5 表 4 参 54

关键词: 陆相致密油; 甜点区; 甜点段; 效益勘探开发; 中国; 北美

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Profitable exploration and development of continental tight oil in China

HU Suyun^{1,2}, ZHU Rukai^{1,2,3}, WU Songtao^{1,2,3}, BAI Bin^{1,2}, YANG Zhi^{1,2}, CUI Jingwei^{1,2,3}(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China*; 2. *National Energy Tight Oil and Gas E&P Center, Beijing 100083, China*; 3. *CNPC Key Laboratory of Oil & Gas Reservoirs, Beijing 100083, China*)

Abstract: Based on the investigation of tight oil exploration and development in North America, the successful cases of tight oil exploration and development in North America under the background of low oil price are summarized. The geological differences between continental tight oil in China and marine tight oil in North America is analyzed to explore the technical strategies for the industrial development of continental tight oil in China. The experiences of large-scale exploration and profitable development of tight oil in North America can be taken as references from the following 6 perspectives, namely exploring new profitable strata in mature exploration areas, strengthening the economic evaluation of sweet spots and focusing on the investment for high-profitability sweet spots, optimizing the producing of tight oil reserves by means of repetitive fracturing and 3D fracturing, optimizing drilling and completion technologies to reduce the cost, adopting commodity hedging to ensure the sustainable profit, and strengthening other resources exploration to improve the profit of whole project. In light of the high abundance of tight oil in China, we can draw on successful experience from North America, four suggestions are proposed in sight of the geological setting of China's lacustrine tight oil: (1) Evaluating the potential of tight oil resources and optimizing the strategic area for tight oil exploration; (2) selecting “sweet spot zone” and “sweet spot interval” accurately for precise and high efficient development; (3) adopting advanced tight oil fracturing technology to realize economic development; (4) innovating management system to promote the large-scale profitable development of tight oil.

Key words: continental tight oil; sweet-spot area; sweet-spot interval; profitable exploration and development; China; North America

引用: 胡素云, 朱如凯, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油效益勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 737-748.

HU Suyun, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Profitable exploration and development of continental tight oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 737-748.

0 引言

中国致密油资源丰富, 据美国能源信息署(EIA)预测, 中国致密油技术可采资源量达 44.8×10^8 t, 位居

世界第 3 位^[1-4]。近年来, 借鉴北美非常规油气成功经验, 中国陆相致密油勘探开发取得重要进展, 形成了“甜点”预测^[5-8]、快速钻完井^[9-11]、规模改造^[6,10]等配套技术, 在鄂尔多斯^[12-13]、松辽^[14]、三塘湖^[15]、准噶

尔^[16]、渤海湾^[17-19]等多个盆地均实现突破。其中,鄂尔多斯盆地新安边油田探明石油地质储量为 1.01×10^8 t,三级储量为 7.39×10^8 t^[20-22],初步建成年产能力 82.9×10^4 t^[12-13,20];同时,松辽盆地齐家、卫星、让子井等地区新增致密油控制+预测地质储量 1.84×10^8 t,初步建成年产 10×10^4 t产能规模^[14];三塘湖盆地二叠系条湖组控制地质储量为 2.506×10^4 t,已建成年产 10×10^4 t产能规模^[15];渤海湾盆地的华北油田束鹿、辽河油田雷家、大港油田南皮斜坡等地区水平井钻探取得重要突破,致密油资源逐渐被纳入储量评估范围^[3-4]。截至2016年底,中国陆相致密油已建成产能 155.3×10^4 t。

2014年以来,国际油价呈现断崖式下跌^[3-4,23-26]。致密油勘探开发成本高,如何实现规模效益勘探开发成为业内普遍关注的重点。美国依靠水平井与多段体体积压裂技术以及最大限度降低工程作业成本,使致密油产量实现了快速增长^[4,27-29],2000年产量为 750×10^4 t,2013年快速增加到 1.5×10^8 t,2015年、2016年产量分别为 2.24×10^8 t, 2.12×10^8 t,占美国原油总产量的51.8%和52.6%^[29]。

本文在北美致密油勘探开发现状调研基础上,总结北美致密油规模效益勘探开发的成功经验和做法,分析中国陆相致密油与北美海相致密油成藏地质条件差异,提出中国陆相致密油产业发展的技术对策。

1 北美致密油效益勘探开发的经验

致密油是指储集在覆压基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (空气渗透率小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集层中的石油,或非稠油类流度小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$ 的石油^[30]。储集层邻近富有机质生油岩,单井无自然产能或自然产能低于商业开发下限,但在一定条件和技术措施下可获得商业石油产量。

总体看,美国致密油勘探开发集中于Williston、West Gulf和Permian等近20个盆地,勘探层系包括Bakken、Eagle Ford、Wolfcamp、Niobrara、Bone Spring等^[31]。

2014—2017年,受油价持续低位徘徊的影响,美国致密油4大主力产区的钻井数量急剧下降,但通过实施大量降本增效措施,实现了致密油产量的大幅提升。据美国能源署2017年7月统计结果^[32],Bakken致密油钻井平台从2014年的200个减少至50个左右,但单平台的产量从54.8 t/d增加到102.7~109.6 t/d;Eagle Ford致密油钻井平台从2014年的250个降为75个,但单平台平均产量从68.5 t/d提高到109.6 t/d;

Permian盆地钻井平台从2014年的550个减少至200个左右,单平台平均产量从27.4 t/d提高到54.8~61.6 t/d。总结北美致密油规模效益勘探开发成功做法,可归纳为以下6个方面。

1.1 成熟探区寻找新的效益勘探层系

Williston盆地横跨美国和加拿大,面积约 34×10^4 km²。Bakken含油气系统包括上泥盆统Three Forks组和上泥盆统—下密西西比统Bakken组,是美国致密油勘探开发的重点层系之一。Bakken组从上至下可分为4段:上Bakken段、中Bakken段、下Bakken段、Pronghorn段,其中上Bakken段、下Bakken段富含有机质页岩沉积于相对高海平面时期的深水缺氧环境,是重要的烃源层系;中Bakken段和Pronghorn段岩性为砂岩、粉砂岩和白云岩,沉积于浅水潮下带和开阔海环境,是主要储集层^[33]。Williston盆地致密油勘探开发层系为中Bakken段和Three Forks组,在North Dakota地区的Sanish、Parshall和Billings Nose油田,Pronghorn段为主力产油层系,但在盆地其他地区不存在该层系或没有生产(或没有测试)。Skinner等^[34]、Rebecca L J^[35]通过对Williston盆地的整体研究,发现Pronghorn段在盆内广泛发育,最大厚度超过15 m,下Bakken段富含有机质页岩生成的烃类可以就近运移至Pronghorn段储集层中,形成规模石油聚集,储集层平均孔隙度为5%~6%,平均渗透率为 $(0.4 \sim 0.6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均含油饱和度为31%~32%。

美国Whiting石油公司立足Williston盆地,围绕Bakken层系开展精细研究与评价,发现Pronghorn段新含油层系,最初2口探井初始日产量分别为286.3 t/d和267.5 t/d。截至2015年年底,Whiting石油公司已完成钻井80余口,勘探前景良好。

1.2 加强“甜点区”经济评价、重点开发高收益“甜点区”

“甜点区”资源的经济性是石油公司关注的重点,目前北美致密油“甜点区”经济评价重点关注资源规模、储集层质量与产出能力^[4,23,31-35]。综合Shell、Marathon公司资料^[4]及中国致密油地质评价国家标准^[30],致密油“甜点区”评价采用的定性参数标准是:烃源岩总有机碳含量(TOC)大于2%,处于生油窗—凝析气窗阶段, R_o 理想值大于0.9%;有效储集层厚度大于15 m,理想值大于50 m,储地比大于70%,平均孔隙度大于8%;含油饱和度大于40%,理想值大于60%;地面原油密度小于 $0.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,气油比(GOR)大于100;储集层泊松比小于0.3,弹性模量大于 2×10^4 MPa,发育天然裂缝;现今埋深小于4 100 m,理想值

小于 3 500 m，地层发育常压—超压压力系统。

从不同地区致密油成本价格直方图统计结果看（见图 1），北美不同地区致密油经济性存在较大差异，即使是同一致密油区带，由于非均质性及其他因素的综合影响，不同地区成本价格也存在较大差异。以 Eagle Ford 致密油为例，德州 Dewitt 郡成本价格仅为 168 美元/（23 美元/bbl），而德州 Dimmit 郡的成本价格最高，达到 423 美元/（58 美元/bbl），为前者的 2.5 倍^[26,32,36]，因此，石油公司在勘探生产部署时，往往优先开发成

本价格相对较低的区带。IHS 剑桥能源研究协会统计结果表明^[28]，目前北美 4 个重点致密油区带在保证 10% 内部收益率的前提下，二叠盆地 Wolfcamp 致密油成本最低为 160 美元/t（22 美元/bbl），Eagle Ford 致密油成本最低为 182 美元/t（25 美元/bbl），Bakken 致密油和 Niobrara 致密油成本最低约 277~292 美元/t（38~40 美元/bbl），因此 IHS 预测二叠盆地在 2021 年投资将达到 400×10^8 美元，占北美陆上油气勘探投资的 35%。

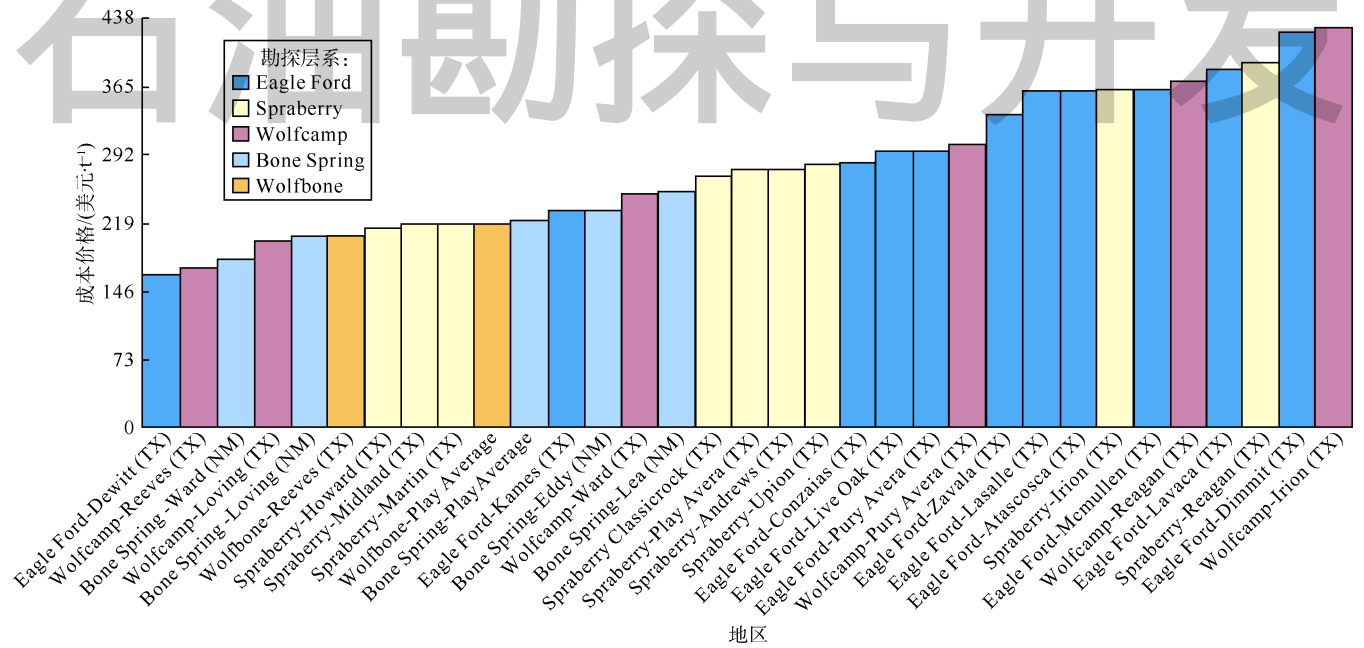


图 1 美国不同地区致密油成本价格直方图（据参考文献^[32]修改；TX——Texas，得克萨斯州；NM——North Montana，蒙大纳州北部）

1.3 采用重复压裂、立体压裂最大限度提高致密油储量动用程度

随着致密油勘探开发的不断深入，石油公司发展思路发生了转变，从以往的急于扩展矿权面积转向维持或缩小矿权面积^[36-42]。在已有矿权区内，一方面举措是重点加强对已有生产井的二次改造，重复压裂、立体压裂成为重要的技术创新。以 Eagle Ford 致密油为例，Carrizo 石油公司通过上述两项创新技术，将 Eagle Ford 致密油 110 m 的有效簇间距进一步减小至 83, 67 和 55 m，对应的致密油可采储量动用程度分别提高了 20%、45%和 80%^[37]。另一方面举措是进一步聚焦开发层系与压裂对象，以 Permian 盆地 Wolfcamp 致密油为例，2015 年之前，各大石油公司进行了全面勘探，从上覆 Spraberry 组到 Wolfcamp 组，钻井深度与压裂改造规模不断扩大，大量实践结果证实 Wolfcamp A 段与 B 段云质砂岩、泥灰岩与岩屑砂岩^[27]开发潜力较

大，因此越来越多的开发者将重心放到这一层段，多家作业者获得高产工业油流，原油初始产量普遍大于 $63 \text{ m}^3/\text{d}$ （400 bbl/d），最高可达 $254 \text{ m}^3/\text{d}$ （1 600 bbl/d）。目前针对 Wolfcamp 致密油钻井的水平段长度普遍大于 2 500 m，2017 年前 6 个月累计产量超过 $1 500 \times 10^4 \text{ t}$ ^[38]。

1.4 优化钻完井技术、降低工程作业成本

技术引领发展，降本增效已成为北美致密油产业应对低油价挑战的核心理念^[36-42]。裸眼完井技术、工厂化压裂技术、标准化开发模式等的成功应用，极大地缩短了钻完井周期、降低了成本。据统计，Oasis 石油公司 Bakken 致密油的单井总成本从 $1 060 \times 10^4$ 美元降至 740×10^4 美元，钻井周期从 24 d 降为 16 d，总的运行成本降低了 35%^[39]；大陆能源公司的 Bakken 致密油单井钻井成本降低了 30%，而对应的单井最终可采储量 2016 年比 2014 年提高了 45%^[40]；Devon 石油公

司在 Eagle Ford 致密油开发中采用错列式立体压裂技术,将钻井效率提高了 50%,并降低完井成本 25%^[41]; Carrizo 石油公司在 Eagle Ford 致密油开发中采用裸眼完井技术,将单井钻井成本与完井成本分别降低了 21%和 27%^[37],单井最短钻井周期仅为 7.79 d(井深 2 400 m,水平段长度 2 400 m);在 Niobrara 致密油开发中单井成本从 2010 年的 670×10^4 美元降至 2015 年的 300×10^4 美元左右^[37](见图 2)。

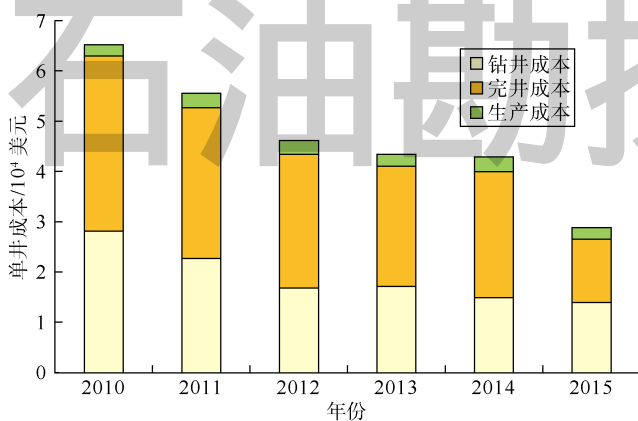


图 2 Niobrara 致密油单井成本变化趋势图^[35]

1.5 采用商品套期保值措施确保公司长期盈利

石油天然气生产企业的商品套期保值是指企业为规避商品价格波动风险,指定一项或一项以上套期工具,使套期工具的公允价值或现金流量变动,预期抵销被套期项目或部分公允价值或现金流量变动。其策略通常是买入(或卖出)与现货市场数量相当、但交易方向相反的期货合同,以期在未来某一时间通过卖出(或买入)期货合同来补偿现货市场变动带来的实际价格风险。很多独立油气公司利用其签订的衍生工具套期合约,早在 2014 年油价大跌之前的前 2~3 年就对原油和天然气价格进行了不同程度锁定,锁定卖出价格,规避价格下跌风险,弥补油价下跌带来的损失。如 Pioneer 资源公司原油的保值比例达 86%,售价区间在 584~657 美元/t(80~90 美元/bbl),油气的套期保值措施确保了该公司在油价 292 美元/t(40 美元/bbl)时还能够继续盈利;2014 年第 3 季度其商品衍生工具损益为 3.41×10^8 美元,净利润为 3.74×10^8 美元;2014 年第 4 季度,其商品衍生工具损益为 6.96×10^8 美元,净利润为 4.31×10^8 美元^[25],规避了价格下跌风险。

1.6 加强不同资源综合开发和利用,提升项目整体效益

除加强致密油地质评价和提升勘探开发技术外,加强不同资源综合开发和利用,提升致密油项目整体效益也是一个有效措施。在巴肯致密油开发过程中,

以康菲石油公司为代表^[43],各大石油公司都对与致密油伴生的天然气和重烃资源进行了回收利用,并将回收的天然气回注油井以提高采收率。这种做法有两方面益处:一方面减少了天然气排放,避免了资源浪费,并减少了致密油开发过程中注入水的用量,具有重要的环保意义;另一方面通过重烃资源回收,提高了项目经济效益。HESS 石油公司经过处理集输设施的多轮优化,目前已实现了产出液、气全收集零排放;康菲公司经过优化分离器,单井组年增效益超过 $3\ 600 \times 10^4$ 美元^[43]。

2 中国陆相致密油与北美海相致密油的差异及原因

连续分布的致密油一般发育于大型宽缓构造背景,坡度较小,分布面积较大。广覆式优质成熟烃源岩以 I、II 型烃源岩为主,TOC 值多数大于 2%,热演化成熟度 (R_o) 为 0.6%~1.3%;纳米级孔喉为主的致密砂岩或致密湖相碳酸盐岩储集层叠置分布,面积较大;源储间互或上下紧密接触;石油以一次运移或短距离二次运移为主,浮力作用受限,以非达西渗流为主,生烃增压和油水浓度差是石油运聚的主要动力。

2.1 中国陆相致密油与北美海相致密油差异

与北美 Bakken、Eagle Ford、Wolfcamp 等海相致密油相比,中国陆相致密油形成的地质背景及其构造沉积环境极为复杂,盆地类型多样,湖盆沉积体系变化快,经历多期调整改造,形成与分布独具特征(见表 1—表 3)。

① 沉积盆地。北美地区致密油主要分布于几大稳定的海相克拉通盆地,构造稳定,如 Williston 盆地、Permian 盆地、West Gulf 盆地等,面积 $(1\sim7) \times 10^4 \text{ km}^2$;中国陆相盆地致密油主要分布于 7 个陆相沉积盆地,断陷、拗陷和前陆等盆地都有分布,储集层以中新界为主,多物源分布,生油凹陷多,源储分布规模受限,面积几百至几万平方千米。

② 烃源岩特征。北美海相烃源岩厚度几十米,TOC 值一般为 2%~20%, R_o 值为 0.6%~1.7%;中国陆相烃源岩发育于淡水、半咸水至咸水环境,厚度一般为几十至几百米,TOC 值为 0.4%~16.0%, R_o 值为 0.4%~1.4%。

③ 储集层特征。北美地区致密油储集层岩性主要为碳酸盐岩、砂岩、混积岩,以碳酸盐岩为主,其次为砂岩;储集层厚度一般为几十米,孔隙度为 5%~13%,渗透率不超 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。中国陆相盆地致密储

表1 北美与中国致密油地质特征与形成条件对比

地区	沉积盆地			烃源岩特征			储集层特征		
	构造背景	沉积背景	分布范围/km ²	岩性	TOC	R _o /%	主要岩性	物性	储集层分布
美国	构造稳定	以海相沉积为主	(1~7)×10 ⁴	以海相页岩为主	2%~20%, TOC值较高	0.6~1.7, 成熟度较高	碳酸盐岩、砂岩、混积岩	物性相对较好, 孔隙度较高, 连通性较好	分布稳定, 连续性好
中国	晚期构造活动强烈	以陆相沉积为主	几百至几万平方米	湖相泥页岩	0.4%~16.0%, TOC值变化大	0.4~1.4, 成熟度较低	碳酸盐岩、致密砂岩、混积岩、沉凝灰岩	物性较差, 孔隙度偏低, 非均质性较强, 油层薄	非均质性强

地区	储集层特征		流体特征				经济性	
	集中段厚度/m	孔隙度/%	地层压力	压力系数	原油密度/(g·cm ⁻³)	GOR	单井累产/10 ⁴ t	埋深及储量丰度
美国	5~20	5~13	以超压为主	1.35~1.78	0.75~0.85	几十	2~10	埋深适中, 储量丰度较高
中国	10~80	3~12	压力系数偏低	0.70~1.80	0.75~0.92	几百至几千	1~4	埋深差异大, 储量丰度变化大

表2 国外典型致密油盆地致密油形成条件参数统计

盆地与层系	构造背景	沉积环境	盆地面积/10 ⁴ km ²	有利面积/10 ⁴ km ²	地层时代	岩性	烃源岩厚度/m	埋藏深度/m
美国、加拿大 Williston 盆地 Bakken 组	大陆穹隆—克拉通	滨浅海相	52.00	7.0	上泥盆统—下石炭统	上下段页岩为主, 中段为云质砂岩及白云岩	2~18	2 100~3 300
美国 West Gulf 盆地 Eagle Ford 组	克拉通	碳酸盐台地相	25.00	2.0	上白垩统	上、下两段泥灰岩、页岩	20~60	1 000~3 400
美国 Permian 盆地 Wolfcamp 组	克拉通	碳酸盐台地相	22.36		上二叠统	上段灰岩, 下段页岩	20~150	2 250~3 300
加拿大 Alberta 盆地 Duvernay 组	大陆边缘	海相	13.00	2.4	上泥盆统	硅质页岩和灰岩	35~60	2 800~3 600
阿根廷 Neuquen 盆地 Vaca Muerta 组	弧后裂谷盆地	海相	14.00	1.5	上侏罗统—下白垩统	泥灰岩和碎屑岩	45~150	1 380~1 950

盆地与层系	矿物组成	TOC/%	R _o /%	有机质类型	孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm ²	原油密度/(g·cm ⁻³)	含油饱和度/%	GOR	压力梯度/(MPa·km ⁻¹)
美国、加拿大 Williston 盆地 Bakken 组	石英与碳酸盐含量大于 90%	5.00~20.00	0.6~1.0	II	5.0~12.0	0.5~10.0	0.79~0.82	68	50~375	11.30~15.82
美国 West Gulf 盆地 Eagle Ford 组	黏土含量 8%~20%	0.70~9.20	0.7~1.7	II	6.0~14.0	0.4~13.0	0.79	55~85	90~850	14.70
美国 Permian 盆地 Wolfcamp 组	黏土含量 10%	2.24~7.24	0.6~1.5	I—II	8.0~12.0	0.4~10.0	0.78	65~80	356	15.82
加拿大 Alberta 盆地 Duvernay 组	黏土含量 26%, 石英与碳酸盐含量为 67%	2.00~7.50	0.5~2.0	II	6.0~7.5	0.2~8.0	0.78	70	150~650	15.80~20.30
阿根廷 Neuquen 盆地 Vaca Muerta 组	黏土含量 15%~20%, 石英与碳酸盐含量 70%~90%	3.00~5.00	0.7~1.3	I—II	4.0~14.0	0.5~2.0	0.80~0.83	55~85	89~1 068	15.80~22.60

集层类型多样, 有碳酸盐岩、砂岩、沉凝灰岩和混积岩 4 大类 (见表 4), 以砂岩为主; 岩性复杂, 沉积环境、成岩作用和构造改造程度差异大, 导致储集层横向变化大, 非均质性强, 厚度几十至上百米; 其中致密砂岩有条带状砂体和薄层席状砂体, 单砂体薄; 致密碳酸盐岩厚度相对较大, 孔隙度为 3%~12%, 渗透率不超 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从脆性矿物 (硅质、碳酸盐等) 含量对比看, 中美海陆相致密储集层差异不大 (见表 3), 但可压性有一定差异, 海相碎屑岩由于搬运距离较远, 经过反复的分选、淘洗, 石英含量相对较高, 可压性较好; 而陆相盆地碎屑岩距离物源区近, 长石、岩屑含量相对较高, 可压性较海相砂岩差。

④流体特征。北美致密油多为凝析油, 油质较轻, 原油密度为 $0.75 \sim 0.85 \text{ g/cm}^3$, 压力系数为 $1.35 \sim 1.78$, 以超压为主; 中国陆相盆地经历了较强烈的晚期构造

运动, 对保存条件有一定影响, 压力系数变化大, 压力系数为 $0.7 \sim 1.8$, 既有超压, 也有低压, 地层能量、原油品质变化大, 原油密度为 $0.75 \sim 0.92 \text{ g/cm}^3$ 。

⑤经济性。北美地区海相地层埋深普遍小于 $3 700 \text{ m}$, 储量丰度大于 $50 \times 10^4 \text{ t/km}^2$; 中国陆相致密油埋藏深度偏大, 埋深为 $1 000 \sim 4 500 \text{ m}$, 经济性与可动用规模较差, 埋深差异大, 储量丰度为 $(5 \sim 72) \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。

2.2 中国陆相致密油与北美海相致密油差异的主要原因

区域地质背景差异是导致中国陆相致密油与北美海相致密油成藏差异的根本原因, 其核心要素包括两个方面: 稳定的构造背景与连续沉积条件、烃源岩热演化程度。

2.2.1 构造稳定性与致密油规模分布的地质基础

邹才能等^[4]总结了大面积连续分布致密油形成应具备 6 个条件, 其中大型宽缓构造背景, 大面积持续

表 3 中国陆相致密油主要特征参数表

盆地 层系	烃源性			储集性			流动性				资源规模			经济性			
	TOC 值/ %	R _o /%	厚度/ m	岩性	厚度/ m	孔隙 度/%	脆性 矿物 含量/%	原油 密度/ (g·cm ⁻³)	原油 黏度/ (mPa·s)	GOR	含油饱 和度/%	压力 系数	单井 累产/ 10 ⁴ t	储量 丰度/ (10 ⁴ t·km ⁻²)	资源 量/ 10 ⁸ t	埋深/ m	地表 条件
鄂尔多斯 盆地延长 组 7 段	3.0~ 16.0	0.7~ 1.2	10~ 100	粉细砂岩	10~ 40	7~13	>80	0.80~ 0.86	5~10	95~ 125	60~80	0.70~ 0.80	2~4	43~72	35~ 40	1 000~ 2 600	黄土塬
松辽盆地 白垩系	0.9~3.8	0.5~ 1.3	80~ 450	粉细砂岩	5~30	2~15	>50	0.78~ 0.87	12~ 20	10~ 30	50	1.20~ 1.58	2~4	9~20	20~ 30	1 600~ 2 500	平原、 沼泽
准噶尔盆地 二叠系	4.0~ 16.0	0.6~ 1.1	10~ 35	云质粉 砂岩、泥质 白云岩	20~ 50	6~20	>80	0.88~ 0.92	55~ 370		80~90	1.10~ 1.30	1~4	5~60	15~ 20	2 300~ 4 500	戈壁、 草地
四川盆地 侏罗系	1.0~2.4	0.5~ 1.4	100~ 150	粉细砂岩、 介壳灰岩	10~ 60	0.2~ 7.0	>60	0.76~ 0.87			40~50	1.23~ 1.72	1~3		10~ 12	1 400~ 3 200	丘陵
渤海湾盆地 沙河街组、 孔店组	1.5~3.5	0.5~ 1.3	100~ 300	粉细砂岩、 碳酸盐岩	100~ 200	5~10	>50	0.67~ 0.86	8~22		50	1.24~ 1.80	1~4		20~ 25	1 800~ 4 300	平原
柴达木盆地 第三系	0.4~1.2	0.7~ 0.8	200~ 1 200	泥灰岩、 藻灰岩、 粉砂岩	100~ 150	5~8	>70	0.85~ 0.88			60	1.30~ 1.40	2~3		3~5	2 500~ 4 000	山地
三塘湖盆地 二叠系	1.0~6.0	0.6~ 1.1	30~ 60	灰质 白云岩、 沉凝灰岩	10~ 100	3~13	>80	0.85~ 0.90			40~50	1.00~ 1.20	2~3		0.9~ 1.2	1 800~ 4 000	戈壁

表 4 中国 4 类致密储集层、6 种致密油聚集类型特征

储集层类型	聚集类型	储集层特征	实例
砂岩	厚层砂岩孔隙型	储集层厚，含油饱和度高，原油性质好，低压	鄂尔多斯盆地延长组等
	薄层砂岩孔隙型	储集层薄，偏强水敏，含油饱和度低，普遍含水	松辽盆地扶余油层，柴达木盆地新近系，渤海湾盆地大港南皮古近系
混积岩	厚层含云质砂岩型	储集层较厚，水平应力差异小，油质较稠	准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组等
沉凝灰岩	凝灰岩孔隙型	单层薄，孔隙度高，压力敏感性较强，原油性质较差	三塘湖盆地条湖组
碳酸盐岩	薄层云岩孔隙型	单层薄、黏土含量高，含水饱和度较高，油质较差	渤海湾盆地沙一段、沙四段，柴达木盆地古近系白云岩
	泥灰岩型、灰岩裂缝型	厚度变化大，裂缝发育，含水饱和度高	华北油田束鹿凹陷泥灰岩、四川盆地侏罗系大安寨段

沉降沉积环境是主要控制因素之一。稳定宽缓的大型构造背景下，原始沉积时构造平缓，有利于优质烃源岩、致密储集层的大面积展布，区域封堵条件更为优越，导致处于同一构造背景的致密油资源大面积展布。这也是北美海相致密油与中国陆相致密油形成特征差异的首要原因。以全球非常规油勘探开发的热点地区——Williston 盆地上泥盆统—下石炭系 Bakken 组致密油为例，其形成于面积超过 34×10⁴ km² 的大型克拉通沉积盆地，横跨美国、加拿大，分布于 North Dakota 州、Montana 州、South Dakota 州以及加拿大中南部 Manitoba 州和 Saskatchewan 州^[33-35]。晚泥盆世到密西西比纪（早石炭世）时期，Williston 盆地位于北美大陆西部边缘的广阔大陆架沉降活跃地区（见图 3），盆地为半圆形，发育 3 个明显的背斜构造：Nesson 背斜、Billings 背斜和 Cedar Greek 背斜，具有继承性发育特征，保证了古生界沉积的稳定分布^[44-45]，沉积相变慢，烃源岩与储集层大面积稳定发育是关键。其中，上 Bakken 段、下 Bakken 段发育两套页岩，具有

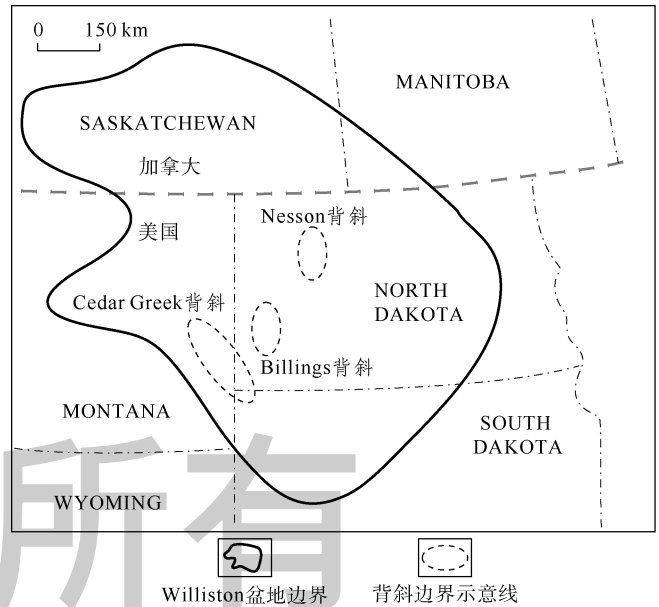


图 3 Williston 盆地位置图 (据参考文献[44]修改)

全盆地展布特征。以下 Bakken 段页岩为例，其厚度在全盆范围内普遍为 5~12 m；Bakken 组的主力储集层

段为形成于滨浅海环境的致密白云质粉砂岩，厚度为10~15 m，累计厚度超过55 m，展布面积超过7×10⁴ km²；大范围分布的致密储集层与生油岩紧密接触的共生层系，保证了连续型分布的 Bakken 致密油区的形成^[47-48]。Permian 盆地 Wolfcamp 致密油、West Gulf 盆地 Eagle Ford 致密油均表现出与 Bakken 致密油类似的特征，大型克拉通盆地稳定发育的背景为海相致密油烃源岩与储集层的规模发育奠定了良好的基础。

与海相致密油相比，中国陆相致密油形成背景更为复杂。以目前勘探开发效果最好的鄂尔多斯盆地延长组长7段致密油为例，其形成于一个由古生代地台及台缘拗陷与中生代台内拗陷叠合而成的大型克拉通盆地，总面积约25×10⁴ km²，盆地内部构造相对简单，地层平缓且发育齐全，倾角小于1°，未发生强烈的变形。盆地自中生代以来，长期稳定发展，后期构造变动微弱，在中晚三叠世延长组沉积阶段，鄂尔多斯盆地经历了湖盆形成、发展、全盛、衰退至消亡的全过程，其中长7段沉积期为湖盆发育鼎盛期，分布范围广，在盆地的覆盖面积超过10×10⁴ km²，岩性为一套有机质丰富的深灰色油页岩、暗色泥岩夹薄层粉细砂岩，平面上延长组油气主要分布在陕北斜坡中南部，约占80%以上的储产量^[49-51]。但是，陆相沉积背景导致了频繁的砂泥互层及较快的沉积相变，单砂体横向

稳定性较差，纵向厚度较小，如鄂尔多斯盆地长7段单砂体厚度一般3~15 m，累计厚度一般为10~30 m，横向展布有限；松辽盆地扶杨油层呈现出薄互层沉积特征，单砂体厚度仅为3~5 m，横向连续性差；准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组为混积岩沉积，有利储集层云质砂岩单层厚度2~10 m，横向展布范围小；同时，较小的湖盆面积导致沉积水体环境与陆源碎屑供给的差异性进而导致纵向上致密油储集层性质变化快，非均质性强。在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积期，水体盐度整体偏大，伴随湖盆演化与物源体系的变化，水体温度、深度与盐度频繁变化，导致碳酸盐矿物、硅酸盐矿物及黏土矿物含量急剧变化（见图4），导致储集层性质的快速变化，最高孔隙度达20%，但在相距不足20 cm范围内孔隙度骤减为4%。在鄂尔多斯盆地长7段沉积期，尽管水体盐度稍低于芦草沟组沉积期，但由于原始物质组成及成岩作用的差异，同样导致矿物在纵向上变化较快，石英含量最高达58%，最低仅15%左右，碳酸盐矿物含量最高达45%，但最低仅2%（见图4），由此造成了纵向上强烈的非均质性。

2.2.2 烃源岩热演化程度差异导致致密油规模与流动性差异

中国陆相致密油烃源岩与北美海相致密油烃源岩地球化学特征相似（见图5），但是北美海相烃源岩热

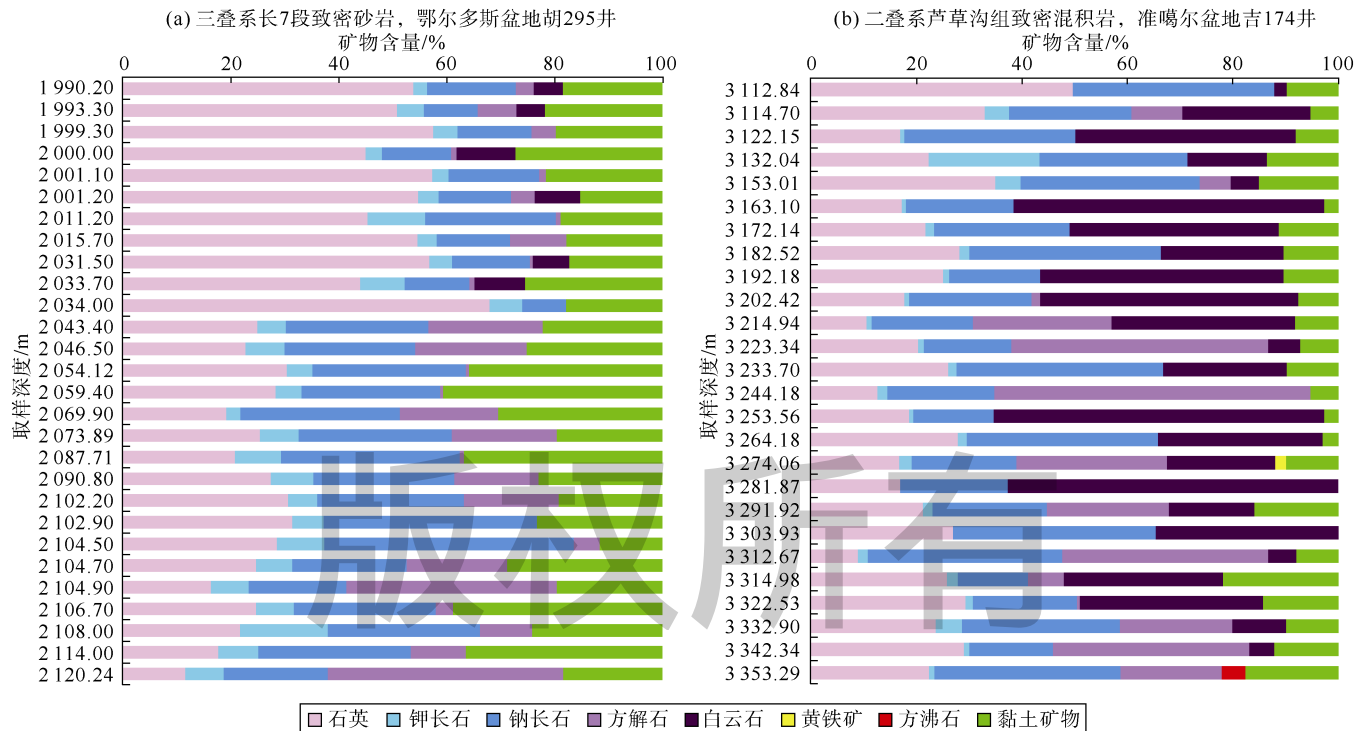


图4 陆相致密油储集层X射线衍射全岩矿物组成

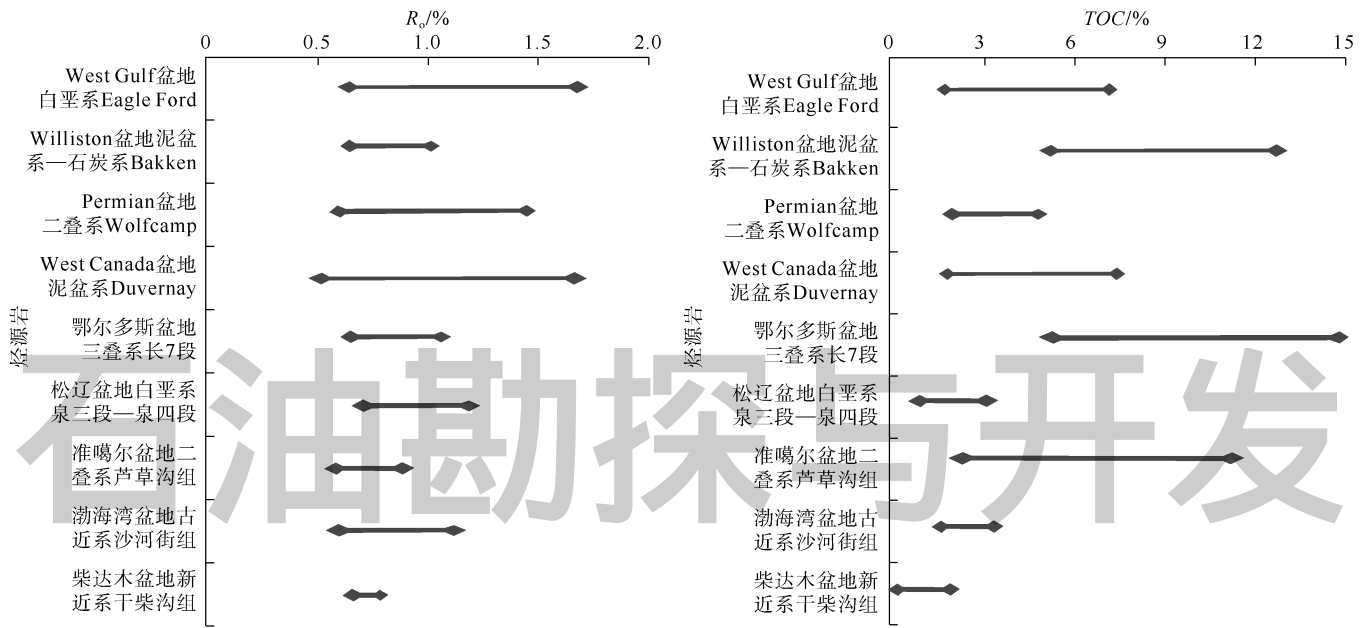


图5 北美海相与中国陆相致密油烃源岩 R_o 、TOC 参数对比图

演化程度普遍较高,决定了北美海相致密油层异常高压、气油比高、油质较轻、流动性较好,脆性与可压裂性也得到提升,这也是北美致密油经济性好的根本原因。如 Eagle Ford 泥灰岩分布面积约 $4.45 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于得克萨斯州南部和部分中部地区,地层厚度从东北部的 15.2 m 到西南部超过 91.4 m,储集层由泥灰岩组成,埋深在 609.6~4 572.0 m, Eagle Ford 地层向南倾斜,经历了油窗口、油和过渡窗口和气窗口,在浅埋藏深度,主要产黑油;在较大埋藏深度,由于高温高压作用,主要产天然气^[46]。致密油层 1 306 口高产井生产数据显示,当 R_o 值大于 0.9% 时,致密油高产的概率从 9%~20% 显著提高到 42% 以上,气油比普遍大于 800,原油密度主体小于 0.788 g/cm^3 。

中国陆相致密油烃源岩热演化程度偏低,鄂尔多斯盆地长 7 段烃源岩的 R_o 值主要为 0.8%~1.2% (46 口井),热解峰温主要分布于 440~460 $^{\circ}\text{C}$ ^[51-52];准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩 R_o 值为 0.52%~1.03%,热解峰温为 440~455 $^{\circ}\text{C}$,其中 R_o 值小于 0.80% 的样品占 53%, R_o 值大于 0.80% 的样品占 47%,整体处于低成熟—成熟演化阶段^[53-54],这种情况一方面导致陆相致密油气油比偏低,石油的密度与黏度偏高,地层能量不足,致密油可流动性较差;另一方面导致陆相致密油储集层矿物热稳定性偏差,塑性矿物含量偏高,影响了储集层的可压裂性。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油油质偏重,地面原油密度

$0.888 \sim 0.918 \text{ g/cm}^3$, 50 $^{\circ}\text{C}$ 下黏度为 73~300 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,平均含蜡量为 9.04%,平均凝固点为 13.49 $^{\circ}\text{C}$,属于中—重质原油,决定了芦草沟组致密油流动性较差^[53-54];鄂尔多斯盆地长 6 段地层原油密度 $0.718 \sim 0.786 \text{ g/cm}^3$,黏度 0.92~1.14 $\text{mPa} \cdot \text{s}$;长 7 段地层原油密度 $0.717 \sim 0.760 \text{ g/cm}^3$,黏度 0.89~1.21 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,尽管呈现出低密度、低黏度的轻质原油特征^[13],但地层能量不足,压力系数主体为 0.7~1.0,黏土矿物中伊蒙混层、蒙脱石比例偏高,影响了储集层改造中人造裂缝的形成与展布,造成产量快速递减。然而,需要注意的是,钻井过程中长 7 段页岩普遍显示高气测异常,现场浸水试验可见断续状气泡冒出,显示出一定的含气性,密闭岩心解吸气试验结果显示对整块岩心一次解吸后页岩平均含气量为 1.2~1.5 m^3/t ,较高的含气量可以增加页岩层系的气油比,在一定程度上提高了长 7 段致密油的流动性与可采性^[52]。

因此,与北美典型致密油区带相比,由于构造背景、连续沉积条件及烃源岩热演化程度等差异,中国陆相致密油地质特征更为复杂,尽管发育优质烃源岩,但储集层分布的稳定性与连续性较差,流体可流动性也较差,资源整体的规模性与效益性也不如北美海相致密油资源,实现效益勘探开发的难度更大。

3 中国陆相致密油效益勘探开发建议

对比北美致密油勘探开发的成功经验,针对中国陆相致密油效益勘探开发,提出 4 方面建议。

3.1 评价致密油资源潜力、优选致密油勘探战略选区

高效、准确的资源潜力评价是非常规资源成功勘探开发的关键。中国陆相致密油资源较丰富，但致密油富集程度差异大，应开展致密油资源分级评价，客观评价致密油资源潜力与资源富集程度，为“甜点区”优选提供评价依据。在近期完成的中国石油第4次资源评价中，参考了北美重点区带致密油勘探现状，结合中国陆相致密油实际地质条件，采用了3级资源评价方案，其中，I类资源储集层孔隙度大于8%，渗透率大于 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，喉道主体半径大于200 nm，可动流体饱和度大于50%，产量较高，是近期勘探重点；II类资源储集层孔隙度为5%~8%，渗透率为 $(0.03 \sim 0.08) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，喉道主体半径为100~200 nm，可动流体饱和度为20%~50%，产量较低，经济性偏差，需要技术进步才有勘探开发潜力；III类资源储集层孔隙度小于5%，渗透率小于 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，喉道主体半径小于100 nm，可动流体饱和度小于20%，产量低，近、中期不具勘探开发价值（远景区）。

3.2 选准“甜点区”、“甜点段”，实现精准高效开发

致密油具有源区控油、近源富集、“甜点区”高产的特点，北美致密油规模效益开发实践证明，高收益“甜点区”是致密油勘探、开发的优选目标，是决定致密油勘探开发成效的关键。应重视4方面研究：①烃源灶供烃充足性与有效性是致密油规模形成基础，烃源岩品质控制“甜点区”平面分布范围，陆相烃源岩非均质性强，TOC分布在纵向上具有多旋回性，平面上具迁移性，应加强富含有机质页岩沉积环境与有机质富集机理的研究，明确高TOC分布段与分布区；高度重视热演化程度对致密油富集高产的重要控制作用研究，通过岩心、岩屑的地球化学分析确定有机质类型、丰度和成熟度等参数，预测烃类生成和流体性质。②储集空间与可动流体是形成致密油“甜点区”的保障，致密储集层非均质性强，类型多，需要发展复杂储集层多参数数字岩石评价技术，通过各种先进的实验分析技术研究微纳米孔喉系统的连通性，研发储集层结构有效表征技术和脆性矿物评价技术，评价致密储集层非均质性，明确不同类型致密储集层孔喉结构、储集能力与产能特性，并根据测量数据建立地质模型。③微构造背景和天然裂缝对致密油富集高产有重要影响，“甜点区”多发育在宽缓背景下的局部微构造区，应开展有利区微构造形态与发育演化规律研究；利用CT原位成像技术，对致密储集层样品逐渐加压，观察裂缝随压力变化的生长规律，明确裂缝发育机制与主

控因素，建立裂缝动态生长三维模型，直观展示致密储集层裂缝生长特征，评价预测裂缝发育层段。④“甜点区”经济评价是致密油勘探开发成效的关键，应加强“甜点区”形成主控因素、富集高产规律与经济性评价研究，选好高收益区；“甜点段”是水平井设计、精确压裂改造、效益开发的根本，应加强“甜点段”形成条件与分布规律的研究，选准“甜点段”。

3.3 采用先进致密油压裂改造技术实现经济效益开发

北美致密油勘探实践证明，致密油开发最大难题是如何提高单井产量，提高采收率。中国陆相致密油规模偏小，单井产量普遍较低，如鄂尔多斯盆地长7段致密油储集层非均质性强，类型多，平面上岩性变化快，制约水平井部署，单砂层厚度薄，砂体横向连续性差，分布不稳定，砂体钻遇率低；I类井盈亏平衡点为365美元/t（50美元/bbl），而北美致密油“甜点区”开采成本为146~365美元/t（20~50美元/bbl），平均成本241美元/t（33美元/bbl）。建议开展以下2方面技术攻关：①创新发展致密油体积压裂改造技术，降低工程作业成本；②优化水平井井距、水平段长度及压裂簇数，使井网覆盖区域最大化，作业流程最优化，控制钻完井等综合成本，最大限度提高致密油储量动用程度。由于中国地质条件存在差异，不同地区致密油钻完井工艺具有差异。在钻井方面，长庆油田根据长7段致密油地质特征，在不使用旋转导向系统的情况下，通过研制球形扶正器、大扭矩螺杆，调整短钻链长度，提高增斜效率，平均钻井周期与常规水平井相当；大庆油田根据扶杨油层河道砂体规模小、厚度薄、单井控制储量小等特征，采用工厂化施工，经过优化井深结构与井眼剖面，大幅度缩短钻井周期。在压裂方面，不同地区工艺的差异主要表现在完井方式上，其中新疆油田芦草沟组主要采用了裸眼封隔器分压方式，长庆油田主要采用水力喷砂技术，吉林油田采用套管可开关滑套分段压裂方式，吐哈盆地二叠系条湖组对比了固井滑套、快钻桥塞、裸眼封隔器等3种完井方式，证实快钻桥塞方式压后效果最好。因此根据研究区地质特征研发适用性钻完井技术是提高致密油勘探开发效益的必由之路。

3.4 通过管理体制创新，推进致密油规模效益开发

市场化是美国实现致密油气重大突破的关键。美国是市场化程度非常高的国家，开放、竞争的市场环境对致密油开发起到了关键作用。建议借鉴国外公司先进的管理经验及国内如苏里格气田“5+1”合作开发模式，通过引入外部市场竞争体制，设立国家级致密

油开发示范区,在全国范围内推广成功的致密油勘探开发与管理经验,解决关键技术难题,进一步降低成本,实现规模效益开发。

4 结论

石油与天然气等化石能源具有丰富的资源基础,在未来很长一段时间仍将是全球主导能源,中国陆相致密油资源丰富,发展潜力巨大。北美主要致密油勘探开发公司通过加强成熟探区精细勘探和挖潜开发,加强“甜点区”经济评价、重点开发高收益“甜点区”,创新压裂技术,通过重复压裂、立体压裂最大限度地提高致密油储量动用程度,优化钻完井技术,缩短周期,降低工程作业成本等多项措施,确保长期稳定盈利,促进了北美致密油产量快速增长。中国各陆相致密油区尽管不同程度地存在地质上的“短板”,但通过强化基础研究,选准“甜点区”和“甜点段”,创新发展针对性方法技术,并通过体制机制与管理创新,降低工程作业成本,一定能实现致密油的规模效益开发,成为中国油气勘探开发的重要接替领域。

参考文献:

- [1] US Energy Information Administration(EIA). Technically recoverable shale oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United states[EB/OL]. (2013-06-01)[2017-12-01]. <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/overview.pdf>.
- [2] DYNI R J. Geology and resources of some world oil-shale deposits: Scientific investigations report 2005-5294[EB/OL]. (2006-06-01)[2017-12-01]. https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5294/pdf/sir5294_508.pdf.
- [3] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [4] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [5] 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(2): 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(2): 343-350.
- [6] 童晓光. 非常规油的成因和分布[J]. 石油学报, 2012, 33(S1): 20-26.
TONG Xiaoguang. Origin and distribution of unconventional hydrocarbon[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 20-26.
- [7] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics, and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [8] 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.
- [9] 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[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[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [10] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术: 兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399, 454.
ZOU Caineng, ZHANG Guosheng, YANG Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399, 454.
- [11] 张林晔, 李钜源, 李政, 等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-711.
ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 700-711.
- [12] 杨华, 李士祥, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2012, 34(1): 1-11.
YANG Hua, LI Shixiang, LIU Xianyang, et al. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 34(1): 1-11.
- [13] 周正龙, 王贵文, 冉冶, 等. 致密油储集层岩性岩相测井识别方法: 以鄂尔多斯盆地合水地区三叠系延长组 7 段为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 61-68, 83.
ZHOU Zhenglong, WANG Guiwen, RAN Ye, et al. A logging identification method of tight oil reservoir lithology and lithofacies: A case from Chang7 Member of Trassic Yanchang Formation in Heshui area, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 61-68, 83.
- [14] 孙雨, 邓明, 马世忠, 等. 松辽盆地大安地区扶余油层致密砂岩油分布特征及控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 589-597.
SUN Yu, DENG Ming, MA Shizhong, et al. Distribution and controlling factors of tight sandstone oil in Fuyu oil layers of Da'an area, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 589-597.
- [15] 梁浩, 李新宁, 马强, 等. 三塘湖盆地条湖组致密油地质特征及勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 563-572.
LIANG Hao, LI Xinning, MA Qiang, et al. Geological features and

- exploration potential of Permian Tiaohu Formation tight oil, Santanghu Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(5): 563-572.
- [16] 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.
- [17] 杨智, 侯连华, 陶士振, 等. 致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 555-565.
YANG Zhi, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Formation and “sweet area” evaluation of liquid-rich hydrocarbons in shale strata[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 555-565.
- [18] 周庆凡, 杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(4): 541-544, 570.
ZHOU Qingfan, YANG Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(4): 541-544, 570.
- [19] 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.
- [20] 付金华, 喻建, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地致密油勘探开发新进展及规模富集可开发主控因素[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(5): 9-19.
FU Jinhua, YU Jian, XU Liming, et al. New advances on tight oil exploration and development and key factors of tight oil enrichment in the Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(5): 9-19.
- [21] 朱如凯, 吴松涛, 苏玲, 等. 中国致密储层孔隙结构表征需注意的问题及未来发展方向[J]. *石油学报*, 2016, 37(11): 1323-1336.
ZHU Rukai, WU Songtao, SU Ling, et al. Problems and future works of porous texture characterization of tight reservoirs in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(11): 1323-1336.
- [22] WU Songtao, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Characteristics and origin of tight oil accumulations in the Upper Triassic Yanchang Formation of the Ordos Basin, North-Central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(5): 1804-1817.
- [23] 耶金·丹尼尔. 能源重塑世界[M]//朱玉萍, 阎志敏, 译. 北京: 石油工业出版社, 2012.
YERGIN D. The quest energy, security, and the remaining of the modern word[M]//ZHU Yuben, YAN Zhimin, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [24] 赵文智, 胡素云, 李建忠, 等. 我国陆上油气勘探领域变化与启示[J]. *中国石油勘探*, 2013, 18(4): 1-10.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, LI Jianzhong, et al. Changes and enlightenment of onshore oil/gas exploration domain in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2013, 18(4): 1-10.
- [25] 康康. 低油价对美国非常规油气公司的影响及启示[J]. *国际石油经济*, 2015, 25(10): 11-17.
KANG Kang. Impact of low oil price on the unconventional oil and gas companies in the United States[J]. *International Petroleum Economics*, 2015, 25(10): 11-17.
- [26] 张焕芝, 何艳青, 邱茂鑫, 等. 低油价对致密油开发的影响及其应对措施[J]. *石油科技论坛*, 2015, 34(3): 68-71.
ZHANG Huanzhi, HE Yanqing, QIU Maoxin, et al. Impact of low oil price on tight oil development[J]. *Oil Form*, 2015, 34(3): 68-71.
- [27] ZHANG Hualiang, JANSON Xavier, LIU Li, et al. Lithofacies, diagenesis, and reservoir quality evaluation of Wolfcamp unconventional succession in the Midland Basin, West Texas[R]. Houston, Texas: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2017.
- [28] OLMSTEAD R, KUGLER I. Halftime in the Permian: An IHS energy discussion[EB/OL]. (2017-06-01)[2018-01-01]. <https://cdn.ihs.com/www/pdf/Halftime-in-the-Permian.pdf>.
- [29] US Energy Information Administration(EIA). Annual energy outlook 2017 with projection to 2050[EB/OL]. (2017-01-05)[2017-12-01]. [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2017).pdf).
- [30] 国家质检总局. 致密油地质评价方法: GB/T 34906—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision. Tight oil geological evaluation method: GB/T 34906—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [31] US Energy Information Administration(EIA). Outlook for shale gas and tight oil development in the US[EB/OL]. (2013-05-21)[2017-12-01]. https://www.eia.gov/pressroom/presentations/sieminski_05212013.pdf.
- [32] US Energy Information Administration(EIA). Drilling productivity report for key tight oil and shale regions[EB/OL]. (2018-03-01)[2018-03-01]. <https://www.eia.gov/petroleum/drilling/pdf/dpr-full.pdf>.
- [33] US 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]. (2013-04-01) [2017-12-01]. <https://pubs.usgs.gov/fs/2013/3013/fs2013-3013.pdf>.
- [34] SKINNER O, CANTER L, SONNENFELD D M, et al. Discovery of “Pronghorn” and “Lewis and Clark” fields: Sweet-spots within the Bakken petroleum system producing from the Sanish/Pronghorn Member NOT the Middle Bakken or Three Forks[EB/OL]. (2015-04-01) [2017-12-01]. http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2014/90187cspg/abstracts/ndx_skinn.pdf.html.
- [35] REBECCA L J. The Pronghorn Member of the Bakken Formation, Williston Basin, USA: Lithology, stratigraphy, reservoir properties [EB/OL]. (2013-05-01) [2017-12-01]. http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2013/50808johnson/ndx_johnson.pdf.html.
- [36] 汪天凯, 何文渊, 袁余洋, 等. 美国页岩油低油价下效益开发新进展及启示[J]. *石油科技论坛*, 2017, 36(2): 60-68.
WANG Tiankai, HE Wenyuan, YUAN Yuyang, et al. Latest development in US cost-effective development of shale oil under background of low oil prices[J]. *Oil Forum*, 2017, 36(2): 60-68.
- [37] Carrizo Oil & Gas Inc. Presentation on JEFFERIES 2015 energy conference[EB/OL]. (2015-06-01)[2017-12-01]. https://s22.q4cdn.com/193387661/files/doc_presentations/11-12-15_Jefferies_conference.pdf.
- [38] FAIRHURST B, REID F, PIERACACOS N. Exploration insight and

- input that changed organizational focus, strategies and economic outcomes: Several resource play examples[EB/OL]. (2015-06-01) [2017-12-01]. http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/abstracts/pdf/2015/90227gtw/abstracts/ndx_fair.pdf.html.
- [39] Oasis Petroleum Inc. Oasis investor presentation[EB/OL]. (2017-08-03)[2017-12-01]. <http://oasispetroleum.investorroom.com/events?item=79>.
- [40] Continental Resource Inc. Continental resources reports second quarter 2017 results and updates full-year guidance[EB/OL]. (2017-08-08) [2017-12-01]. <http://jhpenergy.com/wp-content/uploads/2017/08/CLR.pdf>.
- [41] Devon Energy Inc. Devon energy reports second-quarter 2017 results [EB/OL]. (2017-08-01) [2018-12-01]. <https://www.oglinks.news/article/3fbb49/devon-energy-reports-2017-results>.
- [42] Encana Corporation. Q2 2017 results conference call[EB/OL]. (2017-05-21) [2017-12-01]. <https://www.encana.com/news-stories/news-releases/index.html?2017>.
- [43] ConocoPhillips. 2017 sustainability report[EB/OL]. (2018-02-27) [2018-04-01]. <http://static.conocophillips.com/files/resources/17sr.htm#1>.
- [44] SONNENBERG A S, PRAMUDITO A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1127-1153.
- [45] SONNENBERG A S. The giant continuous oil accumulation in the Bakken petroleum system, Williston Basin[EB/OL]. (2015-03-27)[2017-12-01]. <http://wbpc.ca/pub/documents/archived-talks/2015/Abstracts/Sonnenberg.pdf>.
- [46] SLATT R M, O'Brien N R, ROMERO A M, et al. Eagle Ford condensed section and its oil and gas storage and flow potential [EB/OL]. (2012-05-27) [2017-12-01]. http://www.searchanddiscovery.com/documents/2012/80245slatt/ndx_slatt.pdf.
- [47] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-30.
LIN Senhu, ZOU Caineng, YUAN Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30.
- [48] 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 .
- [49] 张妮妮, 刘洛夫, 苏天喜, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段与威利斯顿盆地 Bakken 组致密油形成条件的对比及其意义[J]. 现代地
质, 2013, 27(5): 1120-1130.
ZHANG Nini, LIU Luofu, SU Tianxi, et al. Comparison of Chang 7 Member of Yanchang Formation in Ordos Basin with Bakken Formation in Williston Basin and its significance[J]. Geoscience, 2013, 27(5): 1120-1130.
- [50] 白玉彬, 赵靖舟, 赵子龙, 等. 鄂尔多斯盆地志丹地区延长组长7致密油成藏条件与成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 631-640.
BAI Yubin, ZHAO Jingzhou, ZHAO Zilong, et al. Accumulation conditions and characteristics of the Chang 7 tight oil reservoir of the the Yanchang Formation in Zhidan area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 631-640.
- [51] 杨华, 牛小兵, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 511-520.
YANG Hua, NIU Xiaobing, XU Liming, et al. Exploration potential of shale oil in Chang7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 511-520.
- [52] 张文正, 杨华, 杨伟伟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7湖相页岩油地质特征评价[J]. 地球化学, 2015, 44(5): 505-515.
ZHANG Wenzheng, YANG Hua, YANG Weiwei, et al. Assessment of geological characteristics of lacustrine shale oil reservoir in Chang 7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Geochimica, 2015, 44(5): 505-515.
- [53] 彭永灿, 李映艳, 马辉树, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油藏原油性质影响因素[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 656-659.
PENG Yongcan, LI Yingyan, MA Huishu, et al. Influencing factors of crude oil properties in Lucaogou tight reservoir in Jimsar Sag, Eastern Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6): 656-659.
- [54] 王屿涛, 杨作明, 马万云, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油地球化学特征及成因[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(4): 379-384.
WANG Yutao, YANG Zuoming, MA Wanyun, et al. Geochemical characteristics and genesis of tight oil in Lucaogou Formation of Jimsar Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(4): 379-384.

第一作者简介: 胡素云 (1963-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事石油地质综合研究与非常规油气方面研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院院办, 邮政编码: 100083。E-mail: husy@petrochina.com.cn

收稿日期: 2017-12-01 修回日期: 2018-06-04

(编辑 黄昌武 王大锐)

版权所有