

文章编号: 1000-0747(2013)01-0014-13

页岩油形成机制、地质特征及发展对策

邹才能¹, 杨智¹, 崔景伟¹, 朱如凯¹, 侯连华¹, 陶士振¹, 袁选俊¹,
吴松涛¹, 林森虎¹, 王岚¹, 白斌¹, 姚泾利²

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 中国石油长庆油田公司)

基金项目: 国家油气重大专项“岩性地层油气藏成藏规律、关键技术及目标评价”(2011ZX05001)

摘要:页岩油是储存于富有机质、纳米级孔径为主页岩地层中的成熟石油,是常规-非常规“有序聚集”体系的重要类型之一,对中国陆相页岩油形成的沉积环境、储集空间、地球化学特征和聚集机制等基本石油地质问题进行了分析总结。富有机质页岩主要发育在半深湖—深湖环境,不同岩性组合共生沉积;发育纹层结构,微米—纳米级孔隙和微裂缝是主要储集空间;有利页岩以Ⅰ型和Ⅱ型干酪根为主, R_o 值为 0.7%~2.0%、TOC 值大于 2.0%、有效厚度大于 10 m;揭示了页岩孔隙演化和页岩油滞留聚集模式,储集空间、脆性指数、黏度、压力、滞留量等是页岩油“核心区”评价的关键。中国陆相页岩油在湖盆中心连续聚集,初步预测可采页岩油资源量约 $30 \times 10^8 \sim 60 \times 10^8$ t,水平井体积压裂、改造“天然裂缝”、注粗颗粒“人造储集层”等可能是页岩油工业化发展的核心技术,提出加快页岩油“分布区”研究、加强“核心区”评选、加大“试验区”建设的“三步走”发展思路。借鉴北美海相页岩气突破成功经验,陆相页岩油工业化有望在中国首先突破。图 9 表 2 参 39

关键词:页岩油;页岩气;页岩系统油气;纳米级孔隙;非常规油气;常规-非常规“有序聚集”体系

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China

Zou Caineng¹, Yang Zhi¹, Cui Jingwei¹, Zhu Rukai¹, Hou Lianhua¹, Tao Shizhen¹, Yuan Xuanjun¹,
Wu Songtao¹, Lin Senhu¹, Wang Lan¹, Bai Bin¹, Yao Jingli²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;
2. PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710065, China)

Abstract: As an important type of “conventional-unconventional orderly accumulation”, shale oil is mature oil stored in organic-rich shales with nano-scale pores. This paper analyzes and summarizes elementary petroleum geological issues concerning continental shale oil in China, including sedimentary environment, reservoir space, geochemical features and accumulation mechanism. Mainly deposited in semi-deep to deep lake environment, shale rich in organic matter usually coexists with other lithologies in laminated texture, and micron to nano-scale pores and microfractures serve as primary reservoir space. Favorable shale mainly has type I and II kerogens with a R_o of 0.7%–2.0%, TOC more than 2.0%, and effective thickness of over 10 m. The evolution of shale pores and retained accumulation pattern of shale oil are figured out. Reservoir space, brittleness, viscosity, pressure, retained quantity are key parameters in the “core” area evaluation of shale oil. Continuously accumulated in the center of lake basins, continental shale oil resources in China are about $30 \times 10^8 \sim 60 \times 10^8$ t by preliminary prediction. Volume fracturing in horizontal wells, reformation of natural fractures, and man-made reservoir by injecting coarse grains are some of the key technologies for shale oil production. A three step development road for shale oil is put forward, speeding up study on “shale oil prospective area”, stepping up selection of “core areas”, and expanding “test areas”. By learning from marine shale breakthroughs in North America, continental shale oil industrialization is likely to kick off in China.

Key words: shale oil; shale gas; shale system; nano-scale pore-throat; unconventional hydrocarbon; conventional-unconventional orderly accumulation

0 引言

世界石油工业正在从常规油气向非常规油气跨越。非常规油气主要为页岩系统油气,包括致密油和页岩油和气。致密油和气是储集在致密砂岩或灰岩等储集层中的石油和天然气,油气经历了短距离运移。页岩油和气是指富集在富有机质黑色页岩地

层中的石油和天然气,油气基本未经历运移过程,目前页岩气已成为全球非常规天然气勘探开发的热点^[1-5],页岩油的相关研究也正在兴起。笔者在充分调研国内外页岩油气、致密油气最新勘探开发和研究进展的基础上^[1,5-10],根据对鄂尔多斯盆地中生界延长组等中国陆相湖盆页岩油的研究,系统总结页岩油的基本内涵和基本特征,详细阐述了页岩油形成的沉积环境、地

球化学特征、储集空间和聚集机制等基本石油地质问题,最后预测中国页岩油的资源潜力,提出页岩油“核心区”评价标准和“三步走”的具体发展思路。

1 研究背景

全球油气工业发展正在不断突破油气生成最高温度极限、突破油气储集最小孔喉极限、突破油气聚集最大深度极限,“3个极限”的突破,推动油气发展地域由陆地向深水区、深度由中浅层向深层—超深层、资源由常规油气向非常规油气快速延伸,大于3 000 m海洋超深水等新区、超过6 000 m陆地深层等新层系、小于1 000 nm孔径超致密储集层等新类型,将成为石油工业发展具有战略性的“三新”领域。

目前,以页岩气为代表的非常规油气引发了一场重大石油科技革命,其有3个显著特征:理论的颠覆性,技术的突破性,生产的工业性。勘探开发非常规油气是从常规寻找圈闭向寻找大面积储集层转变,颠覆了传统圈闭油气聚集理论;从常规直井开发向水平井规模压裂转变,突破了直井传统开采方法;从常规单井开采向平台式多井“工厂化”开采转变,打破了一个井场单井开采模式。非常规油气突破具有3大战略意义:延长石油工业的生命周期,突破了传统资源禁区 and 成藏理论,增加了资源类型与资源量;引发了油气科技革命,推动整个石油工业理论技术升级换代;改变了全球传统能源格局,形成以中东为核心的东半球“常规油气版图”,以美洲为核心的西半球“非常规油气版图”,影响世界发展秩序。美国主要依靠非常规油气推动“能源独立”战略实施,真正实现美国“能源安全”,深远影响世界大国在政治、经济、军事等领域的战略调整和新布局。

油气工业发展将经历常规油气突破、常规油气与非常规油气并重、非常规油气发展3个阶段,形成完整的石油工业生命周期。预测世界石油工业的生命周期大约300 a,自1859年现代石油工业诞生起,已经经历了150余年。1934年McCulloagh提出的“圈闭学说”是常规油气地质理论形成的重要标志,指导了常规油气资源的勘探开发;1995年Schmoker等提出的“连续型油气聚集”是非常规油气理论开启的里程碑,为非常规油气资源有效开发利用提供了科学依据^[6-10]。由于找油气理论、技术和方法不断创新,1956年哈伯特提出的石油产量“峰值理论”已被颠覆,世界油气产量高峰从20世纪60年代,可能延迟到21世纪30—40年代,世界石油工业生命周期也很可能会超过300 a^[6-10]。

非常规油气是指用传统技术无法获得自然工业产

量、需采用新技术改善储集层渗透性或流体流动性等才能经济开采、连续或准连续型聚集的油气资源。常规与非常规油气聚集的本质区别是油气是否明显受圈闭控制、单井是否有自然工业产能。非常规油气有两个关键标志:油气大面积连续或准连续分布,圈闭界限不明显;无自然工业稳定产能,达西渗流不明显。

常规-非常规油气“有序聚集”体系,是指富油气盆地或凹陷内常规与非常规油气在时间域持续充注、空间域有序分布,二者成因有先后、相互依存、紧密共生,形成统一的油气聚集体系。该体系揭示出不同类型油气资源“有序聚集”的规律,展示出富油气盆地或凹陷内常规与非常规油气资源应“同步研究、同步部署、同步勘探”,可采用平台式多井“大井场”开采模式对不同层系、不同类型油气“同步开发”,加快勘探开发节奏,提高资源利用效率和经济效益。据此规律可透视不同类型油气在空间上的分布位置,一般发现常规油气,预示供烃方向可能有非常规油气分布;发现非常规油气,预示外围空间可能有常规油气伴生。平面上,一般盆地边缘或斜坡分布常规构造油气藏和岩性地层油气藏,凹陷或沉积中心聚集非常规致密油气和页岩油气等;纵向上,从浅到深分布远源的常规油气藏、近源的致密油气和源内的页岩油气。以往不同阶段找油气思路有差异,一般早中期立足常规油气资源,用“源控论”寻找大型构造油气藏、“复式油气聚集带”或“大油气区”理论寻找构造与岩性地层油气藏集群;中后期立足非常规油气资源,用“连续型油气聚集”认识,寻找近源致密油气或源内页岩油气。而常规-非常规油气“有序聚集”体系认识突破了传统找油气思路,推动找油气地质理论从“找点”、“找带”、“找面”向“找体”跨越,打破先找常规后找非常规“先富后贫”的找油思路。对待常规与非常规油气,勘探追求“一网打尽”,开发追求“吃干榨尽”。

非常规油气主要类型是页岩系统油气,包括致密油和气、页岩油和气。页岩气的成功开发利用突破了页岩气开采的理论关、技术关、成本关和环保关“四道关口”,已成为全球非常规天然气勘探开发热点^[1,4-5]。页岩气是非常规天然气的成功革命者,页岩油可能成为非常规石油的革命者。

目前全球已在阿巴拉契亚、墨西哥湾、西西伯利亚、松辽等盆地发现了泥页岩裂缝型油气,特殊泥页岩裂缝出油已成共识^[6],但在基质页岩油能否形成工业化聚集和经济性开采问题上,理论界和工业界主要持否定和悲观态度,也尚未有取得工业突破的报道。以往研究认为富有机质黑色页岩主要是提供油气来源的

生油岩, 或为阻止油气继续运移、逸散的封盖层, 而非油气储集层, 故长期未被纳入油气勘探开发之列, 但在大量钻遇富有机质黑色页岩地层中发现了丰富的石油显示, 证明富有机质页岩中存在页岩油资源。

页岩油是重要的非常规石油类型, 常规-非常规“有序聚集”的重要类型之一。页岩油能否获得工业化突破, 主要取决于页岩油地质理论创新、工业化技术等突破的速度, 可能成为未来 20~30 a 重大的油气接替领域。

2 页岩油的基本特征

2.1 页岩油的定义

页岩油是指储存于富有机质、纳米级孔径为主页岩地层中的石油, 是成熟有机质页岩石油的简称。页岩既是石油的烃源岩, 又是石油的储集岩。页岩油以吸附态和游离态形式存在, 一般油质较轻、黏度较低。主要储集于纳米级孔隙和裂缝系统中, 多沿片状层理

面或与其平行的微裂缝分布。富有机质页岩一般在盆地中心大面积连续聚集, 整体普遍含油, 资源规模大。页岩油“核心区”评价的关键包括储集空间分布、储集层脆性指数、页岩油黏度、地层能量和富有机质页岩规模等。页岩气的成功开采为页岩油开采提供了技术参考, 水平井体积压裂、重复压裂等“人造渗透率”改造技术, 是实现页岩油有效开发的关键技术。

页岩油资源中, 凝析油或轻质油可能是实现工业开采的主要类型^[6,11]。凝析油和轻质油分子直径为 0.5~0.9 nm, 理论上讲, 其在地下高温高压下页岩纳米级孔隙中更易于流动和开采。

2.2 有利页岩油分布区基本特征

页岩油在聚集机理、储集空间、流体特征、分布特征等方面与源储分离的常规石油和近源聚集的致密油具有明显差异(见表 1), 与页岩气则有更多相似之处。有利页岩油分布区主要有以下特征。

表 1 页岩油主要地质参数统计表

盆地	层位	储集空间特征							
		沉积相	岩性	页岩厚度/m	埋深/m	储集空间类型	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙直径/nm
鄂尔多斯	三叠系	半深湖—深湖	页岩	10~40	1 500~3 000	基质孔、微裂缝	<4	<0.1	<150
准噶尔	二叠系	半深湖—深湖	页岩、云质泥岩	10~200	1 800~4 500	基质孔、微裂缝	<5	<0.1	<150
四川	侏罗系	半深湖—深湖	页岩	20~60	2 000~4 500	基质孔、微裂缝	<3	<0.1	<100
渤海湾	沙河街组	半深湖—深湖	页岩	30~200	1 500~5 000	基质孔、微裂缝	<6	<0.5	<200
松辽	白垩系	半深湖—深湖	页岩	50~200	1 800~2 400	微裂缝、基质孔	3~6	<0.15	<200
柴达木	第三系	半深湖—深湖	页岩、灰质泥岩	30~200	3 500~4 600	基质孔、微裂缝	<3	<0.1	<150
酒西	白垩系	半深湖—深湖	页岩	50~200		基质孔、微裂缝	<3	<0.1	<300
三塘湖	二叠系	半深湖—深湖	云灰质泥岩	20~100	1 000~4 500	微裂缝、基质孔	<3	<0.1	<300
吐哈	侏罗系	半深湖—深湖	页岩	30~60	1 000~4 500	微裂缝、基质孔	<3	<0.1	<300
江汉	第三系	半深湖—深湖	页岩	30~100	2 500~3 500	基质孔、微裂缝	<5	<0.1	<200
南襄	第三系	半深湖—深湖	页岩	30~120	2 300~3 700	基质孔	<4	<0.1	<200
苏北	第三系	半深湖—深湖	页岩	30~100	2 500~3 500	微裂缝	<2	<0.1	<250
Williston ^[6]	Bakken	陆棚区	海相页岩	5~12	2 590~3 200	基质孔、微裂缝	<3	<0.1	<200
South Texas ^[6]	Eagle Ford	陆棚区	海相泥灰岩	20~60	914~4 267	微裂缝、基质孔	<3	<0.1	<150

盆地	脆性特征		含油性特征				流体特征*			地质资源量	
	脆性指数/%	泊松比	TOC/%	R _o /%	S _i /(mg·g ⁻¹)	氯仿沥青“A”/%	原油黏度/(mPa·s)	原油密度/(g·cm ⁻³)	压力系数	分布面积/10 ⁴ km ²	资源量/10 ⁸ t
鄂尔多斯	40~55	0.20~0.30	3.0~28.0	0.6~1.0	1~6	0.6~1.2	6.1~6.3	0.80~0.85	0.75~0.85	8.0~10.0	25~35
准噶尔	45~55	0.20~0.30	1.4~6.9	0.6~1.5	1~6	0.3~1.0	55.0~125.0	0.87~0.92		6.0~8.0	20~25
四川	45~55	0.25~0.35	1.8~17.0	0.9~1.5	1~7	0.3~1.0	5.0~20.0	0.76~0.87	1.23~1.72	7.0~9.0	15~20
渤海湾	40~80	0.20~0.35	2.0~17.0	0.35~1.5	1~10	0.1~3.1	5.0~30.0	0.67~0.86	1.30~1.90	9.0~11.0	20~25
松辽	37~58	0.25~0.35	0.7~8.7	0.5~2.0	1~3	0.2~1.0	20.0~200.0	0.78~0.87	1.20~1.58	8.0~9.0	20~25
柴达木	40~50	0.25~0.35	0.7~1.2	0.6~1.8	1~3	0.3~0.5		0.72~0.80	1.40~1.50	2.0~3.0	5~8
酒西			1.0~2.5	0.5~0.8				0.82~0.94		0.3~0.5	2~3
三塘湖	40~55	0.25~0.30	2.0~8.0	0.6~1.2	1~4	0.2~0.7	10.0~250.0	0.85~0.90	1.00~1.20	0.5~1.0	3~5
吐哈	40~50	0.25~0.30	1.0~5.0	0.5~0.9	1~2	0.1~0.5		0.75~0.85	1.00~1.20	0.7~1.0	2~3
江汉	30~40	0.30~0.35	1.0~2.0	0.6~1.3	1~2	0.1~0.7	0.7~14.0	0.80~0.86	0.90~1.10	0.2~0.3	1~2
南襄	45~75	0.25~0.30	1.0~3.0	0.5~1.2	1~3	0.1~0.6	5.0~350.0	0.84~0.87	0.90~1.10	0.1	1~2
苏北	20~30	0.30~0.35	1.0~2.0	0.6~1.3	1~2	0.1~0.5	4.0~18.0	0.81~0.85	0.90~1.10	0.2~0.3	1~2
Williston ^[6]	20~40		10.0~14.0	0.6~0.9	3~5			0.81~0.83	1.35~1.58	7.0	
South Texas ^[6]	45~65	0.20~0.30	3.0~7.0	0.7~1.3				0.82~0.87	1.35~1.80	4.0	

注: *为近源致密砂岩、致密灰岩储集层中的流体特征参数

2.2.1 源储一体, 滞留聚集

页岩油是典型的源储一体、滞留聚集、连续分布的石油聚集。富有机质页岩既是生油层, 也是储集层。与页岩气不同, 页岩油主要形成于有机质演化的液态烃生成阶段。在富有机质页岩持续生油阶段, 石油在

页岩储集层中滞留聚集, 只有在页岩储集层自身饱和后才向外溢散或运移。因此, 处在液态烃生成阶段的富有机质页岩均可能聚集页岩油。目前在北美海相地层和中国陆相地层中已有页岩裂缝油发现^[12], 但未见基岩页岩油发现的报道。

2.2.2 富有机质，成熟度较高

富含有机质是页岩富含石油的基础，高产富集页岩油层 TOC 值一般大于 2% R_o 值一般为 0.7%~2.0%，形成轻质油和凝析油，有利于开采。

2.2.3 发育纳米级孔喉、裂缝系统

一般页岩发育毫米—厘米级纹层。页岩油储集层中广泛发育纳米级孔喉，孔径主要为 50~300 nm，局部发育微米级孔隙，孔隙类型包括粒间孔、粒内孔、有机质孔、晶间孔等。微裂缝在页岩油储集层中也非常发育，类型多样，以未充填的水平层理缝为主，干缩缝次之，近断裂带处发育直立或斜交的构造缝。大部分页岩发育较好的片状结构，有黏土矿物片状结构、碳酸盐片状结构、有机质片状结构、黄铁矿等多种类型，页岩油广泛赋存于这些片状层理面或与其平行的微裂缝中。

2.2.4 储集层脆性指数较高

脆性矿物含量是影响页岩微裂缝发育程度、含油性、压裂改造方式的重要因素。页岩中高岭石、蒙脱石、水云母等黏土矿物含量越低，石英、长石、方解石等脆性矿物含量越高，岩石脆性越强，在外力作用下越易形成天然裂缝和诱导裂缝，利于页岩油开采。中国湖相富有机质页岩脆性矿物含量总体较高，可达 40%以上，如鄂尔多斯盆地延长组长₇段湖相页岩石英、长石、方解石、白云石等脆性矿物含量平均达 41%，黏土矿物含量低于 50%，长₇²亚段和长₇³亚段页岩中黄铁矿的含量较高，平均为 9.0%。

2.2.5 地层压力大、油质轻

页岩油富集区位于已大规模生油的成熟富有机质页岩地层中，一般地层能量较高，压力系数可达 1.2~2.0，也有少数低压地层，如鄂尔多斯盆地延长组压力系数仅为 0.7~0.9；油质一般较轻，原油密度多为 0.70~0.85 g/cm³，黏度多为 0.7~20.0 mPa·s；高气油比，在纳米级孔喉储集系统中更易于流动和开采。

2.2.6 大面积连续分布，资源潜力大

页岩油分布不受构造控制，无明显圈闭界限，含油范围受生油窗富有机质页岩分布控制，大面积连续分布于盆地坳陷或斜坡区。页岩生成的石油较多地滞留于页岩中，一般占总生油量的 20%~50%，资源潜力较大。如鄂尔多斯盆地中生界长₇段页岩中富集页岩

油层段（集中分布于长₇²下段和长₇³大部）初步估算页岩油可采资源量达 10×10⁸~15×10⁸ t。北美海相页岩分布面积大、厚度稳定、有机质丰度高、成熟度较高，有利于轻质和凝析页岩油的生成^[6,11]。

3 富有机质页岩沉积模式

页岩可形成于海相、海陆过渡相和陆相沉积环境中，富有机质黑色页岩的形成需具备两个重要条件：高生产力，丰富的有机质供给；有利于沉积有机质保存、聚积与转化的条件^[13-14]。

富有机质黑色页岩的沉积模式主要有 4 种：海（湖）侵模式、水体分层模式、门槛模式和洋流上涌模式^[15]。在陆相湖盆内，只发育湖侵、水体分层和门槛 3 种模式。湖侵模式是指相对湖平面上升，导致深水处形成大面积缺氧环境，有机质得以埋藏、保存而形成黑色页岩（密集段），在坳陷湖盆的展布规模一般较大（见图 1a）。水体分层模式是指在温度、盐度或其他差异作用下，汇水盆地上下水体循环受阻，导致局部低洼滞水区形成缺氧环境，形成富有机质黑色页岩。水体分层是富有机质页岩形成的最主要形式。门槛模式分为高门槛和低门槛两种，这主要是针对水体深度而作的区分。高门槛模式是指在断陷湖盆（见图 1b）和前陆湖盆（见图 1c）等深水湖盆内，由于受“门槛”阻挡，外源水体无法影响盆地深部水体，进而水体分层形成缺氧环境，发育黑色页岩。低门槛模式则是指在水体很浅的滞水区内（如沼泽），由于生物分解大量耗氧，导致水体呈还原环境，进而保存高等植物有机质形成煤系页岩的沉积模式。低门槛模式的最大特征是无水体分层。

湖平面周期性的波动过程中，水体深度和沉积物输入速率具有周期性变化的特征，导致沉积剖面上有机碳总量规律变化^[16]。层序边界处水体较浅，沉积物堆积速度快且氧化作用活跃，剖面上往往出现有机碳总量最小值。在最大湖泛面附近，沉积物供应速度慢，为欠补偿沉积段，有机质相对富集^[17]，常出现有机碳总量最大值，即密集段是层序中最有利的富有机质页岩层段^[18]。但并非所有湖盆的最大湖泛面附近皆可形

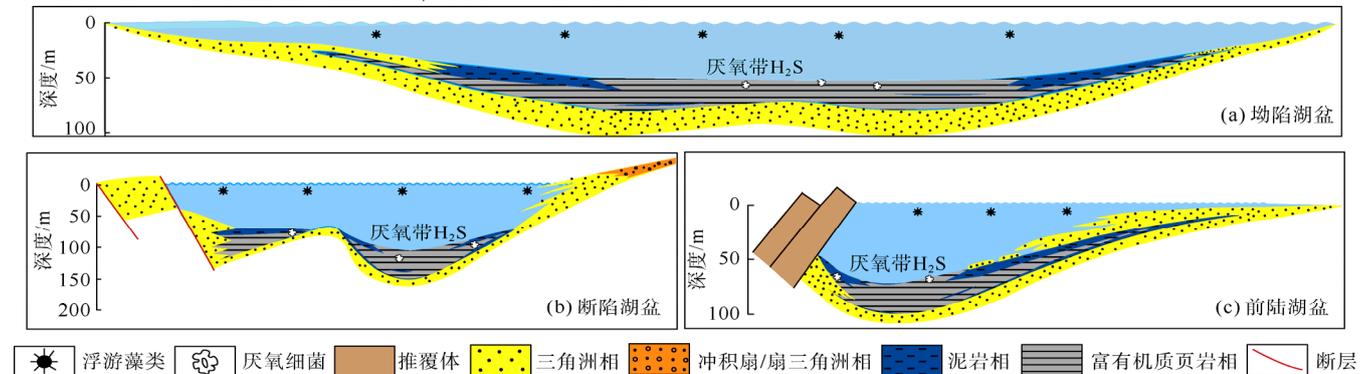


图 1 陆相湖盆黑色页岩沉积模式图

文章编号: 1000-0747(2013)01-0014-13

成密集段^[19], 陆相湖盆由于盆地类型和演化阶段不同, 加之湖盆面积小、多物源、湖平面变化等因素, 富有机质页岩在层序内的纵向分布较为复杂。中国东部断陷湖盆沉积密集段可分布于高位体系域下部, 也可分布于湖侵体系域^[20], 中西部盆地主要分布于湖侵体系域^[21]。

中国陆相优质油源岩常与凝灰岩共生, 如鄂尔多斯盆地长₇段、松辽盆地青山口组一段、渤海湾盆地沙河街组三段和四段、准噶尔盆地平地泉组、三塘湖盆地芦草沟组等, 均广泛发育薄层—纹层状凝灰岩, 常见颜色为浅灰色、浅黄色、紫红色等, 单层厚度一般为 10~100 mm, 最厚可达数米。凝灰岩可能主要来自火山喷发活动, 具有序纹层结构、大气降落等明显沉积特征, 同期活跃的区域构造活动可能是页岩沉积期最大湖泛的主要动力因素, 同期频繁的火山喷发、湖底热液等活动, 共同促进了富氢有机质页岩的大规模发育^[22]。

中国陆上富有机质黑色页岩类型多, 时代跨度大, 分布范围广, 为页岩油气形成提供了良好的物质基础 (见表 1)。湖相富有机质黑色页岩形成于二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系和新近系的陆相裂谷盆地、坳陷盆地。二叠系湖相富有机质黑色页岩发育在准噶尔盆地, 分布于准噶尔盆地西部—南部坳陷, 包括风城组、夏子街组、乌尔禾组 3 套页岩。三叠系湖相页岩发育在鄂尔多斯盆地, 其中长₇段、长₈段页岩最好, 分布于盆地中南部。侏罗系在中西部地区为大范围含煤建造, 但在四川盆地为内陆浅湖—半深湖相沉积, 中—下侏罗统发育自流井组页岩, 在川中、川北和川东地区广泛分布。白垩系湖相页岩发育在松辽盆地, 包括下白垩统青山口组、嫩江组、沙河子组和营城组页岩, 在全盆地分布。古近系湖相页岩在渤海湾盆地广泛发育, 以沙河街组一段、三段、四段为主, 分布于渤海湾盆地各凹陷, 黄骅和济阳坳陷还发育孔店组页岩。湖相富有机质黑色页岩为中国陆上松辽、渤海湾、鄂尔多斯、准噶尔等大型产油区的主力油源岩。

4 页岩油母质类型与地球化学特征

中国陆相富氢有机质页岩主要发育在半深湖—深湖相沉积环境, 以 I 型和 A 型干酪根为主, 易于生油; 页岩成熟度普遍较高, R_o 值一般为 0.7%~2.0%, 处于生偏轻质石油阶段; 页岩有机质丰度较高, 总有机碳含量一般在 2.0% 以上, 最高可达 40%; 形成商业性页岩油气的有效页岩厚度一般大于 10 m。沉积有机质的划分可有效确定富有机质页岩的分布。

页岩内赋存的烃类包括气态烃、轻质油和重质油 3 部分。用 S_1 值 (游离烃含量)、氯仿沥青“ A ”含量和 TOC 值衡量页岩油含量时, 结果有一定差异^[23]。 S_1 值无法反映原油中重质部分的含量, 氯仿沥青“ A ”含量不能反映 C_{14} 烃类的含量, 二者的观测值均低于实际

残留油量, 且受成熟度影响大, 在度量页岩油含量时需进行必要的校正; TOC 值相对稳定, 并与 S_1 和氯仿沥青“ A ”有较好的相关关系, 可用于页岩含油量评价。如鄂尔多斯盆地中生界长₇段页岩 S_1 值、氯仿沥青“ A ”含量与 TOC 值呈很好的正相关关系 (见图 2a, 2b)。还有其他一些指标也可用于页岩油含量的度量, 如黄铁矿含量常与页岩油含量正相关 (见图 2c)。

陆相页岩层系油源岩中, 纹层状页岩与块状泥岩在各种地球化学指标上差异较大。以鄂尔多斯盆地长₇段为例, 大量测试分析显示 (见表 2), 长₇段页岩有机质丰度和生烃潜力远大于泥岩, 页岩生烃潜力是泥岩的 5~8 倍; 长₇段黑色页岩 TOC 值平均高达 18.50%, 约是泥岩的 5 倍; 页岩 S_1 值平均为 5.24 mg/g, 是泥岩的 5 倍以上; 页岩的 S_2 值 (热解烃含量) 平均为 58.63 mg/g, 为泥岩的 8 倍多; 而且页岩的氢指数、

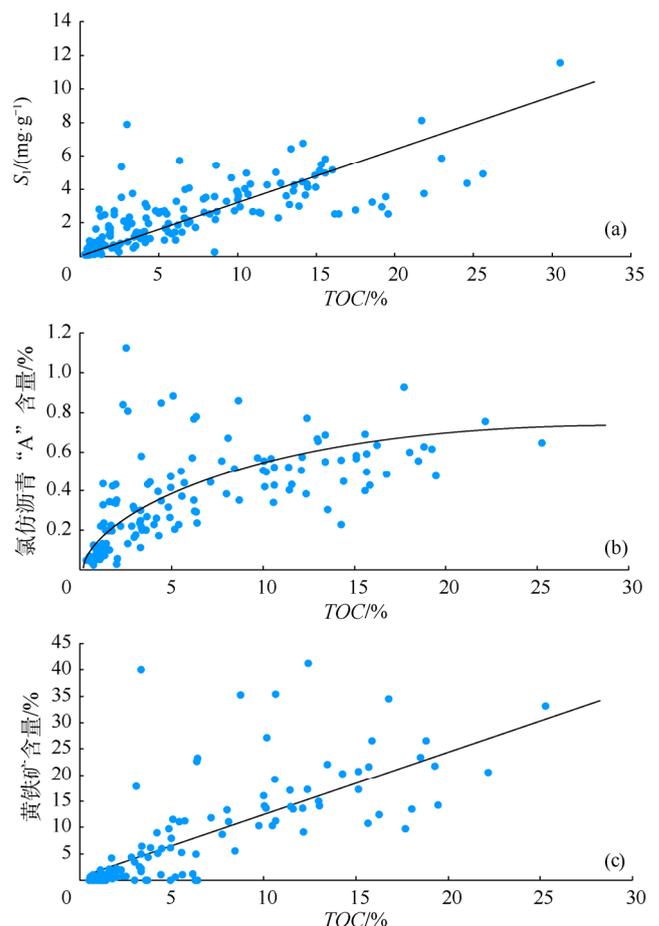


图 2 鄂尔多斯盆地中生界长₇段页岩含油性与 TOC 关系 (样品数 113)

有效碳、降解率等参数均大于泥岩。富有机质页岩不但是长₇段最主要的生油岩,也是页岩油主要的储集岩。

5 页岩油聚集空间类型与纳米级孔演化模式

近年来,国内外学者尝试使用高精度设备开展了大量页岩微孔隙和微裂缝表征方面的工作。利用氩离子切割、双离子束激光切割等制样设备,3D X射线微米CT和纳米CT、场发射扫描电镜、环境扫描电镜、原子力显微镜、透射电子显微镜等高分辨率观测设备^[24-30],结合能谱、二次电子和背散射图像,实现了页岩内部孔隙和矿物成分三维分布图像重构^[31-32]。邹才能等利用场发射扫描电镜和纳米CT扫描重构了四川盆地海相页岩的孔隙结构,在中国含油气储集层中首次发现了纳米级孔喉系统^[33]。

页岩是指由粒径小于0.0039 mm的碎屑、黏土、有机质等组成具页状或薄片状层理、容易碎裂的一类细粒沉积岩,常见的页岩类型有黑色页岩、炭质页岩、硅质页岩、铁质页岩、钙质页岩等。页岩矿物成分复杂,碎屑矿物包括石英、长石、方解石等,含量一般超过40%;黏土矿物有蒙脱石、伊蒙混层、伊利石、高岭石等;黄铁矿单体或集合体常与干酪根有机质共生。页岩层理结构十分发育,发育碳酸盐-石英-长石—黏土矿物—有机质-黄铁矿“三元”结构(见图3a—3d)或黏土矿物—有机质-黄铁矿、碳酸盐-石英-长石—有机质-黄铁矿“二元”结构,不同矿物组成、岩性组合常相互叠合、共生分布。

中国富有机质黑色页岩储集空间包括微米级孔隙、纳米级孔喉和微裂缝,以纳米级孔喉为主,微米级孔隙和微裂缝次之。纳米级孔喉主要为黏土矿物晶间孔、自生石英粒间孔-晶间孔、长石粒间孔、碳酸盐晶间孔、黄铁矿晶间孔等,孔径一般为小于500 nm,局部发育微米级孔隙(见图3c、3d)。黏土矿物主要为伊蒙混层

矿物、伊利石和绿泥石(见图3e、3f),晶间孔以片状为主,绝大多数为纳米级孔喉。白云石、方解石、菱铁矿等矿物,以及石英、钾长石、斜长石等碎屑矿物在页岩中也非常发育,常呈纹层状与黏土矿物相互叠合分布(见图3c)。黄铁矿呈草莓状集合体分散或团簇或沿裂缝呈长条形产出,晶形完好,发育纳米级晶间孔,常与有机质伴生叠置(见图3c、3g);页岩油储集层中,有机质演化程度相对较低,尚未达到生气窗,有机质内纳米级孔隙的贡献有限,如鄂尔多斯盆地长₇段泥页岩内有机质孔多为狭长缝状,发育于有机质与基质边界,孔隙宽50~200 nm(见图3h)。微裂缝按成因可分为成岩微裂缝和构造微裂缝两类:前者主要为纹层间微裂缝(见图3a),在不同成分纹层间均有发育,微裂缝较窄,宽度一般在1~10 μm,易于顺层延续;后者主要为斜交微裂缝(见图3b),缝面较平直,常见纹层错断,缝内常充填自生碳酸盐矿物、黄铁矿等。

据页岩成岩物理模拟实验、纳米级孔喉定量分析等研究,本文提出中国湖相富有机质页岩(Ⅱ型干酪根)孔隙演化模式(见图4)。实验发现,大孔(孔径大于50 nm)、中孔(孔径为2~50 nm)和微孔(孔径小于2 nm)的比孔容随温度增加呈现出不同的变化趋势。大孔的比孔容随模拟实验温度和压力增加先增加后降低,微孔和中孔的比孔容先降低后增加。整个生排烃过程残留烃的含量是变化的,即随温度增加先增加后减小,在约350 ℃时达到最大(150 mg/g),这与前人研究提出的残留烃存在一个门限值(100 mg/g)的观点不同^[34]。

实际上,页岩有机质类型、残留烃排烃方式、排烃压力等均可能对排烃产生一定影响,尚需深入研究。

表2 鄂尔多斯盆地长₇段页岩与泥岩地球化学参数

岩性	$S_1/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$S_2/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	热解峰温/ ℃	$(S_1+S_2)/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$S_4/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	TOC/ %	母质 类型	产率 指数	氢指数/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	有效碳/ %	降解率/ %	烃指数/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
页岩	5.24	58.63	450.60	63.87	131.93	18.50	— A	0.12	296.20	5.30	27.20	31.63
泥岩	1.01	6.88	446.65	7.90	30.83	3.74	A— B	0.19	143.96	0.66	14.47	30.39

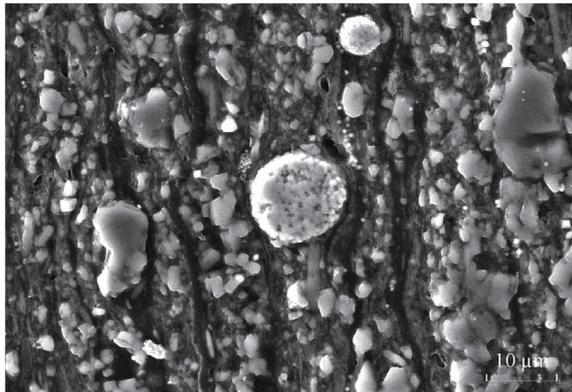
注: S_4 —残余碳含量



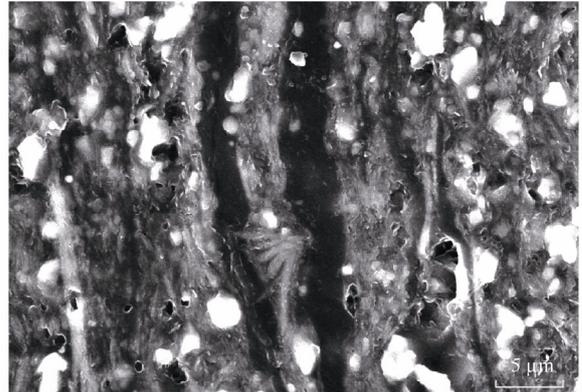
(a) 里147井, 2 422 m, 黑色页岩, 发育碳酸盐-石英-长石-黏土矿物-有机质-黄铁矿“三元”纹层结构, 见纹层间微裂缝, 单偏光照片



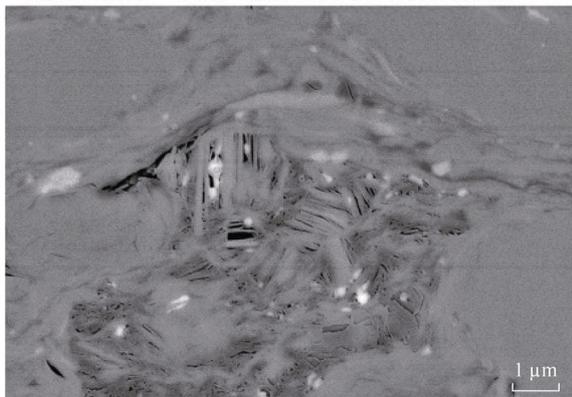
(b) 白32井, 2 458.8 m, 黑色页岩, 发育碳酸盐-石英-长石-黏土矿物-有机质-黄铁矿“三元”纹层结构, 见斜交微裂缝, 单偏光照片



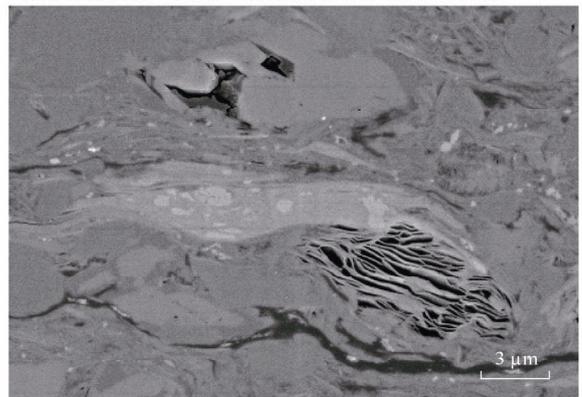
(c) 里147井, 2 445.5 m, 黑色页岩, 发育石英-长石-伊蒙混层-有机质-黄铁矿“三元”纹层结构, 普通扫描电镜照片



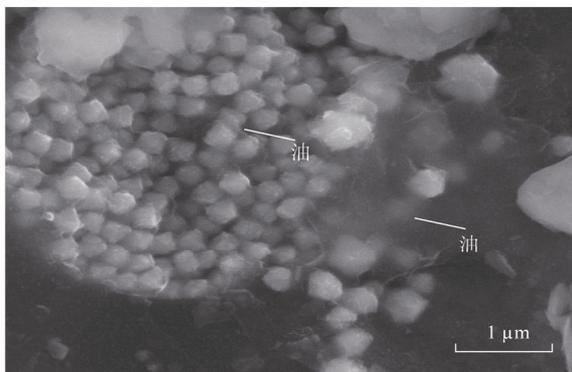
(d) 环317井, 2 479.35 m, 黑色页岩, 发育石英-长石-黏土矿物-有机质-黄铁矿“三元”纹层结构, 普通扫描电镜照片



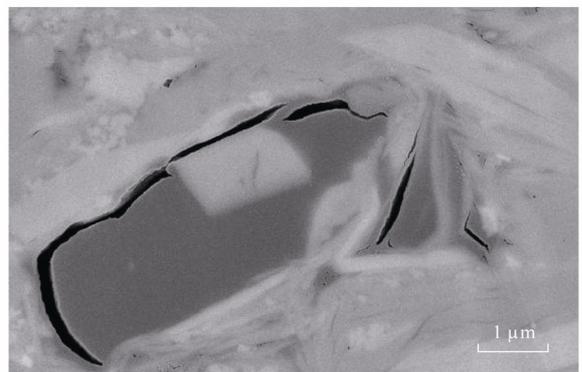
(e) 张2井, 960 m, 纳米级伊蒙混层晶间孔发育, 氟离子抛光-场发射扫描电镜照片



(f) 张2井, 960 m, 纳米级绿泥石晶间孔发育, 氟离子抛光-场发射扫描电镜照片



(g) 里147井, 2 426.5 m, 黄铁矿呈草莓状集合体产出, 纳米级晶间孔有液态石油, 环境扫描电镜照片



(h) 白406井, 1 975.30 m, 有机质孔沿有机质与黏土基质边缘分布, 氟离子抛光-场发射扫描电镜照片

图3 鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩微观照片

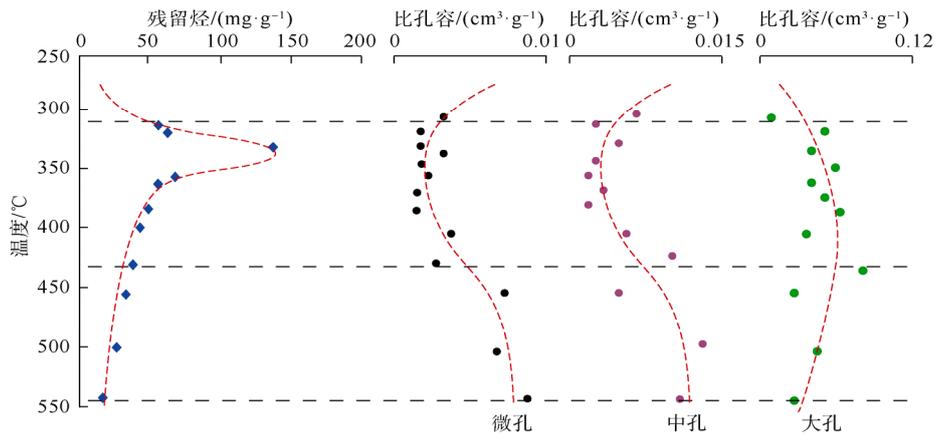


图4 湖相富含有机质页岩纳米孔演化模式

6 页岩油的形成机制

页岩在不同成熟阶段产出油气的机制不同。未成熟有机质页岩可形成“人造油”，成熟有机质页岩地下形成页岩油，高过成熟有机质页岩形成页岩气，可分别称为未熟“人工”页岩油、成熟页岩油、高熟页岩气（见图5）。

尽管页岩生成烃类已被公认，但对页岩内残留烃

素起控制作用。泥页岩内滞留油气取决于干酪根的化学性质和生成油气的体积与组成，而油气的体积与组成又取决于干酪根的性质和二次裂解反应。泥页岩中烃类滞留机理不仅决定烃类在泥页岩中的残留数量和排烃数量，还控制了滞留烃类二次裂解形成页岩气的潜力。很多学者对泥页岩内烃类滞留机理进行了探讨，比较有代表性的理论包括干酪根吸附机理、聚合物溶解机理、排烃门限理论等，这些理论在一定程度上解释了干酪根性质对油气滞留的影响，对油气排烃过程产生的分馏效应也作了一定解释，但均存在一定局限性^[34,36-39]。

依据泥页岩矿物组成、有机碳和残留烃相关分析，结合场发射和环境扫描电镜下页岩孔隙和含油性观察，本文提出了页岩内部页岩油滞留聚集模式（见图6）。残留液态烃主要以吸附态存在于有机质内部和表面，以吸附态和游离态存在于黄铁矿晶间孔内。同

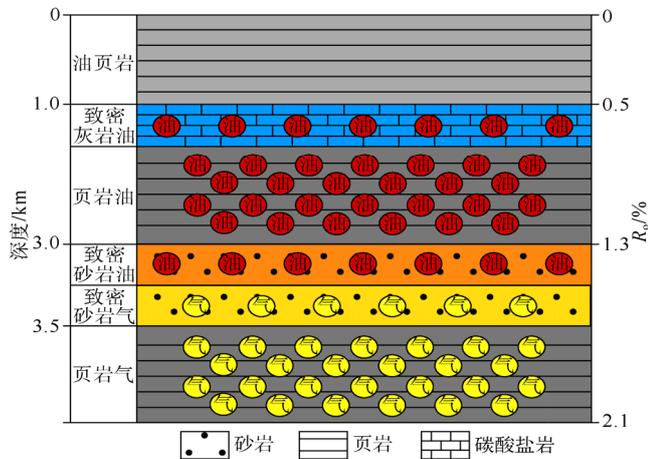


图5 页岩层系油气聚集模式

量和滞留机理却存在不同认识^[35-37]。多数学者认为泥页岩中烃类的释放和排出包括两个过程：烃类从干酪根中热演化生成释放过程和生成烃类在泥页岩内部的初次运移，而对于这两个过程哪个是关键至今还存在很大分歧。有学者认为干酪根中烃类释放是关键，液态烃释放受干酪根吸附和烃类在干酪根网络中的扩散作用控制；还有学者认为烃源岩的岩性组合、有效运移通道、烃源岩内压力分布以及微裂缝发育程度等因

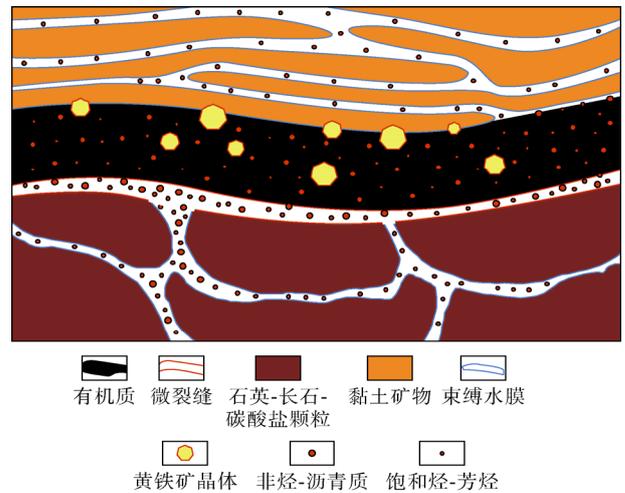


图6 页岩油滞留聚集模式

时,受泥页岩纳米孔喉连通程度、穿越孔喉的贾敏效应、源岩内部压差等限制,部分烃类滞留在泥页岩孔喉系统内,伴生气溶解在烃类中呈液态。由于黏土、石英、长石、白云石、方解石等矿物颗粒表面束缚水膜的存在,矿物基质纳米级孔喉中的液态烃主要呈游离态赋存,其次为吸附态。残留液态烃在微裂缝中主要以游离态形式存在。

7 页岩油资源量预测、评价与核心技术

页岩气的成功勘探开发,表明页岩不仅可作为烃源岩和盖层,还可成为储集层。但对于能否在页岩孔隙中寻找页岩油,国内外尚未形成共识。目前世界上形成工业产量的页岩油绝大多数产自自裂缝性泥页岩,真正的泥岩或页岩中尚无形成规模产量的报道。按照现有的生排烃理论,烃源岩生成的石油大约20%~50%会滞留下来,页岩油的资源潜力可能会远远超过致密油。

中国页岩油勘探刚刚起步,缺少相应的产能数据,常用体积法进行地质资源量计算,即:

$$Q = Sh\rho q \quad (1)$$

式中 Q ——页岩油资源量, t; S ——页岩有效面积, m^2 ; h ——页岩有效厚度, m; ρ ——页岩密度, 10^3 kg/m^3 ; q ——单位质量页岩总含油率, %, 一般用氯仿沥青“ A ”含量或热解液态烃含量 S_1 进行计算。

根据公式(1)估算中国主要盆地可采页岩油资源量大约为 $30 \times 10^8 \sim 60 \times 10^8 \text{ t}$, 目前这还只是一个参考数据和初步认识, 未来资源量数据还会改变。

本文以鄂尔多斯盆地长₇段为例进行了页岩油资源规模研究。长₇段中下部发育的富有机质页岩是页岩油的主要富集层段, 厚度较大, 大面积分布, 其中下部长₇³页岩累计厚度一般达10~18 m, 最厚可达25 m; 中部长₇²页岩累计厚度一般为6~15 m, 最厚可达22 m。富集页岩油层段具有高 TOC 、高黄铁矿含量、高 S_1 、高氯仿沥青“ A ”含量和高自然伽马值的“五高”

特征, $TOC > 2\%$ 、 $R_o > 0.7\%$ 的页岩油富集有利区面积约为 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (见图7), 初步估算页岩油可采资源量达 $10 \times 10^8 \sim 15 \times 10^8 \text{ t}$ 。

发展页岩油应加深资源认识, 找准页岩油富集的有利核心区, 把“核心区”作为资源评价的最终目标。页岩油“核心区”评价取决于5项关键指标(见图8): 有机质含量大于2%、有机质成熟度为0.7%~2.0%, 方可保证页岩中有足够含油量; 脆性矿物含量大于40%、黏土矿物含量小于30%, 方可保证容易压裂形成裂缝系统, 脆性矿物含量高也容易发育天然裂缝; 页岩为超压系统, 方可保证有较大的天然能量, 更有利于石油开采; 较低的原油黏度, 凝析油或轻质油更有利于石油在页岩纳米级孔喉中的流动, 可保证页岩油开采的经济效益; 含油页岩具有一定体积规模, 可保证能进行工业化作业和经济开采。

页岩气开发为页岩油发展提供了技术路线图和经验。展望页岩油开发核心技术, 应包括页岩油资源评价方法、富有机质段测井评价、富有机质段平面地震叠前预测、水平井体积压裂、改造“天然裂缝”(见图9a) 注入粗颗粒“人造储集层”(见图9b) 注气形成高气油比技术、微地震监测、纳米油气提高采收率、“工厂化”作业模式等。在页岩气技术发展的基础上, 针对页岩油攻关, 有可能形成针对页岩油的关键技术, 实现页岩油开发的工业化突破。

8 页岩油“三步走”发展思路

页岩油研究具有重要的战略意义: 页岩油有很大资源潜力。中国发育陆相富有机质页岩, 已发现有纳米级孔喉系统和裂缝页岩油, 表明页岩油资源类型客观存在。页岩气开发为页岩油开发提供了参照路线图, 北美海相页岩气工业化生产为中国陆相页岩油生产提供了技术支持和发展思路, 但页岩油与页岩气开发还是存有一定差异。关键是技术突破的时间和速度。页岩油可能是石油工业下一个突破点。加强页岩油理论技术创新研究, 有利于加快石油工业再一次科技革命, 推动石油工业快速发展。页岩气在北美成

文章编号：1000-0747(2013)01-0014-13

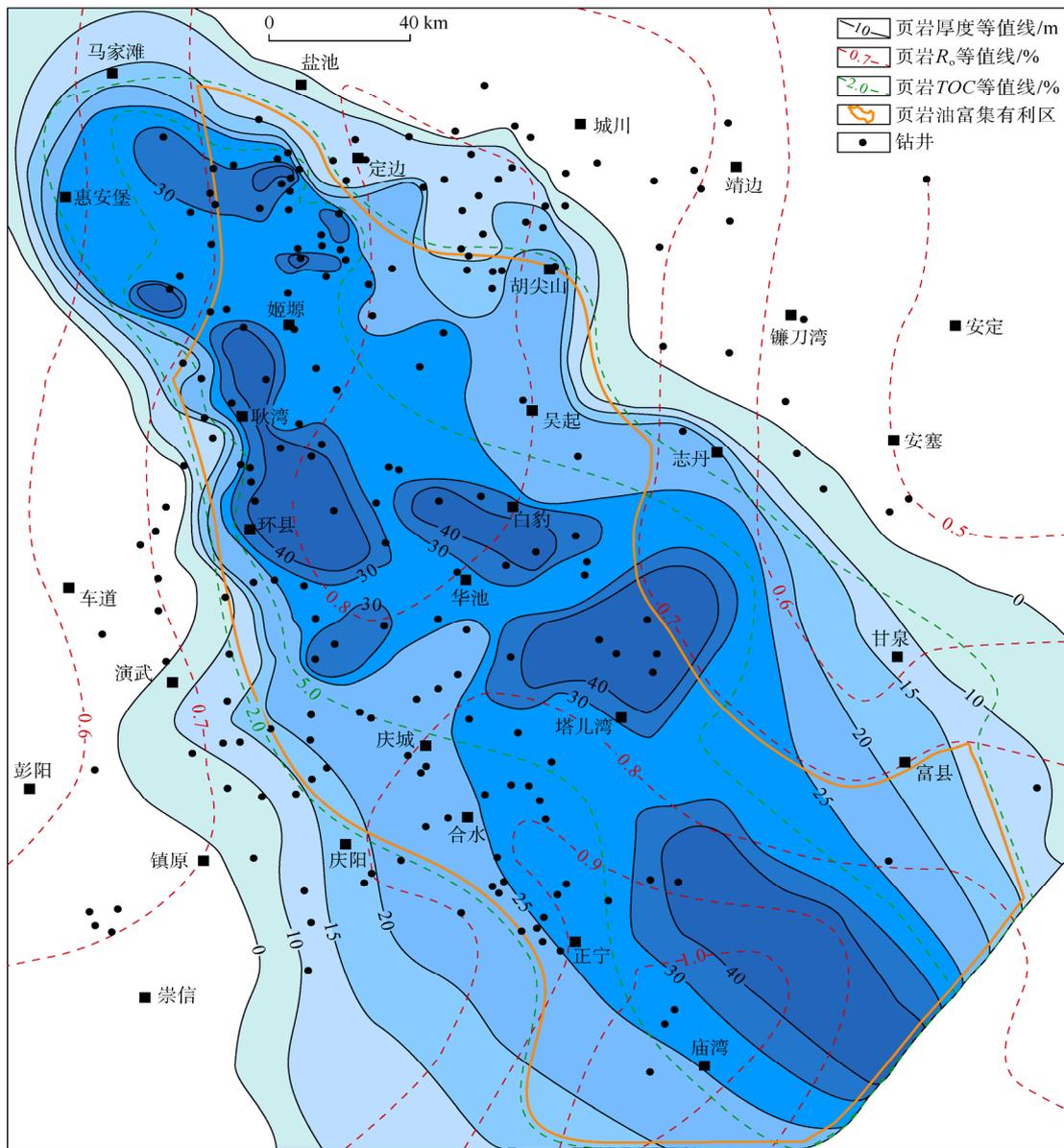


图7 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油富集有利区分布

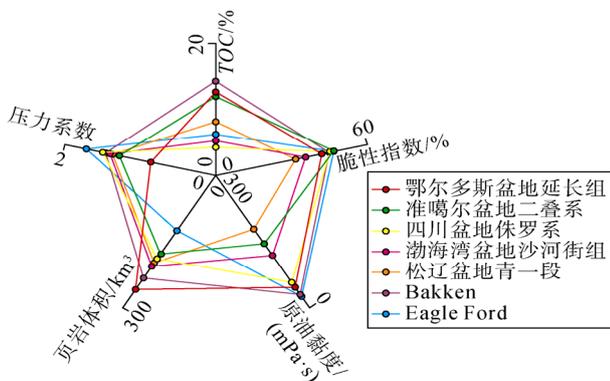


图8 页岩油经济评价综合图

功实现了革命，是非常规天然气的突破。

借鉴国外页岩气发展经验，结合中国页岩气目前现状，笔者提出了中国页岩气发展应制定加快核心区评选、加大试验区建设、加强生产区规划的“三步走”发展思路。加快页岩油发展：第1步，加快“分布区”研究。以中国陆上中浅层重点盆地已知成熟页岩层系为重点，积极开展不同类型页岩油的解剖与分析测试等基础研究工作，解决页岩油运聚机理、赋存状态与渗流机制等基础科学问题，明确页岩油资源潜力与分布。第2步，加强“核心区”评选。以老井复查为基础，积极新钻一批地质调查参数井，开展系统测试分

文章编号: 1000-0747(2013)01-0014-13

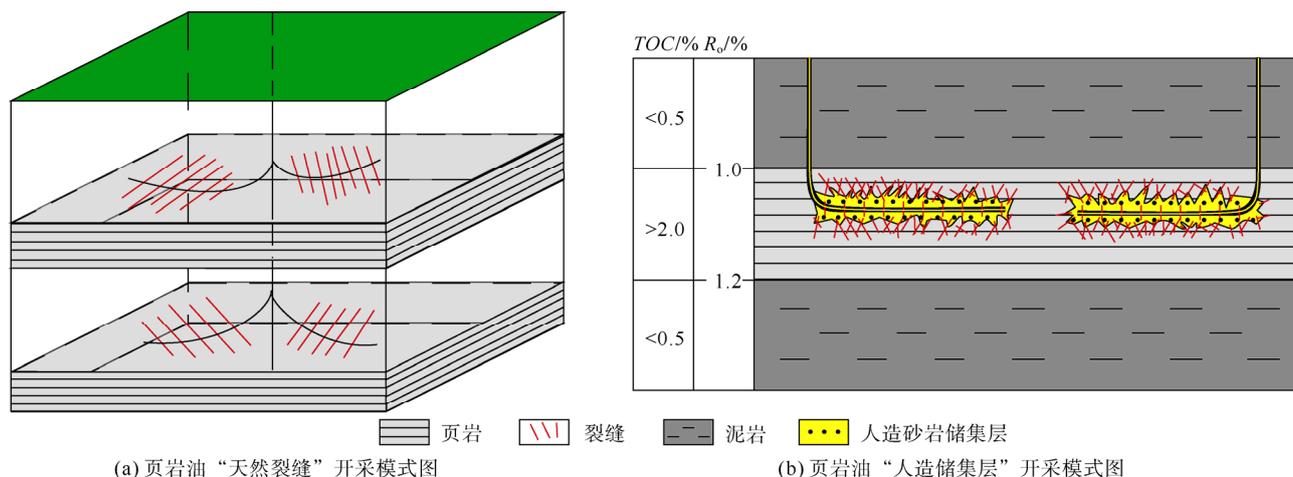


图9 页岩油开采模式图

析化验, 取全、取准评价所需的关键参数, 确定合理评价标准, 选取合适的评价方法, 科学评价中国陆相页岩油技术可采资源量和有利分布区。第3步, 加大“试验区”建设。借鉴页岩气和致密气的成熟开采技术, 在鄂尔多斯、松辽、准噶尔、渤海湾等盆地加大针对性关键技术攻关与试验, 积极探索页岩油大规模经济有效开发模式, 解决页岩油发展的关键技术与开发模式瓶颈。通过生油岩储集空间、聚集油量等基础地质研究, 以及水平井压裂等技术攻关, 页岩油很有可能在未来20~30a前后实现工业化开采。

9 结论

页岩油是指储存于富有机质、纳米级孔径页岩地层中的石油, 是成熟有机质页岩石油的简称。页岩油具有6大基本特征: 源储一体, 滞留聚集; 较高成熟度, 富有机质, 含油性较好; 发育纳米级孔喉、裂缝系统; 储集层脆性指数较高; 地层压力大、油质轻; 大面积连续分布, 资源潜力大。

陆相富有机质页岩主要发育在半深湖—深湖相沉积环境, 常分布于最大湖泛面附近的高位体系域下部和湖侵体系域, 常和与火山活动有密切关系的凝灰岩共生; 有利页岩以Ⅰ型和Ⅱ型干酪根为主, R_o 值一般为0.8%~2.0%, TOC 值一般在2.0%以上, 有效页岩厚度大于10m, S_1 值、氯仿沥青“A”含量、 TOC 值、黄铁矿含量等是评价页岩含油性的有效指标, 凝析油和轻质油含量是页岩油经济可采储量的重要指标, 陆相页岩层系中纹层状页岩与块状泥岩差异较大; 页岩

发育“二元”或“三元”纹层结构, 不同矿物组成、岩性组合常相互叠合、共生分布, 微米—纳米级孔喉和微裂缝是页岩主要储集空间。初步揭示了中国湖相富有机质页岩(Ⅰ型干酪根)孔隙演化与页岩油滞留聚集模式。

估算中国主要盆地可采页岩油资源量大约为 $30 \times 10^8 \sim 60 \times 10^8$ t, 储集空间、脆性指数、黏度、压力、富有机质页岩规模是页岩油“核心区”评价的关键。针对页岩油的未来发展, 提出了加快“分布区”研究、加强“核心区”评选和加大“试验区”建设的“三步走”发展思路。预测水平井体积压裂、改造“天然裂缝”、注粗颗粒“人造储集层”、注气形成高气油比、纳米油气提高采收率等可能是页岩油工业化发展的核心技术。在页岩气技术基础上, 针对页岩油攻关, 有可能形成针对性关键技术系列。但目前页岩油开发还有以下重大问题需要研究解决: 页岩油与泥岩油、裂缝油的区别; 富有机质页岩形成机制、分布模式与资源预测方法等; 压裂、地表工程等技术; 页岩油低成本开采模式。

参考文献:

- [1] 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.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [2] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,

- 39(2): 129-136.
- [3] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [4] 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 69-75.
Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Southern Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 69-75.
- [5] 梁兴, 叶熙, 张介辉, 等. 滇黔北坳陷威信凹陷页岩气成藏条件分析与有利区优选[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 693-699.
Liang Xing, Ye Xi, Zhang Jiehui, et al. Reservoir forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in the Weixin Sag, Dianqianbei Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 693-699.
- [6] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望: 以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [7] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [8] 康玉柱. 中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 1-5.
Kang Yuzhu. Characteristics and exploration prospect of unconventional shale gas reservoirs in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 1-5.
- [9] 马永生, 冯建辉, 牟泽辉, 等. 中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 22-30.
Ma Yongsheng, Feng Jianhui, Mou Zehui, et al. The potential and exploring progress of unconventional hydrocarbon resources in Sinopec[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6): 22-30.
- [10] 李玉喜, 张金川. 我国非常规油气资源类型和潜力[J]. 国际石油经济, 2011(3): 61-67.
Li Yuxi, Zhang Jinchuan. Types of unconventional oil and gas resources in China and their development potential[J]. International Petroleum Economics, 2011(3): 61-67.
- [11] 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.
- [12] 张金功, 袁政文. 泥质岩裂缝油气藏的成藏条件及资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 336-338, 347.
Zhang Jingong, Yuan Zhengwen. Formation and potential of fractured mudstone reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 336-338, 347.
- [13] 张爱云, 武大茂, 郭丽娜, 等. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-19, 72-81.
Zhang Aiyun, Wu Damao, Guo Li'na, et al. Geochemistry characteristics and its metallogenetic implications of the marine dark shale structure[M]. Beijing: Science Press, 1987: 1-19, 72-81.
- [14] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 133-141.
Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 133-141.
- [15] Picard M D. Classification of fine-grained sedimentary rocks[J]. Journal of Sedimentary Research, 1971, 41: 179-195.
- [16] Gemaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64: 1179-1209.
- [17] 史士龙, 吴明荣, 曲志鹏. 湖相地层剖面中有机碳总量旋回及其层序地层意义[J]. 油气地球物理, 2012, 10(2): 51-54.
Shi Shilong, Wu Mingrong, Qu Zhipeng. Total organic carbon cycles in lacustrine facies stratigraphic section and their significance of sequence layer[J]. Petroleum Geophysics, 2012, 10(2): 51-54.
- [18] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12.
- [19] 邹金华, 张哲, 王柏轩. 内陆凹陷层序地层的关键界面及其有关问题: 以东营凹陷沙二段和沙三上亚段为例[J]. 地层学杂志, 2000, 24(1): 78-83.
Wu Jinhua, Zhang Zhe, Wang Baixuan. The key boundaries of sequence stratigraphy and their correlative affair in inland depressions: An example from the second member and the upper part of the third member of the Shahejie Formation in Dongying Depression[J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24(1): 78-83.
- [20] 杨剑萍. 惠民凹陷下第三系湖相沉积密集段特征[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1998, 22(4): 21-25.
Yang Jianping. Features of lacustrine condensed sections of the lower Tertiary in Huimin Depression[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1998, 22(4): 21-25.
- [21] 刘洛夫, 康永尚. 准噶尔盆地侏罗系层序地层格架中的烃源岩评价[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 687-694.
Liu Luofu, Kang Yongshang. Evaluation of source rocks in the Jurassic sequence stratigraphic framework of the Junggar Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 687-694.
- [22] 张文正, 杨华, 彭平安, 等. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩发育的影响[J]. 地球化学, 2009, 38(6): 573-582.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Peng Ping'an, et al. The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin[J]. Geochimica, 2009, 38(6): 573-582.
- [23] 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.
- [24] Gale F J, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG

- Bulletin, 2007, 91(4): 603-622.
- [25] Bustin A M M, Bustin R M, Cui X. Importance of fabric on the production of gas shales[R]. SPE 114167, 2008.
- [26] Javadpour F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks(shales and siltstone)[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(8): 16-21.
- [27] Loucks R G, Ruppel S C, Reed S C, et al. Origin and classification of pores in mudstones from shale-gas systems[R]. Search and Discovery Article 40855, 2011: 1-32.
- [28] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [29] Wang F P, Reed R M, John A, et al. Pore networks and fluid flow in gas shales[R]. SPE 124253, 2009.
- [30] Farshi M M, Javadpour F. Uncovering nanoscale issues in shale gas systems[J]. Geological Society of America, 2011, 43(3): 48.
- [31] Golab A N, Knackstedt M A, Averdunk H, et al. 3D porosity and mineralogy characterization in tight gas sandstones[J]. Special Section: Tight Gas Sands, 2010: 1476-1483.
- [32] Sondergeld C H, Ambrose R J, Rai C S, et al. Micro-structural studies of gas shales[R]. SPE 131771, 2010.
- [33] 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.
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.
- [34] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- Pang Xiongqi. Theory and application of the hydrocarbon expulsion threshold controlling petroleum distribution[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [35] Leythaeuser D, Poelchau H S. Expulsion of petroleum from type kerogen source rocks in gaseous solution: Modelling of solubility fractionation[M]. Montana: Geological Society Special Publications, 1991, 59: 33-46.
- [36] Pepper A S, Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation: Part 1: Oil and gas generation from kerogen[J]. Marine Petroleum Geology, 1995, 12(3): 291-319.
- [37] Stainforth J G. Practical kinetic modeling of petroleum generation and expulsion[J]. Marine Petroleum Geology, 2009, 26(4): 552-572.
- [38] Pepper A S. Estimating the petroleum expulsion behaviour of source rocks: A novel quantitative approach//England W A, Fleet A J. Petroleum migration[C]. London: Geological Society of London, 1991, 59: 9-31.
- [39] Ritter U. Solubility of petroleum compounds in kerogen: Implications for petroleum expulsion[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 319-326.

第一作者简介: 邹才能(1963-), 男, 重庆江北人, 博士生导师, 中国石油勘探开发研究院副院长兼总地质师, 李四光地质科学奖获得者, 主要从事大油气区、岩性-地层油气藏、非常规油气等地质理论技术研究和勘探生产实践等工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院院办, 邮政编码: 100083。E-mail: zcn@petrochina.com.cn

收稿日期: 2012-08-26 修回日期: 2012-11-28

(编辑 黄昌武、王大锐 绘图 刘方方)

中国油气储产量仍有较大增长空间

国土资源部近日发布的《全国油气资源动态评价 2010》(以下简称《动态评价》)显示, 2030 年前中国油气储产量仍有较大增长空间, 石油地质储量目前仍处于高位稳定增长阶段, 年均探明石油地质储量 10×10^8 t 以上, 产量 2×10^8 t 持续 20 a 以上; 天然气地质储量目前处于高位快速增长阶段, 年均探明地质储量 6000×10^8 m³ 左右, 预计 2030 年天然气产量接近 3000×10^8 m³。

国土资源部地质勘查司司长彭齐鸣表示, 未来 20 a, 中国石油工业发展进入了新的机遇期, 石油产量稳定增长, 天然气产量快速攀升, 油气产量有望从 2010 年的 2.8×10^8 t 油当量增加到 2015 年的 3.6×10^8 t、2020 年的 4.1×10^8 t 及 2030 年的 4.5×10^8 t。

《动态评价》显示, 到“十二五”末, 中国 5000×10^4 t 级油气生产基地将达到 5 个, 分别为松辽盆地、渤海湾盆地陆域、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地和近海海域。如果低品位和非常规油气资源得到有效开发利用, 未来油气产量还能增加 1000×10^4 t 以上。

《动态评价》得出了中国油气资源潜力的最新认识: 石油地质资源量 881×10^8 t、可采资源量 233×10^8 t, 比“新一轮全国油气资源评价”分别增加 116×10^8 t 和 21×10^8 t, 探明程度 36%, 储产量稳定增长有资源保障。天然气地质资源量 52×10^{12} m³、可采资源量 32×10^{12} m³, 比“新一轮全国油气资源评价”分别增加 17×10^{12} m³ 和 10×10^{12} m³, 探明程度 18%, 储产量快速增长资源基础雄厚。

《动态评价》表明, 鄂尔多斯盆地低渗、特低渗储集层开发技术拓展了资源领域, 石油地质资源量由 74×10^8 t 增加到 129×10^8 t, 天然气由 4.7×10^{12} m³ 增加到 15.2×10^{12} m³, 为建设“西部大庆”奠定了资源基础; 渤海湾海域中深层勘探取得重大突破, 石油地质资源量由 225×10^8 t 增加到 277×10^8 t; 四川盆地海相天然气勘探连续获得重要成果, 地质资源量由 5.4×10^{12} m³ 增加到 9.3×10^{12} m³。

(黄昌武 摘自《国际石油网》, 2011-12-26)