

文章编号: 1000-0747(2019)01-0173-12 DOI: 10.11698/PED.2019.01.18

“进源找油”: 源岩油气内涵与前景

杨智, 邹才能

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

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

摘要: 基于全球能源结构转型背景、非常规油气勘探开发进展和重点盆地研究对比分析, 将非常规油气划分为源岩油气、致密油气和滞聚油气3种类型, 明确源岩油气是全球油气供应的战略领域, 是未来石油工业第2个150 a生命周期中举足轻重的资源组成, 是“进源找油”的主要对象。提出源岩油气地质学内涵, 集成建立了源岩油气生、排、滞留烃模式, 指出5个源岩油气生成段决定相应技术条件下的现实资源潜力; 分析了源岩油气“甜点段”形成机理, 发现页岩油主要聚集在紧贴生油段、孔渗较好的泥页岩段, 而煤层气和页岩气“甜点段”源储一体、吸附在煤层表面或滞留在富有机质黑色页岩段, 评价优选源岩油气“甜点区(段)”是“进源找油”的核心; 源岩油气资源潜力巨大, 继北美之后, 全球十余个大型常规-非常规“共生盆地”源岩油气也将迎来大发展, 源岩油气是中国未来石油稳定发展的主力、天然气产量跨越的增长点, 预计2030年中国源岩油和源岩气产量将分别占比15%和30%; 应对源岩油气发展挑战, 建议坚持理论创新、设立开发试验区、加强技术攻关、争取国家支持等。源岩油气地质, 是“源控论”在非常规油气阶段的新发展, 将为承续和推进后油气工业时代上游领域新征程提供新的理论依据。图7表4参39

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

关键词: 源岩油气; 页岩气; 页岩油; 煤层气; 甜点段; 甜点区; 源控论; 人工油气藏; 非常规油气革命; 大型常规-非常规“共生盆地”

“Exploring petroleum inside source kitchen”: Connotation and prospects of source rock oil and gas

YANG Zhi, ZOU Caineng

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the transitional background of the global energy structure, exploration and development of unconventional oil and gas, and investigation of key basins, the unconventional oil and gas resources are divided into three types: source rock oil and gas, tight oil and gas, and retention and accumulated oil and gas. Source rock oil and gas resources are the global strategic supplies of oil and gas, the key resource components in the second 150-year life cycle of the future petroleum industry, and the primary targets for “exploring petroleum inside source kitchen”. The geological connotation of source rock oil and gas was proposed, and the models of source rock oil and gas generation, expulsion and accumulation were built, and five source rock oil and gas generation sections were identified, which may determine the actual resource potential under available technical conditions. The formation mechanism of the “sweet sections” was investigated, that is, shale oil is mainly accumulated in the shale section that is close to the oil generation section and has higher porosity and permeability, while the “sweet sections” of coal-bed methane (CBM) and shale gas have self-contained source and reservoir and they are absorbed in coal seams or retained in the organic-rich black shale section, so evaluation and selection of good “sweet areas (sections)” is the key to “exploring petroleum inside source kitchen”. Source rock oil and gas resources have a great potential and will experience a substantial growth for over ten world-class large “coexistence basins” of conventional-unconventional oil and gas in the future following North America, and also will be the primary contributor to oil stable development and the growth point of natural gas production in China, with expected contribution of 15% and 30% to oil and gas, respectively, in 2030. Challenges in source rock oil and gas development should be paid more attention to, theoretical innovation is strongly recommended, and a development pilot zone can be established to strengthen technology and promote national support. The source rock oil and gas geology is the latest progress of the “source control theory” at the stage of unconventional oil and gas. It will provide a new theoretical basis for the new journey of the upstream business in the post-industry age.

Key words: source rock oil and gas; shale gas; shale oil; coal-bed methane; sweet section; sweet area; source control theory; artificial oil and gas reservoir; unconventional oil and gas revolution; large “coexistence basins” of conventional-unconventional oil and gas

引用: 杨智, 邹才能. “进源找油”: 源岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 173-184.

YANG Zhi, ZOU Caineng. "Exploring petroleum inside source kitchen": Connotation and prospects of source rock oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 173-184.

0 引言

非常规油气将成为 21 世纪中下叶最重要的油气接替领域,而源岩油气是非常规油气资源中极为重要的组成部分,涵盖页岩气、页岩油、煤层气等主要资源类型^[1]。“进源找油”包括石油和天然气,广义上涵盖“近源”寻找致密油气、“入源”寻找页岩油气、煤层气、“尽源”开采页岩油、油页岩油等 3 方面内容;本文讨论的“进源找油”,主要包括“入源”和“尽源”两方面内容,“入源”即进入到生油气层系中,寻找“甜点区”和“甜点段”,“尽源”即开发滞留烃和转化有机质,追求采出所有潜在油气资源。“进源找油”理论技术的持续针对性攻关,在当前及不远的未来都将具有重要的理论和战略意义。笔者研究团队近 10 年在国家 973 计划、国家科技重大专项等科研项目的资助下,依托国家能源致密油气研发中心等实验基地,以鄂尔多斯、准噶尔、松辽、四川、美国西部湾岸等国内外重点盆地源岩层系为研究对象,围绕源岩油气形成分布与工业评价这一主题,采用地质-地球化学-地球物理等多学科交叉研究的工作模式,进行实验分析、地质评价和工业实践,剖析源岩油气的地质内涵,开展源岩油气资源分类对比、“甜点段”形成机理、“甜点区”分布规律、发展前景等方面研究。

1 “进源找油”背景分析

1.1 能源结构转型的发展变革

应对气候变化,加快推进能源的低碳化转型已成全球共识,主要途径是控制与降低化石能源的碳排放量,并大力发展可再生能源等非化石能源^[1-2]。

然而客观上,化石能源在较长时间内仍将作为主体能源保持增长。非常规油气的成功开发进一步加强了油气资源基础,预测未来油气仍将发挥主体能源作用,在一定时期内发挥不可替代的作用,天然气在 2030 年后将成为占比最高的单类型化石能源,并将担当化石能源向可再生能源转型的可靠桥梁^[1,3]。

对于中国而言,较长时期内不断增油增气减煤、大力发展新能源将是优化能源结构的关键,非常规油气规模快速发展将是油气长期稳定发展的重要保障,是国家基本能源安全的重要砝码。

1.2 非常规油气勘探开发进展

非常规油气,是指用传统技术无法获得自然工业

产量、需用新技术改善储集层渗透率或流体黏度等手段才能经济开采的连续分布油气资源^[4](见图 1)。非常规油气革命,是指颠覆传统油气生产模式,打破常规渗透性储集层、经典油气圈闭成藏概念,从致密砂岩和页岩中发现具工业价值的纳米级孔隙,创新大面积连续型油气聚集理论与水平井体积压裂工业化技术,变革传统圈闭型“油气藏”勘探开发方式,突破直井达西渗流开发技术理论,在传统油气禁区实现工业化生产的重大能源革命事件。按照运聚特点,非常规油气可划分为源岩油气、致密油气和滞聚油气 3 种类型。源岩油气是自生自储、滞留在生烃层系内部的非常规油气,主要包括页岩气、页岩油、煤层气、油页岩油等类型,本文主要讨论前 3 种类型;致密油气是他生自储、近源聚集在致密储集层中的非常规油气,主要包括致密油、致密气等类型;滞聚油气是经过较长距离运移、因水洗、降解等稠化、温压稳定带结晶等作用,滞留聚集在近地表储集层、海底沉积物及冻土带等储集层中的非常规油气(见图 1、表 1),主要包括水合物、油砂重油等类型。

进入 21 世纪,以美国页岩油气、致密油、加拿大油砂和委内瑞拉重油为代表,全球非常规油气勘探开发取得了一系列突破性进展,已成为全球油气生产的重要组成部分,深度重塑了全球能源版图与地缘政治格局^[5-7]。致密气、煤层气、重油、沥青砂等已成为全球非常规油气勘探开发重点领域,页岩气成为热点领域,致密油成为亮点领域。随着全球非常规油气产量快速增长,非常规油气在全球能源供应中的地位日益凸显,已成为油气产量的重要组成部分。2017 年,全球石油产量 $43.9 \times 10^8 \text{ t}$,其中非常规石油占 14%;全球天然气产量 $3.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中非常规天然气占 25%^[1,3,6]。近 10 年,美国成就了页岩气、致密油“革命性发展的黄金十年”。依靠连续型油气聚集理论、水平井体积压裂创新和国家政策扶持 3 项重要经验,美国先后实现了页岩气革命和致密油革命。2017 年美国天然气产量 $7.345 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中页岩气产量 $4.746 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、致密气 $1.200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、煤层气 $302 \times 10^8 \text{ m}^3$,非常规气占比 85%;由于非常规气的快速发展导致美国天然气产量达到历史新高,已基本实现自给;2017 年美国致密油产量 $2.36 \times 10^8 \text{ t}$,占石油总产量 37%^[1,3,6]。总体上,美国非常规油气产量已占比 70%,成为油气产量增长的领衔主角,持续推动美国“能源独立”战略实施。

资源类型	聚集类型	聚集形态	聚集机理	分布特征	资源比例	勘探对象	开发模式	关键技术	实例
常规油气	圈闭油气	构造油气藏	远源浮力	单体型	约20%	常规圈闭	油气藏、自然产能	二维或三维地震、直井或水平井	松辽盆地长垣白垩系
		岩性、地层油气藏		集群型					准噶尔盆地西北缘二叠系—侏罗系
非常规油气	滞聚油气	水合物	远源结晶稠化	连续型	约80%	非常规甜点区	人工油气藏、人造渗透率	三维地震、微地震监测、水平井、体积压裂、原位转化/改质、平台式“工厂化”开采……	珠江口盆地新近系
									油砂+重油
	致密油气	致密油	近源压差						鄂尔多斯盆地三叠系
		致密气							鄂尔多斯盆地石炭-二叠系
	源岩油气	页岩油	源内滞留						鄂尔多斯盆地三叠系
		煤层气+页岩气							鄂尔多斯盆地石炭-二叠系
		页岩气							四川盆地寒武系—志留系

石油 天然气 水层 煤层 页岩 泥岩 盖层 常规储集层 致密储集层

图1 常规与非常规油气类型划分与对比(据文献[4]修改)

在中国,经过10余年攻关,非常规油气已基本实现工业化发展。一是非常规天然气已实现整体规模工业化生产。截至2016年底,非常规天然气探明储量达 $4.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占全国天然气储量的36%;2017年产量为 $499 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国天然气产量的34%^[1]。致密气已形成以鄂尔多斯盆地上古生界、四川盆地须家河组为代表的多个万亿立方米、千亿立方米级大气区,2017年全国总产量为 $360 \times 10^8 \text{ m}^3$;截至2017年底页岩气已提交探明地质储量 $9209 \times 10^8 \text{ m}^3$,先后发现了涪陵、长宁、威远3个千亿立方米级海相页岩大气田,2017年页岩气产量为 $90 \times 10^8 \text{ m}^3$;煤层气规模开发初见成效,形成沁水、鄂尔多斯两个生产基地,2017年产量达 $49 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1]。二是非常规致密油初步实现工业化。致密油已进入储量序列,落实了鄂尔多斯盆地新安边、松辽盆地扶余、准噶尔盆地吉木萨尔等3个十亿吨级致密大油田,2017年产量约 $150 \times 10^4 \text{ t}$ 。此外,天然气水合物探索取得重要进展,2017年从珠江口盆地神狐海域水深1266m的海底之下厚为203~277m的中新统、上新统中采出天然气,连续产气42d,累产气超 $23.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[8];页岩油资源潜力巨大,基本明确“甜点区(段)”,目前正在鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩开展原位加热转化现场先导试验可行性论证与非水压裂等科学探索,有望在中国率先实现陆相“页

岩油革命”^[9-10]。截至2017年底,中国非常规油气产量达 $6600 \times 10^4 \text{ t}$ 油气当量,占油气总产量的20%,取得了“战略性突破”,已具备革命性发展基本条件。

1.3 “源岩油气”的战略地位

页岩气、页岩油、煤层气等非常规源岩层系油气资源(简称“源岩油气”),是全球油气供应的战略领域。全球非常规石油可采资源量为 $6200 \times 10^8 \text{ t}$,与常规石油相当,其中源岩石油占比50%;全球非常规天然气可采资源量为 $3922 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是常规天然气的8倍多,其中源岩天然气占比77%(除天然气水合物)^[1,7,11-14]。总体而言,源岩油气具巨量资源规模,整体探明率极低,是未来石油工业第2个150年生命周期中举足轻重的组成部分,具有极为重要的战略地位^[4]。

中国大陆处于太平洋、西伯利亚和印度3大板块交汇处,沉积盆地的形成和发展过程多样,经历了古生代海相与中生代陆相两个阶段,形成了10余套富含有机质页岩及煤系。源岩油气具备较好的资源赋存基础。相比于北美源岩油气,中国源岩油气形成分布特点更为复杂,受构造作用影响更大,储集层纵横向分布的非均质性更强,油气水关系相对更加多变,“甜点区(段)”的评价预测难度更大,已发现的页岩气以高一过成熟度海相地层为主、煤层气以高成熟度海相和海陆过渡相地层为主、页岩油以陆相中—低成熟度地

表 1 常规与非常规油气地质特征、开发特点对比

油气类型	分布特征	源储关系	运移方式	聚集作用	保存条件	流体特征		开采工艺		产烃组成		可采资源/ (油:t;气:m ³)		典型实例
						烃类组成	可动烃含量	开发对象特点	关键技术	初产	累产	全球	中国	
常规油	高部位有利圈闭	源储分离	二次运移	高丰度构造、地层、岩性油藏	区域及直接盖层	液态烃	可动烃比例为40%~80%	石油高丰度聚集、储集层物性好、自然产能高	直井、水平井等	初期产油可动油占比90%~100%	累计产油中可动油占比90%~100%	4 878×10 ⁸	200×10 ⁸	加瓦尔油田、大庆长垣油田等
常规气	高部位有利圈闭	源储分离	二次运移	高丰度构造、地层、岩性气藏	区域及直接盖层	烃气,一般以甲烷为主	游离气比例为90%~100%	天然气高丰度聚集、储集层物性好、自然产能高	直井、水平井等	初期产气游离气占比90%~100%	累计产气中游离气占比90%~100%	471×10 ¹²	20×10 ¹²	北方-南帕斯气田、克拉2气田等
重滞聚油	近地表沥地层	源储分离	二次运移	泄油区的有利圈闭	盖层及自封堵	重稠油	几乎不含可动油	原油黏稠、流动性极差、无自然产能	蒸汽辅助重力驱、蒸汽吞吐、冷采等	初产几乎不含可动油	累产几乎不含可动油	2 146×10 ⁸	42×10 ⁸	委内瑞拉重稠油、西加拿大盆地沥青砂等
水合物	温压稳定带	源储分离	二次运移	粗相带储集层富集	温压条件	甲烷为主	几乎不含游离气	海底产层未固结、不稳定,无自然产能	降压、热采等	初产几乎不含游离气	累产几乎不含游离气	3 000×10 ¹²	(50~70)×10 ¹²	南海北部水合物等
致密油	盆地中致密油或斜坡部位	源储直接接触或近邻	初次运移或短距离二次运移	构造区或裂缝区富集高产	良好顶底板封隔	以中成熟度石油为主	可动烃比例为20%~50%	储集层致密	水平井增能驱油压裂等	初期产油可动油占比90%~100%	累计产油中可动油占比90%~100%	(400~600)×10 ⁸	(20~25)×10 ⁸	鄂尔多斯三叠系、松辽盆地白垩系致密砂岩油等
致密气	盆地中心或斜坡部位	源储直接接触或近邻	初次运移或短距离二次运移	构造区或裂缝区富集	良好顶底板封隔	含气饱和度差异大,多数小于60%	游离气比例为90%~100%	储集层致密、自然产能低	水平井压裂改造等	初期产气游离气占比90%~100%	累计产气中游离气占比90%~100%	210×10 ¹²	(9~13)×10 ¹²	鄂尔多斯盆地石炭-二叠系、四川盆地三叠系致密砂岩气等
页岩油	深凹或斜坡泥页岩发育地区	源储一体	无运移或烃源层内短距离初次运移	存在纳米孔喉系统,裂缝发育区富集	良好顶底板封隔	以中低成熟石油、未熟油页岩为主	可动烃比例为0%~30%	产量低、无或低自然产能	原位加热转化等	初期产油可动油占比0%~100%	累计产油中可动油占比0~5%	15 000×10 ⁸	(200~300)×10 ⁸	鄂尔多斯盆地三叠系页岩油等
页岩气	靠近盆地沉降一沉积中心	源储一体	无运移或烃源层内短距离初次运移	页岩内弥散式分布,裂缝区富集	良好顶底板封隔	以干气为主,吸附在干酪根、孔隙中,游离于裂缝中	游离气比例为40%~70%	产量低、采收率低	水平井分段压裂等	初期产气游离气占比80%~100%	累计产气中游离气占比30%~60%	456×10 ¹²	(10~25)×10 ¹²	阿巴拉契亚盆地马塞勒斯页岩气、四川盆地地下古生界页岩气等
煤层气	盆地或层拗陷向斜区	源储一体	无运移或烃源层内短距离初次运移	裂隙或割理为富集区	良好顶底板封隔	吸附气、游离气	游离气比例为5%~20%	低产、无自然产能	水平井压裂等技术	初期产气游离气占比5%~10%	累计产气中游离气占比0~5%	256×10 ¹²	11×10 ¹²	沁水、鄂尔多斯等盆地石炭-二叠系煤层气等

层为主(见图2)。立足中国实际地质条件,加强中国特色源岩油气形成分布规律和评价开采技术的深入研究,对中国源岩油气的规模工业发展极为重要。

源岩油气地质理论方法研究将是未来石油地质学科的研究焦点。含油气源岩层系储集层发育纳米级孔喉系统,具有油气连续分布、储集层致密、多相态共存、源内聚集、特殊成藏机理等不同于常规油气的新特征(见图1、表1),突破了石油地质学中的许多认识局限,

对传统石油地质理论带来重大挑战。深化源岩油气地质理论方法研究,发展重构石油地质学理论体系,已成为学科发展的最前沿,是未来油气工业的紧迫要求^[4]。

近10多年,在纳米级孔喉系统微观表征、致密储集层孔隙演化与油气赋存、基于生产动态的资源评价方法、基于连续型油气聚集理念的“甜点区”评价方法等方面^[4,14-31],已取得诸多显著进展,推动源岩层系油气展现良好发展前景。源岩油气作为石油地质新的

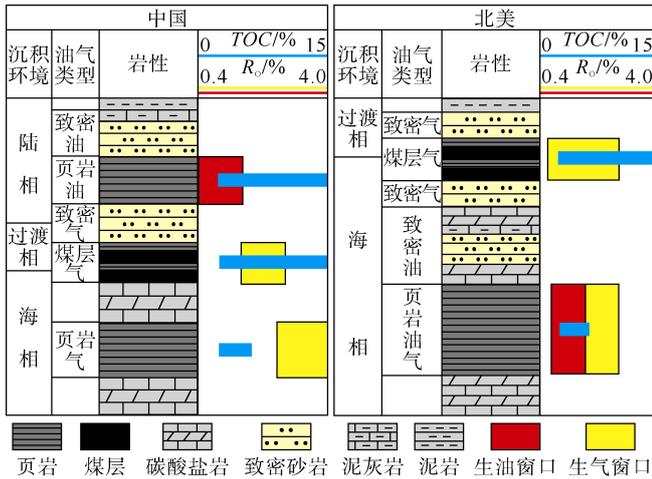


图2 中国与北美非常规油气地质条件对比

学科方向，在未来较长时间内，仍将面临孔隙发育机理、油气生运聚规律、甜点评价预测等诸多理论方法挑战，如何有效破解制约勘探发现的瓶颈问题并带动规模工业发展，是源岩油气地质评价预测的核心内容。

2 源岩油气的理论内涵

2.1 源岩油气的地质内涵

源岩油气，是指生烃层系生成、滞留或就近聚集在烃源岩内部，利用新技术产生“人工渗透率”、建造“人工油气藏”，可以实现工业开采的连续分布油气资源，是非常规油气资源的重要类型之一。这些新技术包括水平井体积压裂、原位加热转化/改质等提高渗流

能力、降低流体黏度、增加地层能量等工业措施。源岩油气地质学的内涵，是指一门研究地壳中非常规源岩油气生烃模式、形成机理、分布规律、开发地质、工程地质、发展战略的地质学科，涵盖页岩气、煤层气、页岩油等资源类型，包括源岩油气勘探地质和开发地质两个理论组成部分。源岩油气勘探地质研究是以烃源岩内油气赋存的有利资源区带为对象，评价其“岩性、烃源性、储集性、含油气性、可压性、各向异性”6个特性，核心是明确连续型油气聚集范围与储量规模；源岩油气开发地质研究是以“甜点段”和“甜点区”为对象，产生“人工渗透率”或形成“人工能量场”、建造“人工油气藏”，核心是实现油气资源规模效益开采。

源岩油气的烃源岩有机质类型，一般划分为I型、II₁型偏腐泥型的湖相黑色页岩、II型偏腐泥型的海相黑色页岩和III型偏腐殖型的黑色煤系3种类型。根据油气生烃特点，又可将源岩油气划分为油页岩油、低—中成熟度页岩油、中—高成熟度页岩油、有利页岩生气、有利煤成气共5个油气生成段。各油气生成段的资源对象不同，结合湖相页岩、海相页岩、煤层样品生烃模拟实验^[10,31-36]，集成建立源岩油气生、排、滞留烃模式（见图3）。

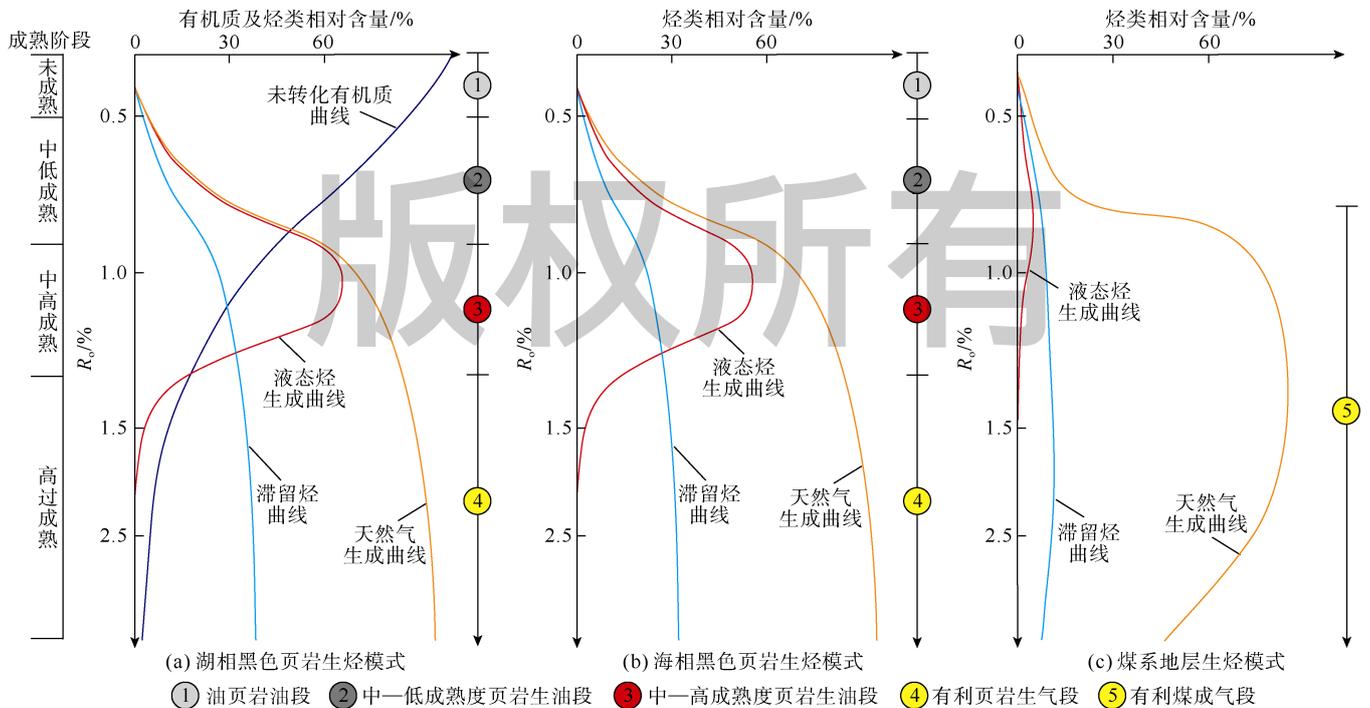


图3 源岩油气生、排、滞留烃模式

0.9%是有利成熟度窗口,窗口内滞留液态烃和尚未转化有机质的数量都较大;中—高成熟度页岩油阶段,主要为已生成尚未排出的滞留烃, R_o 值为0.9%~1.3%是有利成熟度窗口,窗口内滞留液态烃的数量达到最大;有利页岩生气阶段,主要为已生成尚未排出的滞留气, R_o 值大于1.3%是有利成熟度窗口,窗口内滞留气态烃的数量达到最大;有利煤成气阶段,主要为已生成尚未排出的吸附气, R_o 值大于0.8%是有利成熟度窗口,窗口内吸附气态烃的数量逐渐达到最大,生成煤成气的数量大幅增加。

源岩油气的现实资源潜力,主要取决于源岩内已经生成并留存的烃量,和人工干预可以影响并产出的烃量。利用水平井分层分段体积压裂技术,目前基本解决了中—高成熟度页岩油、有利页岩生气、有利煤成气共3个油气生成段的大规模开发利用问题。针对油页岩油、低—中成熟度页岩油这两个油气生成段,地下原位加热转化技术可能是未来有效解决途径之一,目前仍在攻关试验^[9]。

页岩中岩石(有机质)-流体-孔缝系统耦合机理是

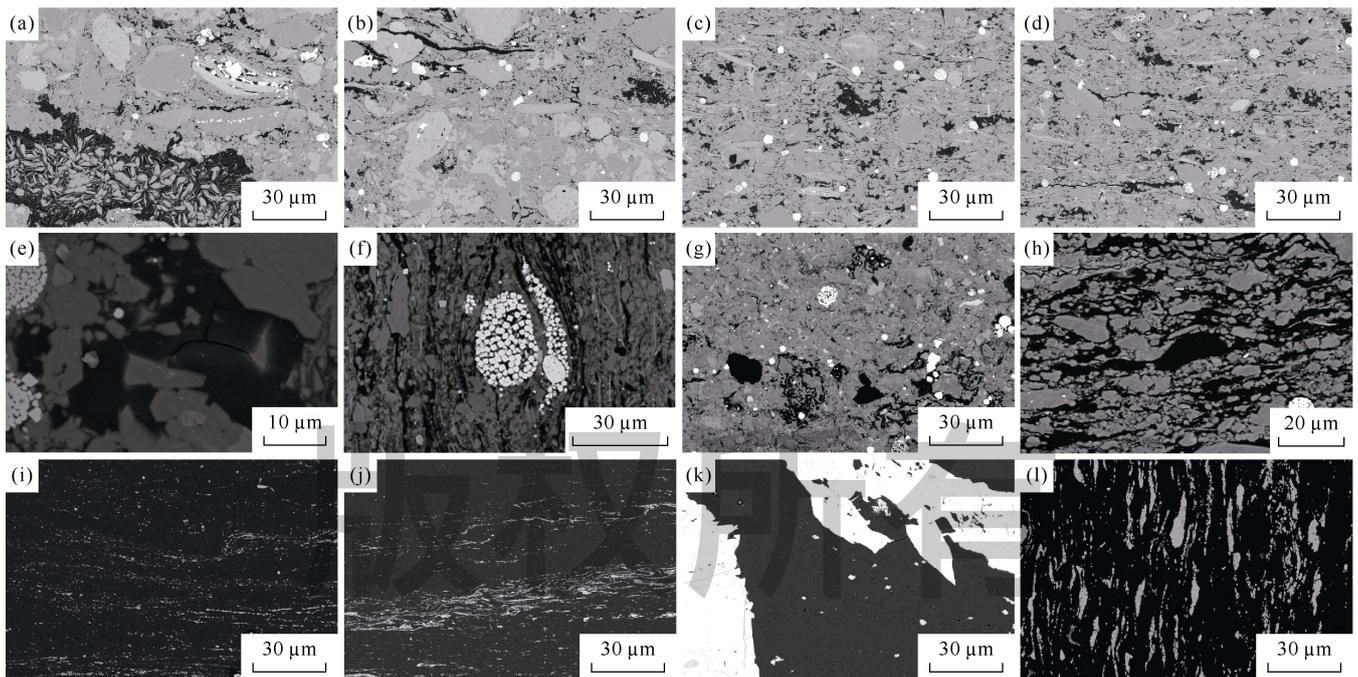
石油地质理论研究的一个新命题。近源岩致密储集层中油气近源二次运聚机理已基本清晰,但源岩内部油气一次运聚机理仍是困扰石油地质家的重大科学难题。页岩埋藏热演化过程是一个温压演进环境中固体-流体-孔缝三元体系相互耦合作用的复杂过程^[18,36],采用常规实验手段的、单一因素考量的研究,常常难以恢复页岩真实的演化过程^[35],进而难以把握孔缝变化和油气赋存的关键时深节点。因此,开展不同成熟阶段固体-流体-孔缝3要素的系统研究,是揭示页岩油气生排烃历史和孔缝发育机制的有效途径。

2.2 源岩油气分类对比

对比国内外页岩油、页岩气、煤层气3种主要源岩油气类型,共性特征是富有机质源岩段分布范围大、厚度较大、有机质丰度较高、源岩生烃潜力大、纳米级孔隙为主、对烃类有很强的吸附性、储集空间油气充满程度高、大面积连续分布、资源规模大等(见图4,表2—表4)。

2.3 源岩油气垂向“甜点段”形成机理

源岩油气“甜点段”是指剖面上油气相对富集或



(a) 四川盆地威远区块,下志留统龙马溪组,岩心,黑色页岩,与石英、方解石、白云石和黏土矿物共生的有机质;(b) 四川盆地威远区块,下志留统龙马溪组,岩心,黑色页岩,与石英、方解石、白云石和黏土矿物共生的有机质;(c) 四川盆地威远区块,下志留统龙马溪组,岩心,黑色页岩,与石英和黏土矿物共生的有机质;(d) 四川盆地威远区块,下志留统龙马溪组,岩心,黑色页岩,与石英和黏土矿物共生的有机质;(e) 鄂尔多斯盆地里147井,上三叠统延长组7段,岩心,黑色页岩,与石英、长石、黄铁矿和黏土矿物共生的有机质;(f) 鄂尔多斯盆地里147井,上三叠统延长组7段,岩心,黑色页岩,与黄铁矿和黏土矿物共生的有机质;(g) 松辽盆地金432井,下白垩统青山口组一段,岩心,黑色页岩,与石英、长石、黄铁矿和黏土矿物共生的有机质;(h) 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷吉174井,中二叠统芦草沟组,岩心,黑色页岩,与石英、白云石、方解石矿物共生的有机质;(i) 沁水盆地煤矿,下二叠统山西组,煤样,黑色煤岩,与伊利石、伊蒙混层等黏土矿物共生的有机质;(j) 沁水盆地煤矿,下二叠统山西组,煤样,黑色煤岩,与高岭石等黏土矿物共生的有机质;(k) 沁水盆地煤矿,上石炭统太原组,煤样,黑色煤岩,与方解石共生的有机质;(l) 鄂尔多斯盆地东缘煤矿,下二叠统山西组,煤样,黑色煤岩,与高岭石等黏土矿物共生的有机质

图4 中国重点盆地源岩油气储集层氩离子抛光-扫描电镜微观照片

表2 国内外页岩油主要参数对比

盆地	地质概况							地球化学参数				
	地质时代	构造背景	沉积环境	层位	埋藏深度/m	有利区面积/km ²	页岩厚度/m	主要岩性	TOC/%	S ₁ +S ₂ /(mg·g ⁻¹)	R _o /%	有机质类型
鄂尔多斯	三叠系	斜坡、凹陷区	浅水湖盆	延长组	1 500~3 000	30 000	30~70	泥页岩	一般 5.0~16.0	6~97	0.6~1.1	I、II ₁
松辽	白垩系	斜坡、凹陷区	浅水湖盆	青山口组	1 000~2 700	20 000	40~150	泥页岩	一般 2.0~3.0	5~26	0.5~1.2	I、II ₁
渤海湾	古近系	斜坡、凹陷区	浅水湖盆	沙河街组	2 000~4 500	20 000	100~250	泥页岩、泥灰岩	一般 3.0~10.0	4~20	0.5~1.3	I、II ₁
准噶尔	二叠系	斜坡、凹陷区	浅水湖盆	芦草沟组	2 000~4 000	3 000	100~240	钙质泥岩	一般 3.0~12.0	2~50	0.6~1.2	II
威利斯顿	上泥盆统一 下石炭统	拗陷区	内陆海盆	Bakken组	2 600~3 200	50 000	5~49	页岩	3.0~25.0	10~65	0.6~0.9	II
墨西哥湾岸	白垩系	斜坡区	深水陆棚	Eagle Ford组	1 000~3 600	40 000	20~60	泥灰岩	3.0~7.0		0.7~1.4	II
二叠	二叠系	拗陷区	深水陆棚	Wolfcamp组、 Spraberry组	2 200~3 800	520 000	20~150	页岩	2.2~7.2		0.7~1.7	II

盆地	储集层参数			流体参数			资源参数		产量参数				
	主要孔隙类型	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	脆性矿物含量/%	压力系数	原油黏度/(mPa·s)	原油密度/(g·cm ⁻³)	气油比/(m ³ ·t ⁻¹)	含水饱和度/%	生烃量/(10 ⁸ t)	地质资源量/(10 ⁸ t)	单井初产/(t·d ⁻¹)	单井累产/(10 ⁴ t)
鄂尔多斯	纳米孔	1~3	一般小于0.10	30~50	0.7~0.9	5~20	0.80~0.85	20~100	0	1 300	300~350	1~25	/
松辽	纳米孔	2~6	一般小于0.02	40~60	1.0~1.2	20~200	0.82~0.85	50~100	0~15	1 160	250~300	1~8	0.5~1.0
渤海湾	纳米孔	2~6	一般小于0.10	40~60	1.2~1.9	10~100	0.67~0.86	50~130	0	1 100	250~300	1~50	0.5~2.8
准噶尔	纳米孔	1~3	一般小于0.10	60~90	1.2~1.5	50~120	0.87~0.92	10~20	0	200	30~50	1~20	/
威利斯顿	纳米孔	4~14	一般小于1.00	50~70	1.2~1.5		0.81~0.83	50~100		450	570	210	1.0~5.0
墨西哥湾岸	纳米孔	5~10	一般小于1.00	60~90	1.3~1.8		0.82~0.87	200~500	5~15	400	约500	200	1.0~5.0
二叠纪	纳米孔	3~12	一般小于1.00	55~85	1.0~1.4		0.78~0.84	100~500	15~25	1 000	约1 000	80	1.0~5.7

表3 国内外页岩气主要参数对比

气田/参数	地质概况					地球化学参数				流体参数		
	构造背景	沉积环境	层位	埋藏深度/m	气区面积/km ²	TOC>2%页岩厚度/m	TOC/%	R _o /%	有机质类型	压力系数	甲烷含量/%	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)
长宁气田	宽缓斜坡和向斜	深水陆棚	上奥陶统一下志留统	2 000~3 000	2 050	33~46	0.3~7.9	2.4~2.8	II型为主	1.4~2.0	96~99	1.9~7.8
威远气田	宽缓斜坡和向斜	深水陆棚	上奥陶统一下志留统	1 600~2 900	1 415	20~60	0.3~8.2	1.8~2.3	II型为主	1.4~2.0	96~99	2.8~3.9
涪陵气田	箱状背斜,产层大面积滑脱	深水陆棚	上奥陶统一下志留统	2 000~4 500	600	38~44	1.5~6.1	2.2~3.1	II型为主	1.5~2.0	96~99	2.0~5.0
延长组页岩气	宽缓斜坡	浅水湖盆	上三叠统	800~1 600	2 367	21~66	2.0~10.0	0.8~1.2	I型、II ₁ 型	0.7~1.0	50~80	2.0~8.1
Marcellus	前陆拗陷及斜坡,产层大面积滑脱	深水陆棚	中泥盆统	1 300~2 600	西南区 7 000, 东北区 6 900	15~61	2.0~10.0	1.1~3.0	II型为主,少量III型	1.0~1.3	大于95	1.7~2.8

气田/参数	储集层参数				资源参数			产量参数			
	孔隙类型	总孔隙度/%	基质孔隙度/%	裂缝孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm ²	脆性矿物含量/%	可采资源量/10 ⁸ m ³	资源丰度/(10 ⁸ m ³ ·km ⁻²)	水平井单井产量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	单井累计产量/10 ⁸ m ³	年产量/10 ⁸ m ³
长宁气田	基质孔隙为主,少量裂缝	3.4~8.4	3.4~8.2	0~1.16	0.000 22~0.001 9	65~98	3 500	4.38	5.55~27.4	0.80~1.00	25
威远气田	基质孔隙为主,少量裂缝	2.5~9.7	3.4~7.9		0.000 11~0.000 6	55~98	2 300	4.00	2.30~22.80	0.70~1.00	
涪陵气田	基质孔隙和裂缝	4.6~7.8	3.7~5.2	0.50~3.30	0.05~0.30	55~75	2 000	9.92	5.90~54.70	1.13~2.00	60
延长组页岩气	纳米孔为主	0.5~4.0			一般小于0.05	30~50	5 318	2.25	0.20~1.60		
Marcellus	基质孔隙和裂缝	6.0~10.0	5	3.50~4.50	0.13~0.77	50~70	85 000	6.12	7.10~76.50	西南区 0.60~3.40, 东北区 0.60~5.70	1 590

表 4 国内外煤层气主要参数对比

盆地/ 参数	地质概况						地球化学参数			
	盆地类型	沉积环境	地层	埋藏 深度/m	煤层 面积/km ²	净煤 厚度/m	气体成因	C ₁ 同位素 组成/%	R _o / %	煤阶
沁水	克拉通	海陆过渡相	石炭-二叠系	300~2 000	5 000	4~17	热成因为主	-31.95	1.5~3.0	瘦煤、贫煤、无烟煤
鄂尔多斯	克拉通	海陆过渡相	石炭-二叠系	600~2 000	10 000	5~18	热成因为主	-32.41	1.2~2.8	焦煤、贫煤
粉河	前陆	河流沼泽相	古近系	60~760	3 300	24~45	生物成因	-62.33	0.3~0.4	亚烟煤
圣胡安	前陆	海陆过渡相	白垩系	150~1 200	1 900	9~21	热成因为主, 含有较高的生物成因	-41.12	0.3~1.3	高低挥发分烟煤

盆地/ 参数	储集层参数			流体参数		资源参数		产量参数	
	孔隙类型	渗透率/10 ⁻³ μm ²	压力系数	甲烷含量/%	含气量/ (m ³ ·t ⁻¹)	可采资源量/ 10 ⁸ m ³	资源丰度/ (10 ⁸ m ³ ·km ⁻²)	平均单井产量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	年产量/ 10 ⁸ m ³
沁水	纳米级孔缝	0.01~5.75	0.7~0.9	98.87	4.0~32.0	6 064	1.2	0.2~0.3	30.9
鄂尔多斯	纳米级孔缝	0.02~16.17	0.8~1.0	90.80	4.0~20.0	11 481	1.1	0.2~0.7	10.4
粉河	纳米级孔缝	35.00~1 000.00	0.9~1.0	98.60	0.8~1.6	6 600	2.0	0.5~0.6	145.0
圣胡安	纳米级孔缝	5.00~60.00	1.0~1.2	97.00	10.0~12.7	3 800	2.0	1.0~3.0	150.0

潜力相对较大的源岩层系内部，经人工改造可形成工业价值的高产层段。“甜点段”的研究，是源岩油气地质研究的核心内容之一。源岩油气“甜点段”的形成，是漫长地史时期，源岩内部生烃作用与储集空间或储集介质之间，长期耦合作用的结果（见图 5）。页岩油“甜点段”的形成，是石油在生油高峰期，干酪根吸附饱和后，从富有机质和孔渗性较差的生油段，大规模排烃就近运移到贫有机质和孔渗性较好的页岩段的过程，“甜点段”一般比生油段具有更好的含油气性和可压裂性。煤层气“甜点段”的形成，是煤成的天然气原地吸附在煤层表面，形成具有较高含气丰度、较高地层压力、较好保存条件等的富气段的过程，“甜点段”和生气段是一体的。页岩气“甜点段”的形成，是天然气在富有机质黑色页岩内部自生自储、原地滞留富集的过程，“甜点段”一般具有高 TOC 值、页理和孔隙较为丰富、游离气含量较高、天然裂缝及超压发育、顶底板封闭条件较好等显著特点（见图 5），“甜

点段”厚度一般不大，如奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气“甜点段”，主要是 6.85 Ma 内形成的 20~40 m 厚的富笔石页岩段。“甜点段”的标识对源岩油气目的层系的把握、地球物理方法的识别、“甜点区”资源规模的评价、水平钻进段及作业段的确立等均具有至关重要的作用。

2.4 源岩油气平面“甜点区”分布规律

源岩油气“甜点区”，是指在平面上有利源岩层系分布范围内，经人工改造可形成工业价值的相对高产富集区。源岩油气的“甜点区”一般大面积连续分布于盆地中心及斜坡的构造稳定区。页岩油“甜点区”一般位于半深水—深水富有机质陆棚页岩沉积区、半深水—深水相富有机质页岩沉积区，中国页岩油主要为湖盆中心、低—中成熟度的富有机质页岩油。页岩气“甜点区”一般位于半深水—深水闭塞、缺氧环境的富有机质页岩沉积区，如南方中上扬子区五峰组—龙马溪组已识别出焦石坝、长宁—昭通、威远等 3 个“甜点区”。煤层气“甜点区”一般位于中高煤阶含煤盆地的向斜区，如美国圣胡安盆地和中国沁水盆地。“甜点区”的评选，是源岩油气地质评价、规划部署的核心内容。

此外，需要注意的是，源岩油气“甜点区（段）”内涵丰富，主要包括 3 个方面，“地质甜点区（段）”关注油气赋存特征、富有机质源岩段分布、顶底板分布、天然裂缝、地层能量等地质综合评价，“工程甜点区（段）”关注目的层段横向连续性、地层可压性、地应力各向异性等工程综合评价，“经济甜点区（段）”关注目的层段埋深、可采油气资源规模、地表条件及基础设施等经济综合评价。“地质甜点区（段）”，是指在源岩层系发育区，目前经济技术条件下可优先勘探开发的非常规源岩油气相对富集高产的目标区（段）。目前技术条件下，依靠水平井体积压裂、平台式“工

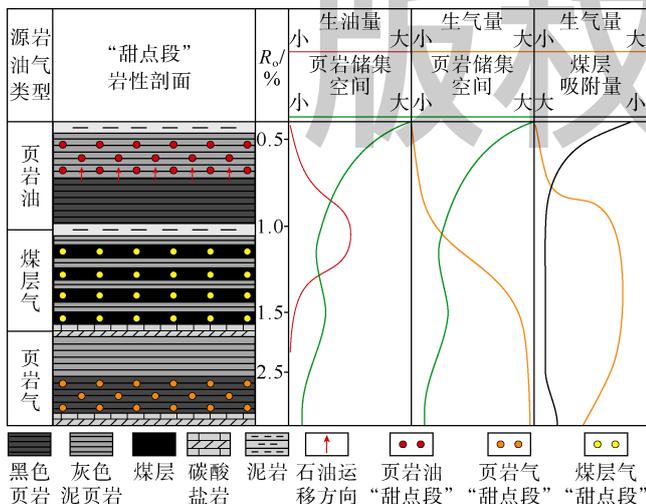


图 5 源岩油气“甜点段”形成机理

厂化”作业等技术,页岩气、煤层气及中高成熟度页岩油“较高资源丰度区(段)”,一般为目的层段厚度较大、分布稳定连续、孔渗性相对较好、保存条件较好、有一定构造背景的有利区(段),这是“甜点区(段)”评价的地质属性;潜在技术条件下,依靠地下原位加热转化等技术,油页岩油、中低成熟度页岩油的“甜点区(段)”,是富有机质页岩段厚度较大、有机质丰度很高、稳定连续分布范围很大、埋深较小、顶底板封闭性好的有利区(段)。“工程甜点区(段)”是指“人工渗透率区(段)”,一般为天然裂缝发育、脆性矿物含量较高、水平应力差较小的有利区(段),这是“甜点区(段)”评价的工程属性。

源岩油气“甜点区”包括“地质甜点区(段)、工程甜点区(段)、经济甜点区(段)”,只有3个“甜点区(段)”匹配叠置才能有效开采“地质甜点区(段)”着眼于源岩品质(体积压裂页岩油气 R_0 值为0.9%~3.5%、TOC值大于2%,原位转化页岩油 R_0 值为0.5%~0.9%、TOC值大于6%)、储集能力(孔隙度:页岩油气大于3%)、渗流能力(地层压力、渗透率、天然裂缝、油气品质等)、资源丰度(含油气饱和度大于50%、资源丰度大于 $2 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$)、资源规模(资源量大于 $1 \times 10^8 \text{ t}$,单井两年累产大于 $2.0 \times 10^4 \text{ t}$ 油气当量)等综合评价;“工程甜点区(段)”着眼于岩石脆性(页岩脆性矿物含量大于40%)、各向异性(水平应力差小于10 MPa)、埋藏深度(小于3 500 m)、地表条件(基础设施、水力电力供应、交通运输等条件优越)等综合评价;“经济甜点区(段)”着眼于油价变化、市场机制(工程服务公司、管道公司、销售公司等市场化)、管理方式(研发、作业、运输、销售等程序无缝链接)、政策支撑(财政补贴、新技术研发激励基金等)、环境保护(符合环境保护法规定、绿色作业)等综合评价。

总之,源岩油气具有两个基本特征:①油气大面积连续分布,资源丰度低;②无自然工业产能,经“人工”改造产油。因此,“进源找油”包括寻找“较高资源丰度区(段)”和易于形成“人工渗透率区(段)”两个内容。立足源岩油气有利资源规模区,立足现实及潜在经济技术条件,评价优选“甜点区(段)”,是“进源找油”的核心部分,贯穿勘探开发全过程。

3 “源岩油气”发展前景与挑战

3.1 “源岩油气”的资源基础

源岩油气资源相当丰富。全球源岩石油占比石油可采资源总量的25%,其中页岩油 $2.080 \times 10^8 \text{ t}$ 、油页岩油 $1.051 \times 10^8 \text{ t}$;源岩天然气可采资源总量是常规天然气的1.5倍多,其中页岩气 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、煤层气 $256 \times$

10^{12} m^3 ^[7,11-14]。中国沉积盆地的形成与发展历经了古生代海相与中生代陆相两个演化阶段,源岩油气形成的地质条件较好(见图6)。中国油页岩油可采资源量 $131.80 \times 10^8 \text{ t}$ 、页岩气可采资源量 $12.85 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、煤层气可采资源量 $12.51 \times 10^{12} \text{ m}^3$,预测地下原位加热转化中低成熟度富有机质页岩,石油可采资源量(700~900) $\times 10^8 \text{ t}$,天然气约(60~65) $\times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[10],预测水平井体积压裂中高成熟度页岩油可采资源量超过 $200 \times 10^8 \text{ t}$ 。

3.2 “源岩油气”的学科意义

1959年大庆油田发现后,中国石油先辈们根据松辽盆地的实践经验,总结出油气运移距离短、油源区控制油气田分布的理论,简称“源控论”,并提出“定凹选带”的勘探思路^[37]。60年来,秉承“源控论”找油理念,中国油气勘探始终遵循立足主力生烃凹陷、寻找供烃范围内有利常规油气田目标的原则,在东部中、新生界陆上及海域断陷盆地、中西部古、中生界克拉通、前陆盆地,乃至国外富油气盆地油气勘探中,发现了一大批油气田^[38-39]。

源岩油气地质,是“源控论”在非常规油气阶段的新发展,是非常规油气地质学科的重要组成部分,是正在蓬勃发展、尚需不断总结完善的新兴学科方向。通过“进源找油”,北美源岩油气发展渐入佳境;中国等极少数国家源岩油气发展刚刚起步,世界其他地区源岩油气发展依然滞缓,多变的地质条件和严苛的技术要求,决定了全球源岩油气的理论技术进步和整体规模开发是一个长期过程。大型常规-非常规油气“共生盆地”,是坚持“进源找油”,发展源岩油气的首选阵地。大型“共生盆地”内,常规油气与非常规油气共生伴生、“有序聚集”,油气资源丰富,勘探程度较高,具有深入的地质认知、立体的物探钻试资料、完备的地面管输设施等有利条件,可实现源岩油气快速发展。作为中国油气科技工作者,植根中国地质实际,持续思考总结中国源岩油气地质理论,关注开拓国外源岩油气地质认识,是一项需长期坚持、不断创新的重要工作。源岩油气地质,将为承续和推进后油气工业时代上游领域新征程,提供新的理论依据。

3.3 “源岩油气”的发展挑战与前景

源岩油气仍面临地质认识创新、甜点有效评价、钻采核心技术及经济降本增效等方面挑战,其中地质研究包括表征源岩油气赋存状态、重现流体运聚过程、揭示油气分布规律等,甜点评价包括刻画源岩储集层纳米级孔缝系统、建立储集层评价体系、寻找油气富集甜点等,钻采技术包括研发旋转导向钻井技术、打破核心技术瓶颈等,经济评价包括降本增效规模上产、规划源岩油气战略性接替。产生“人工渗透率”或形

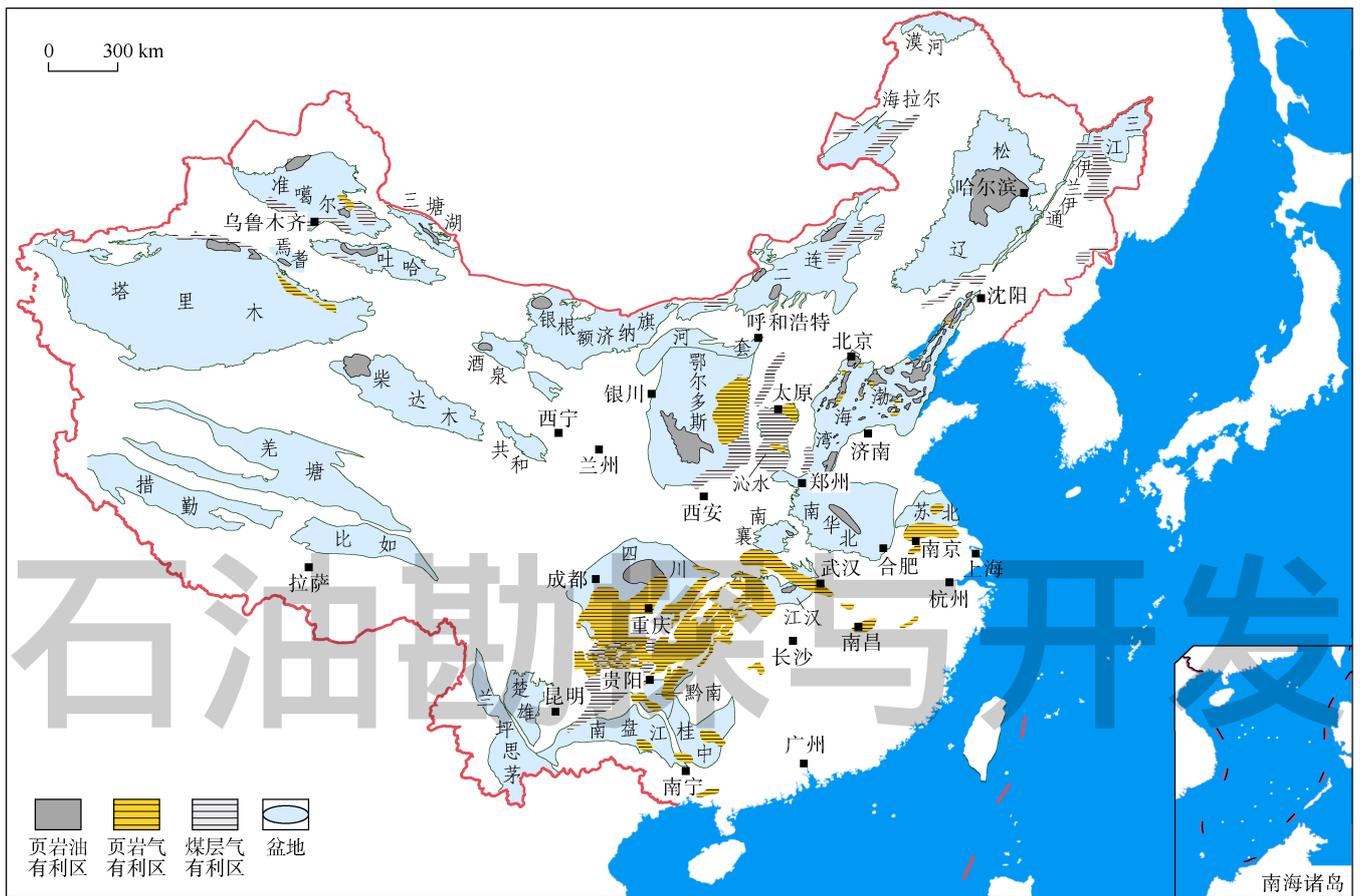


图6 中国陆上主要“源岩油气”资源有利区分布

成“人工能量场”、建造“人工油气藏”等开发技术，是源岩油气规模效益发展的关键（见图7）。

油气类型	岩性	理论基础	主要技术路线
油页岩油	油页岩	干酪根成烃	地表加热干馏、清洁利用一体化、原位水平井电加热转化“地下炼厂”
页岩油	页岩油	干酪根成烃连续油聚集	中低成熟度原位电加热转化“地下炼厂”、非水（CO ₂ 、N ₂ 、空气等）压裂“人工油藏”、中高成熟度水平井水力压裂“人工油藏”、纳米材料压裂提高采收率技术
煤层气	煤层	连续气聚集	水力压裂增产改造“人工气藏”、多元气体驱替、采煤采气一体化
页岩气	页岩气	连续气聚集	水平井水力压裂“人工气藏”、纳米材料压裂提高采收率技术

图7 源岩油气开发主要技术路线

中国源岩油气发展面临以下问题：页岩气面临地表条件复杂、埋藏深度大、水源条件差、管网设施不完善、3 500 m 以深工程技术不具备、寒武系页岩热演化程度高、常压页岩气未突破、陆相-海陆过渡相页岩气未突破等问题；煤层气面临气水分布复杂、富集规律不清、800 m 以深开采技术不具备、储集层改造难度大等问题；页岩油面临泥页岩非均质性强、黏土矿物含量高、有机质成熟度较低、原油流动性较差、水平

井压裂技术不适用等难题。

中国源岩油气主要发展建议：①坚持源岩油气理论的创新研究。目前，页岩油等的形成机理和分布规律仍处于探索阶段，油气连续分布的“甜点区”和“甜点段”仍需反复求解，地质理论创新研究仍是未来指导源岩油气规模效益发展的必经之路。②设立3种类型源岩油气开发试验区。一是设立技术突破试验区，研究鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段页岩油等关键开发技术；二是设立提高采收率试验区，突破煤层气等关键提产技术；三是设立降本增效试验区，实施蜀南浅层页岩气等一体化低成本规模开发。③下决心集中投资突破瓶颈技术。着力加强3类制约源岩油气突破的技术瓶颈攻关力度。一是加强地下钻头精准钻进，包括掌握地震精细建模、地质旋转导向垂直快打、水平井地质旋转导向等核心技术；二是加强深层页岩油气储集层改造，重点是3 500~4 500 m 深层页岩“井工厂”压裂造缝技术；三是加强页岩油地下转化开采，亟需开展原位加热转化现场先导试验与非水压裂等探索，争取率先在中国实现陆相“页岩油革命”。④推动国家对源岩油气政策支持。美国非常规源岩油气的可持续发展离不开长期稳定的国家政策支持，值得借鉴。

源岩油气资源潜力巨大，具有广阔的发展前景。

就像当前北美 Appalachian、Permian、Gulf Coast、Williston 等大型常规-非常规“共生盆地”源岩油气正经历迅猛发展一样，Central Arabia、West Siberian、Zagros、RuʼAl Khali 等中东、中亚—俄罗斯、非洲、南美、澳大利亚等 10 余个成熟探区大型常规-非常规“共生盆地”的源岩油气，也将在未来某个时间节点迎来发展的“黄金期”。在中国，源岩石油将是未来石油稳定发展的主力，源岩天然气将是天然气产量跨越的增长点，预计 2030 年源岩石油和源岩天然气产量将分别占比 15%和 30%，鄂尔多斯盆地、四川盆地等“共生盆地”将发挥重要作用，应进一步加大源岩油气发展力度，推动和加快中国源岩油气革命，促进源岩油气在能源转型阶段成为保障中国能源基本安全重要砝码。

4 结语

源岩油气是生烃层系生成、滞留或就近聚集在烃源岩内部、利用新技术可工业开采的连续型油气资源。“进源找油”的主要任务，就是进入生烃层系中，寻找“甜点区”和“甜点段”，开发滞留烃和转化有机质。源岩油气地质，是“源控论”在非常规油气阶段的新发展，是非常规油气地质学科的重要组成部分。

源岩油气是全球油气供应的战略领域，目前主要取得 4 项新进展：①提出了源岩油气地质学内涵，是研究地壳中源岩油气生烃模式、形成机理、分布规律、采出机制、发展战略的地质学科，建立了源岩油气生、排、滞留烃模式，指出 5 个源岩油气生成段决定相应技术条件下的现实资源潜力；②分析了源岩油气“甜点段”的形成机理，提出了“甜点区”优选应考虑地质、工程和经济 3 个方面，评价优选“甜点区(段)”是源岩油气“进源找油”的核心部分；③全球成熟探区大型常规-非常规油气“共生盆地”是未来源岩油气发展的重心，具有广阔的发展前景，预计 2030 年中国源岩油和天然气产量将有望分别占比 15%和 30%；④针对源岩油气发展诸多挑战，提出坚持理论创新研究、设立开发试验区、加强技术攻关、争取国家支持等建议。

目前源岩油气还面临一系列基础理论与技术难题。个别源岩油气类型还有一些理论问题需要深入探究，如油页岩油及其形成的重油归属等等。同时，太阳能、储能、氢能等新能源发展、地缘政治经济等都深刻影响化石能源开发进程与产量高低。未来主要源岩油气产量将随化石与非化石能源变革而变化，这是能源革命不可逆转的发展趋势。

参考文献：

[1] 邹才能, 杨智, 何东博, 等. 常规-非常规天然气理论、技术及前景

[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 575-587.

ZOU Caineng, YANG Zhi, HE Dongbo, et al. Theory, technology and prospect of natural gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 575-587.

[2] 丹尼尔·耶金. 能源重塑世界[M]. 朱玉霖, 阎志敏, 译. 北京: 石油工业出版社, 2012.

YERGIN D. The quest: Energy, security, and the remaking of the modern world[M]. NIU Yuben, YAN Zhimin, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.

[3] BP. Statistical review of world energy 2018[R]. London: BP Distribution Services, 2018.

[4] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2014.

ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.

[5] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 1-11.

JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geology theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.

[6] 翟光明. 关于非常规油气资源勘探开发的几点思考[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 1-3.

ZHAI Guangming. Speculations on the exploration and development of unconventional hydrocarbon resources[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 1-3.

[7] 董晓光, 张光亚, 王兆明, 等. 全球油气资源潜力与分布[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 1-10.

TONG Xiaoguang, ZHANG Guangya, WANG Zhaoming, et al. Distribution and potential of global oil and gas resources[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 1-10.

[8] 戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 等. 中国天然气水合物气的成因类型[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 837-848.

DAI Jinxing, NI Yunyan, HUANG Shipeng, et al. Genetic types of gas hydrates in China[J]. Petroleum Exploration & Development, 2017, 44(6): 887-898.

[9] 杨智, 邹才能, 付金华, 等. 基于原位转化/改质技术的陆相页岩选区评价: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组 7 段页岩为例[J]. 深圳大学学报(理工版), 2017, 34(3): 221-228.

YANG Zhi, ZOU Caineng, FU Jinhua, et al. Selection of pilot areas for testing in-situ conversion/upgrading processing in lacustrine shale: A case study of Yanchang-7 member in Ordos Basin[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2017, 34(3): 221-228.

[10] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 537-545.

ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 537-545.

[11] USGS. World petroleum assessment[EB/OL]. (2013-01-01)[2013-03-01]. <http://pubs.usgs.gov/dds/dds-060>.

[12] IEA. International energy outlook 2017[EB/OL]. (2017-09-14)[2017-12-20]. <http://www.eia.gov/ieo>.

[13] EIA. International energy outlook 2011[EB/OL]. (2011-09-19)[2014-07-03]. http://www.eia.gov/pressroom/presentations/howard_09192011.pdf.

[14] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2: Shale-oil resource systems[C]//BREYER J A. Shale reservoirs: Giant resources for the 21st century. Tulsa: AAPG, 2012: 89-119.

[15] 戴金星, 倪云燕, 吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 257-264.

- DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.
- [16] HAO F, ZOU H Y, LU Y C. Mechanisms of shale gas storage: Implications for shale gas exploration in China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(8): 1325-1346.
- [17] HU Q H, ZHANG Y X, MENG X H, et al. Characterization of micro-nano pore networks in shale oil reservoirs of Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag of Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 681-690.
- [18] LOUCKS R G, RUPPEL S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [19] NELSON P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones and shales[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(8): 329-340.
- [20] ZHANG T W, WANG X Z, ZHANG J F, et al. Geochemical evidence for oil and gas expulsion in Triassic lacustrine organic-rich mudstone, Ordos Basin, China[J]. Interpretation, 2017, 5(2): 41-61.
- [21] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10.
- JIN Zhijun, HU Zongquan, GAO Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.
- [22] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
- LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, CHEN Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [23] 邱楠生, 许威, 左银辉, 等. 渤海湾盆地中—新生代岩石圈热结构与热—流变学演化[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 13-16.
- QIU Nansheng, XU Wei, ZUO Yinhui, et al. Characteristics of Mesozoic thermal regimes in typical eastern and western sedimentary basins of China[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 13-16.
- [24] HAN Y, HORSFIELD B, WIRTH R, et al. Oil retention and porosity evolution in organic-rich shales[J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(6): 807-827.
- [25] HAN Y, MAHLSTEDT N, HORSFIELD B. The Barnett Shale: Compositional fractionation associated with intraformational petroleum migration, retention, and expulsion[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(12): 2173-2202.
- [26] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- ZHANG Jinchuan, XU Bo, NIE Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140.
- [27] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-26.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, TAO Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.
- [28] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [29] 杨智, 侯连华, 陶士振, 等. 致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 555-565.
- YANG Zhi, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Formation condition and “sweet spot” evaluation of tight oil and shale oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 555-565.
- [30] 赵文智, 王红军, 曹宏, 等. 中国中低丰度天然气资源大型化藏理论与勘探开发技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- ZHAO Wenzhi, WANG Hongjun, CAO Hong, et al. Large scale accumulation theory and exploration & development technology of natural gas resources with low and medium abundance in China[M]. Beijing: Science Publishing House, 2013.
- [31] 宋岩, 刘洪林, 柳少波, 等. 中国煤层气成藏地质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- SONG Yan, LIU Honglin, LIU Shaobo, et al. Coal-bed gas reservoir geology[M]. Beijing: Science Publishing House, 2010.
- [32] 李剑, 马卫, 王义凤, 等. 腐泥型烃源岩生排烃模拟实验与全过程生烃演化模式[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 445-454.
- LI Jian, MA Wei, WANG Yifeng, et al. Modeling of the whole hydrocarbon-generating process of sapropelic source rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 445-454.
- [33] 秦建中, 刘宝泉. 成煤环境不同类型烃源岩生排烃模式研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 758-764.
- QIN Jianzhong, LIU Baoquan. Study on the models of hydrocarbon generation and expulsion from various source rocks in coal-bearing environments[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(6): 758-764.
- [34] 马中良, 郑伦举, 余晓露, 等. 泥质烃源岩的有效排油门限及页岩油地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 32-39.
- MA Zhongliang, ZHENG Lunju, YU Xiaolu, et al. Effective oil expulsion threshold of argillaceous source rocks and geological significance of shale oil[J]. Journal of China University of Petroleum, 2018, 42(1): 32-39.
- [35] KO L T, LOUCKS R G, ZHANG T, et al. Pore and pore network evolution of Upper Cretaceous Boquillas (Eagle Ford-equivalent) mudstones: Results from gold tube pyrolysis experiments[J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(11): 1693-1722.
- [36] MILLIKEN K L, RUDNICKI M, AWWILLER N D, et al. Organic matter-hosted pore system, Marcellus formation (Devonian), Pennsylvania[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 177-200.
- [37] 胡朝元. 生油区控制油气田分布: 中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 9-13.
- HU Chaoyuan. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, east China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(2): 9-13.
- [38] 胡朝元. “源控论”适用范围量化分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 1-3.
- HU Chaoyuan. Research on the appliance extent of “source control theory” by semi-quantitative statistics characteristics of oil and gas migration distance[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 1-3.
- [39] 贾承造, 邹才能, 杨智, 等. 陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 1-15.
- JIA Chengzao, ZOU Caineng, YANG Zhi, et al. Significant progress of continental petroleum geology theory in basins of Central and Western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 1-15.

第一作者简介: 杨智 (1980-), 男, 内蒙古五原人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事非常规源岩油气、致密油气地质、常规油气风险勘探等研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院石油地质研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: yangzhi2009@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018-08-13 修回日期: 2018-12-11

(编辑 魏玮)