

文章编号: 0253-2697(2015)02-0127-11 DOI:10.7623/syxb201502001

国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义

张君峰¹ 毕海滨² 许浩³ 赵俊龙³ 喻廷旭³ 赵达³ 耿昀光³

(1. 中国石油勘探与生产公司 北京 100007; 2. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 3. 中国地质大学能源学院 北京 100083)

摘要:系统调研了国外致密油勘探与开发最新进展(尤其是最为活跃的北美地区),针对致密油资源利用过程中普遍存在的定义多样化、储量计算方法不适用、过于依赖新技术与政策等几个突出问题,提出了相应的解决思路。结果表明:综合已有致密油及页岩油定义,结合致密油特征,从方便储量计算的角度,致密油定义可统一为以吸附或游离状态赋存于未纳入常规油田产层的低渗储层或地层深部致密岩石中(包括原地致密烃源岩,如泥页岩;与烃源岩互层或紧邻的致密储层,如致密砂岩、致密碳酸盐岩、致密岩浆岩、致密变质岩等),必须通过水平井或多级压裂等资金密集型开发技术才能实现经济采出的轻质石油聚集,进一步可分为2大类5个亚类;通过积极探索针对极低孔渗储层的物性测试技术和测井反演方法是建立致密油储层定量评价方法的有效途径之一,在储量评估时,借鉴基于开发动态的产量递减法对可采储量进行评价是更为切实可行的做法,同时,储层物性(孔隙度、渗透率)上限也应根据实际情况进行调整;此外,成功的致密油开发更需要政府制定积极有效的扶持鼓励政策,从而保障致密油资源的勘探与开发。

关键词:致密油;储量计算;北美地区;勘探;开发;新进展

中图分类号:TE02 **文献标识码:**A

New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development

Zhang Junfeng¹ Bi Haibin² Xu Hao³ Zhao Junlong³ Yu Tingxu³ Zhao Da³ Geng Yunguang³

(1. PetroChina Exploration & Production Company, Beijing 100007, China;

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

3. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This study systematically investigated the latest exploration and development of overseas tight oil reservoirs, especially in the North America with the most active activities. Aiming at some prominent problems such as diversified definitions commonly existing in the application process of tight oil resources, inapplicable reserve calculation methods and excessive dependence on new technologies and policies, a corresponding solution was proposed herein. The results show that based on the existing definitions of tight oil and shale oil in combination with characteristics of tight oil, and from the perspective of facilitating reserve calculation, it can be defined as light petroleum accumulation in a free or adsorbed state in low-permeability reservoirs excluded from conventional pay zones or deep tight rocks (including in-situ tight oil source rocks, such as shale; the tight reservoirs interbedded with or adjacent to source rocks, such as tight sandstones, tight carbonates, tight magmatic rocks and tight metamorphic rocks), which cannot be economically recovered unless using capital-intensive development technologies such as horizontal well and multistage fracturing, etc. Further, it can be mainly divided into two types and five subtypes. Active exploration of the physical property testing technology and logging inversion method for extremely low-permeability reservoir is one of the effective ways to establish a quantitative evaluation method for tight oil reservoir. During the process of reserve evaluation, it is more practical to evaluate the recoverable reserve using the production decline method, which is based on development data. Meanwhile, the upper limit of reservoir physical properties (porosity and permeability) should also be adjusted according to actual situation. In addition, successful development of tight oil requires the government to actively formulate effective supporting and encouragement policies, thus safeguarding the exploration and development of tight oil resources. Key words: tight oil; reserve calculation; North America; exploration; development; new process; enlightenment

Key words: tight oil; reserve computation; North America; exploration; exploitation; new progress

引用:张君峰,毕海滨,许浩,赵俊龙,喻廷旭,赵达,耿昀光.国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义[J].石油学报,2015,36(2):127-137.

Cite: Zhang Junfeng, Bi Haibin, Xu Hao, Zhao Junlong, Yu Tingxu, Zhao Da, Geng Yunguang. New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 127-137.

基金项目:国家自然科学基金青年项目(No. 40802027)和中国石油天然气股份有限公司风险创新基金项目(0706d01040102)资助。

第一作者及通信作者:张君峰,男,1971年9月生,1994年获中国地质大学(武汉)学士学位,现任中国石油勘探与生产公司处长、高级工程师,主要从事石油天然气储量评价与管理方面的研究工作。Email: zhangjunfeng@petrochina.com.cn

面对世界油气需求的持续增长与常规油气产量不断下降的形势,具有较大资源潜力的非常规油气逐渐成为全球石油勘探新的亮点领域^[1]。特别是2008年威利斯顿盆地(Williston Basin) Bakken 致密油实现规模化开发,强力逆转了北美石油产量持续走低趋势,成为当年全球油气领域十大发现之一^[2];同年,德克萨斯州(Texas)南部的 Eagleford 致密油开发亦取得突破^[3]。此后,致密油的勘探开发在北美获得巨大成功,产量大幅提升,截至2013年底,美国原油生产已占世界石油总产量的10%以上,在一定程度上改变了世界传统能源格局^[4-6]。受此影响,世界各国石油工业争相介入非常规资源的勘探开发。相比之下,中国致密油资源非常丰富^[7],但研究尚处于起步阶段,不仅缺乏有效的勘探

开发技术,更为重要的是,当前国内对致密油地质特征的认识十分浅显。因此,全面认识致密油这一非常规轻质油,对中国致密油勘探开发具有极大的指导意义。本文通过详实而系统的资料调研,阐述了国外(特别是北美地区)致密油勘探开发的最新进展,并针对致密油这一新领域在资源利用过程中存在的问题,提出了相应的对策,以期为中国致密油资源勘探开发提供借鉴。

1 国外致密油资源勘探开发现状

1.1 全球致密油资源分布

近年来,致密油勘探开发极为活跃,作为一种重要的能源供给形式,世界大部分国家和地区均已发现了致密油资源^[8](图1)。

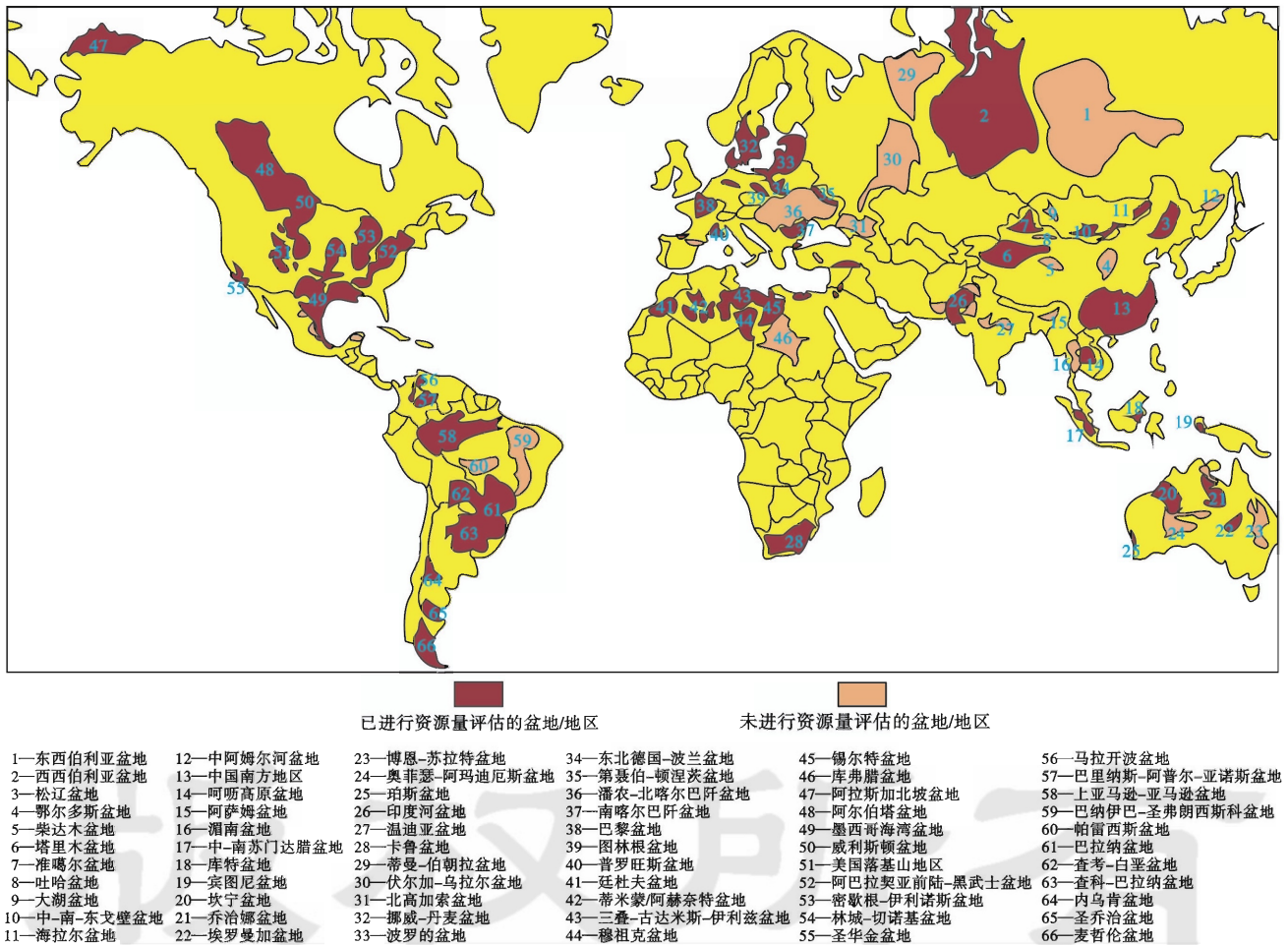


图1 全球致密油资源分布^[8]

Fig. 1 Global distribution of tight oil resources^[8]

据统计,全球致密油资源总储量为 $67\ 840 \times 10^8$ 桶,技术可采储量为 $3\ 362 \times 10^8$ 桶,平均采收率为 4.96%,其中,2/3 以上的致密油资源集中于俄罗斯、美国、中国、利比亚、阿根廷、澳大利亚 6 个国家^[9](表 1)。

然而,全球致密油勘探开发最成功的地区为北美,特别是美国和加拿大两个国家致密油产量的大幅提升

已经逆转了该地区石油产量下降的趋势。此外,俄罗斯同样将水力压裂技术应用于西西伯利亚盆地(Western Siberia Basin)的致密油地层,成为除美国和加拿大以外仅有的生产了商业数量致密油的国家,2013年,致密油日产量为 12×10^3 桶,占俄罗斯石油总产量的 1%^[6]。

表 1 全球致密油地质储量与技术可采储量分布^[8]

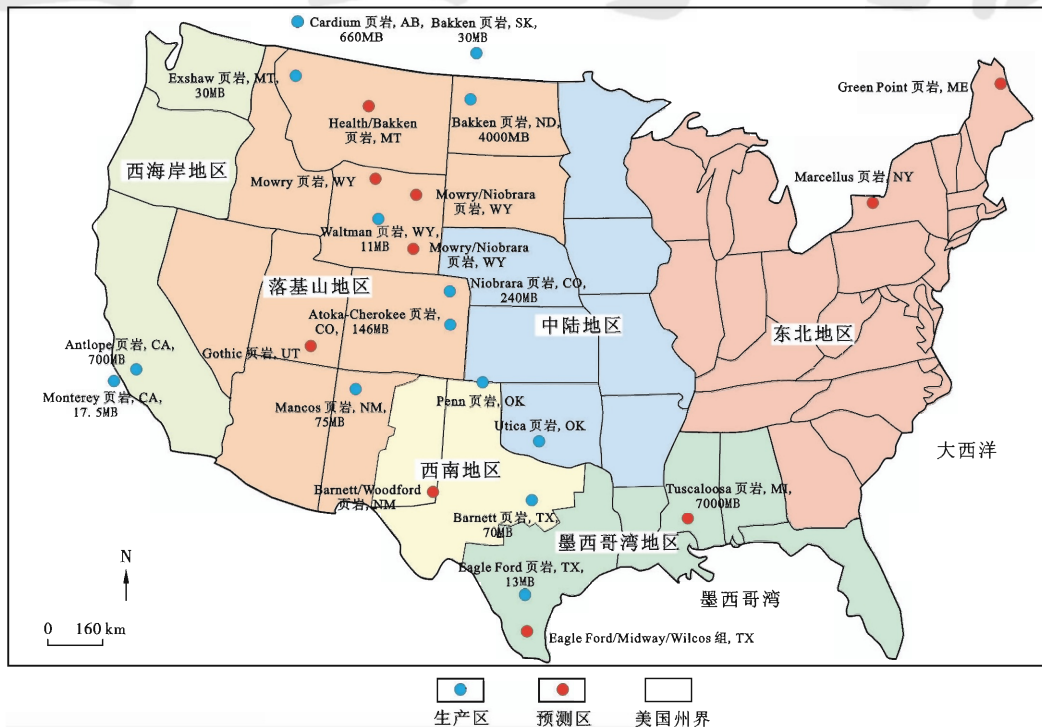
Table 1 Global tight oil distribution of geological reserves and technical recoverable reserves^[8]

大洲	国家	地质储量/ 10 ⁸ 桶	技术可采 储量/10 ⁸ 桶	平均采收 率/%
欧洲	俄罗斯	12 430	746	6.00
北美洲	美国	9 540	477	5.00
亚洲	中国	6 440	322	5.00
非洲	利比亚	6 130	261	4.26
南美洲	阿根廷	4 800	270	5.63
大洋洲	澳大利亚	4 030	175	4.34
	其他地区	22 850	1 023	4.56
	总计	67 840	3 362	4.96

1.2 北美致密油资源开发现状及发展预测

目前,北美已有 19 个盆地发现了致密油^[10],其中已经生产的地层主要分布于美国中陆(Mid-continent)和落基山(Rocky mountain)地区,范围从阿尔伯塔盆地(Alberta Basin)中部一直延伸到德克萨斯州南部,同时,西南地区及加利福尼亚(California)南部的 Monterey 地层也已经开始生产致密油。已被证实的致密油预测区遍及落基山地区、墨西哥湾(Mexico Gulf Coast)地区、西南地区和美国东北部地区(图 2)。

北美致密油主要赋存于泥盆纪—新近纪的地层中,具有 4 套主力产油层。其中,最著名的致密油地层



注: AB 为阿尔伯塔省; SK 为萨斯喀彻温省; MT 为蒙大拿州; ND 为北达科他州; ME 为缅因州; CO 为科罗拉多州; CA 为加利福尼亚州; UT 为犹他州; NM 为新墨西哥州; OK 为俄克拉荷马州; TX 为德克萨斯州; MI 为密西西比州; WY 为怀俄明州; NY 为纽约州; MB 为百万桶。

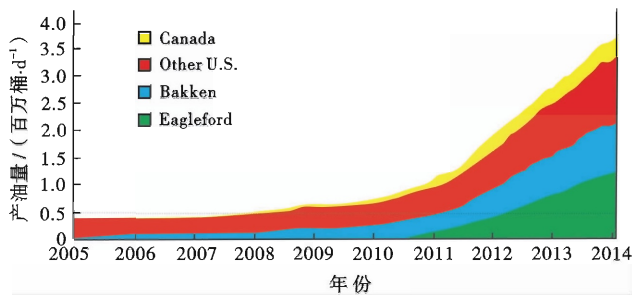
图 2 北美致密油产区、预测区分布及储量评估^[10-12]

Fig. 2 Tight oil distribution of production and prediction areas and reserves evaluation in North America^[10-12]

为威利斯顿盆地的 Bakken 地层、德克萨斯州的 Eagleford 地层、阿尔伯塔盆地的 Cardium 地层以及加利福尼亚圣华金盆地(San Joaquin Basin)的 Monterey 地层,这些致密油地层均具有区域性、大面积分布的特点。美国地质调查局(USGS)曾经评估 Bakken 地层覆盖了北达科他州(North Dakota)、蒙大拿州(Montana)及萨斯喀彻温省(Saskatchewan)南部的几个县; Niobrara 地层可能包含科罗拉多州(Colorado)、怀俄明州(Wyoming)、甚至新墨西哥州(New Mexico)的大部分地区;在加拿大,Cardium 地层也覆盖了阿尔伯塔

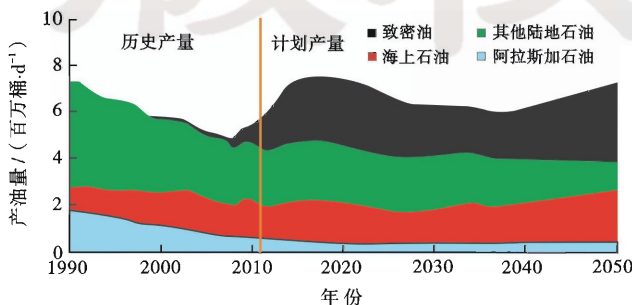
盆地中部的大部分地区^[10]。

在北美致密油资源构成中,美国致密油产量占北美致密油总产量的 91%,而加拿大仅占 9%^[6](图 3)。2013 年下半年,美国原油日产量超过 300×10^4 桶,主要来源于 Eagleford、Bakken、Barnett、Marcellus、Niobrara 这 5 大致密油地层^[13]。在加拿大,2013 年致密油日产量平均为 34×10^4 桶,占加拿大原油日总产量(352×10^4 桶)的近 10%。这些致密油生产完全集中在该国西部的阿尔伯塔省、马尼托巴省(Manitoba)和萨斯喀彻温省^[4]。

图3 致密油贡献下的北美原油产量增长曲线^[6]Fig. 3 Crude oil production growth curves of North America under the tight oil contribution^[6]

北美2009年致密油实际日产量为 26.5×10^4 桶，按照该速度进行计算，预计到2035年，如果不考虑压裂水源的限制、税收规则改变等因素的影响，北美致密油日产量最低目标为 60×10^4 桶；最可能实现的日产量目标是 200×10^4 桶。以Bakken致密油开发为例，在2012年，仅北达科他州就日产Bakken致密油 45×10^4 桶，若以这样的速度计算，北达科他州致密油生产至少能够维持10年，到2035年，致密油的日产量将会增长到 60×10^4 桶。同时，Eagleford地层也将最终达到日产量 80×10^4 桶。但是，若萨斯喀彻温省和蒙大拿州的Bakken地层生产水平都达到北达科他州的一半，那么Eagleford、Niobrara、Cardium致密油地层产量也将非常喜人。到2035年，致密油日产量将超过 200×10^4 桶。然而，考虑到不断进步的开发技术及更为精确的储量计算方法，预计到2035年，日产量将达到 300×10^4 桶^[10]。

基于对当前致密油资源量、开发技术以及油价环境的认识，从定性的角度来看，未来的40年中，北美致密油产量将在2015—2025年之间达到高峰^[14]（图4）。北达科他州矿业资源局（NDDMR）预计到2050年，从该州的Bakken地层生产的致密油日产量能够达到 $(25 \sim 35) \times 10^4$ 桶^[15]。若用这种递减速率计算其他致密油地层的产量，到2050年，致密油日产量仍旧能够达到 $(100 \sim 200) \times 10^4$ 桶。

图4 北美原油生产趋势及预测^[14]Fig. 4 Crude oil production trends and predictions of North America^[14]

1.2.1 美国致密油资源

自从美国政府对致密油的勘探开发给予了与页岩气同样高度的重视后，2006年，威利斯顿盆地Elm Coulee油田Bakken地层致密油日产量突破了 5×10^4 桶，极大提振了致密油勘探开发的信心，吸引了大量投资^[7]。2009年，美国致密油勘探开发投资达 514×10^8 美元，创下历史高峰^[16]。2010年美国致密油年产量达 2.1×10^8 桶，使美国持续24年的石油产量下降趋势首次得以扭转^[14]。2011年美国定向井油产量首次超过了气产量，水平井数量超过了直井数量，致密油日产量超过了 45.6×10^4 桶^[17]。受致密油产量不断上涨的推动，2013年第4季度，美国原油（日产量 322×10^4 桶）生产占世界总产量（日产量 784×10^4 桶）的10%以上；仅2014年1—4月，美国致密油日产量就高达 83.8×10^4 桶，是2013年的1.17倍^[6]。2014年5月，美国已钻致密油气井45468口，在钻1861口，预计到2020年致密油使美国原油总产量增加1/3，原油日产量将达到 1071×10^4 桶，2030年日产量达到 1300×10^4 桶^[14]。

目前，美国致密油勘探开发典型代表是威利斯顿盆地的Bakken地层和德克萨斯州的Eagleford地层（图5），其中Bakken地层是美国最大的致密油生产地层^[18]，主要位于威利斯顿盆地的中部及北部，地质资源量为 1643×10^8 桶，技术可采资源量 42×10^8 桶，待发现资源量为 26×10^8 桶油及相近数量的伴生气^[3]。2000—2010年Bakken地层累计产油已超过 2×10^8 桶。而Eagleford地层的油气种类较多，致密油主要赋存于区带北部，2010年全年产致密油约 142×10^4 桶。2012年第一季度，Bakken和Eagleford地层致密油日产量均超过了 75×10^4 桶，接近于美国同期石油产量的12.5%，且产量持续保持增长趋势^[3]。然而，由于其他地层致密油产量的提高，2014年2月，美国63%的致密油生产来自Eagleford页岩（日产量 121×10^4 桶，占美国原油总产量的36%）和Bakken页岩（日产量 94×10^4 桶，占美国致密油总产量的28%），与2011年11月相比（占原油总产量的84%）有所降低^[6]。在致密油产量的贡献下，2014年4月，Eagleford地层原油产量增幅最大，平均日增长率为 3.2×10^4 桶，是二叠盆地（Permian Basin）的2.3倍、Bakken地层的1.7倍，从而使得美国从2010年4月到2014年4月，北达科他州和德克萨斯州的原油产量平均年增长率分别为37%和28%（其他地区年增长率仅2%）^[19]。2014年7月，美国原油月生产同比增长数据显示，Eagleford地层仍然居首，其次为二叠盆地和Bakken地层，同时，致密油占原油生产比例也接近峰值^[20]。

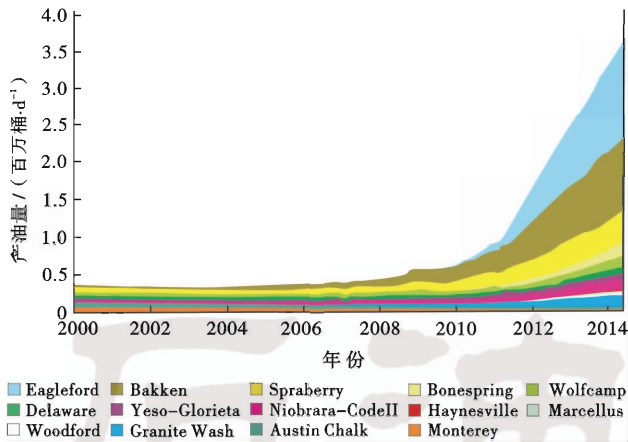


图 5 致密油贡献下的美国原油产量情况^[14]

Fig. 5 Crude oil production of America under the tight oil contribution^[14]

在储量方面,归因于水平井和水力压裂等资金密集型技术在致密油储层中的应用,美国原油和伴生气凝析油探明储量在 2012 年增加了 45×10^8 桶,这是美国原油探明储量连续增长的第 4 年,其中,90% 以上的致密油探明储量增长来源于 5 大致密油地层(表 2),可见开发致密油大大增加了美国原油探明储量。在美国各州中,德克萨斯州增加的石油探明储量最大,增加近 30×10^8 桶,其中,Eagleford 地层致密油的探明储量为 34×10^8 桶,首次超过了威利斯盆地 Bakken 地层的 32×10^8 桶石油储量,成为美国最大的致密油地层^[13]。

1.2.2 加拿大致密油资源

加拿大是世界上第 5 大石油出口国,致密油资源同样具有非常好的前景。加拿大的致密油主要产于西加拿大沉积盆地,始于 2005 年萨斯喀彻温省东南部以及马尼托巴省西南部的 Bakken 地层。在西加拿大沉积盆地,Bakken/Exshaw 地层、Cardium 地层和 Beaverhill Lake 地层、Viking 地层、Lower Shaunagvon 地层、Duvernay/Muskwa 地层、Lower Amaranth 地层都发现了致密油(图 6)。2010 年致密油开发已经延伸

表 2 美国主要致密油地层 2011 年和 2012 年储量与产量情况^[13]

Table 2 Reserves and productions of the main American tight oil formations in 2011 and 2012^[13]

盆地	地层	州	产量/10 ⁶ 桶		储量/10 ⁶ 桶	
			2011 年	2012 年	2011 年	2012 年
墨西哥海湾	Eagleford	TX	71	209	1251	3372
威利斯顿	Bakken	ND, MT, SD	123	213	1998	3166
福特沃斯	Barnett	TX	8	10	118	66
阿巴拉契亚	Marcellus	PA, WV	—	4	—	72
丹佛-朱尔斯堡	Niobrara	CO, KS, NE, WY	2	3	8	14
总计	—	—	204	439	3375	6690
其他致密油	—	—	24	41	253	648
全美总计	—	—	228	480	3628	7338

注:TX 为德克萨斯州,ND 为北达科他州,MT 为蒙大拿州,SD 为南达科他州,PA 为宾夕法尼亚州,WV 为西弗吉尼亚州,CO 为科罗拉多州,KS 为堪萨斯州,NE 为内布拉斯加州,WY 为怀俄明州。



图 6 西加拿大沉积盆地致密油地层分布^[4]

Fig. 6 Formation distribution of tight oil in the western Canada sedimentary basin^[4]

到盆地的其他储层,水平井数量从2005年的10口增加至2010年的140口。Bakken页岩油日产量在2011年3月超过了 7.8×10^4 桶。目前,阿尔伯塔盆地已经是西加拿大主要致密油产区^[21]。

西加拿大盆地致密油主要分为8大致密油区带^[22](表3),但是盆地总储量目前尚未查明^[14]。目前,加拿大境内的Bakken地层致密油储量是 2.25×10^8 桶,Car-

dium地层为 1.3×10^8 桶,Viking地层为 5800×10^4 桶,Lower Shuanavon地层为 9300×10^4 桶。随着勘探开发的不断进行,储量必然还会继续上升。此外,在加拿大西部的纽芬兰(Newfoundland)岛也进行了Green Point地层致密油储量测试作业,位于魁北克(Quebec)Anticosti岛的奥陶系Macasty页岩目前也被认定为主要致密油储层^[17]。

表3 西加拿大沉积盆地致密油地层地质参数^[22]

Table 3 Geological parameters of the tight oil formations in the western Canada sedimentary basin^[22]

地层	省	是否有常规石油产出	典型深度/m	已报道储量/ 10^6 桶	单井典型初始日产油量/桶
Bakken/Exshaw	MB/SK/AB/BC	是	900~2500	225	120~250
Cardium	AB	是	1200~2300	130	150~500
Viking	AB/SK	是	600~900	58	100~200
Lower Shaunavon	SK	是	1300~1600	93	100~250
Monteney/Doig	AB	是	800~2200	—	200~600
Duvernay/Muskwa	AB	否	>2000	—	—
Beaverhill Lake	AB	是	2000~2900	—	250~2000
Lower Amaranth	MB	是	800~1000	—	100~200

注:MB为曼尼托巴省,SK为萨斯喀彻温省,AB为阿尔伯塔省,BC是不列颠哥伦比亚省。

尽管加拿大国家能源委员会(NEB)评估加拿大致密油资源开发处于起步阶段,但是该地区致密油具有非常好的资源前景。2010年,西加拿大沉积盆地原油日产量超过 16×10^4 桶,而同年加拿大新发现陆地原油的日产量只有 27.6×10^4 桶。若以 13.4×10^4 桶/d的速度开采,当前 5×10^8 桶的探明和概算储量能够保持10年。同美国一样,西加拿大沉积盆地致密油产量已经扭转了常规石油的长期递减趋势。从图7可以看出,截至到2011年1月,西加拿大沉积盆地致密油日产量超过 16×10^4 桶,其中Bakken地层致密油产量最高,约占40%,其次为Cardium地层。萨斯喀彻温省致密油在2011年第一季度日产量为 9×10^4 桶,马尼托巴省日产量达到 2.5×10^4 桶。阿尔伯塔能源保护委员会(AERCB)预测,2014年阿尔伯塔致密油日产量将达到 17×10^4 桶^[4]。

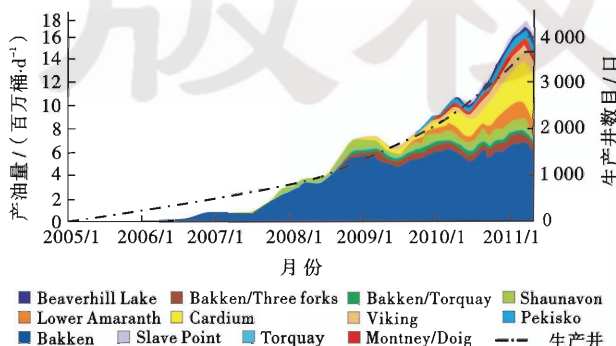


图7 西加拿大沉积盆地致密油产量情况^[4]

Fig. 7 Tight oil production of the western Canada sedimentary basin^[4]

2 致密油资源利用存在问题及对策

尽管致密油是非常现实的石油接替资源,但是由于致密油的勘探开发和相关研究仍处于初步阶段,总体勘探程度与地质认识程度较低,对于致密油资源的勘探开发、储量评价仍存在一些问题需要探讨,主要体现在3个方面:①定义多样,不利于资源对比;②储层致密,常规储量计算方法和参数的确定方法不适用;③过于依赖政策及资金密集型技术。

2.1 建立基于储量计算的致密油定义

2.1.1 致密油资源特点及当前的定义

在致密的储层中,孔隙空间的数量、大小以及连通性都明显低于常规储层,油气生产极为困难。对加拿大148个致密储层进行统计发现,赋存于泥页岩、砂岩与粉砂岩、碳酸盐岩3类储层中的致密油占90%以上,主要储层是泥页岩,约占50%^[8]。通过对比Bakken、Eagleford、Cardium这3个致密油地层的储层特点(表4)可以发现,致密油储层主要是大面积分布的物性极差的储层,成熟优质的生油层广覆式分布,生油层与储层紧密联系,无明显圈闭边界,无油“藏”的概念;致密油品质成熟,油质较轻,需要利用水平井和多级压裂等资金密集型技术才能实现经济开采。从空间角度来看,致密油通常赋存在地层深部致密沉积岩中(图8)。

基于上述特点,不同的机构和学者先后从不同角度对致密油进行了描述(表5),但这些定义除了在开

发方式上认识一致外,在储层、岩性、物性的认识上均存在分歧,而且容易和页岩油混淆,给资源评价和对比带来了一定的困难。当前国内对于致密油定义的争论焦点在于“什么是致密油”,致密油是否包括“页岩油”,这些问题就是准确认识页岩油和致密油的关键。然而,对比页岩油定义表明(表 6),狭义页岩油也并非完

全是从岩性角度定义(单从页岩中产出的成熟石油),其也强调了页岩“层系”的概念,包括薄的砂岩、碳酸盐岩等致密岩石的夹层或邻层,实际上是“页岩储层油”。因此,认为页岩油就是从纯页岩中产出的石油是片面的,其只是致密油的一种,而从储层的角度(广义的角度)来理解致密油才是最为“符合实际内涵的”。

表 4 北美地区 3 大致密油产层地质特征及资源量^[4,23,24]

Table 4 Geological characteristics and resources of three tight oil formations in North America^[4,23,24]

地层	埋深/m	盆地类型	有利分布面积/km ²	储层				主要岩性		烃源岩		原油密度/(g·cm ⁻³)	地层压力系数
				主要岩性	孔隙度/%	渗透率/mD	地层厚度/m	有效厚度/m	有机碳含量/%	成熟度/%			
Bakken	2 900~3 300	克拉通	70 000	致密砂岩	8~12	0.05~0.5	33	1.83~4.57	海相页岩	约 12	0.6~1.3	0.81~0.83	1.35~1.58
Eagleford	1 200~4 500	克拉通	40 000	致密灰岩	3~10	(3~405) × 10 ⁻⁶	30~90	>15	海相页岩	1~7	0.7~1.3	0.82~0.87	1.35~1.8
Cardium	1 200~2 300	前陆	>3 000	砂质泥岩	5~12	0.1~10	>8	5~8	海相页岩	约 2.5	>0.7	0.82	>1.3

表 5 当前国内外与致密油相关的定义及描述

Table 5 Domestic and foreign definition and description of the tight oil at present

提出机构或学者	定义或相关描述
美国能源信息署(EIA,2012)	利用水平钻井和多段水力压裂技术从页岩或其他低渗透储层中开采出的石油 ^[25]
美国能源信息署(EIA,2014)	致密油是指发现于非常低渗透率的储层中,包括页岩和其他岩性 ^[13]
欧洲议会研究服务(EPRS,2014)	致密油是指圈闭于页岩、石灰岩、砂岩地层中的轻质原油 ^[26]
美国国家石油委员会(NPC,2011)	一般来说,致密油蕴藏在那些埋藏很深、不易开采的沉积岩层中,这些岩层具有极低的渗透率(故而称其为“致密”);在有的致密油区,石油直接产自页岩层,不过大多数的致密油则是产自与作为烃源岩的页岩具有密切关系的砂岩、粉砂岩和碳酸盐岩 ^[10]
加拿大自然资源协会(NRC,2012)	将产自页岩层系的石油称为致密轻质油或致密页岩油,其是蕴藏在渗透性极差的沉积岩中的石油资源,这类油藏中从地层流入井筒的油流受致密层颗粒细、渗透性差的限制。在一些致密轻质油区,石油是直接产自页岩的,不过多数情况下致密油是产自作为源岩的页岩层系中的低孔渗性的粉砂岩、砂岩、灰岩和白云岩夹层。这类石油资源的产层物性相对很差,开发需要利用水平井和水力压裂技术 ^[27]
加拿大国家能源委员会(NEB,2012)	致密油涵盖的范围除页岩油外还包括致密砂岩、粉砂岩、灰岩及白云岩等致密储层中的石油 ^[4]
加拿大非常规资源协会(CSUR,2011)	把在已发现常规油田周边的含油区因为储层致密而未纳入常规油田产区的区域归属于致密油范畴,称之为“裙边油”,在这些边缘区带,石油通过应用水平井、水力压裂等新技术得以开采。实例有西加拿大盆地的 Cardium 地层和 Viking 地层 ^[28]
Clarkson 等(2011)	从烃源岩运移到储层的轻质油,基质覆压渗透率<0.1 mD,类似于致密气,储集层可以是碎屑岩或碳酸盐岩。实例有萨斯喀温省的 Bakken 地层和阿尔伯塔省的 Monteny 地层的一部分 ^[24]
赵政璋和杜金虎(2012)	致密油是指夹在或紧邻优质生油层系的致密碎屑或者碳酸盐岩储层中,未经过大规模长距离运移而形成的石油聚集,一般无自然产能,需通过大规模压裂技术才能形成工业产能,致密油的物性界限确定为地面空气渗透率小于 1 mD,地下覆压渗透率小于 0.1 mD 左右 ^[29] 。
贾承造等(2012)	致密油是指以吸附或游离状态赋存于生油岩中,或与生油岩互层、紧邻的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集岩中,未经过大规模长距离运移的石油聚集 ^[30]
邹才能等(2012)	致密油是指与生油岩层系共生的、在各类致密储集层聚集的石油,油气经过短距离运移,储集层岩性主要包括致密砂岩和致密灰岩等 ^[1]
郭永奇等(2013)	致密油是指以吸附或游离状态赋存于生油岩中,或与生油岩互层、紧邻的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集岩中,未经过大规模长距离运移的石油聚集 ^[31]
姚泾利等(2013)	致密油通常是指覆压基质渗透率小于 0.2 mD 或空气渗透率小于 2 mD 的砂岩、碳酸盐岩等油层,单井一般无自然产能,或自然产能低于工业油气流下限,但在一定经济条件和压裂、水平井、多分支井等技术措施下可以获得工业油产量 ^[32]
童晓光等(2012)	有利于形成页岩(致密)油的地质条件主要有:形成页岩(致密)油的烃源岩的成熟度 Ro 应低于 1.3%,但应高于 0.6%,最好在 0.9%~1.3%,生成的原油为轻质油,分子量小,能够在低孔低渗条件下运移;页岩油实际的含油储层主要是特低渗透率的粉砂岩,其储层的物性条件优于页岩,可能将其称为致密油更加恰当 ^[33]
林森虎等(2011)	致密油是指以吸附或游离状态赋存于富含有机质且渗透率极低的暗色页岩、泥质粉砂岩和砂岩夹层系统中的自生自储、连续分布的石油聚集 ^[3]
景东升等(2012)	致密油是指产于低孔隙度和低渗透率页岩或其他致密岩石储层中的石油。致密油以吸附或游离状态赋存于富含有机质且渗透率极低的暗色页岩、泥质粉砂岩和砂岩夹层系统中,形成自生自储、连续分布的石油聚集 ^[34]
姜在兴等(2014)	致密油是致密储层油的简称,泛指蕴藏在低渗、低孔(通常孔隙度小于 10%,覆压基质渗透率小于 0.1 mD)的储集层中的石油,储集岩石类型包括页岩、粉砂岩、砂岩、灰岩、白云岩、甚至火山岩。但是,页岩夹层或邻层中的石油资源由于源-储关系、渗流机理、成藏主控因素及开采方式都与纯泥岩中的石油聚集有所区别,所以,并不属于致密油 ^[35]

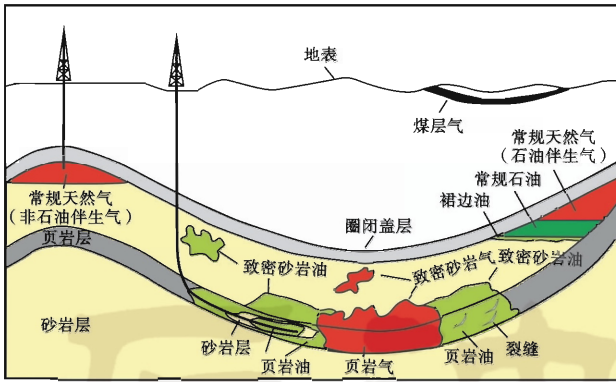


图 8 常规石油、天然气与非常规石油、天然气空间分布^[4,24]
 Fig. 8 Space distribution of conventional and unconventional oil and gas^[4,24]

表 6 致密油和页岩油定义的对比^[36,37]

Table 6 Definition comparison of shale oil and tight oil^[36,37]

油气种类	定义角度	定义概要
页岩油 ^[34]	油页岩	必需经过加热干馏生产的石油
	广义	泛指蕴藏在具有低的孔隙度和渗透率的致密含油层中的石油资源,其开发需要使用与页岩气类似的水平井和水力压裂技术
致密油 ^[35]	狭义	与页岩气对应,专指来自作为源岩的泥页岩层系中的石油资源,其特点是源岩与储层同层。即有效生烃泥页岩层系中具有勘探开发意义并以液态为主的烃类,主要以游离态、吸附态及溶解态等方式赋存于泥页岩基质孔隙、裂缝以及砂岩、碳酸盐岩、火山岩等夹层中
	广义	与广义页岩油一致
致密油 ^[35]	狭义	与致密气对应,是指来自页岩之外的致密储层(如粉砂岩、砂岩、灰岩和白云岩等)的石油资源,不包括广义致密油中的狭义页岩油部分

表 7 致密油分类及特征描述

Table 7 Classification and characteristics of tight oil

2 大类	5 亚类	赋存状态	主要特点	物性分级	典型地区
位于页岩储层中的石油,即未发生运移的烃源岩中的石油	裂缝不发育型页岩油	吸附+游离态	纯页岩产出的石油,源-储相同,孔隙空间连通性差	1	Eagleford 页岩
	裂缝性页岩油	游离态		2	Bakken 上段
	夹层型页岩油	游离态	夹层内产出的石油,源-储不同,孔隙连通性一般	3	Bakken 中段
从烃源岩运移到相邻或一定距离的致密砂岩、砂泥岩、石灰岩或白云岩中的石油	与烃源岩相邻的致密储层产出的石油	游离态	产自页岩以外致密储层,源-储不同,具有较大的孔隙度,但仍比常规储层物性差很多	4	Three Forks 砂岩
	与烃源岩相隔较远的致密储层产出的石油			5	Cardium 裙边油

注:致密油物性分级中,从 1 到 5,孔渗条件依次变好。

层的孔隙度和渗透率数据(表 4)发现,Cardium、部分 Bakken 致密油储层覆压渗透率高于 0.1 mD(如 Bakken 渗透率最高为 0.5 mD,孔隙度最高为 8%)。此外,对于致密油储层渗透率高于 0.1 mD 的更为明显的实例是 Niobrara 致密油地层,该地层渗透率介于 0.1~1 mD[图 9(b)]。

2.2 建立针对致密储层的储量评价方法

国际石油公司所说的储量一般是指在美国证券交易委员会(SEC)向公众披露并作为上市资产的储量,主

2.1.2 适于储量计算的致密油定义及分类

为方便储量计算,采取“方便交流,注重应用”的原则,综合前人的研究成果,结合致密油储层特征与储量评估要求,笔者从储层的角度提出更加丰富与完善的定义,即致密油是指以吸附或游离状态赋存于未纳入常规油田产层的低渗储层或地层深部致密岩石中(包括原地致密烃源岩,如泥页岩;与烃源岩互层或紧邻的致密储层,如致密砂岩、致密碳酸盐岩、致密岩浆岩、致密变质岩等),必须通过水平井或多级压裂等资金密集型开发技术才能实现经济采出的轻质石油聚集。

显然,新定义是广义致密油定义,包含以下几个方面的总结:①赋存状态:吸附或游离;②储层岩性及物性:地层深部致密岩石及未纳入常规油田产层的低渗储层;③是否运移:石油不运移或短距离运移;④开发方式:水平井、多级压裂等资金密集型技术;⑤经济效益:实现经济采出;⑥石油属性:成熟、轻质。然而,从现阶段的地质能源矿种及经济性角度来看,主要存在位于页岩储层中的石油和经过短距离运移后赋存于其他致密沉积岩储层中的石油 2 大类,进一步又能分为 5 个亚类,这些致密油类型的主要特征与区别如表 7 所示,其分布如图 8 所示。

2.1.3 致密油储层孔隙度与渗透率界限

将 Bakken 致密油储层渗透率与孔隙度投影到半对数坐标图上[图 9(a)],可以看到,多数情况下,致密储层孔隙度低于 10%,覆压渗透率小于 0.1 mD(空气渗透率小于 1 mD)。然而,通过对比北美几个致密地

要是指证实储量,且是证实剩余经济可采储量,其主要评价方法包括容积法、类比法和产量递减法^[39](表 8)。致密油类似于致密气、页岩气以及煤层气,没有明显的油-水边界和圈闭,储层孔渗性极差。因此,致密油开发具有其特定规律,如果按常规石油储量评价方法开展评价容易造成动用程度偏低、采收率偏低等一系列低估致密油储量的认识问题。具体来说,主要体现在:①一些致密油地层虽然生产致密油[如俄克拉荷马州(Oklahoma)的 Penn 页岩、Utica 页岩地层],但是没有

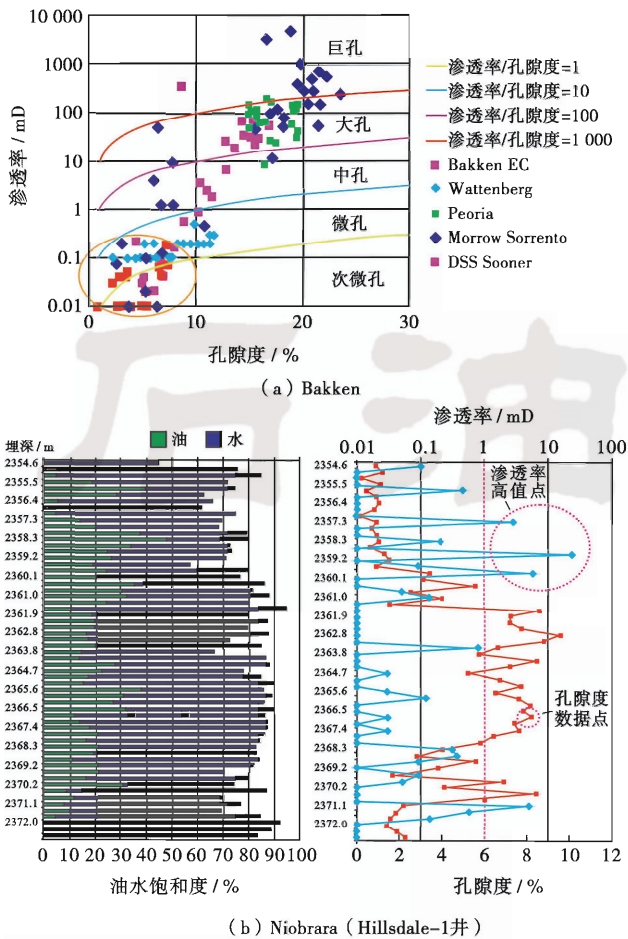


图 9 Bakken 和 Niobrara 致密油储层孔隙度和渗透率分布^[38,39]
 Fig. 9 Distribution of porosity and permeability in the tight oil reservoirs from Bakken and Niobrara^[38,39]

表 8 不同开发阶段可选用的储量评价方法^[40]

Table 8 Reserves evaluation methods at different development stages^[40]

对比内容	储量类别	方法	国内储量	SEC 储量	
未开发或勘探阶段	地质储量	算术平均值法	✓	✓	
		容积法	等值线面积	✓	✓
			权衡法	✓	✓
			单井控制法	✓	—
			网格积分法	✓	—
		开发初期	技术可采储量(地质储量×采收率)	静态法	—
概率统计法	✓			—	
经验公式法、类比法(确定采收率)	✓			✓	
数值模拟法	✓			—	
产量递减法,如指数、双曲、调和等	✓			✓	
开发中后期	技术可采储量	动态法	—	—	
		水驱特征曲线法	✓	—	
		注采特征曲线法	✓	—	
		压降法	✓	—	
		物质平衡法	✓	—	

对其储量进行报道;②几个开发时间较早的致密油地层(如 Eagleford 页岩、二叠盆地的 Barnett 页岩和 Woodford 页岩、怀俄明州的 Mowry/Niobrara 页岩)

的储量可能比现在报道的要高很多;③随着技术和效率的不断进步,未来致密油可采储量也可能会增加。此外,当前的储量评价也存在较强的不确定性,特别是技术可采储量的评估,如 2014 年 5 月 21 日, EIA 报道 Monterey 页岩致密油的可采储量值就削减了 96%^[41]。

可见,需要结合致密油特点制定一套相应的储量评价方法。对于致密油储层各项参数的评价应在传统的测井和实验室测试分析方法的基础上,在考虑储层改造技术的前提下,积极探索针对极低孔渗储层的物性测试技术和测井反演方法,建立致密油储层定量评价方法,同时充分调研国外致密油开发生产资料,借鉴基于开发动态的产量递减法对可采储量的评价,是更为切实可行的做法,也是国外通用的做法,这些专门针对致密油储层的可采储量评价方法包括 Duong 法、SEPD 法及 YM-SEPD 法等^[42-45]。

2.3 建立积极有效的保障性扶植政策

成功的致密油开发强烈依赖于钻井、完井、数值模拟技术的发展,以及对于给定地层地质特征的准确认识。除此之外,从北美致密油开发经验看来, Bakken 地层和其他北美致密油地层的开发很大程度上也取决于政策性因素。尽管 Bakken 地层的成功率很高(有些报道中称成功率超过 90%)^[10],但是,这些成功均建立在资金密集型技术的基础上,其额外的花费将与政府法规或者税收挂钩,如果政府不制定积极的扶持政策将在很大程度上影响致密油地层的经济可行性。因此,中国也应该制定相应的政策鼓励开展致密油的勘探开发,为致密油资源的利用提供保障。

3 结 论

(1) 北美(美国和加拿大)是目前世界上致密油勘探与开发最为成功的地区,其产量将在 2015—2025 年之间达到高峰。预计到 2035 年,致密油最低日产量为 60×10^4 桶,最高日产量 300×10^4 桶,最可能日产量为 200×10^4 桶。到高峰过后的 2050 年,致密油日产量仍旧能够达到 $(100 \sim 200) \times 10^4$ 桶。

(2) 中国致密油资源丰富,但勘探开发尚处于早期,致密油地质特征认知程度低,对致密油资源利用存在诸多问题:定义多样,不利于资源对比;储层致密,常规储量计算方法和参数的确定方法不适用;过于依赖政策及资金密集型技术。

(3) 综合前人对致密油的认识及致密油的特征,从储量计算角度,对致密油定义进行统一:致密油是指以吸附或游离状态赋存于未纳入常规油田产层的低渗储层或地层深部致密岩石中(包括原地致密烃源岩,如泥页岩;与烃源岩互层或紧邻的致密储层,如致密砂岩、

致密碳酸盐岩、致密岩浆岩、致密变质岩等), 必须通过水平井或多级压裂等资金密集型开发技术才能实现经济采出的轻质石油聚集, 主要包括 2 大类 5 个亚类。

(4) 通过积极探索针对极低孔渗储层的物性测试技术和测井反演方法是建立致密油储层定量评价方法的有效途径之一, 同时, 要借鉴基于开发动态的产量递减法对可采储量的评价, 是更为切实可行的做法。此外, 政府制定积极的扶持鼓励政策, 也能够保障致密油资源的勘探与开发。

参 考 文 献

- [1] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations; taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [2] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1-310.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Geology of unconventional oil and gas[M]. Beijing: Geology Press, 2011: 1-310.
- [3] 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.
- [4] NEB. Tight oil developments in the western Canada sedimentary basin[EB/OL]. [2011-10-02]. <http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfntn/nrgyrprt/1/tghtdvlpmntwcsb2011/tghtdvlpmntwcsb2011-eng.html>.
- [5] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11.
Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [6] EIA. Tight oil production pushes U. S. crude supply to over 10% of world total[EB/OL]. [2014-03-26]. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=15571#>.
- [7] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [8] IHS. Going global: predicting the next tight oil revolution[EB/OL]. [2013-09-18]. <http://www.ihsapac.com/ihsday2013/en/pdf/SolutionBrochure/Multi-ClientStudy/Going%20Global%20Predicting%20the%20Next%20Tight%20Oil%20Revolution%20Updated%202013-21-2013.pdf>.
- [9] EIA. Technically recoverable shale oil and shale gas resources; an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States[EB/OL]. [2013-06-20]. <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldsh-alegas/pdf/overview.pdf>.
- [10] NPC. Unconventional oil[EB/OL]. [2011-09-15]. http://www.npc.org/Prudent_Development-Topic_Papers/1-6_Unconventional_Oil_Paper.pdf.
- [11] Sorensen J A. Tight oil resources in north America-an emerging and evolving opportunity[EB/OL]. [2011-12-07]. http://csis.org/files/attachments/111207_EnergySorensenPPT.pdf.
- [12] EIA. Oil and gas supply module[EB/OL]. [2012-01-01]. http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/oil_gas.pdf.
- [13] EIA. U. S. Crude oil and natural gas proved[EB/OL]. [2014-12-19]. <http://www.eia.gov/naturalgas/crudeoilreserves/index.cfm>.
- [14] Sieminsk A. Outlook for shale gas and tight oil development in the U. S. [EB/OL]. [2013-05-14]. http://www.eia.gov/pressroom/presentations/sieminsk-ki_03132013.pdf.
- [15] Helms L. North dakota department of mineral resources-activity and projections, public presentation delivered to the Williston Economic Development Commission[EB/OL]. [2010-08-25]. <https://www.oilgas.nd.gov>, accessed 8/25/2010.
- [16] 卢雪梅. 美国致密油成开发新热点[N]. 中国石化报, 2011-12-30(5).
Lu Xuemei. A new development hotspot - American tight oil [N]. China Petrochemical News, 2011-12-30(5).
- [17] 张威, 刘新, 张玉玮. 世界致密油及其勘探开发现状[J]. 石油科技论坛, 2013(1): 41-44.
Zhang Wei, Liu Xin, Zhang Yuwei. Worldwide tight oil and its current exploration & development conditions[J]. Oil Forum, 2013(1): 41-44.
- [18] Pollastro R M, Roberts L N R, Cook T A, et al. Assessment of undiscovered technically recoverable oil and gas resources of the Bakken Formation, Williston Basin, Montana and North Dakota, 2008[R]. US Geological Survey Open-File Report 2008-1353, 3 sheets, 2008.
- [19] EIA. North Dakota and Texas now provide nearly half of U. S. crude oil production[EB/OL]. [2014-07-01]. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=16931>.
- [20] Gorgen S. Review of EIA oil production outlooks[EB/OL]. [2014-07-15]. <http://www.eia.gov/conference/2014/pdf/presentations/gorgen.pdf>.
- [21] NEB. Tight oil developments in the Western Canada sedimentary basin[EB/OL]. [2011-12-01] <http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfntn/nrgyrprt/1/tghtdvlpmntwcsb2011/tghtdvlpmntwcsb2011-eng.html>.
- [22] Johnson M, Wall B. An update on WCSB tight oil development [EB/OL]. 2012, <http://www.empr.gov.bc.ca/OG/oilandgas/petroleumgeology/UnconventionalGas/Documents/M%20Johnson.pdf>.
- [23] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 1-10.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 1-10.
- [24] Clarkson C R, Pedersen P K. Production analysis of western Canadian unconventional light oil plays[R]. SPE 149005, 2011.

- [25] EIA. Annual energy outlook 2012[EB/OL]. [2012-02-08]http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=4910.
- [26] EPRS. Unconventional gas and oil in North America [M]. New Hampshire;Gregor Erbach,2014;1-24.
- [27] NRC. North American tight oil[EB/OL]. [2012-05]http://www.nrcan.gc.ca/energy/sources/crude/2114#oil1.
- [28] CSUR. Understanding tight oil[EB/OL]. http://www.csur.com/sites/default/files/Understanding_TightOil_FINAL.pdf.
- [29] 赵政璋,杜金虎. 致密油气[M]. 北京:石油工业出版社,2012;1-3.
Zhao Zhengzhang, Du Jinhui. Tight oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2012;1-3.
- [30] 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.
- [31] 郭永奇,铁成军. 巴肯致密油特征研究及对我国致密油勘探开发的启示[J]. 辽宁化工,2013,42(3):309-312.
Guo Yongqi, Tie Chengjun. Study on characteristics of Bakken tight oil and its revelation for exploration and development of tight oil in China[J]. Liaoning Chemical Industry,2013,42(3):309-312.
- [32] 姚泾利,邓秀芹,赵彦德,等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发,2013,40(2):150-158.
Yao Jingli, Deng Xiuqin, Zhao Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2013,40(2):150-158.
- [33] 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. Genesis and distribution of unconventional oil[J]. Acta Petrolei Sinica,2012,33(S1):20-26.
- [34] 景东升,丁锋,袁际华. 美国致密油勘探开发现状、经验及启示[J]. 国土资源情报,2012(1):18-19.
Jing Dongsheng, Ding Feng, Yuan Jihua. Status quo and experiences of tight oil exploration and exploitation in the United States and its implication [J]. Land and Resources Information, 2012(1):18-19.
- [35] 姜在兴,张文昭,梁超,等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报,2014,35(1):184-196.
Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica,2014,35(1):184-196.
- [36] 国土资源部油气资源战略研究中心,中国地质大学(北京). 页岩油资源潜力评价与有利区优选方法(暂行稿)[M]. 2012,8;1-9.
The oil and gas resources strategic research center of ministry of land and resources, China university of geosciences (Beijing). Shale oil resource potential evaluation and favorable optimization method[M]. 2012,8;1-9.
- [37] 周庆凡,杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油天然气地质,2012,33(4):541-544.
Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms[J]. Oil and Gas Geology,2012,33(4):541-544.
- [38] Sonnenberg S A. The Bakken petroleum system of the Williston Basin[EB/OL]. [2010-12-09]. http://www.aapg.org/career/training/online/e-symposia/details/articleid/1466/the-bakken-petroleum-system-of-the-williston-basin.
- [39] Sonnenberg S A. Core analysis and unconventional reservoirs[EB/OL]. [2010-12-09]. http://www.aapg.org/career/training/online/e-symposia/details/articleid/1466/the-bakken-petroleum-system-of-the-williston-basin.
- [40] 张玲,魏萍,肖席珍. SEC储量评估特点及影响因素[J]. 石油天然气地质,2011,32(2):293-300.
Zhang Ling, Wei Ping, Xiao Xizhen. Characteristics and their influential factors of SEC reserve evaluation[J]. Oil and Gas Geology,2011,32(2):293-300.
- [41] EIA. Annual energy outlook 2014 with projections to 2040[EB/OL]. [2014-05-07]. http://www.eia.gov/forecasts/AEO/pdf/0383%282014%29.pdf.
- [42] Yu Shaoyong, Miocevic D J. An improved method to obtain reliable production and EUR prediction for wells with short production history in tight/shale reservoirs[R]. SPE 168684,2013.
- [43] Yu Shaoyong, Lee W J, Miocevic D J, et al. Estimating proved reserves in tight/shale wells using the modified SEPD method[R]. SPE 166198,2013.
- [44] Yu Shaoyong. Best practice of using empirical methods for production forecast and EUR estimation in tight/shale gas reservoirs[R]. SPE 167118,2013.
- [45] Kabir C S, Rasdi F, Igboalisi B. Analyzing production data from tight oil wells[R]. SPE 137414,2011.

(收稿日期 2014-02-26 改回日期 2014-10-14 编辑 宋宁)