第 25 卷 第 10 期
2014 年 10 月
天然气地球科学
NATURAL GAS GEOSCIENCE
Vol. 25 No. 10
Oct. 2014
doi:10.11764/j.issn.1672-1926.2014.10.1499

综述与评述

致密油地质研究现状及展望

曹 喆[1,2],柳广弟[1,2],柳庄小雪[1,2],袁云峰[3],王 朋[1,2],牛子钺[1,2],张婧雅[1,2]
(1.中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;
2.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;
3.中国石油新疆油田公司勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 841000)

摘要:致密油已成为全球石油地质领域研究的一大热点,在中国的很多盆地也发现了致密油分布。通过对国内外大量文献资料的调研,总结致密油的地质研究现状。结果表明致密油聚集条件与常规油藏成藏有明显区别,可主要概括为 3 点:①广覆式分布的优质生油层;②大面积分布的致密储集层;③连续型分布的储集层与生油岩紧密接触的共生层系。致密储层孔隙系统主要为微米—纳米孔喉系统,并以纳米级孔喉为主。致密油聚集需要强大的源储剩余压差以克服纳米孔喉系统形成的强大的毛细管阻力。致密油聚集以初次运移为主,只发生短距离二次运移,这种运移具有非达西流特征。目前对致密油的充注、运移和聚集的研究还不够深入,致密储层非均质性及源储压差演化等因素对致密油聚集的影响尚未被揭示,这些问题都需要进一步深入探讨。对今后致密油的研究,建议关注致密储层微观孔喉结构分布的非均质性及对石油储集的有效性、石油充注机理及储层非均质性与致密油富集的耦合关系等科学问题。

关键词:致密油;聚集条件;致密储层特征;聚集机理;存在问题;展望
中图分类号:TE121 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-1926(2014)10-1499-10
引用格式:Cao Zhe,Liu Guangdi,Liu Zhuangxiaoxue,*et al*. Research status on tight oil and its prospects[J]. Natural Gas Geoscience,2014,25(10):1499-1508.[曹喆,柳广弟,柳庄小雪,等.致密油地质研究现状及展望[J].天然气地球科学,2014,25(10):1499-1508.]

0 引言

近年来,随着全球能源需求与供应紧张关系的不断加剧,世界各国都在不断加大能源勘探的投入与力度,而油气资源作为世界能源的重要组成部分更是得到了广泛关注。由于全球常规油气产量已不可避免的持续下降,具有较大资源潜力的非常规油气资源越来越受到重视并逐渐成为油气勘探和开发的新领域,如致密砂岩气、页岩气等非常规天然气的勘探使得美国天然气探明储量由 2002 年的 $4.96\times10^{12}m^3$ 增长到 2008 年的 $6.86\times10^{12}m^3$,增幅十分可观[1]。

伴随北美威利斯顿盆地 Bakken 致密油[2]、德克萨斯南部 Eagle Ford 致密油[3]、德克萨斯州中北部 Fort Worth 盆地 Barnett 致密油[4]的成功勘探开发,致密油已成为继北美页岩气之后又一战略性突破领域[5]。致密油被石油工业界誉为"黑金"[6],其成功开发成为 2011 年国际石油十大科技进展之一,成为当今全球石油地质学界研究的热点[7]。过去 10 多年中,美国油气产量中致密油所占的比例逐年剧增,改变了美国连续 24 年石油产量下滑的趋势。目前北美已在 19 个盆地中发现致密油,2011 年其致密油产量已达 $3\ 000\times10^4t$,而到 2020 年预计可达 1.5×10^8t[5,8]。

中国致密油分布也十分广泛,主要分布在鄂尔多斯盆地、四川盆地、松辽盆地、准噶尔盆地和吐哈

收稿日期:2014-04-20;**修回日期**:2014-06-23.
基金项目:国家自然科学基金面上项目"致密砂岩微米—纳米孔喉系统石油充注的有效性及其成藏效应"(编号:41472114)资助.
作者简介:曹喆(1987-),男,黑龙江大庆人,博士研究生,主要从事石油地质及油气成藏机理研究.**E-mail**:caozhe328@aliyun.com.
通讯作者:柳广弟(1961-),男,天津蓟县人,教授,博士生导师,主要从事石油地质及油气成藏机理研究.**E-mail**:lgd@cup.edu.cn.

盆地等，具有广阔的勘探前景(图 1)[9-11]。评价表明，中国包括致密砂岩和致密灰岩在内的低渗透石油有利勘探面积达 $18\times10^4 km^2$，地质资源量在(74～80)$\times10^8$t 之间，可采资源量在(13～14)$\times10^8$t 之间[11-12]。目前，在鄂尔多斯盆地三叠系延长组、准噶尔盆地二叠系芦草沟组、松辽盆地白垩系青山口组—泉头组、四川盆地中—下侏罗统和渤海湾盆地古近系沙河街组等致密油层系已开展了工业化生产，致密油已成为中国非常规石油中最现实的勘探领域之一[13]。

2011 年中国生产原油为 2.036 46$\times10^8$t，进口原油 2.54$\times10^8$t，进口占原油消费总量的 55.5%，原油缺口较大，急需发现更多石油储量。目前中国常规资源数量有限，只占总资源的 20%[14]，且常规油气资源面临产量递减、开发难度增大，开发成本高等诸多挑战。随着科技的进步，压裂、水平井、多分支井等技术已得到广泛应用，为致密油气勘探提供了技术保障，致使致密油将是石油勘探下一个现实领域。致密油的产量在未来中国油气产量中占有举足轻重的地位，非常规油气资源中致密油的开发将成为未来中国油气增储上产的主体。

致密油聚集条件和聚集机理与常规油藏明显不同。致密油储层孔喉细小，以纳米级孔喉系统为主，排替压力高，孔喉结构具有明显的复杂性和非均质性，这种非均质性造成了石油在同一致密储层不同部位富集程度的明显不同[15-18]。这种石油富集程度差异主要取决于致密砂岩储层孔喉分布与石油聚集动力之间的匹配关系。因此，研究致密砂岩储层孔喉结构、油气充注动力学条件，对认识致密油的分布特征及富集规律具有重要的科学和实际意义。

通过阅读国内外文献资料，分析目前已发现的典型致密油特征，从致密油概念、致密油研究现状、存在问题与展望 3 大方面对致密油做了详细阐述，以期为致密油的研究提供参考。

1 致密油定义

致密油概念最早出现在 20 世纪 40 年代，用于描述含油的致密砂岩[19]。2005 年，美国能源信息署(EIA)将致密油定义为页岩中采出的石油。Mille[20]和 Van der Hoevern[21]均提出轻质致密油(Light tight oil)的概念，还特别指出轻质致密油与油页岩(Oil Shale)在 API、黏度及萃取开采方式等方面的不同。油页岩指干酪根丰富的页岩，分解后有机质仍以固体状态存在，必须原地加热或地面采矿后加热产出，也称干酪根石油(Kerogen oil)或油页岩石油(Oil-shale oil)，属于人造石油。美国 EIA 在"年度能源展望 2012"报告中对致密油的定义是"利用水平钻井和多段水力压裂技术从页岩或其他低渗透性储层中开采出的石油"[22]。加拿大自然资源理事会(NRC)指出，轻质致密油(Light tight oil)是在渗透率很低的沉积岩储层中发现的石油，石油从岩石流向井筒的过程中受到非常致密的细粒岩石阻碍，需要借助包括水平井钻井和水力压裂在内的增产技术[23]。

Clarkson 等[24]将轻质致密油分为 3 类：①页岩油(Shale oil)——源岩内部的碳酸盐岩或碎屑岩夹层中，基质渗透率一般在(0.001～0.01)$\times10^{-3}\mu m^2$ 之间，与页岩气相对应，源岩就是储集层，国内学者一般将其称为页岩油(Shale oil)，典型油藏有 Duvemay 油藏、Muskwa 油藏等；② 致密油(Tight oil)——紧邻源岩的致密层中，与生油岩层系共生，油气经过短距离运移，储集层岩性主要包括致密砂岩、致密灰岩等，覆压基质渗透率在(0.01～0.1)$\times10^{-3}\mu m^2$ 之间，孔隙度小于 10%，单井无自然工业产能，与致密气相对应，源岩不作储集层，岩性为碳酸盐岩或碎屑岩，这也是国内学者所说的致密油(Tight oil)，典型油藏包括 Bakken 油藏、Montney 油藏等；③环边油(Halo oil)——基质渗透率高(大于 0.1$\times10^{-3}\mu m^2$)，环带状分布于常规储层外围，与常规储层之间没有明显界限，存在大孔缝优先渗透通道(产层)，岩性为碳酸盐岩或碎屑岩，典型油藏包括 Cardium 油藏和 Viking 油藏等。

当前一些国外能源机构和石油公司(如 CSUR 等)采用涵盖页岩油、致密油及环边油 3 类赋存空间的轻质致密油(LTO)概念，即指低渗透、需采取特殊工艺开采的岩层(页岩、砂岩及灰岩等)中的轻质油，国外主要石油公司在致密油勘探开发统计时，均采用此定义。

在中国，致密油(Tight oil)主要指由源岩排出，经过短距离的运移，再与源岩紧邻或者在源岩层系内的致密砂岩或碳酸盐岩中聚集的，单井无自然产能，需要借助包括水平井钻井和水力压裂在内的增产技术进行开发的原油[11,13,25]。本文采用此定义。

2 致密油地质研究现状

各国学者从不同角度对致密油进行了相关研究，概括起来主要包括致密油源岩特征、储层特征、致密油聚集条件以及致密油聚集机制等。

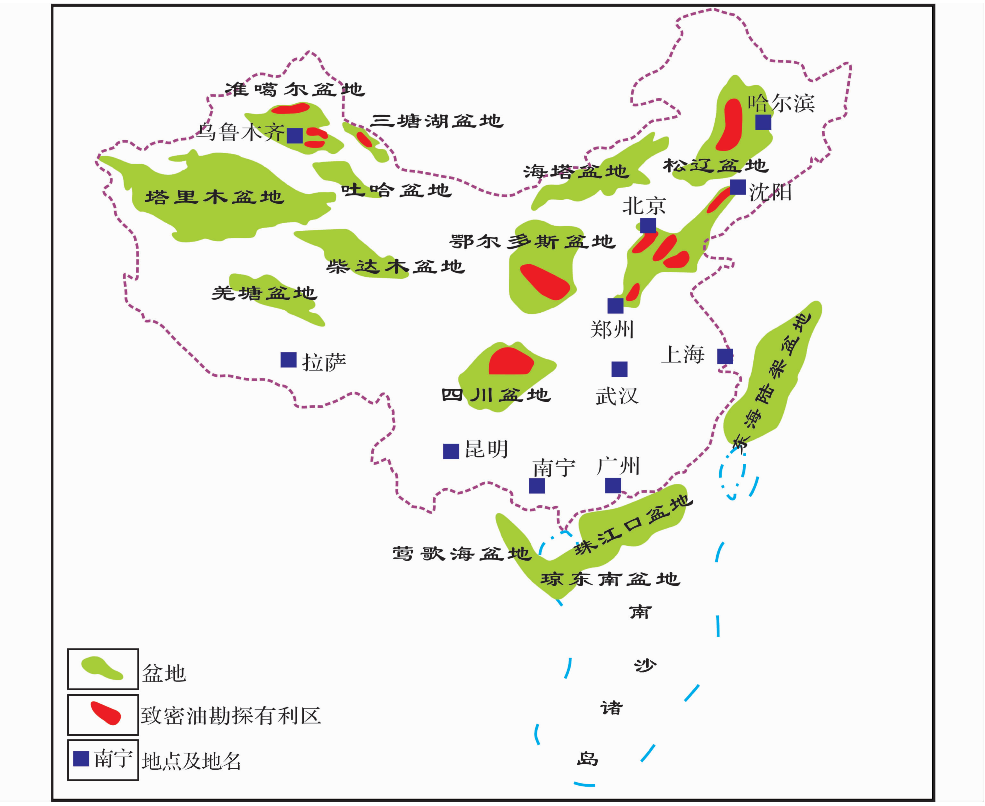

图 1 中国主要盆地致密油分布(据文献[13],有改动)

Fig. 1 Tight oil distribution of main basins in China(modified from reference[13])

2.1 致密油源岩特征

充足的油源条件是致密油聚集的前提。致密油烃源岩有机质丰度高,演化程度较高,生烃潜力较强,分布面积广。例如,北美威利斯顿盆地 Bakken 致密油紧邻储层上、下发育 2 套优质泥页岩,*TOC* 值为 10%～14%,R_O 值为 0.6%～0.9%,生烃能力强。美国德克萨斯南部 Eagle Ford 致密油发育优越的烃源条件,最大总厚度达 250m,*TOC* 值为 4.5%,R_O 值为 0.7%～1.3%。鄂尔多斯盆地上三叠统长 7 段为主的有效烃源岩面积为 8.5×10^4km^2,厚度为 20～110m,*TOC* 值为 2.0%～20%,R_O 值为 0.7%～1.1%。四川盆地侏罗系致密油有效烃源岩展布面积为 10.0×10^4km^2,厚度为 40～240m,*TOC* 值为 0.8%～3.0%,生烃潜量为 6.59～7.24mg/g,R_O 值介于 0.9%～1.4%之间,生烃强度较高[14]。这些烃源岩在一定条件下能生成大量的油气,与储层产生较大的压力差,为致密油聚集提供良好的物质条件与动力条件。

2.2 致密油储层特征

2.2.1 储层岩性与物性

致密油储层岩性一般为粉细砂岩,其中鄂尔多斯盆地延长组致密油有效储层主要为粉细砂岩,Bakken 组致密油有效储层主要为白云质粉砂岩和粉砂岩[2,6,26-28]。致密油储层物性差,孔隙度一般小于 10%～12%,渗透率小于 0.1×10^{-3}μm^2,如鄂尔多斯盆地延长组致密油储层孔隙度为 6.5%～8%,空气渗透率为(0.01～0.3)×10^{-3}μm^2[29];Bakken 致密砂岩孔隙度为 7%～12%,渗透率为(0.01～10)×10^{-3}μm^2[30-31]。

2.2.2 储层孔隙结构

储层孔隙结构特征是评价致密储集层储集性能的重要因素。目前对于致密砂岩储层微观孔隙结构的研究主要集中在储层微观孔隙结构的表征以及微观孔隙结构与储层宏观性质如渗透率等之间的关系等方面的研究[32-38];并探讨了成岩作用对微观孔隙结构的控制,除了压实、胶结等减孔作用和溶蚀等增孔效应外,黏土矿物以及微晶石英对孔隙结构的作用也有较多研究[39-41]。部分学者[42-46]指出,呈环边状产出的黏土矿物如绿泥石、伊利石等对抑制砂岩原生孔隙中石英次生加大的生长从而对深埋藏储层中异常高原生粒间孔起保护作用,并能在一定程度上改善孔喉的分选。同时也有部分学者[47-50]认为孔

隙充填状的黏土矿物能减少孔喉半径,从而使孔隙度和渗透率降低。

总体来说,致密油储层非均质性强,低渗透率特性主要受喉道分布控制,以纳米级孔喉系统为主,局部发育毫米—微米级孔隙,不同微观尺度孔喉结构复杂多样。国外9个盆地不同碎屑粒级储层的研究表明,常规砂岩储层与致密砂岩储层的喉道直径分布范围,分别为大于2μm、在2～0.03μm之间;烷烃、沥青质、环状结构烃类、石蜡族及甲烷等有机物分子的测试结果表明,其直径分布范围为0.01(沥青质)～0.000 38μm(甲烷),从而为不同储层孔喉的分布特征及其比较、石油充注的临界孔喉条件与细粒源岩作为储层的潜力等研究提供了理论基础[35,37,51-52]。邹才能等[53]利用高分辨率场发射扫描电子显微镜、纳米CT等仪器在中国致密油储集层中发现,致密砂岩喉道细小,孔喉直径一般为纳米级,局部发育微米—毫米级孔隙,孔喉直径大多为100～900nm。鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩储层中值孔喉直径主要分布于50～200nm之间[54]。吉木萨尔芦草沟组致密油粉砂岩储层孔喉直径主要分布于90～800nm之间(图2)。相对于孔隙度与渗透率,孔喉尺寸大小和分布是决定储集层储集能力和渗流能力更直接的参数[35,55],确定喉道的大小和分布是研究岩石孔隙结构的核心问题[56-57]。

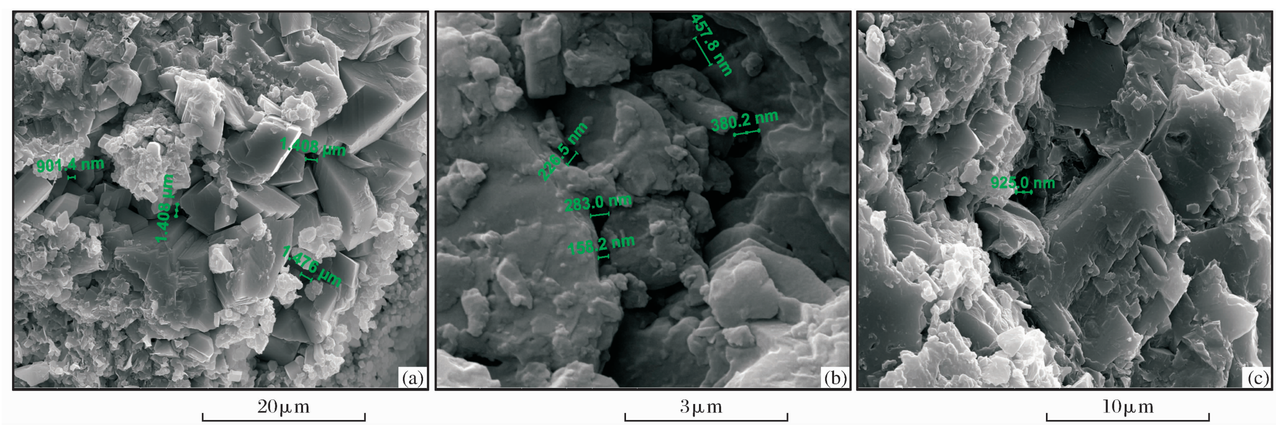

图2 准噶尔盆地芦草沟组致密油储层微观孔喉结构特征

Fig.2 Microscopic pore structure characteristics of tight oil reservoirsin Lucaogou Formation,Junggar Basin

(a)J31井,2 718.33m,白云质粉砂岩,微米级孔喉;(b)J31井,2 861.23m,粉砂岩,纳米级孔喉;(c)J30井,4 053.78m,白云岩,纳米级孔喉

2.3 致密油宏观聚集条件

国内外学者[11,14,53,58]研究表明,致密油主要聚集条件为大面积分布的优质烃源岩与致密储层在空间上紧密接触。这种聚集条件可归纳为3个方面:①广覆式分布的优质烃源岩层;②大面积分布的致密储集层;③连续型分布的致密储集层与烃源岩紧密接触的共生层系。美国Bakken致密油就是大面积分布的致密白云质粉砂岩夹于上、下2套厚度在5～12m之间的高丰度源岩之间(图3)[59-62],而鄂尔多斯盆地延长组长7段厚20～110m的广覆式优质烃源岩上、下则分布着大面积展布的致密砂岩储层[14]。在这种源储配置关系下,优质烃源岩生成的油气可直接充注进入源岩内呈夹层状或临源的泥质粉砂岩、粉砂岩、砂岩和灰岩等致密储层,以游离烃和吸附烃的形式赋存于纳米级孔隙或微裂缝中,形成可供商业开采的致密油[30,61-63]。因此烃源岩和储集层之间的空间接触关系、岩性组合、充注通道对致密砂岩油藏的形成具有重要作用[13,30-31,53-54,64]。

2.4 致密油聚集机制

石油成藏过程是石油驱替储层孔隙中的地层水,从而导致储层中含油饱和度不断增长的过程。油气的运移取决于运移通道及其周围的毛细管力、浮力及水动力或异常流体压力的平衡关系[65-68]。许多学者从不同角度初步讨论了致密砂岩油的聚集特征与机理。研究表明,致密油聚集过程已突破了过去人们对常规油气成藏过程的认识,表现为典型的非浮力聚集[14]。在低渗致密储层中,由于孔隙较小、喉道极细,喉道处毛细管阻力较大,因此储层中油水难以靠自然浮力发生重力分异。由于致密储层孔隙中油珠所受的浮力远小于喉道产生的毛细管阻力[69],油水难以发生自然重力分异,因此浮力不是致密油运移的主要动力。致密油的运移动力以烃源岩超压为主[70],主要受生烃增压或欠压实等控制,其中生烃增压是导致烃源岩超压的重要因素,烃源

岩在大量生烃过程中可产生兆帕级的超压[71];运移阻力主要为毛细管压力,当致密砂岩中的流体压力差小于毛细管阻力时,石油便发生滞留聚集作用,二者耦合控制油气聚集过程[14,72-78]。低渗透或致密砂岩岩心石油聚集模拟实验表明,低渗透或致密砂岩含油饱和度的增长过程比较复杂,受运移动力、岩石物性及原油性质等多种因素影响,其最终含油饱和度普遍较低[70,79]。

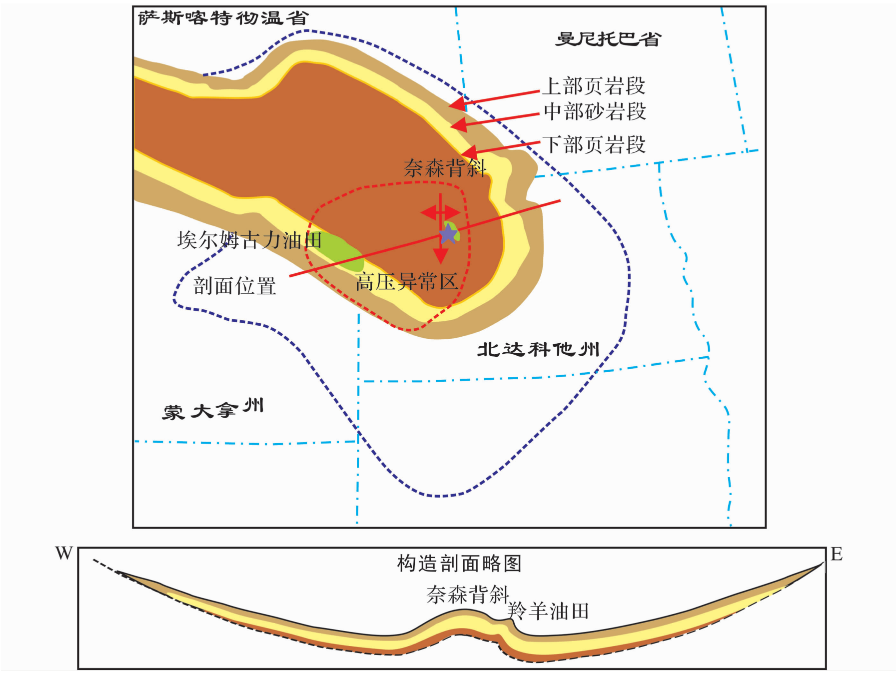

图 3 威利斯顿盆地巴肯组分布特征[5]

Fig. 3 Distribution of Bakken Formation, Williston Basin[5]

许多学者[79-86]研究了低渗透或致密砂岩中的油水渗流特征,并发现低渗透砂岩中的流体运移以低速非达西渗流为主,存在着明显的启动压力梯度。产生非线性渗流的机理比较复杂,国内外学者[79,86-87]对此也进行了大量的研究工作,认为产生非线性渗流主要受多孔介质特征、岩石物性、充注动力与流体流变学性质,液固作用等因素的综合影响。油气进入储集层后无法在自身重力作用下分异,一般以初次运移为主或仅有短距离的二次运移[14,33,35,70,88-90]。

3 致密油勘探研究存在问题

从上述有关致密油的勘探研究现状可以看出,目前关于致密油的研究主要集中在烃源岩特征、致密储层的孔喉结构、致密油聚集动力的定性研究以及致密油聚集的宏观条件研究方面。值得注意的是,致密砂岩油与页岩油及页岩气不同,它不是自生自储的,而是从源岩排出后充注进来的。对于页岩油、页岩气甚至致密砂岩气来讲,任何孔径的孔喉系统都是油气储集的有效空间[15,91-95];而对致密砂岩油来讲,只有充注动力能够克服其产生的毛细管力的那部分孔喉系统才是石油聚集的有效空间,更小的孔喉即使数量很多,对致密砂岩油的聚集也是无效的。

因此,目前对致密砂岩油的研究还存在以下问题:①对致密砂岩物性、孔喉分布研究较多,但对致密油储层中石油在微米—纳米孔喉系统中的赋存状态及其分布特征研究较少;②致密砂岩储层的孔喉直径一般为 50～900nm,分布范围很宽,但这些纳米级孔喉对石油的聚集是否都是有效的,即石油充注和聚集孔喉下限及微米—纳米孔喉系统对致密油聚集的有效性问题缺乏研究。

4 致密油研究展望

通过上述对研究现状和存在问题的分析,认为今后对致密砂岩油的研究应关注以下几个问题。

(1)致密砂岩储层微米—纳米孔喉系统石油分布的非均质性:重点应研究不同尺度的孔喉系统在致密储层中的比例;致密油藏中石油在储层微米—纳米孔喉系统中的赋存状态及其分布特征。

(2)致密砂岩储层孔喉系统石油储集的有效性:

综合开展源储配置关系、石油充注动力、致密储层微米—纳米孔喉结构3方面的研究，以建立不同源储配置条件下，不同充注动力所能突破的孔喉尺度的关系模型，形成源储配置、充注动力与有效聚集空间的孔喉下限关系图版。

(3)石油充注机理、致密储层非均质性和致密油富集的耦合关系：重点研究充注动力的地质成因及其演化、致密储层的有效聚集空间，二者耦合结果用于对致密储层石油富集进行评价和预测。

关于上述研究关注点，已引起部分学者的重视，对致密砂岩储层的石油是否一定富集于纳米级孔隙内提出了疑问[96]，这些科学问题还有待进一步的探索。虽然一般认为超压是驱动石油向致密砂岩充注运移的主要动力，但是关于源储剩余压差的形成演化及其对致密砂岩石油充注的影响等方面的研究尚不够深入。另外，由于致密储层固有的低孔低渗、孔喉结构复杂、毛细管阻力大、油水关系复杂及含油饱和度变化大等特征使得目前对于低渗透储层的石油充注、运移和聚集特征与机理未得到深入研究，从而影响了致密油藏的进一步勘探开发。今后致密储层孔喉系统的非均质性、微纳米孔隙对于致密油聚集的有效性、不同充注动力下石油充注的差异性等将成为今后致密油聚集研究重要内容。

可以展望，随着纳米—CT技术、高显微尺度扫描电镜等技术手段的应用，人们已经能够对致密储层的微观孔隙结构进行较为直观的观测；非常规油气聚集模拟系统的引进使得致密砂岩油充注模拟实验得以实现，与压力预测和模拟技术相结合可望对致密砂岩油聚集机理的认识取得进一步加深，为致密砂岩油富集区的预测奠定理论基础。

5 结论

(1)致密油的概念尚无统一定论，中国主要采用如下概念：致密油主要指由源岩排出，经过短距离的运移，分布在与源岩紧邻或者在源岩层系内的致密砂岩或碳酸盐岩中的，单井无自然产能，需要借助包括水平井钻井和水力压裂在内的增产技术进行开发的原油。

(2)目前对致密油研究主要集中在3个方面：致密油聚集条件、致密储层微观孔喉结构特征及致密油聚集机制。致密油聚集条件与常规油藏有明显区别，可主要概括为3点：①广覆式分布的优质生油层；②大面积分布的致密储集层；③连续型分布的储集层与生油岩紧密接触的共生层系。致密储层岩性细，物性差，孔隙系统主要为微米—纳米孔喉系统，并以纳米级孔喉为主。致密油聚集需要强大的源储剩余压差以克服纳米孔喉系统形成的强大的毛细管阻力，致密油聚集以初次运移为主，只发生短距离二次运移，这种运移具有非达西流特征。

(3)目前对致密油的充注、运移渗流和聚集的研究还不够深入，没有揭示致密储层非均质性及源储压差演化等因素对致密油聚集的影响。将来对致密油的研究应关注致密储层微观孔喉结构分布的非均质性及对石油储集的有效性、石油充注机理及储层非均质性与致密油富集的耦合关系等科学问题。

参考文献(References)：

[1] British Petroleum Company. BP Statistical Review of World Energy 2011[R]. London：British Petroleum Company，2011.

[2] Miller B，Paneitz J，Mullen M. The Successful Application of Acompartmental Completion Technique Used to Isolate Multiple Hydraulic Fracture Treatments in Horizontal Bakken Shale Wells in North Dakota[R]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition，21-24 September，Denver，Colorado，USA. SPE 116469，2008.

[3] Mullen J. Petrophysical Characterization of the Eagle Ford Shale in South Texas[R]. Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference，19-21 October，Calgary，Alberta，Canada. SPE138145，2010.

[4] Hill R J，Zhang E，Katz B J，*et al*. Modeling of gas generation from the Barnett shale，Fort Worth Basin，Texas[J]. AAPG Bulletin，2007，91(4)：501-521.

[5] USGS. Assessment of Undiscovered oil Resources in the Devonian-Mississippian Bakken Formation，Williston Basin Province，Montana and North Dakota[R]. USGS Fact Sheet，2008.

[6] Bruce J. Bakken Black Gold[N]. Leader-Poster，2007-12-10(6).

[7] Sun Zandong，Jia Chengzao，Li Xiangfang，*et al*. Unconventional Oil & Gas Exploration and Development[M]. Beijing：Petroleum Industry Press，2011：1-150.[孙赞东，贾承造，李相方，等.非常规油气勘探与开发(上册)[M].北京：石油工业出版社，2011：1-150.]

[8] Zou Caineng，Tao Shizhen，Hou Lianhua，*et al*. Unconventional Petroleum Geology[M]. Beijing：Geologcal Publishing House，2011.[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.]

[9] Zou Caineng，Tao Shizhen，Yuan Xuanjun，*et al*. Global importance of "continuous" petroleum reservoirs：Accumulation，distribution and evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development，2009，36(6)：669-682.[邹才能，陶士振，袁选俊，等."连续型"油气藏及其在全球的重要性：成藏、分布与评价[J].石油勘探与开发，2009，36(6)：669-682.]

[10] Tao Shizhen，Zou Caineng，Gao Xiaohui，*et al*. Migration dy-

namic, accumulation mechanism and distribution law of oil and gas in different types[C]. Chinese Geophysical Society Symposium, 2011: 72-73. [陶士振,邹才能,高晓辉,等. 不同类型油气运移动力、聚集机理与分布规律[C]. 中国地球物理学会第二十七届年会论文集, 2011: 72-73.]

[11] 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): 121-136. [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): 121-136.]

[12] Zhao Jingzhou. Conception, classification and resource potential of unconventional hydrocarbon[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3): 393-406. [赵靖舟. 非常规油气有关概念、分类及资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 393-406.]

[13] 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. [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.]

[14] 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): 173-186. [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): 173-186.]

[15] Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1851-1852.

[16] Sun S, Shu L, Zeng Y, *et al*. Porosity-permeability and textural heterogeneity of reservoir sandstones from the Lower Cretaceous Putaohua Member of Yaojia Formation, Weixing Oilfield, Songliao Basin, northeast China[J]. Marine and petroleum geology, 2007, 24(2): 109-127.

[17] Wang Guicheng, Wang Yujun. Heterogeneity of Chang 8 reservoir in Yingwang Oilfield, Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2010, 25(5): 16-19, 24. [王桂成,王羽君. 鄂尔多斯盆地英旺油田长8储层非均质性研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2010, 25(5): 16-19, 24.]

[18] Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing, *et al*. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: A new pattern for large tight sand oilfields in the Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2012, 33(6): 811-827. [赵靖舟,白玉彬,曹青,等. 鄂尔多斯盆地准连续型低渗透—致密砂岩大油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 811-827.]

[19] Ledingham G W, Santigo Pool, Kern County, California: Geologicalnote[J]. AAPG Bulletin, 1947, 31(11): 2063-2067.

[20] Mille R M. The Myth of the Oil Crisis: Overcoming the Challenges of Depletion, Geopolitics, and Global Warming[M]. Santa Barbara: Greenwood Press, 2008.

[21] Van der Hoeven M. World Energy Outlook Special Report on Unconventional Gas: Golden Rules for a Golden Age of Gas[R]. IEA, 2012.

[22] US Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2012, with Projections to 2035[R]. United States: Energy Information Administration, 2012.

[23] National Energy Board. Tight Oil Development in the Western Canada Sedimentary Basin[M]. Calgary: National Energy Board, 2011.

[24] Clarkson C R, Jensen J L, Pedemen P K. Production Analysis of Western Canadian Unconventional Light Oil Plays[R]. Canadian Unconventional Resources Conference, 15-17 November, Alberta, Canada. SPE 149005, 2011.

[25] Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Jianzhong, *et al*. Unconventional petroleum resources assessment: Progress and future prospects[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 238-246. [邱振,邹才能,李建忠,等. 非常规油气资源评价进展与未来展望[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2): 238-246.]

[26] Webster R L. Petroleumsource rocks and stratigraphy of Bakken Formation in North Dakota (in 1984 AAPG Rocky Mountain Section meeting, Anonymous)[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(7): 593.

[27] Chen Z H, Osadetz K G, Jiang C Q, *et al*. Spatial variation of Bakken or Lodgepoleoils in the Canadian Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(6): 829-85.

[28] James M. Oil production potential of the North Dakota Bakken[J]. Oil and Gas Journal, 2012: 1-12.

[29] 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. [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.]

[30] Sonnenberg S A, Pramudito A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee Field, Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1127-1153.

[31] Nordeng S H. The Bakken petroleum system: An example of a continuous petroleum accumulation[J]. North Dakota Department of Mineral Resources Newsletter, 2009, 36(1): 19-22.

[32] Sun W, Qu Z, Tang G. Characterization of water injection in low Permeability rock using Sandstone micro-models[J]. Journal of Petroleum Technology, 2004, 56(5): 71-72.

[33] Ma Mingfu, Li Wei, Liu Yacun. Pore structure characteristics analysis of the oilfield in north Melut Basin, Sudan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 121-124. [马明福,李薇,刘亚村. 苏丹Melut盆地北部油田储集层孔隙结构特征分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 121-124.]

[34] Zhou Cancan, Liu Tangyan, Ma Zaitian, *et al*. Evaluation of pore structure using sphere-cylinder model[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 92-96. [周灿灿,刘堂晏,马在田,等. 应用球管模型评价岩石孔隙结构[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 92-

96.]

[35] Nelson P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(3): 329-340.

[36] Nabawy B S, Géraud Y, Rochette P, *et al*. Pore-throat characterization in highly porous and permeable sandstones[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(6): 719-739.

[37] Capm W. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales: Discussion[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(8): 1443-1447.

[38] Clarkson C R, Jensen J L, Pedersen P K, *et al*. Innovative methods for flow-unit and pore-structure analyses in a tight siltstone and shale gas reservoir[J]. AAPG bulletin, 2012, 96(2): 355-374.

[39] Anand V, Hirasaki G J. Diffusional Coupling between Micro and Macroporosity for NMR relaxation in sandstones and grainstones[J]. Petrophysics, 2007, 48(4): 289-307.

[40] Desbois G, Urai J L, Kukla P A. Morphology of the pore space in claystones-evidence from BIB/FIB ion beam sectioning and Cryo-SEM observations[J]. Earth, 2009, 4: 15-22.

[41] Miao Jianyu, Qu Hongjun, Gao Shengli. Reseach on the shandstone pore structure of Upper Paleozoic at Yanchang Gas Field in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2009, 39(5): 814-820. [苗建宇，屈红军，高胜利. 鄂尔多斯盆地延长气区上古生界砂岩孔隙结构[J]. 西北大学学报：自然科学版，2009，39(5)：814-820.]

[42] Larese R E, Pittman E D, Heald M T. Effects of Diagenesis on porosity development, Tuscaloosa sandstone, Louisiana: Abstract[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(4): 498-498.

[43] Dixon S A, Summers D M, Surdam R C. Diagenesis and preservation of porosity in Norphlet Formation (Upper Jurassic), southern Alabama[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(6): 707-728.

[44] Ehrenberg S N. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating: Example from the Norwegian Continental Shelf[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(7): 1260-1286.

[45] Huang Sijing, Xie Lianwen, Zhang Meng, *et al*. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2004, 31(3): 273-281. [黄思静，谢连文，张萌，等. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J]. 成都理工大学学报：自然科学版，2004，31(3)：273-281.]

[46] Berger A, Gier S, Krois P. Porosity-preserving chlorite cements in shallow-marine volcaniclastic sandstones: Evidence from Cretaceous sandstones of the Sawan Gasfield, Pakistan[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(5): 595-615.

[47] Porter K W, Weimer R J. Diagenetic sequence related to structural history and petroleum accumulation: Spindle field, Colorado[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(12): 2543-2560.

[48] Nadeau P H. The Sleipner effect: A subtle relationship between the distribution of diagenetic clay, reservoir porosity, permeability, and water saturation[J]. Clay Minerals, 2000, 35(1): 185-200.

[49] Pay M D, Astin T R, Parker A. Clay mineral distribution in the Devonian-Carboniferous sandstones of the Clair Field, west of Shetland, and its significance for reservoir quality[J]. Clay Minerals, 2000, 35(1): 151-162.

[50] Islam M A. Diagenesis and reservoir quality of Bhuban sandstones (Neogene), Titas Gas Field, Bengal Basin, Bangladesh[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(1): 89-100.

[51] Philipp P, Kuhn R di Primio, Ronald H, *et al*. Three-dimensional modeling study of the low-permeability petroleum system of the Bakken Formation[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(10): 1867-1897.

[52] Slatt R M, O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017-2030.

[53] 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. [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.]

[54] 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, 2013, 34(1): 1-11. [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.]

[55] Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, *et al*. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864. [邹才能，朱如凯，白斌，等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报，2011，27(6)：1857-1864.]

[56] Wardlaw N C. Quantitative determination of pore structure and application to fluid displacement in reservoir rocks[M]// North Sea Oil and Gas Reservoirs-Ⅱ. Berlin: Springer, 1990: 229-243.

[57] Askarinezhad R. A new statistical approach to pore/throat size distribution of porous media using capillary pressure distribution concept[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 75(1): 100-104.

[58] Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, *et al*. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 324-331. [邹才能，陶士振，袁选俊，等. 连续型油气藏形成条件与分布特征[J]. 石油学报，2009，30(3)：324-331.]

[59] Smith M G, Bustin R M. Late Devonian and early Mississippian Bakken and Exshaw black shale source rocks, Western Canada Sedimentary Basin: A sequence stratigraphic interpretation[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(7): 940-960.

[60] Johnston D I, Henderson C M. Disrupted conodont bedding plane assemblages, Upper Bakken Formation (Lower Mississippian) from the subsurface of Western Canada[J]. Journal

Information,2005,79(4):774-789.

[61] Kuhn P P,Di Primio R,Hill R,*et al*. Three-dimensional modeling study of the low-permeability petroleum system of the Bakken Formation[J]. AAPG Bulletin,2012,96(10):1867-1897.

[62] Egenhoff S O,Fishman N S. Traces in the dark-sedimentary processes and facies gradients in the upper shale member of the Upper Devonian-Lower Mississipian Bakken Formation, Williston Basin,North Dakota,U. S. A[J]. Journal of Sedimentary Research,2013,83:803-824.

[63] Meissner F F. Petroleum Geology of the Bakken Formation Williston Basin,North Dakota and Montana[C]//The Economic Geology of the Williston Basin,Montana Geological Society. 1978 Williston Basin Symposium,1978:207-227.

[64] Inan S,Yalin M N,Mann U. Expulsion of oil from petroleum source rocks:Inferences from pyrolysis of samples of unconventional grain size[J]. Organic Geochemistry,1998,29(1):45-61.

[65] Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bulletin,1953,37(8):1954-2026.

[66] Berg R R. Capillary pressures in stratigraphic Traps[J]. AAPG Bulletin,1975,59(6):939-956.

[67] Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment[J]. AAPG Bulletin,1979,63(5):723-760.

[68] England W A,Mackenzie A S,Mann D M,*et al*. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of the Geological Society,1987,144(2):327-347.

[69] Wu Kai,Luo Lirong,Kong Qingfen,*et al*. Pool-forming dynamic characteristics of extra-low permeability and tight reservoir in Yanchang Formation,Mesozoic,Ordos Basin[J]. Petrochemical Industry Application,2013,32(8):37-44.[吴凯,罗丽荣,孔庆芬,等.鄂尔多斯盆地中生界延长组特低渗致密砂岩储层成藏动力学特征[J].石油化工应用,2013,32(8):37-44.]

[70] Li Mingcheng,Li Jian."Dynamic trap":A main action of hydrocarbon charging to form accumulations in low permeability-tight reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica,2010,31(5):718-722.[李明诚,李剑."动力圈闭"——低渗透致密储层中油气充注成藏的主要作用[J].石油学报,2010,31(5):718-722.]

[71] Swarbrick R E,Osborne M J. Mechanisms that generate abnormal pressures:An overview[M]//Law B E,Ulmishek G F,Slavin V I. AAPG Memoir 70:Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments. Tulsa:AAPG,1998.

[72] Law B E,Dickinson W W. Conceptual model of origin of abnormally pressured gas accumulations in low permeability reservoirs[J]. AAPG Bulletin,1985,69(8):1295-1304.

[73] Spencer C W. Hydrocarbon generation as a mechanism for overpressing in Rocky Mountain Region[J]. AAPG Bulletin,1987,71(4):368-388.

[74] Zhang Jinliang,Zhang Jingong. Basic characteristics of deep basin gas traps[J]. Journal of Xi′an Petroleum Institute:Natural Science Edition,2001,16(1):1-7.[张金亮,张金功.深盆气藏的主要特征及形成机制[J].西安石油学院学报:自然科学版,2001,16(1):1-7.]

[75] Law B E. Basin-centered gas systems[J]. AAPG Bulletin,2002,86(11):1891-1919.

[76] Wu Heyong,Liang Xiaodong,Xiang Caifu,*et al*. Characteristics of petroleum accumulation in syncline of the Songliao Basin and discussion on its accumulation mechanism[J]. Science China:Earth Science,2007,37(2):185-191.[吴河勇,梁晓东,向才富,等.松辽盆地向斜油藏特征及成藏机理探讨[J].中国科学:地球科学,2007,37(2):185-191.]

[77] Zhang Jinchuan,Liu Lifang,Tang Xun,*et al*. Abnormal pressure in the source-contacting gas reservoir in western Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers,2008,15(2):147-154.[张金川,刘丽芳,唐玄,等.川西坳陷根缘气藏异常地层压力[J].地学前缘,2008,15(2):147-154.]

[78] Liu Xinshe,Xi Shengli,Huang Daojun,*et al*. Dynamic conditions of Mesozoic petroleum secondary migration,Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development,2008,35(2):143-147.[刘新社,席胜利,黄道军,等.鄂尔多斯盆地中生界石油二次运移动力条件[J].石油勘探与开发,2008,35(2):143-147.]

[79] Zeng J H,Cheng S W,Kong X,*et al*. Non-Darcy flow in oil accumulation(oil displacing water)and relative permeability and oil saturation characteristics of low-permeability sandstones[J]. Petroleum Science,2010,7(1):20-30.

[80] Pascal J P,Pascal H. Non-linear effects on some unsteady non-Darcian flows through porous media[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics,1997,32(2):361-376.

[81] Huang Yanzhang. The Mechanism of Low Permeability Reservoir[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1998.[黄延章.低渗透油层渗流机理[M].北京:石油工业出版社,1998.]

[82] Wang X,Thauvin F,Mohanty K K. Non-Darcy flow through anisotropic porous media[J]. Chemical Engineering Science,1999,54(12):1859-1869.

[83] Cello G,Tondi E,Micarelli L,*et al*. Fault zone fabrics and geofluid properties as indicators of rock deformation modes [J]. Journal of Geodynamic,2001,32(4/5):543-565.

[84] Merrikh A A,Mohamad A A. Non-Darcy effects in buoyancy driven flows in an enclosure filled with vertically layered porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2002,45(21):4305-4313.

[85] Fadili A,Tardy P M,Pearson J R. A 3D filtration law for power-law fluids in heterogeneous porous media[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics,2002,106(2/3):121-146.

[86] Zhu Zhiqiang,Zeng Jianhui,Wang Jiangjun,*et al*. An experimental study on flow characteristics of oil migration in low-permeability sandstone under condition of oil accumulation [J]. Geoscience,2009,23(4):761-766.[朱志强,曾溅辉,王建君,等.油气成藏条件下低渗透砂岩石油运移的渗流特征实验研究[J].现代地质,2009,23(4):761-766.]

[87] Zhu Zhiqiang,Zeng Jianhui,Wu Heyong,*et al*. An experimental study on oil migration and accumulation in low-permeabili-

ty sandstone[J]. Oil and Gas Geology,2007,28(2):229-234. [朱志强,曾溅辉,吴河勇,等. 低渗透砂岩石油运移及成藏特征模拟实验[J]. 石油与天然气地质,2007,28(2):229-234.]

[88] Hou Qijun, Wei Zhaosheng, Zhao Zhanyin, *et al*. Deep basin reservoir in Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,33(4):405-411. [侯启军,魏兆胜,赵占银,等. 松辽盆地的深盆油藏[J]. 石油勘探与开发,2006,33(4):405-411.]

[89] Wang Xuejun, Wang Zhixin, Chen Jie, *et al*. Petroleum migration and accumulation of the Yanchang Formation in the Zhenbei Oilfield, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2011,3(3):299-306. [王学军,王志欣,陈杰,等. 鄂尔多斯盆地镇北油田延长组石油运聚机理[J]. 石油勘探与开发,2011,3(3):299-306.]

[90] Zou Caineng, Tao Shizhen, Yang Zhi, *et al*. New advance in unconventional petroleum exploration and research in China [J]. Bulletin of Minerology, Petrology and Geochemisty, 2012,31(4):312-322. [邹才能,陶士振,杨智,等. 中国非常规油气勘探与研究新进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2012,31(4):312-322.]

[91] Nelson J S, Simmons E C. The quantification of diffusive hydrocarbon losses through cap rocks of natural gas reservoirs-A reevaluation: Discussion(1)[J]. AAPG Bulletin,1992,76(11):1839-1841.

[92] Ross D, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology,2009,26(6):916-927.

[93] Curtis M E, Amobrose R J, Sondergeld C H, *et al*. Structural Characterization of Gas Shales on the Micro-and Nano-Scales [C]//Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2010.

[94] Ambrose R J, Hartman R C, Diaz-Campos M, *et al*. Shale gas-in-place calculations part I: New pore-scale considerations[J]. SPE Journal,2012,17(1):219-229.

[95] Liu G, Sun M, Zhao Z, *et al*. Characteristics and accumulation mechanism of tight sandstone gas reservoirs in the Upper Paleozoic, northern Ordos Basin, China[J]. Petroleum Science, 2013,10(1):442-449.

[96] Yang Jiangchao. Tight oil exploration should focus on three scientific problems[N]. Sinopec Newspaper,2014-02-10. [杨建超. 致密油勘探应关注三个科学问题[N]. 中国石化报,2014-02-10.]

Research Status on Tight Oil and Its Prospects

CAO Zhe[1,2], LIU Guang-di[1,2], LIU Zhuang-xiao-xue[1,2], YUAN Yun-feng[3], WANG Peng[1,2], NIU Zi-cheng[1,2], ZHANG Jing-ya[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing* 102249, *China*; 2. *College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing* 102249, *China*; 3. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Xinjiang Oil Field Company, Kelamayi* 841000, *China*)

Abstract: Tight oil has become a hot topic in the field of global petroleum geology research. A lot of tight oils have been found in the Chinese basins. Current exploration of tight oil was summarized based on a large number of research literature. The accumulation condition of tight oil is very different from conventional oil, which can mainly be summarized in three aspects: (1) high quality source rock with moderate maturation and wide distribution; (2) wide distribution of tight reservoir; (3) coexistence of source rock and reservoir. Pore systems of tight oil reservoir are mainly microns-nanometer, and dominated by nanoscale pore throat. Tight oil reservoir requires a powerful remaining pressure difference between source rock and reservoir to overcome the capillary resistance caused by nanopores. Tight oil is dominated by primary migration and sometimes has secondary migration with short distance, which has non-Darcy flow characteristics. The charging, migration and accumulation of tight oil have not been studied very well currently. Tight oil reservoir heterogeneity and the evolution of source and reservoir pressure difference effect on the tight oil accumulation have not been revealed. All these issues need to be further studied. Future research should focus on the heterogeneity of tight oil micro-pore structure and its effectiveness on oil accumulation, oil charging mechanism, and the coupling relationship between reservoir heterogeneity and oil accumulation.

Key words: Tight oil; Hydrocarbon accumulation conditions; Tight reservoir characteristics; Accumulation mechanism; Problems; Prospects