

doi: 10.12029/gc20200104

方欣欣, 郭迎春, 王朋, 王鹏威, 郭继刚. 2020. 致密油成藏研究进展与待解决的重要科学问题[J]. 中国地质, 47(1):43-56.

Fang Xinxin, Guo Yingchun, Wang Peng, Wang Pengwei, Guo Jigang. 2020. The progress of research on tight oil accumulation and several scientific issues requiring further study[J]. Geology in China, 47(1): 43-56(in Chinese with English abstract).

致密油成藏研究进展与待解决的重要科学问题

方欣欣^{1,2}, 郭迎春^{1,2}, 王朋³, 王鹏威⁴, 郭继刚⁵

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 4. 中石化勘探开发研究院, 北京 100083;

5. 自然资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034)

摘要:致密油是当前非常规油气勘探中的热点和最现实的领域之一, 总结成藏地质研究进展并明确需要深入研究的科学问题对于完善致密油地质理论具有重要意义。当前致密油地质研究进展表现在以下几个方面: ①总结了致密油三大形成条件和六项基本特征及中国陆相致密油与美国海相致密油的区别; ②利用先进和高精度的储层分析测试技术对致密油储层孔-喉-缝网络体系进行了表征, 并初步研究了致密油的赋存状态; ③从充注动力、充注下限、运聚机理和富集模式等方面对致密油成藏机理进行了深入研究。在对研究现状总结的基础上提出当前致密油成藏研究中存在的重要科学问题有: ①致密油储层微米尺度非均质性全息定量表征及其对致密油运聚的影响; ②致密油源储结构的成因机制及其对致密油成藏、富集的控制作用; ③致密油赋存状态的影响因素、转化条件及不同赋存状态/空间的相对贡献; ④混合沉积与致密油形成的内在联系; ⑤致密油成藏要素的综合研究与成藏机理及成藏全过程的研究。这些问题的解决将是对致密油地质研究的重要补充。

关键词:致密油; 储层表征; 成藏机理; 非均质性; 源储结构; 赋存状态; 混合沉积; 油气勘查工程

中图分类号: TE122 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)01-0043-14

The progress of research on tight oil accumulation and several scientific issues requiring further study

FANG Xinxin^{1,2}, GUO Yingchun^{1,2}, WANG Peng³, WANG Pengwei⁴, GUO Jigang⁵

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 100083, China; 5. Strategic Research Center of Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Beijing 100034, China)

Abstract: Unconventional tight oil reservoirs, a lightspot in the present unconventional oil and gas exploration, have emerged as a

收稿日期: 2019-12-01; 改回日期: 2020-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(41602152)资助。

作者简介: 方欣欣, 女, 1981年生, 博士, 助理研究员, 主要从事储层地质与油气成藏研究工作; E-mail: freestarxin@163.com。

通讯作者: 郭迎春, 男, 1982年生, 博士, 副研究员, 主要从事非常规油气地质与常规油气成藏研究工作; E-mail: cugcupgych@163.com。

significant source of oil supply in the world. The geological research, theoretical promoting, and present significant issues concerning tight oil will supply and perfect geological theory on unconventional hydrocarbon. Currently, the development of geological research on tight oil can be concluded as follows: ① Three main formation conditions and six basic characteristics about tight oil as well as the differences between continental tight oil in China and marine tight oil in the USA have been summarized. ② Pore-throat-fracture network in the tight-oil reservoir has been characterized with advanced and high-precision analysis and testing technology, the formation of tight oil being the primary research object. ③ The accumulation mechanism of tight oil has been deeply studied, which includes charge dynamics, the threshold of charging, migration mechanism, accumulating model, etc. Based on the research status about tight oil, this paper puts forward several important questions about tight oil: ① Holographic quantitative heterogeneity characterization on the tight oil reservoir at a micro-nano scale and its effect on tight oil migration and accumulation; ② the genesis of source-reservoir configuration and its control on tight oil accumulation and enrichment; ③ the influence factors and transformation conditions of the occurrence of tight oil, and the relative contribution of different kinds of occurrence status and space; ④ the internal relationship between the mixed sedimentary system in saline lacustrine basins and the formation of tight oil; ⑤ a comprehensive study of the tight oil accumulation factors, and the accumulation mechanism and its whole process. The answers of these questions will play a significant role in geological research on tight oil.

Key words: tight oil; reservoir characterization; accumulation mechanism; heterogeneity; source-reservoir configuration; occurrence state; mixed sedimentary system; oil-gas exploration engineering

About the first author: FANG Xinxin, female, born in 1981, doctor, assistant researcher, mainly engages in the study of reservoir geology and hydrocarbon accumulation; E-mail: freestarxin@163.com.

About the corresponding author: GUO Yingchun, male, born in 1982, doctor, associate researcher, mainly engages in the study of unconventional oil & gas geology and hydrocarbon accumulation; E-mail: cugcupgych@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41602152).

1 引 言

致密油是当前美国原油产量飙升的主要驱动力,2018年致密油产量 3.1×10^8 t (EIA, 2018), 占总产量的60%。根据中国石油第4次油气资源评价, 全国致密油地质资源量 125×10^8 t, 可采资源量 13×10^8 t, 探明储量约 3×10^8 t (孙龙德等, 2019)。截至2018年底, 中国陆相致密油已建成产能 315.5×10^4 t, 2018年年产量约 105×10^4 t (朱如凯等, 2019), 致密油已成为中国非常规石油中最现实的领域之一, 是中国新增石油可采储量和产量的主力军。据预测, 中国致密油和页岩油的探明可采地质储量和产量有望快速上升, 到2020年年产量可达5000万t (廖晓蓉等, 2013)。目前致密油地质理论落后于勘探实践, 亟需构建完备的致密油理论指导其勘探开发, 多位专家针对致密油或非非常规油气指出了存在的关键科学问题及发展趋势 (王震亮, 2013; 贾承造等, 2014; 曾溅辉等, 2014), 但这些稍偏宏观指导, 本文在总结致密油成藏研究进展的基础上, 结合笔者致密油科研实践, 提出针对致密油成藏研究较为细致的科学问题, 是对前人提出的科学问题的补

充, 以期起到一定的指导作用。

2 致密油定义

北美地区的相关机构和媒体发布的报道中所提到的致密油或页岩油, 并没有太重视其二者的区别, 二者含义基本一致。这从有关北美地区致密油/页岩油的报告或文章中得到印证, 不论报告或文章中是叫“致密油”还是叫“页岩油”, 通常列举的具体实例几乎是一致的, 如 Bakken、Eagle Ford、Monterey、Niobara、Cardium、Montney、Eashaw 等 (Clarkson and Pedersen, 2011; NEB, 2011; Madden and Vossoughi, 2013; EIA, 2018)。目前北美地区流行的致密油概念中存在着“轻质(light)”的定语, 以示和常规油在比重上的区别。究其原因, 以目前技术能在致密类储层中实现经济开发的只能是其中油质相对轻的部分, 另一种原因可能为, 致密油的富集是石油在源储压差下, 被充注入紧邻烃源岩的致密储层中, 这种富集方式使得重质油更难在同等压力条件下充注入致密储层, 仅有轻质油才能富集。实际上, 致密油和页岩油有着本质的区别 (周庆凡和杨国丰, 2012; 赵文智等, 2020), 尽管不同机

构给出的定义不尽相同(表1),但其中都提到或者强调了这一区别。页岩油是源内聚集的,属源储一体(如中国东部沧东凹陷、东营凹陷和泌阳凹陷的页岩油勘探);而致密油是自烃源岩排出后运移至邻接的致密储层中,属源储邻接,近源聚集,这也是本文所指的致密油。

从北美和中国关于致密油的定义中可以看出,北美的广义致密油包括三类,即页岩油、致密油、裙边油。中国比较注重致密油和页岩油的区别,狭义的致密油根据其储层(成因)类型可分为湖相碳酸盐岩致密油、深湖水下三角洲砂岩致密油和深湖重力流砂岩致密油(贾承造等,2012),或者致密砂岩油、致密碳酸盐岩油和致密混积岩油(邹才能等,2015;郭迎春等,2018)。

3 国内外致密油勘探开发现状

3.1 美国致密油勘探开发现状

自北美 Bakken 地区借鉴页岩气技术成功开辟致密油新领域之后,致密油已成为北美页岩气之后的又一战略性突破领域(Aguilera, 2013)。美国已在 Williston、Gulf Coast、Fort Worth 等近 20 个盆地,发现了 Bakken、Eagle Ford、Permian 及 Barnett 等多

套致密砂岩、灰岩油产层,致密油技术可采资源量为 $45.3 \times 10^8 \text{t}$,已探明可采储量 $4.6 \times 10^8 \text{t}$,揭示了致密油勘探开发的良好前景(EIA, 2018)。美国致密油主要产自威利斯顿盆地的巴肯(Bakken)区带,墨西哥湾盆地西部的伊格尔福特(Eagle Ford)区带,二叠系盆地的沃尔夫坎普(Wolfcamp)、博恩斯普林(Bone Spring)和斯普拉贝里(Sparberry)区带,丹佛盆地的奈厄布拉勒(Niobrara)区带,以及阿纳达克盆地的伍德福德(Woodford)区带(图1)。

3.2 中国致密油勘探开发现状

鄂尔多斯盆地延长组率先建成了国内第一个工业化生产的成熟致密油区(2019年陇东致密油示范区年产量达到100万t),四川盆地侏罗系的致密储层已有超过150口累积产量超过万吨的油井,是国内现实的接替致密油区(邓燕等,2017)。此外,准噶尔盆地准东平地泉组、渤海湾盆地沙河街组、松辽盆地青山口组、柴达木盆地古近一新近系、酒西坳陷白垩系、三塘湖盆地二叠系以及吐哈盆地侏罗系,均具备形成致密油的潜力,为中国致密油的后续发展提供了有力支撑。截至2018年底,中国陆相致密油已建成产能 $315.5 \times 10^4 \text{t}$,2018年年产量约 $105 \times 10^4 \text{t}$ (朱如凯等,2019)。

表1 国内外关于致密油的定义

Table 1 The definitions of tight oil both in China and abroad

机构/作者	定义
NPC(National Petroleum Council 美国石油委员会),2011	致密油蕴藏在那些埋藏很深、不易开采的渗透率极低的沉积岩层中。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
NEB(National Energy Board 加拿大国家能源委员会),2011	致密油的范围要比页岩油大,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。致密油划分为两个主要类型:存在作为源岩的页岩中的石油资源,从源岩中排出并运移至附近或远处的致密砂岩、粉砂岩、灰岩或白云岩等地层中的石油资源
Clarkson and Pedersen, 2011	将非常规轻质油(Unconventional Light Oil,指的是密度在 32°API (865 kg/m^3) 到 42°API (816 kg/m^3) 之间)分为3类:(1)裙边油(Halo Oil):源储不是一体,基质渗透率相对较大($> 0.1 \text{ md}$),储层可以是碎屑岩和碳酸盐岩,例如 Cardium 和 Viking。(2)致密油(Tight Oil):源储不是一体,基质渗透率较低($< 0.1 \text{ md}$),储层可以是碎屑岩和碳酸盐岩,与致密气相对应,例如 Bakken (Viewfield)和 Montney。(3)页岩油(Shale Oil):源储一体,基质渗透率很低,有机质含量较高,与页岩气相对应,例如 Duvernay 和 Muskwa
EIA (Energy Information Administration 美国能源信息署),2018	致密油这个名词不具有特别的技术、科学或者地质涵义。它通常是指产自特低渗透的页岩、砂岩、碳酸盐岩地层中的石油资源
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(笔者在文中是将页岩油和致密油分开讨论的)
赵政璋和杜金虎,2012 邹才能等,2013	致密油是指储集在覆压基质渗透率 $\leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集层中的石油;单井一般无自然产能或者低于工业油流下限,但在一定经济条件和技术措施(通常包括水平井、多级压裂等)下可获得工业石油产量
中国国家标准 GB/T34906-2017《致密油地质评价方法》	储集在覆压基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密砂岩、致密碳酸盐岩或混积岩等致密储集层中的石油资源

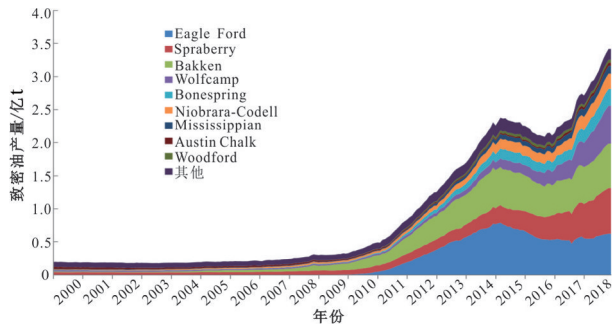


图1 美国致密油产量变化(EIA, 2019)

Fig.1 Tight oil output growth in the USA (EIA, 2019)

4 国内外致密油成藏研究进展

4.1 致密油成藏要素与地质特征

目前国内外分析致密油形成地质条件(或称为成藏要素)的实例较多(梁狄刚等, 2011; 匡立春等, 2012; Colborne and Bustin, 2013; Fic and Pedersen, 2013; Kathel and Mohanty, 2013; Kumar, 2013; 白玉彬等, 2013; 付锁堂等, 2013; 汪少勇等, 2013; 杨华等, 2013)。通常, 致密油区具有三大形成条件和六项基本特征。三大形成条件为: ①大面积分布的致密储层; ②广覆式分布成熟度适中的腐泥型优质烃源岩; ③源储广覆式直接接触(存在源储分离、源距离运移后成藏的例子, 如三塘湖盆地条湖组二段致密油(梁浩等, 2014)、加拿大Saskatchewan的Bakken组中段致密油(Clarkson and Pedersen, 2011)。六项基本特征为: ①圈闭界限不明显; ②非浮力聚集, 水动力效应不明显, 油水分布复杂; ③异常压力, 裂缝高产, 油质轻; ④非达西渗流为主; ⑤短距离运移为主; ⑥纳米级孔喉连通体系为主(邹才能等, 2013; 杜金虎等, 2014)。

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(表2)。对比分析认为造成中国陆相致密油与北美海相致密油成藏差异的根本原因主要包括两个方面: 构造背景与沉积条件、烃源岩热演化程度(胡素云等, 2019)。

4.2 致密油储层微观孔隙结构与致密油赋存状态

孔隙结构精细评价是致密储层研究的热点。目前对非常规储层孔隙结构的研究, 主要包括孔喉

大小、形态、分布、连通性和油气赋存状态等方面。与常规砂岩储层相比, 非常规致密储层具有孔喉尺寸小、非均质性强、孔隙结构复杂的特征。因此, 大量具有更高分辨率与表征精度的技术被用来研究致密储层孔隙结构。这些技术可分为二维平面精细刻画、三维立体空间表征、定量评价三种类型。平面刻画类包括铸体薄片、场发射扫描电镜、环境扫描电镜、透射电镜、原子力显微镜等; 三维表征类包括工业CT、微米CT、纳米CT、激光共聚焦扫描电镜等; 定量评价类主要有高压/恒速压汞、气体吸附(CO_2 和 N_2)、核磁共振、小角散射等(蒋裕强等, 2014; 朱如凯等, 2016; 吴松涛等, 2018)。需要指出的是, 各种测试技术有着自己独特的功能和精度范围(表3)。如通过场发射扫描电子显微镜观察岩石表面的纳米尺度形貌特征, 利用透射电镜观察不同矿物晶体内部的晶格位错、微裂缝、微孔等特征, 借助原子力显微镜观察岩石中纳米级孔隙和裂缝的模拟三维的形态和连通情况。如气体吸附法探测下限为0.35 nm, 压汞法探测上限为1 mm, 前者可以有效反映纳米孔隙的分布, 后者可以反映宏孔甚至微裂缝的信息。压汞法与气体吸附法联合应用可以探测微孔到宏孔范围的孔隙分布情况(田华等, 2012; 黄振凯等, 2013)。但是在这两种技术探测范围交叉的区间内常会出现不一致的结果, Hinai et al. (2014)在应用气体吸附法和压汞法的同时又辅以核磁共振技术, 三者联合克服了各自的缺陷, 取得了完整的孔隙分布频率。朱如凯等(2016)指出致密储层孔隙结构表征技术的发展要注意: ①静态表征与动态演化相结合, 实现孔隙结构的全面表征; ②加强宏观尺度研究, 密切联系可动流体评价; ③应加强与增产改造等现场应用的结合。

4.2.1 储层微观孔隙结构特征

国内外目前对非常规油气储层微观孔隙结构的表征多集中在页岩气和页岩油, 它们和致密油储层微观孔隙结构有明显的不同。首先是泥页岩和砂岩、碳酸盐岩在矿物组成上有着明显区别, 其次页岩油气储层受热演化程度影响较大, 而致密油气储层受成岩作用影响较大。在此以鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩油储层和准噶尔盆地二叠系致密云质岩油储层作为典型例子对其微观孔隙结构特征做一总结(图2)。鄂尔多斯盆地延长组致密储层

表2 中国与美国致密油地质特征与形成条件对比(据胡素云等,2019;孙龙德等,2019)
Table 2 Geological characteristics and formation conditions of tight oil in China and the USA
(after Hu Suyun et al., 2019; Sun Longde et al., 2019)

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	Ro/%	物性
美国	构造稳定	以海相沉积为主	1×10 ⁴ ~7×10 ⁴	以海相页岩为主	2%~20% TOC值比较高	0.6~1.7 成熟度较高	物性相对较好,孔隙度较高,连通性较好
中国	晚期构造活动强烈	以陆相沉积为主	几百至几万平方千米	湖相泥页岩	0.4%~16.0% TOC值变化大	0.4~1.4 成熟度较低	物性较差,孔隙度偏低,非均质性较强,油层薄
地区	储集层特征			流体特征			
	分布稳定,连续性好	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
美国		5~20	5~13	以超压为主	1.35~1.78	0.75~0.85	几十
中国	分均质性强	10~80	3~12	压力系数偏低	0.70~1.80	0.75~0.92	几百至几千

中大孔、中孔、小孔、微孔及纳米孔均发育,成因类型有粒间孔、溶蚀孔、晶间孔及微裂缝,研究发现孔径分布范围、孔隙类型和主体孔隙类型受储层致密程度的控制作用明显(冯胜斌等,2013),不同的砂体沉积成因应该是最根本原因(冉冶等,2016)。准噶尔盆地二叠系芦草沟组致密云质岩油储层中也是多级孔隙均存在,孔隙类型主要为石英、白云石、长石及伊利石等细小矿物晶间孔、晶间溶孔及微缝,不同地区或层位之间的差别更多地受沉积环境

和沉积湖水盐度影响(匡立春等,2012;宋永等,2017),不同岩石类型经历了不同的成岩作用过程,发育了不同类型的储集空间(操应长等,2019)。尽管统计长7段与芦草沟组孔隙度相差不大,但长7段渗透率明显大于芦草沟组,这是由于长7段具有比芦草沟组更大的孔喉半径(图3)。致密油储层中纳米级孔隙对油的产出有无贡献尚无定论,但北美地区成功开发的致密油基本上由微米级孔隙所贡献的(Williams,2013)。致密油储层中微裂缝的发

表3 致密储层微观孔隙结构测试表征技术方法及优势与局限性

Table 3 Characterization methods of tight-oil reservoirs' micro pore structure and their advantages and limitations

技术方法	主体孔径测量范围	优点	局限性
图像分析技术 (扫描电镜等)	取决于制样方法及设备最高分辨率,普通扫描电镜为微米级,场发射和环境扫描电镜为纳米级—微米级	(1)直观;(2)孔隙分类;(3)FIB-SEM等技术具三维成像能力。	(1)样品制备要求较高;(2)微区分析使其代表性降低,需系统取样和多视域观察。
气体(CO ₂ 和N ₂)吸附法	前者0~2 nm,后者2~100 nm	(1)可测至相当于分子直径的孔径;(2)可得比表面积、表面分形维数与孔径分布等多信息。	(1)样品前处理较复杂;(2)分析结果依赖于孔隙形态模型;(3)不能进行大尺寸样品分析。
压汞测试	几十纳米~毫米级	(1)样品预处理较简单;(2)对大于50 nm的孔隙表征较好。	(1)高压下会造成人为裂缝所致误差(特别是块样);(2)计算用到的 Washburn 方程假设样品孔隙为光滑圆柱状连通孔,复杂孔隙形态测试误差较大。
小角散射技术	1~200 nm	(1)快速,无损,样品预处理简单;(2)能在不同温压条件下测试。	适用于孔隙丰富、孔径分布规则样品,孔隙形态复杂的样品需要做较多的假定。
计算机断层成像	100 nm—微米级	(1)连续扫描,提高数据代表性;(2)可进行三维成像。	NanoCT使用样品为微米级,制备复杂。
核磁共振技术	介孔和大孔	(1)结果不受岩石骨架成分影响;(2)区分储层中水、油及沥青等方面应用前景广阔。	受测试环境、仪器参数及样品中微孔隙、顺磁性物质、流体类型等多因素影响。

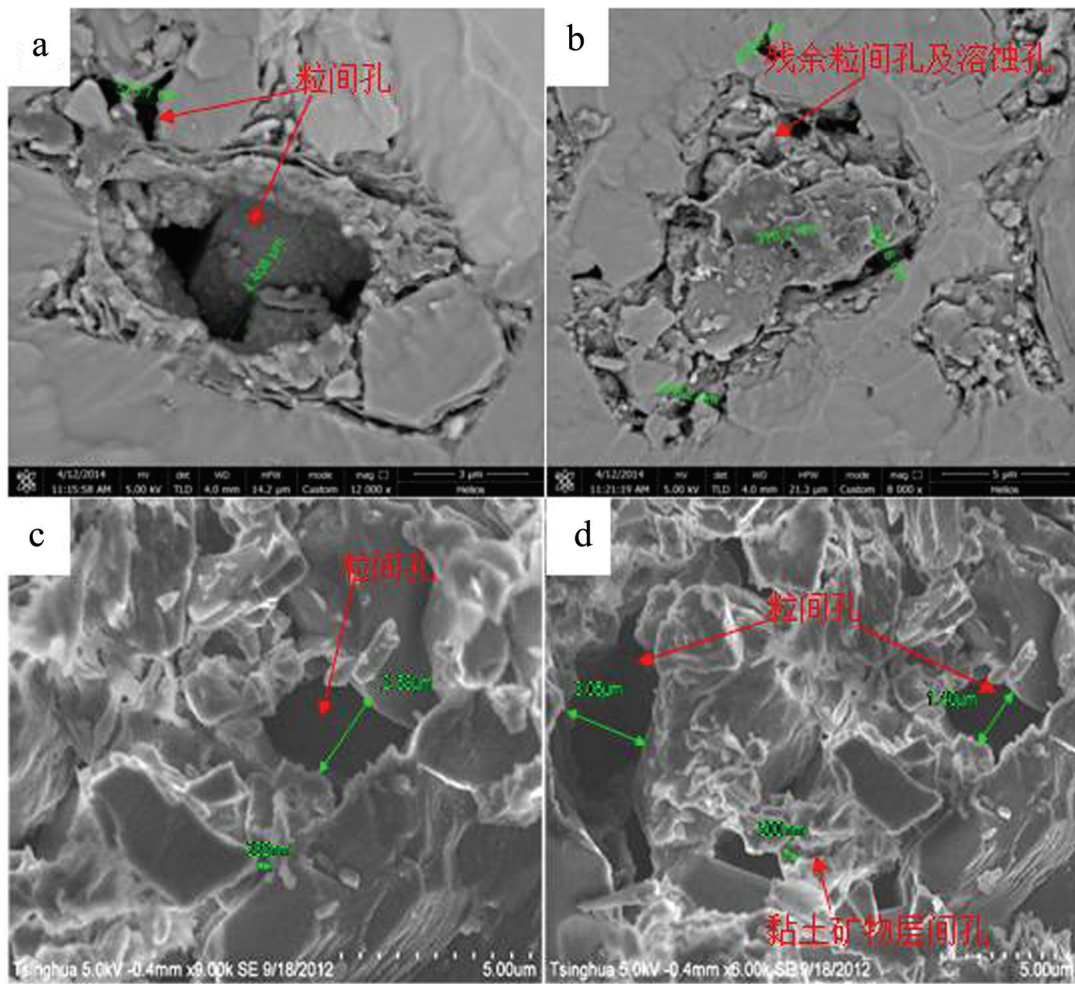


图2 致密油储层微观孔隙发育特征

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷J174井(a:3124.7 m;b:3118.3 m)二叠系芦草沟组致密泥云岩油储层孔隙发育特征与鄂尔多斯盆地Y3井(c:1896.84 m;d:1893.78 m)和三叠系延长组长7段致密砂岩油储层孔隙发育特征

Fig.2 Characteristics of micro pore structure of tight-oil reservoirs

Pore characteristics of tight argillaceous reservoir in Permian Lucaogou Formation, well J174, Jimsar Sag, Junggar Basin (a:3124.7 m;b:3118.3 m) and tight sandstone reservoir in Triassic Chang-7 member, well Y3, Ordos Basin (c:1896.84 m;d:1893.78 m)

育规律及其与孔、喉构成的网络结构还没有得到完美的表征。

4.2.2 致密油赋存状态

牛小兵等(2013)应用核磁共振技术研究发现鄂尔多斯盆地延长组致密储层中石油从大孔到纳米孔隙连续性赋存且含油饱满,随着距离源岩的增加,石油只在大至中孔隙中赋存,纳米孔隙不再含油,分析认为充注动力的逐渐降低控制了石油在具多尺度孔隙的致密砂岩储层中差异性赋存。朱如凯等(2013)应用环境扫描电镜鉴别出延长组致密油4种赋存状态:圆球状、发育于粒间孔内的短柱状集合体、均匀覆盖于颗粒表面的薄膜状、黏结于裂

缝两壁。致密油除了在纳米级孔隙中以吸附态存在外(靳军等,2018),更多地呈游离态存在于致密储层的孔缝之中(类似于致密砂岩气),页岩油可以溶解-吸附态赋存于有机质内部和表面,干酪根溶解-吸附作用是主要机制,也可以游离态赋存于泥页岩的孔、缝系统中。页岩油赋存状态在成藏演化过程中甚至在开采过程中由于环境条件的改变都可以发生转化。如利用数值模拟和敏感性分析,发现Bakken上下两套页岩对主力产层段(中Bakken段)贡献了12%~52%,平均贡献了40%。上下两套页岩中油呈吸附状态,在开采过程中发生了解析和扩散,即从吸附态到游离态的转化(Kumar et al.,

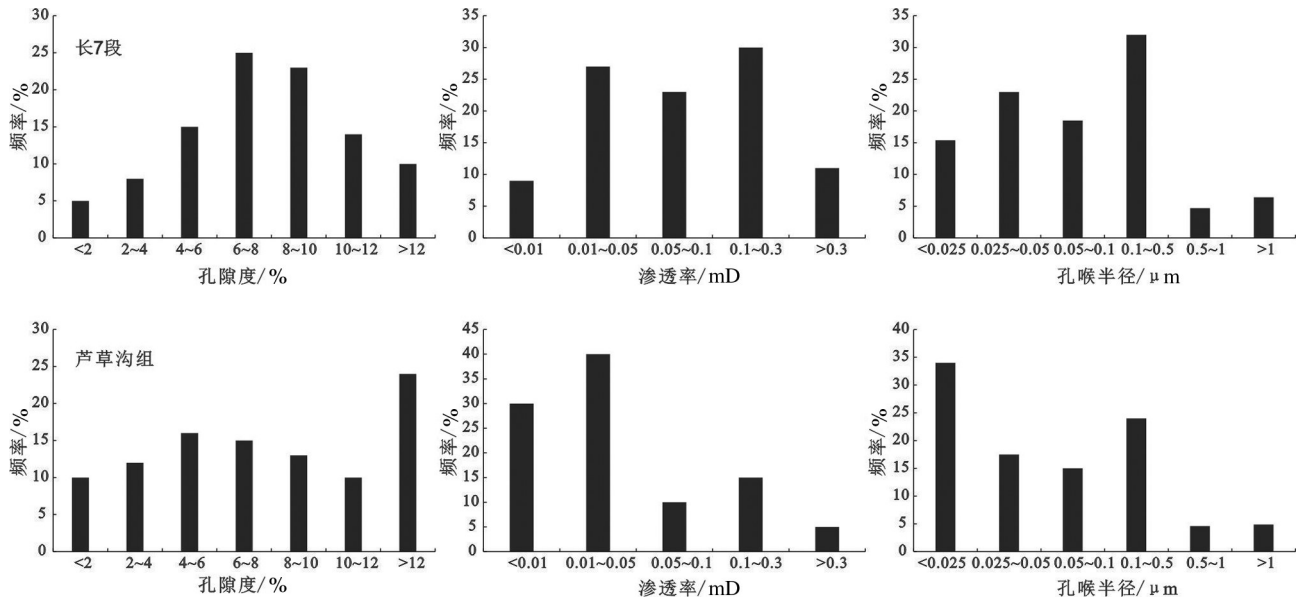


图3 长7段与芦草沟组物性统计特征及孔喉半径分布频率

Fig.3 Statistical characteristics of physical properties and distribution frequency of pore throat radius of Chang-7 and Lucaogou Formation

2013),类似于页岩气的解吸过程。

4.3 致密油成藏机理

4.3.1 充注动力

石油充注主要由流体力学作用控制,从力学角度看,充注动力(源储压差或剩余压力)、毛管阻力、黏滞力以及惯性力是致密油充注过程中的流体力学影响因素,其中,黏滞力和惯性力分别因致密油黏度低和排油速度低而忽略不计。致密储层内的石油以超压充注为主,无一定圈闭形态,石油聚集成藏的范围为超压传递到达的边界,超压梯度大,油充注的距离和圈闭滞留的范围就大,含油饱和度也相对高(冯志强等,2011;郭彦如等,2012;张凤奇等,2012;郭秋麟等,2013)。这种运移充注方式可称为“动力圈闭”(李明诚和李剑,2010),既表示油被超压充注到低渗透致密储层中的重要成藏作用,也反映出低渗透致密储层能够滞留油气、聚集成藏的三维空间范围。

4.3.2 充注下限

邹才能等(2011)将束缚水膜厚度与最大沥青分子直径(4 nm)相加推算得出致密油储集层孔径下限为54 nm。崔景伟等(2013)根据残留含油量和介孔平均孔径的统计关系,认为鄂尔多斯盆地延长组长七段致密油充注下限约为15 nm,对应孔隙度约为2%。实际上,充注下限是与成藏时的充注动

力密切相关的,张洪等(2014)基于充注力学平衡关系得出鄂尔多斯盆地延长组、四川盆地中下侏罗统、美国威利斯顿盆地 Bakken 组致密油储集层内部充注孔喉下限分别为39.45 nm、37.20 nm和52.32 nm,对应的渗透率分别为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.0094 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.0169 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,这也说明了某些致密油气定义中关于物性条件的限定是不具有成藏内涵的(郭迎春等,2013)。郭迎春等(2018)利用数值模拟技术和充注动力学平衡关系,得到了成藏演化过程中充注动力和充注下限的变化过程,并且认识到源储组合配置方式和内部构成特征是影响致密油富集程度的主要因素。

4.3.3 运聚机理

构造低部位和斜坡是致密油主要成藏区域,石油运移距离短,超压运移所波及的空间范围内形成了致密油。目前对致密油充注路径和致密期有着不同的认识,如罗晓容等(2010)和郭彦如等(2012)认为鄂尔多斯盆地延长组储层致密后石油沿早期运移形成的亲油性的路径网络和优势输导通道,发生运移、聚集成藏,并不是弥漫式充注运移。而邓秀芹等(2009)分析认为延长组早期的油气充注规模有限,未能抑制成岩作用进行,生排烃高峰期储层并未变得致密。Kuhn et al.(2012)和郭迎春等(2018)应用多种渗流运移方法模拟了致密油藏形

成过程,模拟结果显示侵入逾渗更好地反映了致密油成藏及分布。但也存在远距离运聚成藏形成致密油的实例,如 Newman et al. (2013) 研究认为 Parshall 油田的 Bakken 致密油是晚白垩世异常热事件之前正常地温梯度下烃源岩成熟生成的油和后期异常热事件过程中生成的油的混合,异常热事件之前原油发生了明显的运移,后期的热液矿化堵塞了孔隙使得地层致密(图4)。加拿大 Saskatchewan 的 Bakken 组上下两段的页岩尚未成熟, Bakken 中段的致密油是从其南部的美国 North Dakota 和 Montana 地区 Bakken 烃源岩生成运移至此的 (Clarkson and Pedersen, 2011)。

4.3.4 富集模式

一般地,平面上有效烃源岩排烃范围控制了致密油的分布,纵向上具有近源聚集的特点;裂缝带、高孔渗区、脆性矿物区等“甜点”区控制了致密油高产区的分布,其富集模式由“优相-低势-近源”控制(庞雄奇等, 2014)。应用热解资料和 TOC 数据可以预测致密油甜点,如 Bakken 中段甜点层段通常具有以下特征:含油饱和度指数大于 100 mg HC/g TOC (Oil Saturation Index (OSI): $S_i / TOC \times 100$), 下 Bakken 段等效镜质体反射率为 0.9~1.0、氢指数在 100 mg HC/g TOC 左右(表4)(Maende and Weldon, 2013)。致密油甜点通常是常规圈闭和非常规圈闭

(源岩层和致密层)的复合体(Williams, 2013), 这种甜点成因模式在致密砂岩气的研究中早已引起了重视(Camp, 2008; Cant, 2011)。

5 致密油地质研究存在的重要科学问题

5.1 致密油储层微纳米尺度非均质性

烃类的运移通道和赋存分布是由各种尺度下的三维非均质性决定的。储层非均质性由沉积、成岩和构造共同控制,宏观表现在岩性、岩相及沉积微相的各向异性(Morad et al., 2010),其产生的本质原因是矿物的组成、排列方式、接触关系、成岩变化、岩石表面润湿性,以及微裂缝、孔隙、喉道的大小、分布、配置及连通性等,在微纳米尺度的空间变化。在非常规油气储层非均质性研究中,除了微米-纳米级孔喉结构,微裂缝的成因、类型及其非常规油气成藏、富集、赋存的影响是另一研究重点(Aydin, 2000; Barbiera, 2012; Gasparrinia and Sassi, 2014),它们共同构成了复杂的孔-喉-缝网络体系。为研究致密油储层非均质性及其对油富集的控制作用,要充分交叉利用先进的实验测试技术,结合露头 and 岩心观察以及沉积和成岩数值模拟技术,全息定量表征多尺度非均质性,刻画微纳米尺度的孔隙网络及孔喉配置关系,总结致密油储层微

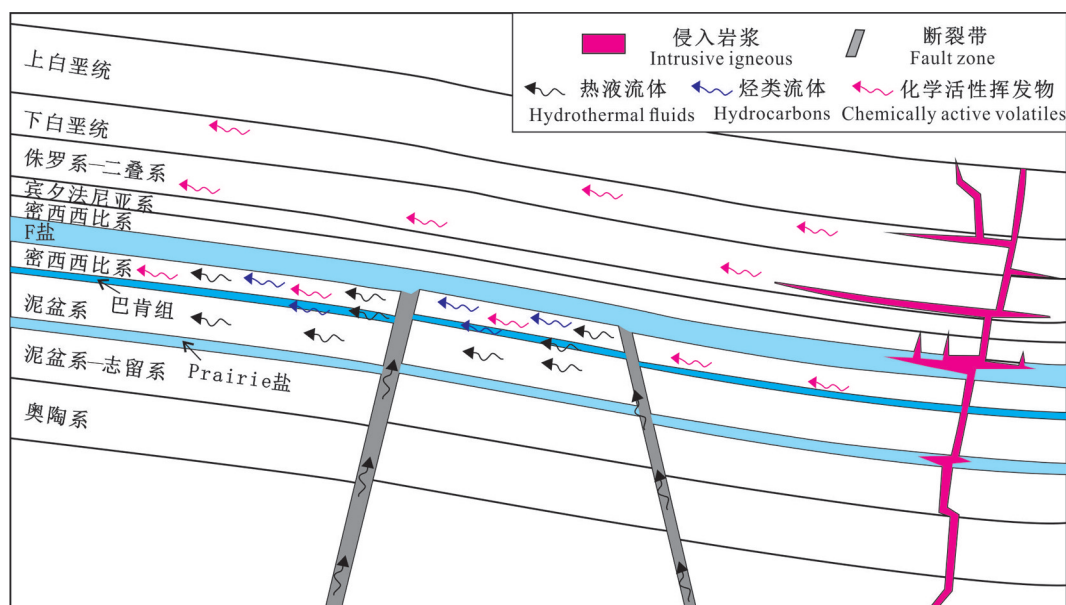


图4 美国 Parshall 油田受岩浆活动影响而形成的 R_o 变化及致密油运聚特征(Newman et al., 2013)

Fig.4 Schematic diagram illustrating tight oil migration affected by igneous activity in the Parshall fields(after Newman et al., 2013)

表4 Bakken致密油产油井与非产油井热解参数对比(据Maende and Weldon, 2013)

Table 4 Comparisons between pyrolysis and TOC data of oil productive wells and one non-oil productive well in Bakken tight oil play (after Maende and Weldon, 2013)

井类别	井名	甜点层段/m	TOC/%	OSI	S ₂ (mg HC/g rock)	下 Bakken 段 HI	下 Bakken 段 等效 Ro
油流井	Graham USA #1~15	3162~3162.6	0.28~0.46 (0.35)	54~146 (88)	0.33~0.86 (0.56)	—	—
	Catherine E. Peck #2	3282.7~3289.7	0.57~0.93 (0.82)	89~149 (132)	0.50~1.25 (0.94)	47~180 (108)	0.81~0.98 (0.92)
	Hagen #1~13	3158.6~3161.7	0.22~0.49 (0.35)	100~129 (115)	0.30~1.08 (0.61)	80~134 (108)	0.83~1.07 (1.01)
	Long 1~01H	2785.3~2795.5	0.22~0.76 (0.47)	374~791 (630)	0.46~2.89 (1.36)	464~827 (712)	0.51~0.74 (0.61)
非产油井	Dobrinski # 18~44	—	0.10~0.80 (0.29)	0~298 (44)	0~1.91 (0.13)	20~607 (200)	0.31~0.62 (0.48)

纳米尺度的非均质性对致密油运聚的影响。

5.2 致密油优势源储结构

源储共生关系是致密油形成最重要的地质条件之一,主要受沉积特征及其演化的控制。从致密油储层的三种主要成因类型可以发现,不管哪一种致密油赋存与分布环境,都存在着多种源储组合样式(如由裂缝发育形成的源储一体式、下生上储式、上生下储式、“三明治”式等),甚至这些样式在一个地区、一个层位普遍存在,而且这些独立分布的源储组合对油气成藏及分布有重要的控制作用(Zhu et al., 2012; 宋岩等, 2013; 黄东等, 2018)。但这些组合样式的有效性不一,某一种或几种可能是该地区最主要的源储组合类型,更准确地应称之为源储结构。源储结构是指烃源岩与储集岩之间的接触关系、岩性组合、厚度差异、物性差异和孔隙结构类型。不同的源储结构,烃源岩与储集岩之间具有不同的接触关系、岩性组合、厚度大小以及孔隙结构特征和物性特征,直接影响着油气由烃源岩向致密储层的充注动力、充注方式、充注强度、充注范围以及充注量,从而对致密储层中的油气运移和聚集产生重要的影响。因此,以源储组合为研究对象,通过产能分析、含油气性统计、实验测试分析结合已有的地质研究成果,评价源储组合的生烃、储烃、保烃的能力,优选出优势源储结构。以优势源储结构为载体研究该组合在埋藏演化过程中成藏条件的变化,对揭示致密油的成藏机理和富集区带的优选有重要意义。

5.3 致密油赋存状态

关于致密油赋存状态的科学问题可以概括为:

致密油赋存状态的影响因素、转化条件及相对贡献。表现在,致密油赋存状态的宏观控制因素(如沉积结构、成岩演化、热成熟作用阶段、顶底板和系统温压场-流体场边界条件等)研究不够深入,尚未开展不同赋存状态和不同赋存空间烃类的相对贡献等方面的研究,致密油成藏演化过程中不同赋存状态相互转化的过程和条件不明确。为解决这些问题,以下思路有可借鉴之处。利用荧光薄片分析、激光拉曼分析、扫描电镜与能谱分析等多种技术手段,系统研究不同代表性(沉积、物性、成熟度、有机质丰度等)的典型样品中致密油的赋存方式;从动力学机制上阐明吸附与游离的临界条件,找出控制因素,揭示不同赋存状态和不同赋存空间的油气相对比例;在搞清楚特定条件下致密油赋存状态和赋存空间及主控因素的基础上,系统研究构造演化过程中(深埋和抬升)吸附与游离态的转化。

5.4 混合沉积与致密油

国内外致密油勘探实践和地质研究表明,北美典型的致密油区带,如Bakken、Eagle Ford等储层都是混合沉积成因的(Roelofsen, 2013),加拿大萨斯喀彻温省西南部Upper Shaunavon段致密油储层以及阿根廷Vaca Muerta组致密油储层也是混合沉积的代表(Fie and Pedersen, 2013; Maximiliano et al. 2019)。在中国四川盆地川中侏罗系、准噶尔盆地二叠系、三塘湖盆地二叠系、酒泉盆地青西凹陷下白垩统、渤海湾盆地冀中坳陷霸县凹陷和饶阳凹陷沙河街组、黄骅坳陷沧东凹陷孔店组与歧口凹陷沙河街组、二连盆地下白垩统等多个发现致密油的

地区,其储层都是混合沉积成因的(郭迎春等,2018),以混合沉积与致密油形成的地质条件相对比,初步认为混合沉积与致密油形成具有一定的一致性(或者说混合沉积更有利于形成致密油),但其内在机制不明确。为揭示混合沉积形成致密油的地质效应,关键问题是合理评价混合沉积所形成的多种源储组合的生油、储油的优劣性。研究混合沉积对致密油源、储及其组合形成的控制作用,优选致密混积岩油优势源储组合并表征其致密混积储层的微观孔-缝-喉结构,揭示致密混积岩油充注、运聚机理,将对完善致密油地质理论、指导致密混积岩油的资源评价与勘探部署具有重要意义。

5.5 致密油地质综合研究

成藏要素的综合研究主要包括:地质描述(如岩相及沉积环境、垂向及侧向非均质性控制因素、层序地层格架、岩石学及矿物学、有机质形成与保存、有机地球化学分析);储层孔喉结构刻画(主要是应用各种新技术、新方法表征纳-微米尺度的孔喉结构);流体-岩石相互作用(主要是应用各种新技术、新方法描述和模拟作用过程);测井解释(特别重视解释新方法的研究及质量控制)。成藏机理与过程的综合研究主要包括生-排-运-聚-富的全过程研究,重点是充注机理、渗流机理、赋存机理。有效充注的孔喉下限是储层孔喉大小、孔隙和孔喉之间的连通性、充注动力和油气的物理性质多个方面耦合作用的结果,需要综合研究储层孔隙-孔喉特征、充注动力和原油物性对油气由烃源岩向致密储层有效充注的孔喉下限的耦合控制作用及其充注机理。渗流机理的研究需要加强理论分析、数值模拟与实验测试等,其中理论分析计算主要集中在力学的基础理论研究,数值模拟主要集中在三维数字岩心的构建,而实验测试趋向于更小尺度下高精度的测量(张雪龄等,2019)。赋存机理研究应在认识到致密储层中油气的赋存状态基础上,对不同级别孔喉系统的致密储层中油气的赋存状态、赋存特征及其影响因素,运移动力与赋存状态之间的关系,矿物-油气-地层水之间的有机和无机作用及其对油气赋存状态的影响等问题深入研究。

6 结 论

(1)当前致密油地质研究进展表现在以下几个

方面:①总结了致密油三大形成条件和六项基本特征及中国陆相致密油与美国海相致密油的区别;②利用先进和高精度的储层分析测试技术对致密油储层孔-喉-缝网络体系进行了表征,并初步研究了致密油的赋存状态;③在充注动力、充注下限、运聚机理和富集模式等方面对致密油成藏机理开展了卓有成效的研究。

(2)当前致密油成藏研究中存在的重要科学问题有:①致密油储层微纳米尺度非均质性全息定量表征及其对致密油运聚的影响;②致密油源储结构的成因机制及其对致密油成藏、富集的控制作用;③致密油赋存状态的影响因素、转化条件及不同赋存状态/空间的相对贡献;④混合沉积与致密油形成的内在联系;⑤致密油成藏要素的综合研究与成藏机理及成藏全过程的研究。这些问题的解决将是对致密油地质研究的重要补充。

References

- Aguilera R. 2013. Flow units: From conventional to tight gas to shale gas to tight oil to shale oil reservoirs[J]. SPE 165360: 1-31.
- Aydin A. 2000. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow[J]. Marine and Petroleum Geology, 17: 797-814.
- Bai Yubin, Zhao Jingzhou, Zhao Zilong, Yin Yueyue, Tong Jiangnan. 2013. 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, 34(5): 631-640 (in Chinese with English abstract).
- Barbiera M, Hamon Y, Callot J P. Sedimentary and diagenetic controls on the multiscale fracturing pattern of a carbonate reservoir: The Madison Formation (Sheep Mountain, Wyoming, USA)[J]. Marine and Petroleum Geology, 29: 50-67.
- Camp W K. 2008. Basin-centered gas or subtle conventional traps? [C]// Cumella S P, Shanley K W, Camp W K. Understanding, exploring, and developing tight-gas sands—2005 Vail Hedberg Conference. AAPG Hedberg Series 3, 49-61.
- Cant D. 2011. "Unconventional" hydrocarbon accumulations occur in conventional traps[C]// 2011 CSPG CSEG CWLS Convention, 1-2.
- Cao Yingchang, Zhu Ning, Zhang Shaomin, Xi Kelai, Xue Xiujie. 2019. Diagenesis and reserving space characteristics of tight oil reservoirs of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag of Junggar Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 41(3):253-266(in Chinese with English abstract).
- Clarkson C R, Pedersen P K. 2011. Production analysis of western Canadian unconventional light oil plays[J]. SPE 149005: 1-22.
- Colborne J, Bustin R M. 2013. Stratigraphic, depositional and

- diagenetic controls on tight oil reservoir development, Big Valley Formation (Three Forks Equivalent), southern Alberta[J]. SPE 168897: 1–7.
- Cui Jingwei, Zhu Rukai, Wu Songtao, Wang Tuo. 2013. Heterogeneity and lower oily limits for tight sandstones: A case study on Chang–7 oil layers of the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 34(5): 877–882(in Chinese with English abstract).
- Deng Xiuqin, Liu Xinshe, Li Shixiang. 2009. The relationship between compacting history and hydrocarbon accumulating history of the super– low permeability reservoirs in the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 30(2): 156–161(in Chinese with English abstract).
- Deng Yan, Huang Dong, Mi Hong, Jin Tao, Yan Weipeng. 2017. Research on the origin of lacustrine dolomitic reservoir in Jurassic Da'anzhai Formation of Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 44(1): 75–85(in Chinese with English abstract).
- Du Jinhu, He Haiqing, Yang Tao, Li Jianzhong, Huang Fuxi, Guo Bincheng, Yan Weipeng. 2014. Progress in China's tight oil exploration and challenges[J]. *China Petroleum Exploration*, 19(1): 1–9(in Chinese with English abstract).
- EIA (U.S. Energy Information Administration). 2018. Annual Energy Outlook 2018 with Projections to 2040[R].
- Feng Shengbin, Niu Xiaobing, Liu Fei, Yang Xiao, Liu Xiaojing, You Yuan. 2013. Characteristics of Chang 7 tight oil reservoir space in Ordos Basin and its significance[J]. *Journal of Central South University: Natural Science Edition*, 44(11):4574– 4580 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhiqiang, Zhang Shun, Feng Zihui. 2011. Discovery of "enveloping surface of oil and gas overpressure migration" in the Songliao Basin and its bearings on hydrocarbon migration and accumulation mechanisms[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 41(12): 1872 –1883(in Chinese with English abstract).
- Fic J, Pedersen P K. 2013. Reservoir characterization of a "tight" oil reservoir, the middle Jurassic Upper Shaunavon Member in the Whitemud and Eastbrook pools, SW Saskatchewan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 44: 41–59.
- Fu Sutang, Zhang Daowei, Xue Jianqin, Zhang Xiaobao. 2013. Exploration potential and geological conditions of tight oil in the Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(4): 672–682(in Chinese with English abstract).
- Gasparrinia M, Sassi W. 2014. Natural sealed fractures in mudrocks: A case study tied to burial history from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas, USA[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 55:122–141.
- Guo Qiulin, Chen Ningsheng, Song Huanqi, Wu Xiaozhi, Xie Hongbing. 2013. Accumulation models and numerical models of tight oil: A case study from Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 25(1): 4–10 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yanru, Liu Junbang, Yang Hua, Liu Zhen, Fu Jinhua, Yao Jingli, Xu Wanglin, Zhang Yanling. 2012. Hydrocarbon accumulation mechanism of low permeable tight lithologic oil reservoirs in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 39(4): 417– 425 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yingchun, Pang Xiongqi, Chen Dongxia, Jiang Fujie, Tang Guomin. 2013. Progress of research on hydrocarbon accumulation of tight sand gas and several issues for concerns[J]. *Oil & Gas Geology*, 34(6): 717–724 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yingchun, Song Yan, Fang Xinxin, Jiang Zhenxue, Chen Jianjun, Guo Jigang. 2018. Tight oil accumulation mechanism and controlling factors for enrichment in mixed siliciclastic and carbonate sequences in the Xigou Formation of Qingxi Sag, Jiuquan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 39(4):766– 777 (in Chinese with English abstract).
- Hinai A A, Rezaee R, Esteban L. 2014. Comparisons of pore size distribution: A case from the Western Australian gas shale formations[J]. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 8: 1–13.
- Hu Suyun, Tao Shizhen, Yan Weipeng, Men Guangtian, Tang Zhenxing, Xue Jianqin, Jia Xiyu, Chen Xuan, Jiang Tao, Huang Dong, Liang Xiaowei. 2019. Advances on continental tight oil accumulation and key technologies for exploration and development in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 30(8): 1083–1093(in Chinese with English abstract).
- Huang Dong, Duan Yong, Yang Guang, Yan Weipeng, Wei Tengqiang, Zou Juan, Wang Wei, Li Yucong. 2018. Controlling effect of source– reservoir configuration model on tight oil enrichment in freshwater lacustrine sedimentary area:a case study of the Jurassic Da'anzhai Member in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 39 (5): 518–527(in Chinese with English abstract).
- Huang Zhenkai, Chen Jianping, Wang Yijun, Deng Chunping, Xue Haitao. 2013. Pore distribution of source rocks as revealed by gas adsorption and mercury injection methods[J]. *Geological Review*, 59(3):587–595 (in Chinese with English abstract).
- Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. 2014. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 35(1): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, Li Denghua, Zheng Min. 2012. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(3): 343–350 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuqiang, Chen Lin, Jiang Chan, Qin Mingyou, Wen Xiu, Gan Hui, Wang Meng, Hu Chao. 2014. Characterization techniques and trends of the pore structure of tight reservoirs[J]. *Geological Science and Technology Information*, 33(3): 63– 70 (in Chinese with English abstract).
- Jin Jun, Yang Zhao, Yilihamu. Erxidng, Li Lulu, Liu Ming. 2018. Nanopore characteristics and oil– bearing properties of tight oil reservoirs in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. *Earth Science*, 43(5): 1594–1601 (in Chinese with English abstract).
- Kathel P, Mohanty K K. 2013. EOR in tight oil reservoirs through wettability alteration[J]. SPE 166281: 1–15.
- Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, Chang Qiusheng, Ouyang Min,

- Hou Lianhua, Liu Deguang. 2012. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6): 657–667 (in Chinese with English abstract).
- Kuhn P P, Primio R D, Hill R. 2012. Three-dimensional modeling study of the low-permeability petroleum system of the Bakken Formation[J]. *AAPG Bulletin*, 96(10):1867–1897.
- Kumar S, Hoffman T, Prasad M. 2013. Upper and Lower Bakken shale production contribution to the Middle Bakken Reservoir[J]. *SPE 168797*: 1–11.
- Li Mingcheng, Li Jian. 2010. “Dynamic trap” : A main action of hydrocarbon charging to form accumulations in low permeability-tight reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 31(5): 718–722(in Chinese with English abstract).
- Liang Digang, Ran Longhui, Dai Danshen, He Zixin, Ouyang Jian, Liao Qunshan. 2011. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and on-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 32(1): 8–17(in Chinese with English abstract).
- Liang Hao, Li Xinning, Ma Qiang, Liang Hui, Luo Quansheng, Chen Xuan, Bai Guojuan, Zhang Qi, Meng Yuanlin. 2014. Geological features and exploration potential of Permian Tiaohu Formation tight oil, Santanghu Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(5): 563–572(in Chinese with English abstract).
- Liao Xiaorong, Guo Jiaofeng, Li Weiming. 2013. Make greater efforts to develop tight oil and shale oil enhance the security of national energy[J]. *China Mining Magazine*, 22(7): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xiaorong, Zhang Liuping, Yanghua, Fu Jinhua, Yu Jian, Yang Yang, Wu Minghui. 2010. Oil accumulation process in the low-permeability Chang-81 member of Longdong area, the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 31(6): 770–778 (in Chinese with English abstract).
- Madden B, Vossoughi S. 2013. US shale gas and tight oil boom – the opportunities and risks for America[J]. *SPE 165770*: 1–19.
- Maende A, Weldon W D. 2013. Pyrolysis and TOC Identification of tight oil sweet Spots[C]. *Unconventional Resources Technology Conference*.
- Maximiliano P, Juan J P, Luis A B. 2019. Bottomset and foreset sedimentary processes in the mixed carbonate-siliciclastic Upper Jurassic-Lower Cretaceous Vaca Muerta Formation, Picún Leufú Area, Argentina[J]. *Sedimentary Geology*, 389(1): 161–185.
- Morad S, Al-Ramadan K, Ketzner J M. 2010. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy[J]. *AAPG Bulletin*, 94(8):1267–1309.
- NEB (National Energy Board). 2011. Tight Oil Developments in the Western Canada Sedimentary Basin[R].
- Newman J, Edman J, Howe J. 2013. The Bakken at Parshall Field: inferences from new data regarding hydrocarbon generation and migration[J]. *SPE 168733*:1–10.
- Niu Xiaobing, Feng Shengbin, Liu Fei, Wang Chengyu, Zheng Qinghua, Yang Xiao, You Yuan. 2013. Microscopic occurrence of oil in tight sandstones and its relation with oil sources—a case study from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 34(3): 288–293 (in Chinese with English abstract).
- Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue, Huang Handong, Chen Dongxia, Jiang Fujie. 2014. Formation mechanisms, distribution models, and prediction of superimposed, continuous hydrocarbon reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 35(5): 795–828 (in Chinese with English abstract).
- Ran Ye, Wang Guiwen, Zhou Zhenglong, Lai Jin, Dai Quanqi, Chen Jing, Fan Xuqiang, Wang Shuchen. 2016. Identification of lithology and lithofacies type and its application to Chang 7 tight oil in Heshui area, Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 43(4): 1331–1340(in Chinese with English abstract).
- Roelofs J. 2013. Exporting the North American Unconventional Gas and Tight Oil Revolution [EB/OL]. http://www.isgc2013.org/sunum/20/o/jan_roelofs.pdf.
- Song Yan, Jiang Lin, Ma Xingzhi. 2013. Formation and distribution characteristics of unconventional oil and gas reservoirs[J]. *Journal of Palaeogeography*, 15(5): 605–614 (in Chinese with English abstract).
- Song Yong, Zhou Lu, Guo Xu Guang, Chang Qiusheng, Wang Xiatian. 2017. Characteristics and occurrence of lacustrine dolomitic tight-oil reservoir in the Middle Permian Lucaogou Formation, Jimusaer sag, southeastern Junggar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1159–1170(in Chinese with English abstract).
- Sun Longde, Zou Caineng, Jia Ailin, Wei Yunsheng, Zhu Rukai, Wu Songtao, Guo Zhi. 2019. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 46(6): 1015–1026(in Chinese with English abstract).
- Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, Zhang Hong. 2012. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(3): 419–427(in Chinese with English abstract).
- Wang Shaoyong, Li Jianzhong, Li Denghua, Gong Changming. 2013. The potential of tight oil resource in Jurassic Da’anzhai Formation of the Gongshanmiao oil field, central Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 40(2): 477–486(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhenliang. 2013. Research progress, existing problem and development trend of tight rock oil[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(6): 587–595(in Chinese with English abstract).
- Williams K E. 2013. Source rock reservoirs are a unique petroleum system[C]. *AAPG Annual Convention and Exhibition*, Pittsburgh, Pennsylvania, May 19–22, 2013.
- Wu Songtao, Zhu Rukai, Li Xun, Jin Xu, Yang Zhi, Mao Zhiguo. 2018. Evaluation and application of porous structure characterization technologies in unconventional tight reservoirs[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(2): 191–203(in Chinese with English abstract).

- Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. 2013. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 34(1): 1–11(in Chinese with English abstract).
- Zeng Jianhui, Yang Zhifeng, Feng Xiao, Qiao Juncheng, Zhang Zhongyi. 2014. Study status and key scientific issue of tight reservoir oil and gas accumulation mechanism[J]. *Advances in Earth Science*, 29(6):651–661(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fengqi, Wang Zhenliang, Wu Fuli, Gao Xingjun, Luo Ranhao, Rui Zhenhua. 2012. Dynamic analysis on hydrocarbon migration of accumulation periods in low permeability–tight sandstone reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 36(4): 32–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hong, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, Hao Jiaqing, Zhao Mengjun, Tian Hua, Jiang Lin. 2014. A theoretical discussion and case study on the oil–charging throat threshold for tight reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 367–374(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xueling, Kuang Songya, Shi Yutao, Zhu Weiyao, Wang Yanling, Wu Xuehong, Niu Cong. 2019. Research progress on the nonlinear seepage characteristics of tight oil in nano–micron porous media[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 31(4):102–112(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua, Yang Tao, Li Xin, Guo Bincheng, Yang Zhi. 2020. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(1): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhengzhang, Du Jinhui. 2012. *Tight Oil & Gas*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Zhou Qingfan, Yang Guofeng. 2012. Definition and application of tight oil and shale oil terms[J]. *Oil & Gas Geology*, 33(4): 541–544 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guangyou, Gu Lijing, Su Jin. 2012. Sedimentary association of alternated mudstones and tight sandstones in China’s oil and gas bearing basins and its natural gas accumulation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 50:88–104.
- Zhu Rukai, Wu Songtao, Su Ling, Cui Jingwei, Mao Zhiguo, Zhang Xiangxiang. 2016. Problems and future works of porous texture characterization of tight reservoirs in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37(11): 1323–1336(in Chinese with English abstract).
- Zhu Rukai, Zou Caineng, Wu Songtao, Yang Zhi, Mao Zhiguo, Yang Haibo, Fan Chunyi, Hui Xiao, Cui Jingwei, Su Ling, Wang Huandi. 2019. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 40(6): 1168–1184 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua. 2013. *Unconventional Petroleum Geology (second edition)* [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Zou Caineng, Zhai Guangming, Zhang Guangya, Wang Hongjun, Zhang Guosheng, Li Jianzhong, Wang Zhaoming, Wen Zhixin, Ma Feng, Liang Yingbo, Yang Zhi, Li Xin, Liang Kun. 2015. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42(1): 1–13(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, Yang Zhi, Wu Songtao, Su Ling, Dong Dazhong, Li Xingjing. 2011. First discovery of nano–pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1857–1864(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白玉彬, 赵清舟, 赵子龙, 殷悦悦, 童姜楠. 2013. 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*, 34(5): 631–640
- 操应长, 朱宁, 张少敏, 葱克来, 薛秀杰. 2019. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层成岩作用与储集空间特征[J]. *地球科学与环境学报*, 41(3):253–266.
- 曾澹辉, 杨智峰, 冯泉, 乔俊程, 张忠义. 2014. 致密储层油气成藏机理研究现状及其关键科学问题[J]. *地球科学进展*, 29(6):651–661
- 崔景伟, 朱如凯, 吴松涛, 王拓. 2013. 致密砂岩层内非均质性及其含油下限——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例[J]. *石油学报*, 34(5): 877–882.
- 邓秀芹, 刘新社, 李士祥. 2009. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透储层致密史与油藏成藏史[J]. *石油与天然气地质*, 30(2): 156–161.
- 邓燕, 黄东, 米鸿, 金涛, 闫伟鹏. 2017. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相含云质储层成因研究[J]. *中国地质*, 44(1): 75–85.
- 杜金虎, 何海清, 杨涛, 李建忠, 黄福喜, 郭彬程, 闫伟鹏. 2014. 中国致密油勘探进展及面临的挑战[J]. *中国石油勘探*, 19(1): 1–9.
- 冯胜斌, 牛小兵, 刘飞, 杨孝, 刘小静, 尤源. 2013. 鄂尔多斯盆地长7致密油储层储集空间特征及其意义[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 44(11):4574–4580.
- 冯志强, 张顺, 冯子辉. 2011. 在松辽盆地发现“油气超压运移包络面”的意义及油气运移和成藏机理探讨[J]. *中国科学: 地球科学*, 41(12): 1872–1883.
- 付锁堂, 张道伟, 薛建勤, 张晓宝. 2013. 柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析[J]. *沉积学报*, 31(4): 672–682.
- 郭秋麟, 陈宁生, 宋焕琪, 吴晓智, 谢红兵. 2013. 致密油聚集模型与数值模拟探讨——以鄂尔多斯盆地延长组致密油为例[J]. *岩性油气藏*, 25(1): 4–10.
- 郭彦如, 刘俊榜, 杨华, 刘震, 付金华, 姚泾利, 徐旺林, 张延玲. 2012. 鄂尔多斯盆地延长组低渗透致密岩性油藏成藏机理[J]. *石油勘探与开发*, 39(4): 417–425
- 郭迎春, 庞雄奇, 陈冬霞, 姜福杰, 汤国民. 2013. 致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题[J]. *石油与天然气地质*, 34(6): 717–724.
- 郭迎春, 宋岩, 方欣欣, 姜振学, 陈建军, 郭继刚. 2018. 酒泉盆地青西凹陷下沟组混积层系致密油成藏机理与富集影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 39(4):766–777.
- 胡素云, 陶士振, 闫伟鹏, 门广田, 唐振兴, 薛建勤, 贾希玉, 陈旋, 江涛, 黄东, 梁晓伟. 2019. 中国陆相致密油富集规律及勘探开发关

- 键技术研究进展[J]. 天然气地球科学, 30(8): 1083-1093.
- 黄东, 段勇, 杨光, 闫伟鹏, 韦腾强, 邹娟, 王玮, 李育聪. 2018. 淡水湖相沉积区源储配置模式对致密油富集的控制作用——以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. 石油学报, 39(5): 518-527.
- 黄振凯, 陈建平, 王义军, 邓春萍, 薛海涛. 2013. 利用气体吸附法和压汞法研究烃源岩孔隙分布特征[J]. 地质论评, 59(3): 587-595.
- 贾承造, 郑民, 张永峰. 2014. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. 石油学报, 35(1): 1-10.
- 贾承造, 邹才能, 李建忠, 李登华, 郑民. 2012. 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, 33(3): 343-350.
- 蒋裕强, 陈林, 蒋婵, 覃明友, 文秀, 甘辉, 王猛, 胡朝. 2014. 致密储层孔隙结构表征技术及发展趋势[J]. 地质科技情报, 33(3): 63-70.
- 靳军, 杨召, 依力哈木·尔西丁, 李璐璐, 刘明. 2018. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷致密油储层纳米孔隙特征及其含油性[J]. 地球科学, 43(5): 1594-1601.
- 匡立春, 唐勇, 雷德文, 常秋生, 欧阳敏, 侯连华, 刘得光. 2012. 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, 39(6): 657-667.
- 李明诚, 李剑. 2010. “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, 31(5): 718-722.
- 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹中, 何自新, 欧阳健, 廖群山, 何文渊. 2011. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. 石油学报, 32(1): 8-17.
- 梁浩, 李新宁, 马强, 梁辉, 罗权生, 陈璇, 白国娟, 张琪, 孟元林. 2014. 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, 41(5): 563-572.
- 廖晓蓉, 郭焦锋, 李维明. 2013. 加大力度开发致密油和页岩油增强国家能源安全保障[J]. 中国矿业, 22(7): 8-10.
- 罗晓容, 张刘平, 杨华, 付金华, 喻建, 杨颀, 武明辉. 2010. 鄂尔多斯盆地陇东地区长8'段低渗油藏成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 31(6): 770-778.
- 牛小兵, 冯胜斌, 刘飞, 王成玉, 郑庆华, 杨孝, 尤源. 2013. 低渗透致密砂岩储层中石油微观赋存状态与油源关系——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J]. 石油与天然气地质, 34(3): 288-293.
- 庞雄奇, 姜振学, 黄捍东, 陈冬霞, 姜福杰. 2014. 叠复连续油气藏成因机制、发育模式及分布预测[J]. 石油学报, 35(5): 795-828.
- 冉冶, 王贵文, 周正龙, 赖锦, 代全齐, 陈晶, 范旭强, 王抒忱. 2016. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油岩性岩相类型识别及其应用[J]. 中国地质, 43(4): 1331-1340.
- 宋岩, 姜林, 马行陟. 2013. 非常规油气藏的形成及其分布特征[J]. 古地理学报, 15(5): 605-614.
- 宋永, 周路, 郭旭光, 常秋生, 王霞田. 2017. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组湖相云质致密油储层特征与分布规律[J]. 岩石学报, 33(4): 1159-1170.
- 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 位云生, 朱如凯, 吴松涛, 郭智. 2019. 中国致密油气发展特征与方向[J]. 石油勘探与开发, 46(6): 1015-1026.
- 田华, 张水昌, 柳少波, 张洪. 2012. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J]. 石油学报, 33(3): 419-427.
- 汪少勇, 李建忠, 李登华, 龚昌明. 2013. 川中地区公山庙油田侏罗系大安寨段致密油资源潜力分析[J]. 中国地质, 40(2): 477-486.
- 王震亮. 2013. 致密岩油的研究进展、存在问题和发展趋势[J]. 石油实验地质, 35(6): 587-595.
- 吴松涛, 朱如凯, 李勋, 金旭, 杨智, 毛治国. 2018. 致密储层孔隙结构表征技术有效性评价与应用[J]. 地学前缘, 25(2): 191-203.
- 杨华, 李士祥, 刘显阳. 2013. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 34(1): 1-11.
- 张凤奇, 王震亮, 武富礼, 高兴军, 罗然昊. 2012. 低渗透致密砂岩储层成藏期油气运移的动力分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 36(4): 32-40.
- 张洪, 张水昌, 柳少波, 郝加庆, 赵孟军, 田华, 姜林. 2014. 致密油充注孔喉下限的理论探讨及实例分析[J]. 石油勘探与开发, 41(3): 367-374.
- 张雪彪, 邝颂雅, 师渝滔, 朱维耀, 王燕令, 吴学红, 牛聪. 2019. 致密油纳微米孔隙介质非线性渗流特性研究进展[J]. 中国海上油气, 31(4): 102-112.
- 赵文智, 胡素云, 侯连华, 杨涛, 李欣, 郭彬程, 杨智. 2020. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 47(1): 1-10.
- 赵政璋, 杜金虎. 2012. 致密油气[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 周庆凡, 杨国丰. 2012. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质, 33(4): 541-544.
- 朱如凯, 吴松涛, 苏玲, 崔景伟, 毛治国, 张响响. 2016. 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, 37(11): 1323-1336.
- 朱如凯, 邹才能, 吴松涛, 杨智, 毛治国, 杨海波, 范春怡, 惠潇, 崔景伟, 苏玲, 王焕第. 2019. 中国陆相致密油形成机理与富集规律[J]. 石油与天然气地质, 40(6): 1168-1184.
- 邹才能, 陶士振, 侯连华. 2013. 非常规油气地质(第二版)[M]. 北京: 地质出版社.
- 邹才能, 翟光明, 张光亚, 王红军, 张国生, 李建忠, 王兆明, 温志新, 马锋. 2015. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 42(1): 1-13.
- 邹才能, 朱如凯, 白斌, 杨智, 吴松涛, 苏玲, 董大忠, 李新景. 2011. 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, 27(6): 1857-1864.