

中国非常规油气勘探开发与理论技术进展

邹才能, 杨智, 朱如凯, 张国生, 侯连华, 吴松涛, 陶士振, 袁选俊, 董大忠, 王玉满, 王岚, 黄金亮, 王淑芳

中国石油勘探开发研究院, 北京, 100083

内容提要:新世纪非常规油气获战略突破, 微纳米孔喉页岩系统油气成为油气资源接替的重要新领域, 非常规油气资源在能源格局中的地位愈发重要。致密气、煤层气、重油、沥青砂等已成为勘探开发的重点领域, 致密油成为亮点领域, 页岩气成为热点领域。中国在致密气、页岩气、致密油、煤层气等非常规油气资源勘探开发获重要突破, 油页岩、天然气水合物、重油、油砂矿等获重要进展, 初步评价中国非常规石油资源量 $(223\sim 263)\times 10^8\text{ t}$, 天然气资源量 $(890\sim 1260)\times 10^{12}\text{ m}^3$ 。中国非常规油气研究取得重大进展, 细粒沉积学在陆相敞流湖盆大型浅水三角洲砂体、湖盆中心砂质碎屑流沉积、海陆相细粒沉积等研究新进展, 提供了盆地中心储集体形成和分布的理论依据; 非常规储层地质学在研究方法技术、多尺度数据融合、地层条件物理模拟等方面取得重大进展, 多方法多尺度整体表征非常规储层已成为研究热点, 推动了非常规油气地质学地质理论和方法技术快速发展; 创新发展了连续型油气聚集理论, 构建了非常规油气地质学理论体系框架, 明确了非常规油气地质研究的内涵、地质特征、形成机理、分布规律和核心技术, 为大面积非常规油气规模勘探开发奠定了理论基础; 非常规油气勘探开发技术方法快速发展, 涌现了烃源性、岩性、物性、脆性、含油气性与应力各向异性评价等“六特性”、“甜点区”地质—工程综合评价等核心评价方法, 微地震监测、水平井钻完井、“工厂化”生产、“人工油气藏”等开发工程核心理念和技术, 推动非常规油气“革命性发展”。非常规油气的突破, 带来了坚持理论创新、坚持核心技术进步等 4 点重要启示, 对延长石油工业生命周期、推动理论技术升级换代、改变能源格局具有深远意义。

关键词:非常规油气; 非常规油气地质学; 细粒沉积学; 非常规储层地质学; “人工油气藏”开发; 微纳米级孔喉; 致密气; 致密油; 页岩气; 页岩油

进入 21 世纪, 以美国非常规油气、加拿大油砂、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 (Law and Curtis, 2002; Schmoker, 2002; 贾承造等, 2012; 邹才能等, 2012a, 2012b, 2013a, 2014a, 2014b, 2015a, 2015b; BP Company, 2013; USGS, 2013a; EIA, 2013, 2015)。借鉴国外经验, 大力发展中国非常规油气成为必然的战略选择和必由之路。中国进入了常规与非常规油气并重的勘探开发新时代, 地质开发理论进入了非常规油气创新的“黄金期”。随着研究与勘探开发实践的快速推进, 非常规油气将逐步成为中国油气生产的重要组成部分, 为国民经济的发展提供重要保障。

板块两大旋回演化控制了全球原型盆地的形成

与分布, 全球油气分布具有 10 条规律: ①常规—非常规油气有序聚集; ②特提斯域控制生物礁大油气田群带状分布; ③前陆冲断带控制构造油气田群分布; ④克拉通内隆起控制特大型油气田展布; ⑤台地边缘控制生物礁滩大油气田群带状分布; ⑥被动大陆边缘控制海洋特大型油气田形成与分布; ⑦前陆前渊斜坡控制大规模重油沥青赋存; ⑧盆地沉积斜坡控制致密油气与煤层气聚集; ⑨盆地深水富有机质沉积控制页岩油气滞留; ⑩低温高压海底沉积控制水合物展布 (邹才能等, 2015a)。

全球常规与非常规油气资源比例约 2:8, 常规油气已采出 1/4, 常规油气高位稳定生产、海洋油气持续增长、非常规油气快速发展。2013 年全球石油产量 $40.5\times 10^8\text{ t}$ (其中非常规石油占 6%), 全球天然气产量 $3.4\times 10^{12}\text{ m}^3$ (其中非常规天然气占 17%)

注: 本文为国家 973 重点基础研发项目 (编号 2014CB239000) 和国家科技重大专项 (编号 2011ZX05001) 联合资助的成果。

收稿日期: 2015-02-15; 改回日期: 2015-05-07; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 邹才能, 男, 1963 年生, 博士生导师, 李四光地质科学奖获得者。主要从事非常规油气地质学、常规岩性—地层油气藏与大油气田 (区) 等地质理论技术研究及勘探生产实践等工作。地址: 100083, 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院院办, Email: zcn@petrochina.com.cn。

(BP Company, 2013; USGS, 2013a; EIA, 2013)。全球正形成西半球的美国和东半球的中国两大非常规油气突破区。美国借鉴页岩气理论技术与发展经验,实现致密油快速发展,非常规油气推动美国“能源独立”战略梦实施,2014 年,美国天然气产量 $7279 \times 10^8 \text{ m}^3$,石油产量 $5.78 \times 10^8 \text{ t}$,其中致密气 $1400 \times 10^8 \text{ m}^3$,煤层气 $450 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气 $3637 \times 10^8 \text{ m}^3$,致密油 $2.09 \times 10^8 \text{ t}$ (EIA, 2015),2014 年天然气基本可以自给,石油对外依存度已降至 39.1%。中国正在稳步推进非常规油气发展,2014 年,中国生产天然气 $1329 \times 10^8 \text{ m}^3$,生产石油 $2.1 \times 10^8 \text{ t}$,其中致密气 $360 \times 10^8 \text{ m}^3$,煤层气 $36 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气 $13 \times 10^8 \text{ m}^3$,致密油获得工业突破,非常规油气在油气总产量中的比较很低,2014 年天然气对外依存度 32.2%,石油对外依存度 59.5%,非常规油气上升空间广阔。

石油工业界和学术界高度关注非常规油气的发展,针对非常规油气的技术研发、学术研讨等活动异常活跃。2011 年 AAPG 年会主题即为“地球科学界的下一次大飞跃”,认同非常规资源成为油气工业发展的战略驱动。2015 年 AAPG 年会主题“探寻石油地质学顶峰”,非常规油气资源再度成为大会焦点。近年来,非常规油气在中国石油界也广受重视,2011 年第四届石油地质年会主题为“常规和非常规油气资源——中国石油工业持续发展的基础”,2013 年第五届石油地质年会主题“创新与发展——油气勘探理论技术挑战与实践”,2015 年第六届石油地质年会主题“更深、更广、更复杂——油气勘探新领域与新技术”,非常规油气均是重点研讨内容。近年来,中国油气勘探与地质理论呈现 4 方面的新亮点:①细粒沉积储层与非常规油气资源;②高过成熟烃源与古老碳酸盐岩油气田;③低温高压场与超深层油气系统;④重力流沉积与海洋深水大油气田。

中国乃至世界未来能源发展,需重点把握三大新格局。①石油与天然气新格局。石油仍是发展的基石,天然气很具成长性。国际能源形势和油气勘探开发实情显示,天然气必将完成对石油的“第一次革命”,21 世纪将是天然气的时代,大发展战略机遇期已经来临。②常规与非常规新格局。当前常规油气仍是勘探主体,非常规正循序渐进实现有效开发。长远看,页岩气、页岩油、水合物等非常规资源潜力巨大,一旦技术突破,必将形成对常规油气的“第二次革命”,尤其是“页岩油革命”,可能比页岩气革命来得更具颠覆性。③化石与新能源新格局。传统化

石能源不可再生,新能源必将完成对传统能源的“终极革命”。或许未及化石资源枯竭,“新能源革命”已经提前到来。地热、太阳能、风能、氢能,以及当下全球热议的储能,展现出广阔的发展前景,引起全球关注,很多国际能源公司已经采取实质行动。

本文在全面回顾近十年国内外非常规油气勘探开发进展的基础上(胡见义, 1986; Schmoker, 1995, 2002; Gautier and Mast, 1995; 关德师等, 1996; Law, 2002; Law and Curtis, 2002; Collett, et al., 2009; Nelson, 2009; Loucks et al., 2009; Jarvie, 2010; 胡文瑞, 2010; 吴奇, 2011a, 2011b; 孙赞东等, 2011; Yergin, 2012; 邱中建等, 2012a, 2012b; 戴金星等, 2012; 贾承造等, 2012a; 赵文智等, 2013; 袁亮等, 2013; 童晓光, 2014),重点以作者研究团队成果为基础(邹才能等, 2009, 2010a, 2010b; 2012a, 2012b, 2013a, 2013b, 2013c, 2014a, 2014b, 2015),从非常规细粒沉积学、非常规储层地质学、非常规油气地质学、非常规油气开发地质学等 4 个方面对中国非常规油气研究进展进行了归纳总结,总体有 10 项重要进展:①揭示黑色页岩系统细粒沉积形成机理,建立不同岩石沉积模式,创新细粒沉积学理论;②提出非常规油气烃源岩标准,模拟源内外地球化学指标变化规律,创新非常规油气地球化学理论;③揭示微一纳米孔演化规律,创新微纳米孔喉表征方法,创新非常规油气储层地质学理论;④建立油气聚集微纳米孔喉结构模式,模拟油气分子级充注机理,揭示“连续型”油气聚集规律;⑤揭示非常规油气富集层段主控因素,提出非常规有构造“甜点”、连续“甜点区”勘探目标;⑥提出非常规油气“6 特性”评价参数,开发地球物理预测方法,评选非常规油气核心区;⑦提出“人工油气藏”开发模式,建立非常规“L”型产量模型,创新非常规油气开发地质学理论;⑧开发非常规油气资源评价方法软件系统,明确不同类型非常规资源潜力,提出不同类型非常规发展策略;⑨揭示常规—非常规油气“有序聚集”规律,提出“平台式”工厂化生产模式,实现常规—非常规油气协同有效开发;⑩提出非常规油气国家标准,建立国家能源致密油气研发中心,培养非常规专业人才,推动非常规油气工业发展。最后阐述了非常规油气的重要启示、意义及战略定位。

1 全球非常规油气勘探进展

非常规油气是指用传统技术无法获得自然工业产量、需用新技术改善储层渗透率或流体黏度等才

能经济开采、连续或准连续型聚集的油气资源 (Gautier and Mast, 1995; Schmoker, 1995; 邹才能等, 2009, 2014a)。非常规油气有两个关键标志和两个关键参数,两个关键标志为:①油气大面积连续分布,圈闭界限不明显;②无自然工业稳定产量,达西渗流不明显。两个关键参数为:①孔隙度小于 10%;②孔喉直径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 或渗透率小于 $1\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。非常规油气主要特征表现为源储共生,在盆地中心、斜坡大面积分布,圈闭界限与水动力效应不明显,储量丰度低,主要采用水平井规模压裂技术、平台式“工厂化”生产、纳米技术提高采收率等方式开采。主要类型有致密油和气、页岩油和气、煤层气、重油沥青、天然气水合物等(图 1)。

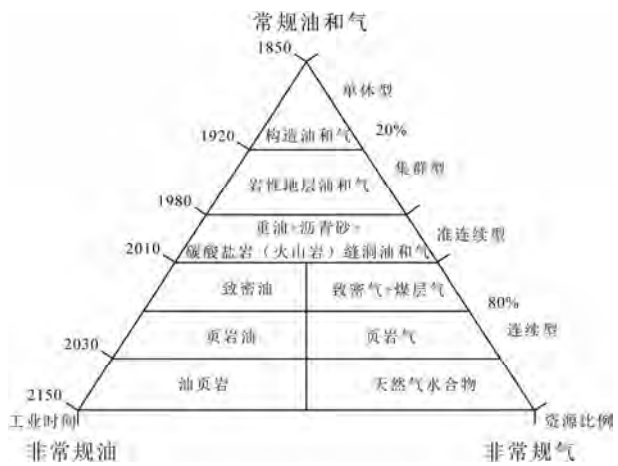


图 1 油气资源类型特征三角图(据邹才能等,2012a)
Fig. 1 Triangle diagram of different types of hydrocarbon resources(after Zou Caineng et al., 2012a)

1.1 全球非常规油气勘探进展

近年来,全球非常规油气勘探开发取得一系列重大突破。致密气、煤层气、重油、沥青砂等已成为全球非常规石油天然气勘探开发的重点领域,页岩气成为全球非常规天然气勘探开发的热点领域,致密油成为全球非常规石油勘探开发的亮点领域。全球非常规油气产量快速增长,在全球能源供应中的地位日益凸显。2008 年全球非常规石油资源规模达 $4495\times 10^8\text{ t}$,与常规石油资源基本相当;全球非常规天然气资源规模达 $3921\times 10^{12}\text{ m}^3$,是常规天然气资源的 8 倍,非常规天然气产量快速上升,已占到天然气产量的 18%(EIA, 2013; 邹才能等, 2010b, 2014a)。

近 10 年成为美国页岩气、致密油“革命性发展的黄金十年”,页岩气由南部地区的巴内特,到海恩斯维尔,再到东部地区的马塞勒斯,持续获得重大发

展,成为非常规油气发展热点,2014 年页岩气产量高达 $3637\times 10^8\text{ m}^3$,约占美国天然气总产量的 50.0%;致密油由北部地区的巴肯,到南部地区的鹰滩,再到东部地区的尤蒂卡,连续获得重大突破,成为非常规油气发展亮点,2014 年致密油产量已达 $2.09\times 10^8\text{ t}$,约占美国石油总产量的 36.2%(EIA, 2015)(图 2)。页岩气、致密油等非常规油气快速发展,使得美国油气对外依存度大幅下降,2014 年天然气基本可以自给,石油对外依存度已降至 39.1%,持续推动美国“能源独立”战略实施,美国未来很可能主要依靠美洲实现宽泛意义上的“能源独立”。

致密砂岩气:1927 年发现于美国的圣胡安盆地,1976 年在加拿大阿尔伯达盆地西部深拗陷区北部发现了大型的埃尔姆沃斯致密砂岩气田,是最早进行工业化开采的非常规天然气资源。上世纪 60 年代末至 70 年代初,致密天然气已被国外认为是天然气的第二个主要领域。目前,全球已发现或推测有 70 个盆地发育致密砂岩气,资源量约为 $209.6\times 10^{12}\text{ m}^3$,主要分布在北美、拉丁美洲和亚太地区。美国是致密砂岩气开发最早、最成熟的地区,已在 23 个盆地发现 900 多个致密砂岩气田,探明可采储量 $5\times 10^{12}\text{ m}^3$,2014 年致密砂岩气产量约为 $1400\times 10^8\text{ m}^3$,占美国天然气总产量的 19.2%;预计 2040 年致密砂岩气产量将保持在 $2380\times 10^8\text{ m}^3$,占届时美国天然气总产量的 22%。

页岩气:全球页岩气资源量约为 $456\times 10^{12}\text{ m}^3$,超过了致密气和煤层气资源量之和。目前,北美是全球唯一实现页岩气工业化开发的地区,其中美国已在 20 多个盆地进行页岩气勘探开发,2014 年产量达 $3637\times 10^8\text{ m}^3$ (EIA, 2015),占美国天然气总产量的 50.0%;未来页岩气产量仍将保持快速增长,有机构预测 2040 年页岩气产量将达到 $5610\times 10^8\text{ m}^3$,占届时美国天然气总产量的 53%。

煤层气:世界 75 个主要含煤国家中,已有 35 个开展了煤层气的研发。全球煤层气资源量约为 $256.1\times 10^{12}\text{ m}^3$,主要分布在前苏联、北美和亚太地区的煤炭资源大国。目前,全球煤层气主要生产国是美国、加拿大和澳大利亚,2013 年煤层气产量超过 $600\times 10^8\text{ m}^3$,其中美国煤层气产量约为 $450\times 10^8\text{ m}^3$ 、加拿大 $80\times 10^8\text{ m}^3$ 左右、澳大利亚 $50\times 10^8\text{ m}^3$ 左右。据 EIA 预测,美国煤层气产量将保持基本稳定,预计 2040 年煤层气产量约为 $483\times 10^8\text{ m}^3$,占届时美国天然气总产量的 5%。

重油:可采资源量大约为 $1079 \times 10^8 \text{t}$, 主要分布于南美和中东地区, 分别占全球重油资源量的 76.3% 和 11.0%。委内瑞拉奥利诺科(Orinoco)重油带是全球最大的重油聚集区, 重油分布面积达 18220km^2 , 位于委内瑞拉陆上面积最大的沉积盆地——东委内瑞拉盆地的南部, 是世界著名的重油

生产区(USGS, 2013b)。据 BP 石油公司 2014 年统计,奥利诺科重油剩余探明可采储量达 354×10^8 t,目前奥利诺科重油产量还不高,2011 年产量不到 6800×10^4 t,占委内瑞拉石油总产量的比例不足 40%。

天然沥青(或称油砂):可采资源量大约为 1066.7×10^8 t,81.6% 分布于北美地区。加拿大的阿尔伯达省是全球油砂最富集的地区。据 BP 石油公司统计,截至 2013 年底,加拿大油砂油剩余探明可采储量达 273×10^8 t,占其剩余石油探明总储量的 97%。目前,加拿大是世界上唯一进行大规模、商业化生产油砂油的国家,2013 年油砂油产量大约为 1.13×10^8 t。若油砂油能够完全开发生产,加拿大有望成为仅次于沙特阿拉伯、俄罗斯和委内瑞拉的全球第四大石油生产国。

油页岩:开发利用历史十分悠久,早在 19 世纪后期就已开始油页岩油的生产,上世纪 70~90 年代还曾有过大规模开发利用,1980 年高峰产量曾达到 4500×10^4 t 左右。目前,油页岩油生产国主要有爱沙尼亚、巴西、中国、澳大利亚等,但产量已降至 2000×10^4 t 以下。全球已发现 600 余处油页岩矿,油页岩油可采资源量约为 1501×10^8 t;其中,美国油页岩油 1005×10^8 t,约占世界的 67%,但美国始终未进行油页岩油的工业生产。进入 21 世纪,随着国际油价的不断攀升和石油供需平衡状况日趋脆弱,美国国会于 2005 年通过了发展非常规能源的法案,鼓励企业进行油页岩干馏炼油的研究与开发。根据美国能源部于 2007 年 9 月公布的研究报告,2020 年美国油页岩油产量将达到 0.5×10^8 t,2030 年达到 1.2×10^8 t。

天然气水合物:目前还处于资源调查和试验性开采阶段,尚未实现工业化开发。世界范围内,约 27% 的陆地和 90% 的海洋中都存在天然气水合物。目前世界各地已发现 120 多处天然气水合物(Collett et al., 2009),许多发达国家制定专门研发计划开展水合物资源勘查评价与试验性开采,按照当前发展趋势,预计 2015 年前后有望实现冻土区天然气水合物的商业性开发,2030 年前后,有望实现海域水合物商业性开采。2013 年,日本在 Daini-Atsumi Knoll,采用降压排采、气水同出生产方式,实现了天然气水合物的重大突破,获得日产 2×10^4 m³ 天然气。不少专家认为,随着水合物开发技术的逐渐成熟,海域水合物开发的进程有可能大大提前。

1.2 中国非常规油气勘探进展

中国沉积盆地的形成及发展历经了古生代海相与中生代陆相两个时期,非常规油气形成的地质条件十分优越。致密油、致密气、页岩油、页岩气、煤层气、油页岩、重油沥青及天然气水合物等非常规油气资源非常丰富(邹才能等, 2009, 2012a, 2013a)。初步评价中国非常规油气可采资源量约为 $(890 \sim 1260) \times 10^8$ t 油气当量,是常规油气的 3 倍左右。其中,非常规石油可采资源量约为 $(223 \sim 263) \times 10^8$ t,与常规石油资源量大致相当;非常规天然气可采资源量约为 $(84 \sim 125) \times 10^{12}$ m³,是常规天然气资源量的 5 倍左右,发展潜力很大。

近 10 年成为中国致密气、致密油“开创性发展的探索十年”。致密气已成为天然气增储上产的重要领域,近 10 年平均新增探明致密气地质储量 2760×10^8 m³,约占同期探明天然气总储量的 45%;2014 年致密气产量已达 360×10^8 m³ 左右,约占全国天然气总产量的 27%;发现了目前全国最大的苏里格致密气区,2014 年探明和基本探明地质储量达 4.2×10^{12} m³,2014 年致密气产量 235×10^8 m³。致密油在鄂尔多斯、准噶尔、松辽等盆地发现 $5 \sim 10 \times 10^8$ t 级储量规模区,在渤海湾、四川等盆地也获重要发现。煤层气初步建成沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地东缘两个地面生产基地,2014 年地面煤层气开采量达 36×10^8 m³。页岩气在四川盆地南部和东部志留系龙马溪组海相页岩已初步实现工业突破,2014 年产量已达 13×10^8 m³。致密油、致密气已成为中国非常规油气发展重点,海相页岩气、煤层气等将实现规模化生产(图 3,表 1)。

致密气:早在 20 世纪 60 年代,在中国四川盆地川西地区就已有发现,但因技术不成熟,长期没有大发展。近年来,随着大型压裂改造技术进步和规模化应用,致密砂岩气勘探开发才取得重大进展,发现了以鄂尔多斯盆地苏里格、四川须家河组为代表致密砂岩大气区,截至 2014 年底,苏里格已探明、基本探明储量超 4×10^{12} m³,2014 年致密气产量为 235×10^8 m³,在松辽、吐哈、塔里木、渤海湾等盆地发现了一批高产的致密砂岩气井,表明中国致密砂岩气分布广泛,资源相当丰富。据最新估算,中国致密砂岩气可采资源量约 $(9 \sim 13) \times 10^{12}$ m³。截至 2013 年底,中国致密砂岩气累计探明地质储量为 4.0×10^{12} m³,大约占全国天然气总探明储量的 41%;2014 年致密气产量大约为 360×10^8 m³,占全国天然气总产量的 27% 左右。预计 2020 年以前,中国致密砂岩

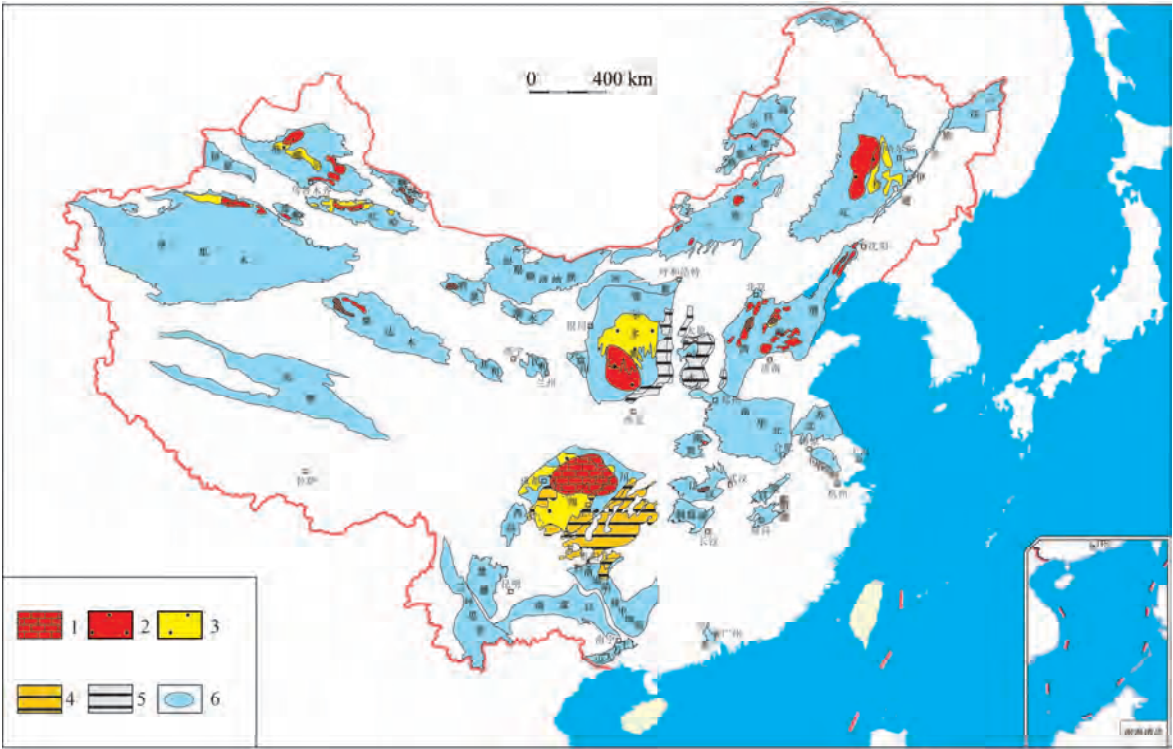


图 3 中国陆上主要非常规油气有利区分布图(据邹才能等,2013c)

Fig. 3 China’s onshore unconventional oil & gas sites for prospecting (after Zou Caineng et al. , 2013c)

1—致密碳酸盐岩油;2—致密砂岩油;3—致密砂岩气;4—页岩气;5—煤层气;6—盆地

1—Tight carbonate oil;2—tight sandstone oil;3—tight sandstone gas;4—shale gas;5—CBM;6—basin

气新增探明储量和年产量仍将保持快速增长,占全国天然气储量、产量比例有望进一步上升。

煤层气:经过近 20 年的发展,初步形成了适合不同类型煤层气的勘探开发配套技术,在山西沁水、辽宁铁法等地成功实现了工业化开采,在鄂尔多斯盆地东缘、吐哈、准噶尔等盆地正在进行开发先导试验。据全国新一轮资源评价,中国埋深 1500m 以浅的煤层气可采资源量 $10.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。截止 2013 年底,中国已累计探明煤层气可采储量 $2849 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2014 年地面煤层气产量已达 $36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。随着煤层气开采技术不断进步与完善,煤层气将进入快速发展期。

页岩气:在中国的研究与勘探开发刚刚起步,资源潜力和有利目标区尚有待深化落实,包括背斜型“甜点”和连续型“甜点”两类页岩气目标。近年来,页岩气已得到国家和企业的高度重视,已在资源评价和核心区优选、水平井压裂等技术创新、工业化试验区建设等攻关取得重大进展。2010 年,四川盆地威 201 井在志留系龙马溪组发现日产大于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 页岩气;并在四川富顺—永川、威远—长宁、重庆焦石坝、云南昭通等地区开展页岩气开采试验(邹才

能等, 2010a; 郭彤楼等, 2014)。截至 2013 年底,已完钻各类页岩气井 130 余口,约 60 口井获气流,2013 年页岩气产量已达 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,2014 年产量 $13 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气开发利用已顺利实现工业起步。初步估算,中国页岩气技术可采资源量大约为 $(10 \sim 25) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。预计未来 5~10 年,将是中国页岩气技术攻关与先导试验的关键期,需要制定“加快‘核心区’评选、加强‘试验区’建设、加强‘生产区’规划”三步走路线图,2020 年前后实现页岩气工业化规模发展。但中国页岩气开发利用面临保存、埋藏较深、地表山地复杂、水资源与环境压力大等一系列特殊性,大规模经济有效开发难度较大。中国页岩气规模化发展,需要突破理论关、技术关、成本关、环境关“四道关”。

致密油:在中国主要含油气盆地广泛分布,主要发育与湖相生油岩共生或接触、大面积分布的致密砂岩油或致密碳酸盐岩油(贾承造等, 2012; 邹才能等, 2012b)。目前,在鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段、准噶尔盆地二叠系芦草沟组、四川盆地中下侏罗统、松辽盆地青山口—泉头组等,都发育丰富的致密油资源,勘探也已获得了一些重要发现,具有形成规

模储量和有效开发的条件。初步预测中国致密油技术可采资源量大约为 $(20\sim 25)\times 10^8\text{t}$ 。截至 2013 年底,在鄂尔多斯、松辽、四川、准噶尔、渤海湾和柴达木等盆地,探明技术可采储量规模近 $3.7\times 10^8\text{t}$,目前,鄂尔多斯盆地长 7、松辽盆地扶杨油层已实现规模开发,中国石油长庆油田分公司已建成我国第一个亿吨级致密油田——新安边油田,2014 年提交探明地质储量 $1\times 10^8\text{t}$,长庆油田已具有 100 万吨的产能规模。我国几大石油公司正在按照致密油的勘探开发思路,开展关键技术攻关,进行试验区建设,已初见成效。随着关键技术的突破和工作力度的加大,致密油开发利用速度将进一步加快。

页岩油:主要赋存于湖相页岩中,广泛分布于鄂尔多斯盆地延长组、准噶尔盆地二叠系、四川盆地侏罗系、渤海湾盆地沙河街组、松辽盆地白垩系、柴达木盆地第三系、酒西盆地白垩系、三塘湖盆地二叠系等层系(邹才能等, 2013b)。近年来,针对辽河西部凹陷沙三段页岩、泌阳凹陷核三段页岩等开展的钻探和试验,在裂缝中见到了良好地效果。初步估算中国页岩油技术可采资源量可能 $(30\sim 60)\times 10^8\text{t}$,具有广阔的勘探前景。

油页岩:在中国分布范围广泛,资源比较丰富。据全国新一轮资源评价,全国 47 个盆地共有油页岩油地质资源量 $476\times 10^8\text{t}$,可采资源量约 $120\times 10^8\text{t}$,其中 94%的资源分布在松辽、鄂尔多斯、伦坡拉、准噶尔、羌塘、茂名、柴达木等 7 个盆地中。但中国油

页岩资源品位总体偏差,含油率大于 5%的油页岩,油页岩油可采资源量 $81\times 10^8\text{t}$ 左右,占全国油页岩油资源总量的 71%;而含油率大于 10%的油页岩,油页岩油可采资源量 $35\times 10^8\text{t}$ 左右,仅占全国油页岩油资源总量的 29%。

重油:中国重油地质资源量 $198\times 10^8\text{t}$,技术可采资源量约 $19\times 10^8\text{t}$,其中渤海湾盆地重油地质资源量可达 $40\times 10^8\text{t}$,准噶尔盆地西北缘重油地质资源量达 $10\times 10^8\text{t}$ 。经过近 60 年的勘探,已在 15 个盆地发现了近百个重油区,探明重油地质储量 $67.4\times 10^8\text{t}$ 、可采储量 $11\times 10^8\text{t}$,2013 年重油年产量超过了 $1000\times 10^4\text{t}$,已成为全国石油产量的重要组成部分。

油砂矿:地质资源量约为 $60\times 10^8\text{t}$,可采资源量 $23\times 10^8\text{t}$,其中 88%的资源分布在准噶尔、塔里木、羌塘、柴达木、松辽、四川、鄂尔多斯等 7 个盆地中。中国油砂矿的品位总体更差,含油率大于 6%的油砂,油砂油可采资源量约 $11\times 10^8\text{t}$,占全国油砂油资源总量的 48%;而含油率大于 10%的油砂,油砂油可采资源量只有 $0.4\times 10^8\text{t}$,仅占全国油砂油资源总量的 2%。

天然气水合物:尚处于前期研究和资源调查阶段。与国外天然气水合物发展历程相比,中国天然气水合物资源调查研究工作起步较晚,但进展较快。1999 年开始,我国启动中国天然气水合物资源调查专项,先后在南海北部陆坡西沙海槽、神狐、东沙、琼

表 1 中国非常规油气资源量与探明储量情况(截至 2013 年底)
Table 1 China unconventional oil & gas resources and proven reserves (by year-end 2013)

类型		技术可采资源量	探明可采储量	典型地区
石油	重油	19	11	胜利八面河、辽河欢喜岭、新疆风城
	致密油	20~25	3.7	鄂尔多斯延长组、松辽盆地扶杨
	油页岩油	120	14.6	辽宁抚顺、广东茂名
	油砂油	23	0.1	准噶尔乌尔禾、松辽图牧吉、四川厚坝
	页岩油	30~60		鄂尔多斯三叠系、松辽白垩系
	碳酸盐岩缝洞	6~8	2.3	塔北寒武—奥陶系
	火山岩储层油	4~6	1.0	新疆北部石炭系
	变质岩储层油	1~2	0.7	辽河兴隆台潜山
	小计	223~263	33.4	
天然气	致密气	9~13	1.8	鄂尔多斯苏里格、四川盆地须家河组
	煤层气	11	0.2	山西沁水、鄂尔多斯韩城
	页岩气	10~25		四川盆地地下古生界、三叠系页岩气
	水合物	50~70		南海海域、青藏高原冻土带
	碳酸盐岩缝洞气	3~4	0.7	塔中奥陶系鹰山组、鄂尔多斯奥陶系
	火山岩储层气	1~2	0.2	松辽盆地深层、新疆北部石炭系
	小计	84~125	2.9	
合计		890~1260	56.4	

注:油的单位为 10^8t ,气的单位为 10^{12}m^3 。

东南海域以及青藏高原多年冻土区,分层次开展了天然气水合物资源调查,并于2007年在南海北部神狐海域、2008年在青藏高原多年冻土区相继钻探获得了水合物实物样品,2013年在南海北部陆坡控制水合物面积 55km^2 、天然气储量 $(1000\sim 1500)\times 10^8\text{m}^3$,标志中国已基本跨越了水合物发现阶段,进入水合物勘探评价阶段。目前调查研究结果表明,中国天然气水合物技术可采资源量大致在 $(50\sim 70)\times 10^{12}\text{m}^3$ 。

2 中国非常规油气研究进展

非常规油气在是否受圈闭控制、是否连续分布、单井是否有自然工业产量等3方面,与常规油气有本质区别。非常规油气研究的灵魂是储层,目标是回答储集有多少油气;而常规油气研究的灵魂是成藏,目标是回答圈闭是否有油气。近十几年来,针对非常规油气不同于常规油气的地质特征和形成分布规律,我国地质工作者开展了大量的研究工作,在非常规油气地质理论研究取得重要进展。本文从学科角度,重点介绍细粒沉积学、非常规储层地质学、非常规油气地质学、非常规油气勘探开发技术的研究进展。

2.1 主要非常规油气类型基本地质特征

2.1.1 页岩气

页岩气是以游离态、吸附态为主,赋存于富有机质页岩层段中的天然气,主体上为自生自储的、大面积连续型天然气聚集。在地层条件下,页岩基质渗透率一般小于等于 $0.001\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,单井一般无自然产能,需要通过一定技术措施才能获得工业气流。页岩层段以富有机质页岩为主,可含极少量粉砂岩、碳酸盐岩等的薄夹层。

页岩气具有独特的地质特征和开发特点。①源储一体,形成早,持续聚集。页岩在有机质演化整个过程中持续接受天然气的聚集,在页岩储层自身饱和后再向外溢散或运移。因此,页岩气是“原位滞留聚集”,为典型的源储一体、形成早、持续充注、连续聚集的天然气。②无明显圈闭界限,富集仍需要良好封闭。页岩气的形成、聚集都在页岩中,源储一体,含气范围与有效气源岩相当,没有明显圈闭界限,无统一气水界线,不存在传统意义上的圈闭。页岩储层致密,大面积连续含气,较易保存。③储层致密,以纳米级孔隙为主。页岩储层孔隙以微孔(孔隙直径 $\geq 0.75\mu\text{m}$)和纳米孔(孔隙直径 $< 0.75\mu\text{m}$)两种尺度的孔隙为主,平均孔隙直径为 100nm 。④以

游离态与吸附态两种主要方式赋存。页岩气组成以甲烷为主,乙烷、丙烷含量较少,赋存方式以吸附态、游离气两种方式为主。⑤页岩气大面积连续分布,资源规模大。页岩气分布范围为进入有效生气窗的烃源岩与良好保存条件所圈定区域,往往大面积连续分布于盆地坳陷或构造背景斜坡区。⑥需大型压裂开采,形成“人造渗透率”产出机理。页岩气开采需要大规模储层压裂改造,形成“人造”裂缝系统,提高渗透率。页岩气的产出以非达西流为主,存在解吸、扩散、渗流等相态与流动机制的转化。⑦采收率变化较大,一般 $10\%\sim 25\%$ 。⑧页岩气单井初产高,低生产周期长。

2.1.2 致密气

致密砂岩气是指覆压基质渗透率 $\leq 0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的砂岩气层,单井一般无自然产能,或自然产能低于工业气流下限,但在一定经济条件和技术措施下,可以获得工业天然气产量。通常情况下,这些措施包括压裂、水平井、多分支井等。

致密砂岩气主要具有以下地质特征:①烃源岩多样,有进入正常热演化程度的含煤岩系和湖相、海相烃源岩,主要为煤系气源岩。②油气分布不受构造带控制,斜坡带、坳陷区均可以成为有利区,分布范围广,局部富集。如苏里格、榆林、大牛地等气田,均分布在陕北斜坡,构造平缓(坡度 $1^\circ\sim 3^\circ$),断层不发育。③储集层多为低孔渗—特低孔渗—致密砂岩储层,非均质性强,含水饱和度较高,储层大规模分布。孔隙类型以孔隙型、孔隙—裂缝型为主。如鄂尔多斯盆地苏里格气田,砂岩孔隙度主要集中在 $5\%\sim 12\%$ 之间,渗透率为 $(0.1\sim 0.82)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,但储集层物性明显受岩性影响,粗砂岩的孔隙度大于 10% ,渗透率大于 $0.82\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,而细粒砂岩孔隙度一般小于 5% ,渗透率小于 $0.03\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。④以自生自储为主,源储紧密接触。如四川盆地上三叠统须家河组致密砂岩气,须二、须四、须六段储层与下伏须一、须三、须五段烃源层直接接触,下伏生成的天然气可通过垂向运移向上注入到须二、须四或须六段储层中。⑤油气运移以一次运移或短距离二次运移为主,油气聚集主要靠扩散方式,浮力作用受限;油气渗流以非达西流为主;也可依靠连通下部烃源层的断裂及其裂缝,作为烃类垂向运移的主要途径。⑥油气具有多期充注聚集特点。如川中—川南过渡带须家河组油气存在三次运聚期。第一期为燕山早中期的晚侏罗世,对应须家河组烃源岩生油气初期阶段;第二期为燕山中晚期

的白垩纪一早第三纪,须家河组各段烃源岩进入生油气高峰期,总体上以天然气注入为主;第三期为喜山运动以来的晚第三纪至今,已经形成的天然气由于构造活动的影响,重新调整。⑦流体分异差,无统一流体界面与压力系统,饱和度差异大,油、气、水易共存。⑧资源丰度较低,平面上能形成油气区,但一般无自然产量或产量极低,需采用适宜的技术措施才能形成工业产量,稳产时间较长。

2.1.3 煤层气

煤层气是一种生成并储存于煤层中,以甲烷为主要成分、以吸附状态为主的烃类气体。在煤矿开采中俗称为“瓦斯”。

煤层气主要具有以下地质特征:①煤层气组分以甲烷为主,井口排采气甲烷含量可以达到98%以上。②煤储层具有双重孔隙结构,甲烷主要吸附在具有较大比表面积的煤层微孔表面,含气量受到煤成熟度、成分、温度、压力、保存条件等因素的影响。③煤层气解吸后渗流主要通过割理和裂隙进行,由于煤层的可压缩性,受地应力影响,煤层渗透率随埋深增加快速下降。④目前,煤层气开发主要限于1500m以浅,资源评价一般限于2000m以浅。⑤煤层气主要是煤化作用过程晚期的生气产物,由于埋藏较浅或者受到晚期抬升作用的影响,次生生物气的混入较普遍。⑥受赋存状态控制,盆地内煤层气具有向斜分布特征;受煤层发育地质时代和沉积环境控制,煤层气主要分布于石炭纪以来的沉积地层,主要包括石炭系一二叠系、三叠系一侏罗系、白垩系一古近系;受煤层区域分布和埋深控制,目前发现的煤层气主要分布于美国的圣胡安、粉河和黑勇士盆地,加拿大的西加拿大前陆盆地,澳大利亚的悉尼、鲍恩和苏拉特盆地,中国的沁水和鄂尔多斯盆地等。

2.1.4 致密油

致密油是储集在覆压基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)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自然产能低于工业油流下限,但在一定经济条件和技术措施下可获得工业石油产量。通常情况下,这些措施包括酸化压裂、多级压裂、水平井、多分枝井等。

致密油多表现为以下特征:①源储共生,圈闭界限不明显,优质生油岩区致密油大面积分布。②主要发育致密湖相碳酸盐岩、致密砂岩两类储层。储层物性质差,基质渗透率低,一般空气渗透率 $\leq 1\text{mD}$,孔隙度 $\leq 12\%$;有利沉积相带控制储层发育,

由于沉积物成熟度低,颗粒细,分选差,胶结物含量高,后生成岩作用强烈,使储层变得十分致密。③持续充注,非浮力聚集,油气以短距离运移为主;油层压力系数高、油质轻;生油岩成熟区($0.6\% \leq R_o \leq 1.3\%$)油气比高,易高产。④按成因分为原生致密油和次生致密油。原生致密油主要是受沉积作用的影响,一般沉积物粒度细,泥质含量高,分选差,以原生孔为主,储层大多埋深较浅,未经历强烈的成岩作用改造,岩石脆性低,裂缝不发育,孔隙度较高,而渗透率较低,多数为中高孔低渗型。次生致密油主要是各种成岩作用改造的结果,这类储层原是常规储层,但由于压实作用、胶结作用等,大大降低了孔隙度和渗透率,原生孔隙残留较少,形成致密层。⑤孔喉半径小,纳米级孔喉系统发育,主体直径 $40 \sim 900\text{nm}$;毛细管压力高,原始含水饱和度较高,一般含水饱和度 $30\% \sim 40\%$,个别高达 60% ,原油比重多数小于 0.85 ,地层粘度多数小于 $3 \text{MPa} \cdot \text{s}$ 。孔隙结构复杂,喉道小,泥质含量高,水敏、酸敏、速敏严重,导致开采过程中易受伤害,损失产量可达 $30\% \sim 50\%$ 。⑥油层砂泥交互,非均质性严重,由于沉积环境不稳定,砂层的厚薄变化大,层间渗透率变化大,有的砂岩泥质含量高,地层水电阻率低,给油水层划分带来很大困难。⑦天然裂缝相对发育,岩性坚硬致密,存在不同程度的天然裂缝系统,一般受区域性地应力的控制,具有一定的方向性,对油田开发的效果影响较大,裂缝是油气渗透的通道,也是注水窜流的条件,且人工裂缝多与天然裂缝方向一致。⑧油层受岩性控制,水动力联系差,边底水驱动不明显,自然能量补给差,产量递减快、生产周期长,稳产靠井间接替,多数靠弹性和溶解气驱采油,油层产能递减快,一次采收率低,只能达到 $8\% \sim 12\%$,采用注水保持能量后,二次采收率可提高到 $25\% \sim 30\%$ 。

2.1.5 页岩油

页岩油是指已生成的、现今仍滞留于泥页岩微一纳米级储集空间中的石油。富有机质泥页岩既是石油的生油岩,又是石油的储集岩。

页岩油基本地质特征。①源储一体,滞留聚集。页岩油也是典型的源储一体、滞留聚集、连续分布的石油聚集。富有机质页岩既是生油岩,也是储集岩。与页岩气不同,页岩油主要形成在有机质演化的液态烃生成阶段。在富有机质泥页岩持续生油阶段,石油在泥页岩储层中滞留聚集,只有在泥页岩储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泥页岩均可能聚集页岩油。②较高成熟度富有机质页岩,含油性较好。富有机质泥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。富含有机质是泥页岩富含油气的基础,当有机质开始大量生油后,才会富集有规模的页岩油。高产富集页岩油一般 TOC 大于 2%,有利页岩油成熟度 R_o 介于 0.7%~2.0%,形成轻质油和凝析油,有利于开采。③发育纳米级孔、裂缝系统,利于页岩油聚集。页岩油储层中广泛发育的纳米级孔喉系统,一般 50~300nm 是最主要的储集空间,局部发育微米级孔隙。④储层脆性指数较高,宜于压裂改造。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。⑤地层压力高、油质轻,易于流动和开采。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。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%,资源潜力大。

2.2 细粒沉积学研究进展

细粒沉积学是研究细粒沉积岩的物质成分、结构构造、分类和成因,以及沉积过程与分布模式的学科(姜在兴等,2013;袁选俊等,2015)。细粒沉积学以细粒沉积物岩石学特征、成因机理、分布模式为主要研究内容,以细粒沉积物储层分析方法(场发射扫描电镜、纳米 CT、QEMSCAN、XRD)、细粒沉积物沉积环境物理模拟技术、细粒沉积物沉积气候恢复技术为主要研究方法,旨在明确细粒沉积岩岩石学特征,揭示分布规律与主控因素,建立成因模式,指导岩相—沉积相—有机相工业编图,推动致密油、页岩油发展。

2.2.1 陆相湖盆大型浅水三角洲成因机理与分布

浅水三角洲的概念最早由 Fisk 提出,Donaldson 等在研究石炭纪陆表海时发现水深是一个重要控制因素,并进一步总结了浅水三角洲的特征。国内外根据已有的三角洲类型与模式分析,划分为一种较新的类型—浅水三角洲,在地形平缓、整体沉降缓慢的坳陷盆地或稳定克拉通盆地背景下河流注入浅水湖盆时易形成此类三角洲。浅水三角洲沉积总体发

育于较浅水湖泊中,沉积特征不同于一般三角洲,以河流作用为主,三角洲平原及前缘水下分流河道比较发育,前缘亚相中河口坝及远砂坝不发育,有别于正常的河流三角洲沉积及具陡坡带的经典湖泊三角洲沉积。

浅水三角洲在我国现代湖盆内极为发育,特别是潮湿气候环境下的浅水三角洲沉积特征更是明显。潮湿背景下,敞流型湖盆是浅水三角洲河道发育的主要因素(四川盆地须家河组),明显区别于闭流型湖盆;干旱背景下,河水主要以地表蒸发、植被消耗等泄水(松辽盆地登娄库组)。对鄱阳湖—赣江浅水三角洲现代沉积考察,通过解析浅水三角洲基本特征、洪水期和枯水期浅水三角洲发育特征与微相构成和浅水三角洲探地雷达响应,发现敞流浅水湖盆中心发育牵引流河道砂体,三角洲砂体分布面积占湖盆面积 60%以上;26 组水槽物理模拟实验表明,敞流浅水三角洲分流河道面积占 60%以上,河口坝可达 40%,储集体发育。

2.2.2 陆相湖盆砂质碎屑流成因机理与分布

砂质碎屑流由 Hampton 引入,Shanmugam 等美国学者在 365 m 的露头观察与 4650 m 岩心分析的基础上完善砂质碎屑流概念。他认为浊流沉积在深水沉积物中所占比例较小,绝大部分为砂质碎屑流与底流改造沉积物。砂质碎屑流代表在粘性与非粘性碎屑流之间的连续作用过程,从流变学的特征看属于宾汉塑性流体,具有分散压力、基质强度和浮力等多种支撑机制。流体浓度较高,泥质含量低到中等,颗粒沉积时表现为整体固结。沉积盆地中,浊流可以延伸盆地平原,砂质碎屑流往往在盆地斜坡部位沉积下来。

陆相盆地深水重力流砂体的各项研究可参照海洋深水扇研究成果,但仍需考虑陆相湖盆沉积特色。按斜坡类型、水位高低、流量大小等进行 22 组水槽实验,表明砂质碎屑流分布在坡折带的下斜坡;通过对鄂尔多斯盆地湖盆中心长 6 等典型地区解剖,发现发育大套深水砂岩,侧向具一定连续性,垂向累积厚度较大,砂质碎屑流的朵体发育于三角洲缘的坡折带下,纵向延伸不远但横向叠置连片,是湖盆斜坡与中心部位最有利的目标区,指导了沉积相编图与勘探部署。

陆相深水砂质碎屑流理论的总结,是对现行经典浊流理论的部分否定与补充。在许多深水盆地中,运用浊流的鲍马序列、扇模式等不能够完全解释所有的深水重力流,更多深水砂体是砂质碎屑流的

产物。新的沉积模式可以使我们对陆相湖盆斜坡和深水区有不一样的视角,提出新的目标区,对勘探部署有一定的指导作用,预测砂质碎屑流在我国松辽、渤海湾、四川等陆相湖盆中是广泛分布与存在的。

2.2.3 细粒沉积研究进展

随着致密油气、页岩油气勘探开发的不断推进,细粒沉积学已成为国内外学者研究的前沿。与砂砾岩等粗粒沉积岩相比,泥页岩等细粒沉积岩研究程度总体较低,目前还缺乏系统性与完整性。本文结合近期四川龙马溪组页岩等研究、鄂尔多斯延长组页岩,简要论述海陆相细粒沉积研究进展。

中国海相富有机质页岩发育在前古生代、早古生代和中生代,分布于华北、南方、塔里木和青藏 4 个地区。古生代是中国海相富有机质页岩发育的最主要时期,形成了多套海相富有机质页岩,其中以寒武纪和志留纪页岩最为典型,本文以四川盆地为例阐述(表 2)。

早寒武世和早志留世两个时期,全球海平面快

速上升,四川盆地整体为克拉通背景上的半深水—深水陆棚,与北美主要产气页岩具有相似的沉积环境。筇竹寺组岩性以黑色页岩及深灰色含砂质页岩为主,下部为深灰—黑色炭质页岩及深灰色、灰色粉砂质页岩和粉砂岩,向上颜色逐渐变浅,为灰、灰绿色含钙质细砂岩、粉砂岩,富有机质页岩($\text{TOC}>2\%$)集中段主要为筇竹寺组底部的黑色页岩段。筇竹寺组页岩厚度受继承性发育的“德阳—安岳”古裂陷槽控制,厚度一般为 300~450m,黑色页岩厚度可达 140~160m(图 4),富有机质页岩($\text{TOC}>2\%$)厚度一般为 20~80m,其中高石梯地区最厚可达 100m。志留纪页岩以早志留世龙马溪组页岩发育最好,分布于整个扬子地台区。根据岩性组合、沉积构造、古生物、矿物成分、测井相应以及有机地球化学特征,将龙马溪组页岩划分为深水陆棚、半深水陆棚、浅水陆棚 3 种亚相(图 5)。龙马溪组沉积早期,海水流动不畅,为弱还原—还原环境,沉积了一套黑色富有机质页岩,笔石富集。该套沉积在整个上扬

表 2 蜀南地区与焦石坝刻度区主要地质参数对比表

Table 2 Comparison of major geological parameters for the Southern Sichuan and Jiaoshiba region

区块		长宁	威远	富顺—永川	焦石坝
构造背景		平缓向斜	古隆起斜坡	向斜区局部挤压褶皱	向斜内的箱状背斜
沉积地层		五峰—龙一段连续深水沉积	五峰组浅水相,龙一段深水沉积	五峰—龙一段连续深水沉积	五峰—龙一段连续深水沉积
埋深/m		2300~3200	1300~3700	3200~4500+	2400~3500
有利面积/km ²		2050	4216	3900	545
优质页岩地化参数	厚度/m	33~46	40~50	60~100	38~44
	TOC/%	1.9~7.3/4.0	1.9~6.4/2.7	1.6~6.8/3.8	1.5~6.1/3.5
	R _o /%	2.3~2.8/2.5	2.3	2.5~3.0	2.2~3.1/2.6
	有机质类型	I、II ₁	I、II ₁	I、II ₁	I、II ₁
岩相组合		硅质页岩、钙质硅质页岩,夹粘土质硅质页岩	硅质页岩、钙质硅质页岩和粘土质硅质页岩	硅质页岩、钙质硅质页岩为主,夹粘土质硅质页岩	硅质页岩为主
孔隙类型		基质孔隙为主,少量裂缝	基质孔隙	基质孔隙和裂缝	基质孔隙和裂缝
天然裂缝发育程度	裂缝段厚度/m	80~90	40~50	>150	80~90
	缝型与充填状况	层间缝为主,多充填黄铁矿	层间缝为主,多充填黄铁矿	网状裂缝,多充填黄铁矿	网状裂缝,多充填黄铁矿
物性	裂缝密度描述	声波时差异常比 1.2~1.4	1.1~4.4 条/m	声波时差异常比 1.3~2.0	裂缝密度 1~20 条/m
	总孔隙度/%	3.4~8.2/5.4	3.9~6.7/5.3	3.0~7.0/4.2	5.0~7.8/6.2
	裂缝孔隙度/%	0~1.16/0.12	0		0.54~3.28/1.63
含气性	渗透率/mD	0.00022~0.0019/0.00029	0.000015~0.00009/0.000042	0.00019~0.00027/0.00023	0.02~0.3/0.15
	地层压力系数	1.4~2.0	1.0~1.7	2.2	1.55
含气量/m ³ /t		1.7~6.5/4.1	2.74~5.01/2.92		4.0~7.7/6.1
脆性	脆性矿物含量/%	石英 25.8~67.6/41.1,长石 0.4~14.1/4.6,方解石+白云石 0~43.2/20.5,粘土 10.3~52.8/30.5	石英 16.7~58.1/33.1,长石 2.7~17.7/7.0,方解石+白云石 4.1~65.2/22.3,粘土 14.9~48.8/33.6	石英 45~48.4/46.7,长石 3.5~9.7/6.6,方解石+白云石 4.8~6.2/5.5,粘土 37.2~40.2/38.7	石英 31.1~56.0/41.9,长石 7.2~13.4/8.6,方解石+白云石 0~23.4/9.7,粘土 19.8~44.7/34.4
	泊松比	0.1~0.25	0.18~0.19	0.20~0.27	0.19~0.24
	杨氏模量/MPa	1.3×10 ⁴ ~4.1×10 ⁴	1.3×10 ⁴ ~1.36×10 ⁴	2.4×10 ⁴ ~3.7×10 ⁴	2.5×10 ⁴ ~4.9×10 ⁴
	垂直压力/MPa	56~66	40~90	85~95	48~50
力特性	两向应力差/MPa	21.4~22.3	16.6~18.3	最小水平应力 82~87MPa	3.0~6.9

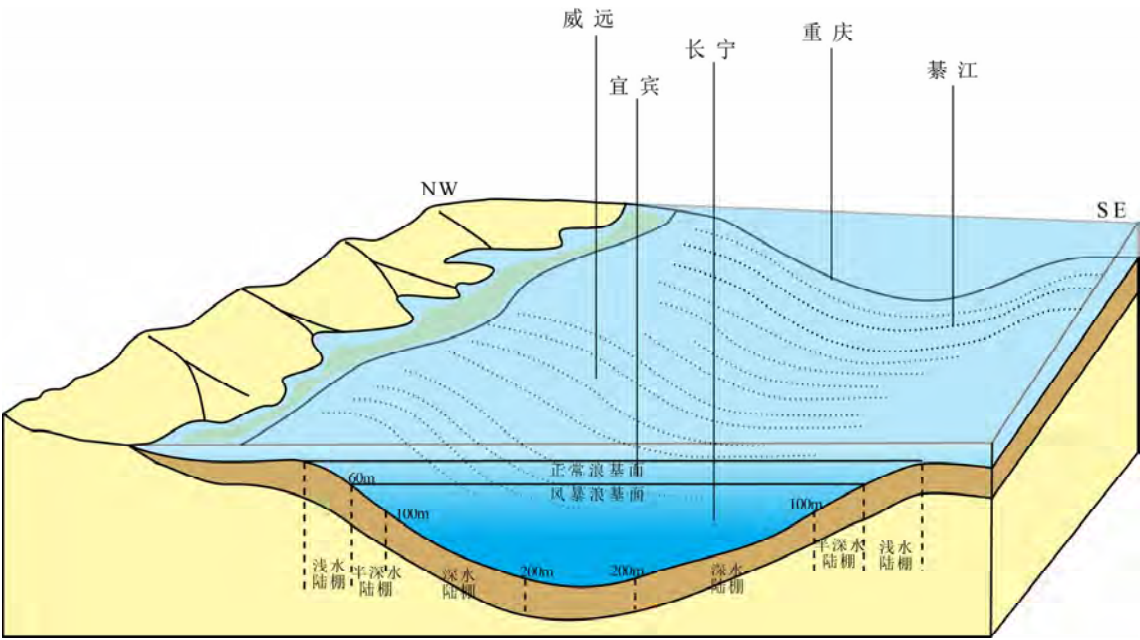


图 5 四川盆地下志留统龙马溪组沉积相模式

Fig. 5 Sedimentary facies model of the Silurian Longmaxi Fm. in the Sichuan Basin

石油阶段,页岩有机质丰度较高(TOC 一般在 2.0%以上,最高可达 40%),是陆相页岩油与致密油重要的烃源岩类型。储层多形成于三角洲前缘—前三角洲—深湖—半深湖等细粒沉积环境,而有别于常规油气储层形成的冲积扇—河流—三角洲平原等粗粒级沉积环境(图 9)。如鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组长 7 油层组沉积期达到鼎盛,形成了面积大、水域宽的大型内陆淡水湖盆。湖泊相在延长组长 7 油层组沉积期达到鼎盛,形成了以油页岩、页岩、暗色泥岩为主的大套细粒沉积,面积达 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。三叠系延长组长 7 油层组富有机质页岩的沉积模式以湖侵—水体分层模式为主,“沉积相带、水体深度、缺氧环境、湖流”是富有机质页岩分布的主控因素。因此,开展中国陆相页岩油与粉砂质致密油源储细粒沉积岩沉积机理与分布模式研究,创新和建立“细粒沉积学”,将为明确细粒致密储层、富有机质页岩分布预测、有利沉积相带和富集区优选提供科学基础依据。

2.3 非常规储层地质学研究进展

非常规油气储层地质学是一门研究非常规储层类型、形成机理、储集性能、分布特征、评价方法与预测技术的新兴油气地质学科。非常规油气储层地质学的核心是“微纳米孔隙系统”,重点研究储集空间类型、尺寸、连通性,建立储集性能与储集体规模关系,评价“储油气能力”,勘探寻找有利储层分布区,开发寻找效益储层开发区。微纳米孔喉系统精

细表征技术、非常规储层孔隙演化物理模拟技术、非常规储层数值模拟技术、非常规储层测井解释技术、非常规储层地球物理预测技术等是主要的研究方法。

国外针对非常规储层储集空间微观表征和成因分析,近年取得很大进展。美国学者 Reed 和 Loucks2007 年(Loucks et al. 2009)利用场发射扫描电镜实验观测分析表征了美国德克萨斯州沃斯堡盆地 Barnett 页岩储层的有机质孔隙特征,其后多位学者针对非常规储层微观孔喉系统进行了研究(Loucks et al. 2009)。不同的孔隙结构决定了非常规储层性质差异,孔隙类型、尺寸与排列影响油气原地赋存与聚集,也影响页岩的封盖能力。孔隙成因与分布的差异性,将对储层的渗透率和物性产生影响。

国内非常规储层在研究方法技术、多尺度数据融合、地层条件物理模拟等方面进展很大。目前非常规储层微观储集空间表征方法包括三类:①二维图像观测法,包括光学显微镜、场发射扫描电镜分析等,实现对孔隙结构的二维精细表征;②三维体积重构法,包括微米 CT、纳米 CT 及聚焦离子束场发射扫描电镜分析等,实现对孔隙结构及连通性的三维刻画与评价;③定量体积评价法,包括气体吸附法与高压压汞法,实现对孔隙结构与储集空间的定量评价。如利用场发射扫描电镜技术和纳米 CT 技术,

在对鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩油与生油岩、鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气、准噶尔盆地二叠系致密云岩与致密砂岩油、四川盆地地下古生界海相含气页岩等储层研究中,在含油气致密储集层中发现了广泛发育的孔喉直径小于 1000 nm 的纳米级孔喉(图 10)。致密储层主体孔径为 20~500 nm,其中页岩气储层一般为 100~200 nm(图 10-A&B),生油岩内的孔径一般为 20~200 nm(图 10-C&D),致密砂岩孔径一般为 100~900 nm,也可见 2~5 μ m 孔隙(图 10-E, F, G&H)。非常规储层丰富的纳米孔,有利于油气滞留聚集,连续分布。

利用多尺度分析方法刻画致密储层样品成为非常规储层研究领域的热点。非常规储层样品非均质性强,孔隙类型繁多,孔隙成因多样,仅用单一分析手段、单一观察尺度无法全面反映储层样品的总体特征,不同实验分析方法可给出多种孔隙评价结果(表 4),发挥各分析方法的优势,有机融合多种分析数据,形成系统整体的孔隙评价表法,非常重要。主要在实验流程方法、非均质性定量评价、孔喉连通性研究等三方面取得阶段进展。①宏观建立了分析流

程与方法。获得岩心样品后,对样品进行不同尺度上的多种分析,在岩心尺度,利用医用 CT 来判断岩心的类型与裂缝发育情况,观察岩心的交互层理;在柱塞尺度,开展大量的常规物性测试,得到定量的孔渗参数、含油饱和度等参数;对柱塞样品进行 SEM 制样,利用 MAPS、QEMSCAN 等大面积分析软硬件对样品进行全面的拼接成像分析,获得宏观的矿物分布,孔隙分布等;针对不同的物相区,开展精细的二维成像表征工作,获得孔隙类型,矿物类型等有用信息;利用定点三维分析技术,以及多尺度三维分析技术,对感兴趣的区域开展全面细致的三维孔隙分析实验,获得数字岩心孔隙网络,经数值分析获得三维孔喉系统的数据信息。②初步形成了非均质性定量评价方案。利用 SEM 设备装配的大面积二维拼接扫描软件、二维大面积能谱拼接分析软件以及二维大面积矿物分布分析软件对大尺寸的薄片样品进行宏观扫描分析,粗分样品中的物相;利用超高分辨扫描成像及精细的 EDS、矿物分析进行选取微观分析。③微观孔喉连通性研究。基于三维数字岩心技术编写连通性分析软件,分析了非常规储层岩石

表 3 四川盆地古生界海相页岩气特征与美国海相页岩气对比表

Table 3 Comparison of the Sichuan Basin's Paleozoic marine shale gas and U. S. marine shale gas

	类别		四川盆地		北美地台		
	1	时代	志留系 龙马溪组	寒武系 筇竹寺组	石炭系 Barnett 页岩	泥盆系 Marcellus 页岩	侏罗系 Haynesville 页岩
		构造背景	平缓斜坡	平缓背斜	平缓向斜和斜坡	平缓向斜和斜坡	平缓向斜和斜坡
		盆地类型	克拉通	克拉通	前陆	前陆	前陆
		沉积环境	陆棚	陆棚	陆棚	陆棚	陆棚
	2	岩石类型	硅质页岩 硅质钙质页岩	硅质页岩	硅质页岩 钙质页岩	硅质页岩 粘土质页岩	硅质页岩 钙质页岩
		有机质类型	I、II ₁	I、II ₁	II ₁	I、II ₁	I、II ₁
		TOC(%)	1.5~6	0.8~6	4.5	3~12	0.5~4
	3	Ro(%)	1.5~3	2.5~4.5	0.5~2.1	1.2~3.5	1.2~3
		孔隙度(%)	3~10	0.4~3	4~5	10	8~9
		渗透率(md)	0.00001~0.009	0.00001~0.009	<0.001	<0.001	<0.005
	4	厚度(m)	26~100	40~100	30~180	15~60	70~100
		含气量(m ³ /t)	2~5.5	0.07~6	4.2~9.9	1.7~2.8	2.8~9.3
	5	吸附气(%)	20~40	40~50	20	20	10
		脆度(%)	30~85	32~80	40~79.7	30~60	35~65
	6	埋深(m)	900~4500	1500~5000	1980~2590	1220~2590	3200~3990
		压力系数	1~2.3	1	0.99~1.01	0.9~1.4	1.6~2
		裂缝发育	发育	十分发育	发育	发育	不发育
	8	盖层特征	有利	不利	有利	有利	有利
		底板特征	有利	不利	有利	有利	有利
	9	地貌特征	平原和丘陵	平原和丘陵	平原	平原	平原
		水源特征	较丰富	较丰富	丰富	丰富	丰富
		管网特征	较发达	较发达	发达	发达	发达
	10	资源潜力	17.5	8.86	9.26	42.5	20.3
		×10 ¹² m ³	3.5	0.886	1.22	7.4	7.1
		地质资源					
		技术可采资源					

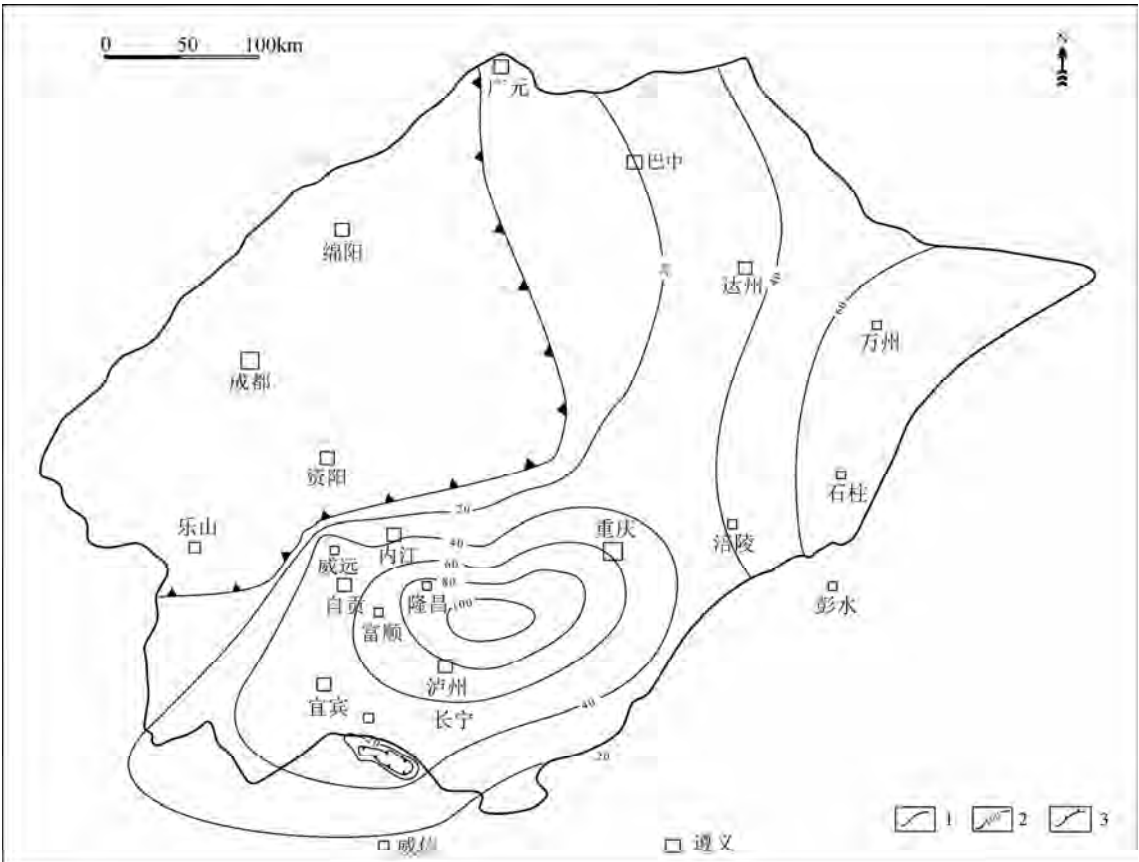


图 6 四川盆地地下志留统龙马溪组富有机质页岩等厚图

Fig. 6 Isopach map of the organically rich Lower Silurian Longmaxi Fm. shale in the Sichuan Basin

1—盆地边界;2—等厚线(m);3—地层剥蚀线

1—Basin boundary;2—Thickness(m);3—Formation erosion line

样品孔隙连通性;基于电化学分析方法,开发了电化学孔隙连通性表征方法,对典型样品进行了应用。

地层条件下非常规储层物理模拟实验取得明显进展。中国石油勘探开发研究院研发了一整套成岩物理模拟系统,具有高温(最高温度 550℃⁺)、高压(最高静岩压力 275MPa,相当于地层深度 10000m)和流体供给(酸、碱性介质,流体压力达 120MPa)等

高性能指标;可连续完成 100 天或更长时间的压实成岩和溶蚀改造模拟实验;试验参数可实时记录、采集,实验过程由计算机程序控制,具有远程报警功能(吴松涛等,2015)。如对鄂尔多斯盆地长 7 低熟泥页岩样品成岩物理模拟,配套多种实验手段,可系统研究泥页岩孔隙演化过程,发现泥页岩孔隙演化受到矿物组成、有机质、成岩流体、温度和压力等多地

表 4 非常规储层微观储集空间表征方法

Table 4 Microscopic characterization of reservoir space in an unconventional reservoir

类型	技术方法	测量范围	观测内容
二维精细表征	光学显微镜	$n \times 10 \mu\text{m} \sim \text{mm}$	2D 微米—毫米级孔隙结构
	场发射扫描电镜	$1 \text{ nm} \sim n \times \text{mm}$	2D 纳米—微米级孔隙结构
三维重构刻画	微米 CT	$1 \mu\text{m} \sim n \times \text{mm}$	3D 纳米—微米级微观孔隙结构与连通性
	纳米—CT	$50 \text{ nm} \sim 65 \mu\text{m}$	
	聚焦离子束扫描电镜	$6 \text{ nm} \sim 30 \mu\text{m}$	
定量体积评价	气体吸附法	$0.35 \text{ nm} \sim 200 \text{ nm}$	定量评价孔隙结构与空间大小
	高压压汞法	$100 \text{ nm} \sim 950 \mu\text{m}$	

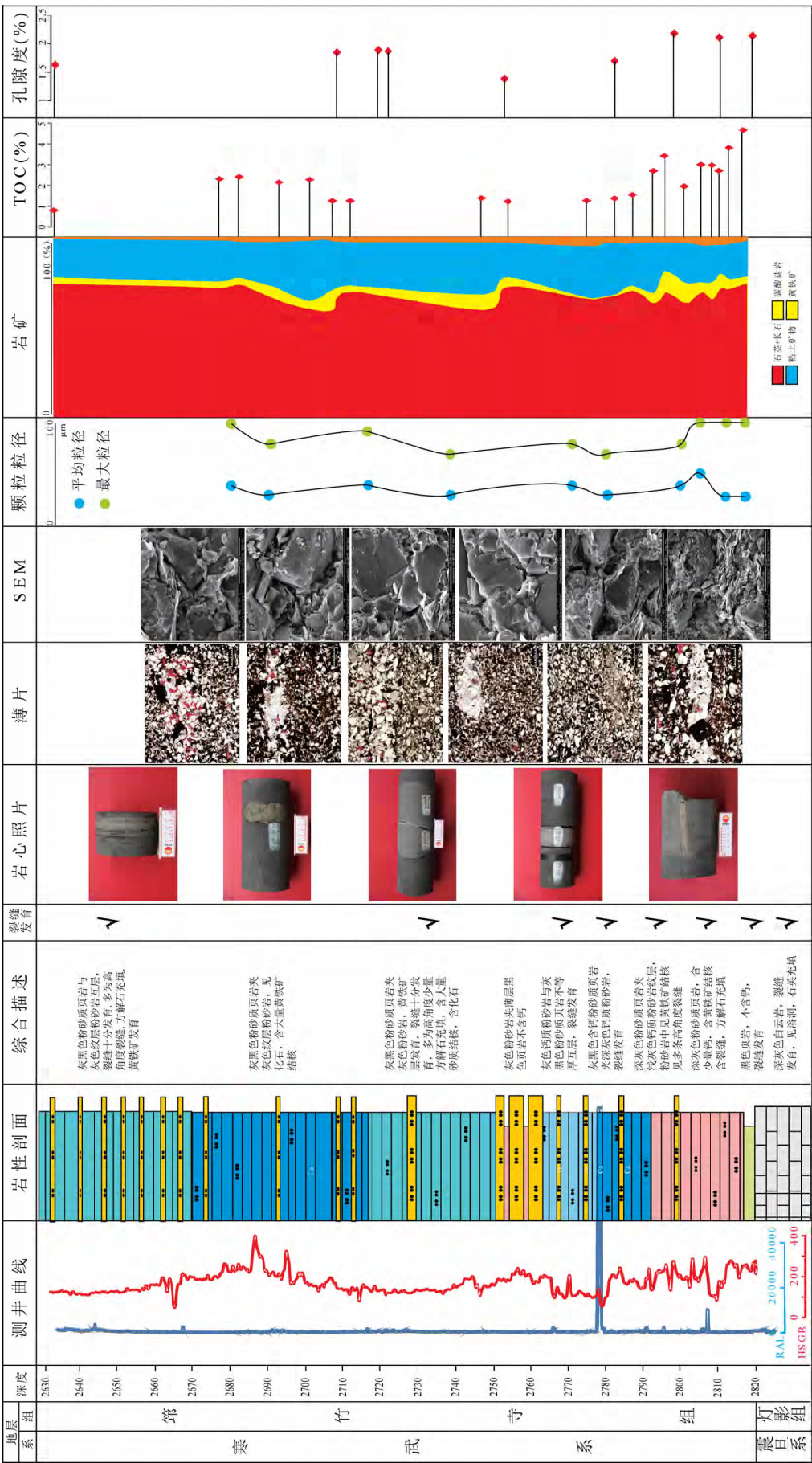


图 8 四川盆地寒武系筇竹寺组岩性综合性柱状图
Fig. 8 Composite histogram of lithology of the Cambrian Qiongzhusi Fm. in the Sichuan Basin

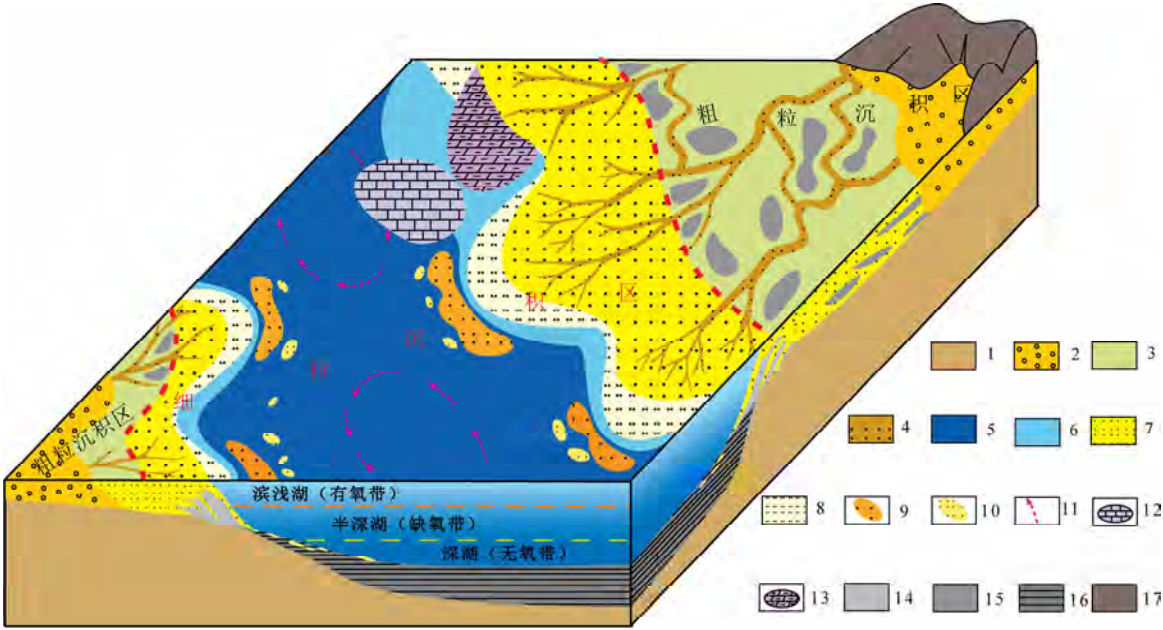


图 9 陆相粗—细粒沉积模式图(据邹才能等,2014b,修改)

Fig. 9 Distribution model of fine-grained and coarse-grained sedimentary environments (after Zou Caineng et al. , 2014b, revised)

1—基底;2—冲积扇;3—洪泛平原;4—河道砂体;5—深湖;6—滨浅湖;7—三角洲前缘朵体;8—席状粉砂;9—碎屑流砂体;10—浊积砂体;
11—湖流;12—湖相碳酸盐岩;13—湖相混积岩;14—粉砂质泥岩;15—炭质页岩;16—富含有机质页岩;17—山脉
1—Basement;2—alluvial fan;3—flood plan;4—channel sand body;5—deep lacustrine;6—shore shallow lacustrine;7—delta front lobe;8—sheet silt;9—sand debris flow sandbody;10—turbidite sandbody;11—lacustrine current;12—lacustrine carbonate rock;13—lacustrine gybride rock;14—silty mudstone;15—carbonaceous shale;16—organic—rich shale;17—mountain range

质参数的影响;泥页岩中不同物质成分对孔隙演化的贡献具有差异性:有机质热演化贡献最大,粘土矿物转换次之,脆性矿物演化最小(图 11)。

2.4 非常规油气地质学研究进展

非常规油气的研究始于 20 世纪 30 年代, W. B. Wilson(1934)油气藏分类中的开放性油气藏, 虽然当时认为该类油气藏没有勘探价值, 但已预测到非常规油气藏的存在。20 世纪 80 年代以来, 国外出现盆地中心气、煤层气、页岩气、致密砂岩气、页岩油等概念(Law and Curtis, 2002), 国内出现深盆气(金之钧等, 1999)、根源气(张金川, 2003)、深盆油(侯启军, 2005)、非稳态成藏(孙龙德, 2008)、致密油(邹才能等, 2010; 贾承造等, 2012b)、致密气(邹才能等, 2012a; 戴金星等, 2012)、页岩气(张金川等, 2003; 邹才能等, 2010a)、页岩油(邹才能等, 2013b)、源岩油气(邹才能等, 2012a)等概念, 非常规油气资源逐渐成为全球油气勘探开发重要领域之一, 在涵盖非常规油气资源内涵、种类、地质特征、资源评价方法、开发技术等方面研究也已取得长足进展。

美国联邦地质调查局(USGS)的 J. W. Schmoker 和 D. I. Gautier 等(1995)针对含油气盆

地非常规储层中油气大面积聚集分布、圈闭与盖层界限不清、缺乏明确油气水界面的特点, 提出了“连续型油气聚集”的概念, 并对致密砂岩气、页岩气、盆地中心气、煤层气、浅层微生物气及天然气水合物等非常规天然气资源进行了评价(USGS, 2013a)。

B. E. Law 等(2002)提出了非常规油气系统的概念, 指出非常规油气系统与构造圈闭无关, 基本上不受重力分异的影响, 区域上存在大规模普遍含油气区带, 并对煤层气、深盆气及天然气水合物等非常规天然气资源做了分析。2007 年石油工程师学会(SPE)、石油评价工程师学会(SPEE)、美国石油地质师协会(AAPG)、世界石油大会(WPC)在《油气资源管理系统》中定义了非常规油气资源相关概念, 认为连续型矿产(continuous-type deposit)和非常规资源(unconventional resources)基本等同, 都定义为大面积连续分布、受水动力影响很小的油气聚集, 包括盆地中心气、页岩气、天然气水合物、天然沥青及油页岩等, 同时强调了其技术难度及经济可行性(SPE et al. , 2007)。

贾承造认为非常规油气地质学有 4 项重要理论问题: ①“含油气系统”理论的深化再认识, 提出含油

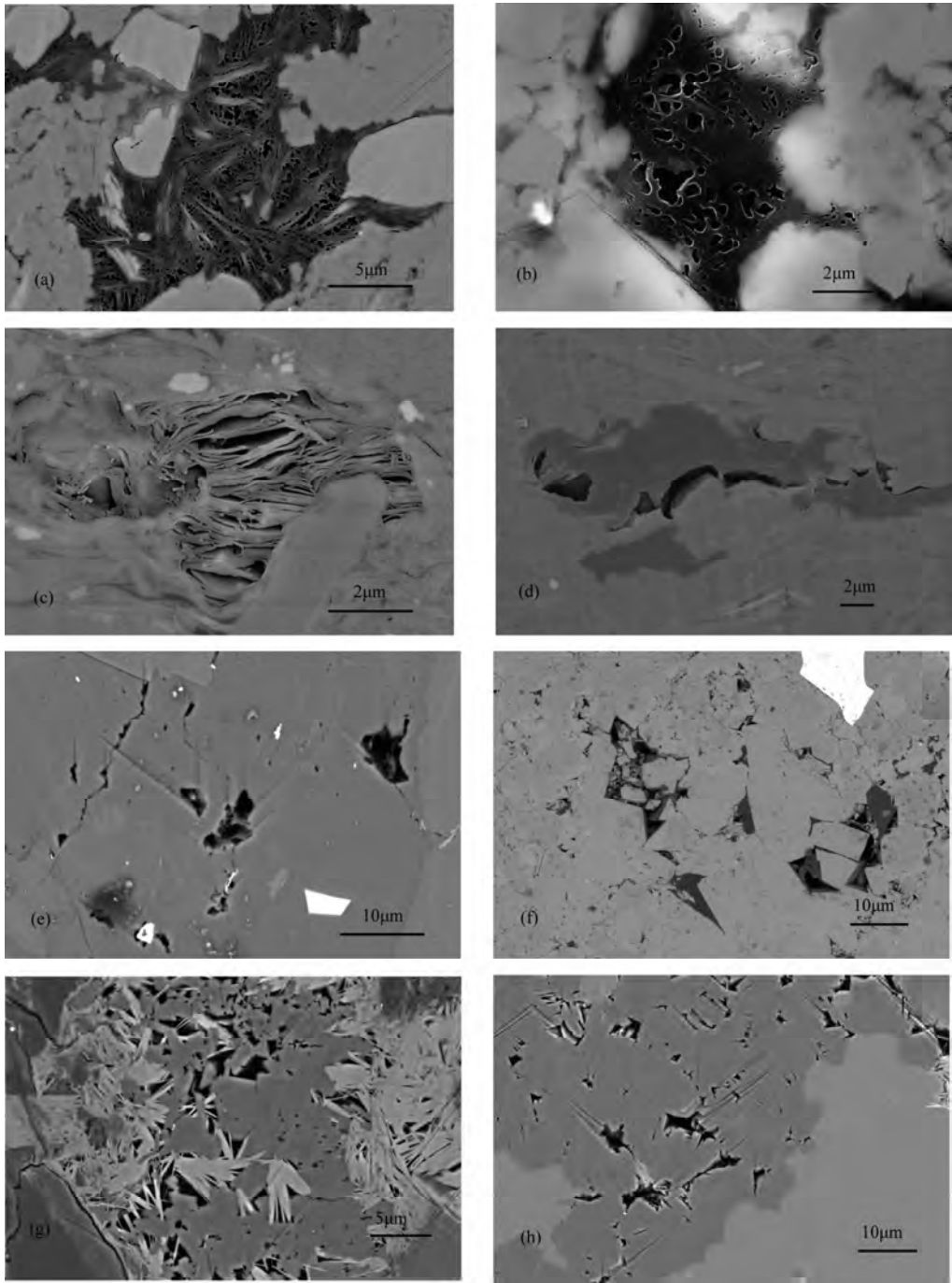


图 10 中国非常规致密储集层纳米级孔喉典型微观照片

Fig. 10 Typical microscopic photos of nano-scale pore throats for China's unconventional tight reservoirs

(a)+(b)—四川盆地威 201 井志留系页岩有机质内孔;(c)—鄂尔多斯盆地张 2 井上二叠统延长组 7 段页岩片状绿泥石基质孔;(d)—四川盆地公 4 井侏罗系大安寨组泥页岩有机质孔;(e)—鄂尔多斯盆地里 78 井延长组 6 段致密砂岩斜长石粒间溶孔;(f)—准噶尔盆地吉 174 井芦草沟组致密云质砂岩白云石粒间孔与粒内孔,孔隙内见残余油充填;(g)—四川盆地龙 3 井须二段致密砂岩石英粒内孔与粒间孔,粒间孔内伊蒙混层发育;(h)—鄂尔多斯盆地苏 37 井太原组致密砂岩石英粒内孔

(a)—Inner pores within organic matter of Siliurian shale in Well Wei-201 of Sichuan Basin, pore throat diameter between 100~200nm;
(b)—Matrix pores within flaky chlorite of shale, Member-7, Yanchang Formation, Upper Triassic Series in Well Zhang-2 of Ordos Basin, pore throat diameter between 40~300nm; (c)—Oil found in nano/micro-sized pore throats within tight dolomitic sandstone, Lucaogou Formation, Permian Series in Well Ji-174 of Ordos Basin; (d)—Intragranular pores within quartz of tight sandstone, Taiyuan Formation, upper Palaeozoic Group in Well Su-37 of Ordos Basin, pore throat diameter between 50~250nm

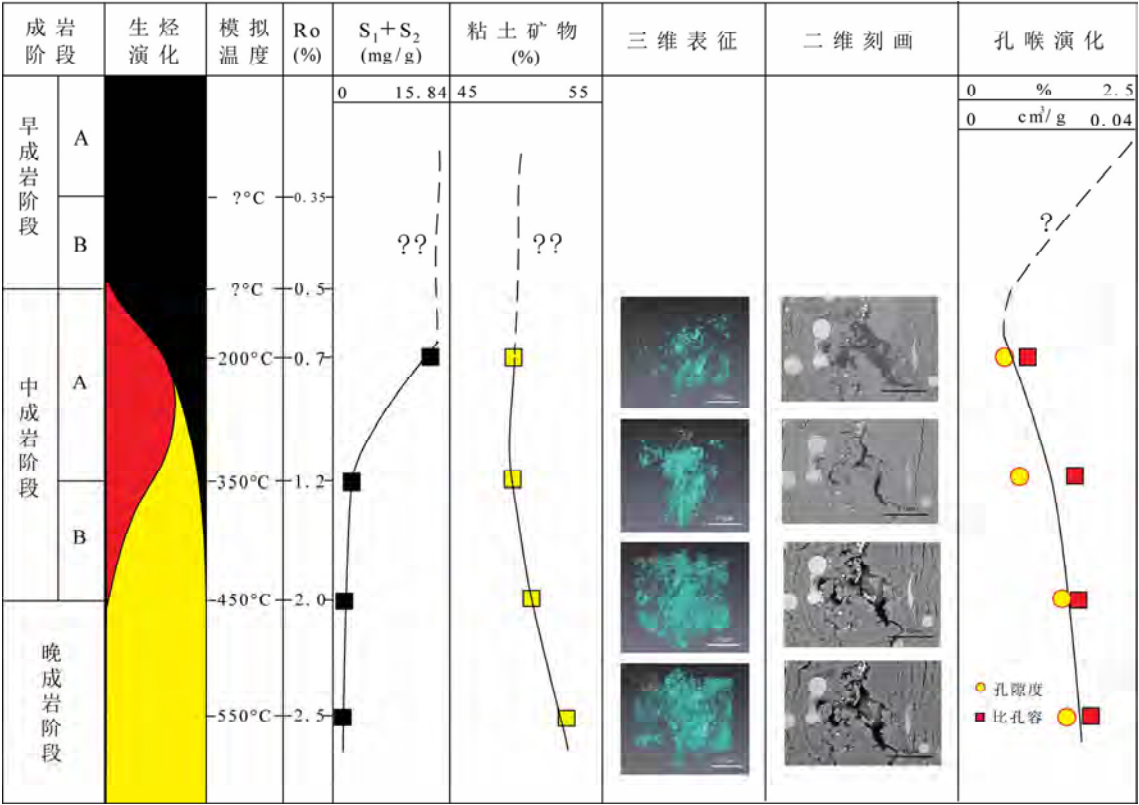


图 11 鄂尔多斯盆地长 7 泥页岩热模拟孔喉演化综合图(据吴松涛等,2015)

Fig. 11 Evolution map of the pore throat of the Chang-7 mud shale in the Ordos Basin(after Wu Songtao et al. , 2015)

气盆地“全含油气系统”的“全过程成藏”模式，从烃类生—排—运—聚全过程定量化研究 4 个关键问题出发，分析非常规油气成藏机理；②细粒沉积体系与致密相带沉积学，通过解析细粒沉积与非常规油气生成关系的角度提出 3 个研究结合点；③页岩与致密储层中微—纳米孔隙系统和流体相态，提出微—

纳米孔隙系统在非常规油气研究方面应重点关注 5 个方面，并解析微—纳米孔隙发育特点及微—纳米孔隙中流体相态的特征；④非常规油气富集规律与资源评价，从非常规油气聚集特征出发，优选建立非常规油气资源评价方法体系(贾承造等,2014)。

邹才能等 2009 年引入并发展连续型油气聚集

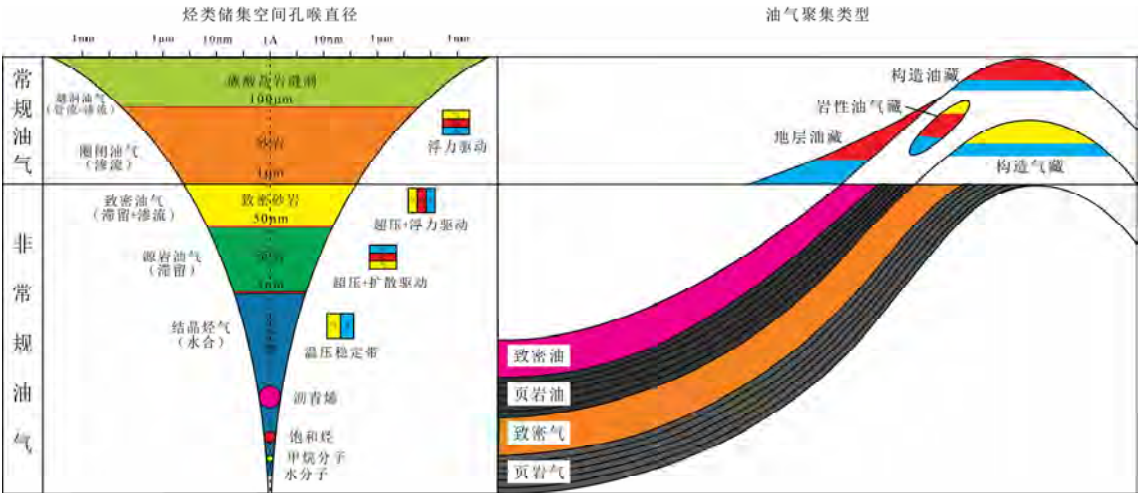


图 12 储集空间与油气聚集类型(据邹才能等,2014b)

Fig. 12 Reservoir space controlling the hydrocarbon accumulation type(after Zou Caineng et al. , 2014b)

理论,总结提出连续型油气聚集具有10项重要特征。通过纳米CT、场发射等先进手段,发现了致密油和气、页岩油和气等非常规油气储层中纳米孔喉系统(邹才能等,2010a),研究了不同类型非常规储层地质特征、油气形成与分布规律、“甜点区”主要控制因素(图12)。提出了含油气单元(盆地、坳陷或凹陷)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、紧密共生与伴生,形成常规—非常规油气“有序聚集”体系(邹才能等,2014b)。初步评价出不同类型非常规油气资源潜力,明确提出中国不同类型非常规油气发展策略与定位(邹才能等,2012a),指出基础地质研究的创新,具有形成非常规石油地质学的趋势(邹才能等,2014b)。2011年、2013年邹才能等先后出版了《非常规油气地质》第一和第二版;2012年作者在爱思维唯尔(Elsevier)集团出版并全球发行了《Unconventional Petroleum Geology》英文一书,被认为是第一本综合对全球非常规油气勘探开发潜力进行判断、分类和评价的书(邹才能等,2014b);2013年在《石油勘探与开发》第4期发表了“非常规油气概念、特征、潜力及技术—兼论非常规油气地质学”一文,介绍了非常规油气地质学的内涵、发展简史、研究内容、研究方法与研究意义(邹才能等,2013c)。2014年8月出版了《非常规油气地质学》一书,明确提出非常规油气地质学是一门研究非常规油气类型、细粒沉积、微纳米级储层、油气形成机理、分布特征、富集规律、产出机制、评价方法、核心技术、发展战略与经济评价等为重点的新兴油气地质学科,已成为石油与天然气地质学的一个重要分支;指出非常规油气地质学的核心是“储集层是否含油气”,评价的重点是烃源性、岩性、物性、脆性、含油气性与应力各向异性“6特性”及匹配关系,明确“生油气能力、储油气能力、产油气能力”;勘探主要目的是寻找油气连续或准连续分布边界与“甜点区”,开发寻找低成本开采技术与经济发展模式(图13)。

伴随美国页岩气、致密油等非常规油气资源的大规模开发利用,非常规油气地质理论正引起越来越多的石油地质学家与勘探家的重视,非常规油气地质理论研究也取得重大进展,已成为石油地质学研究的前缘。

针对富油气盆地常规—非常规油气协同发展,邹才能等2014年又提出了常规—非常规油气“有序聚集”理念,即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(邹才能等,2014b, 2015b)(图14)。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”,可采用多井平台“同步开采”模式对不同层系、不同类型油气“整体规划、整体建设、整体开发”,加快勘探开发节奏,提高资源开发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,一般地,发现常规油气,预示供烃方向有非常规油气共生;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有常规构造油气藏和岩性地层油气藏,凹陷或沉积中心聚集有非常规致密油气和页岩油气等,即非常规油气外围有常规油气,常规油气里面有非常规油气;纵向上,从浅到深分布有远源的常规油气藏、近源的致密油气、源内的页岩油气等。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”寻找大型构造与岩性地层藏集群;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,打破了先找常规后找非常规的“先富侯贫”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”。

2.5 非常规油气勘探技术研究进展

2.5.1 地球物理技术研究进展

针对页岩系统致密储层及流体的评价预测,测井技术取得较大进展,出现了“六特性”测井评价技术系列。“六特性”评价,即烃源性、岩性、物性、脆性、含油气性与应力各向异性评价,实现烃源岩品质评价、储层品质评价和工程品质综合评价,确定页岩系统油气分布的“甜点区”。除了常规测井方法外,岩性评价主要推广应用元素俘获测井技术,提升岩性组份计算精度;含油性评价加大应用对油气信息敏感性较强的录井技术,录井技术测井与录井结合,如将红外光谱、岩石热解地球化学等录井技术与阵列声波或偶极横波、核磁共振等测井技术相结合,实现油气层有效识别;物性评价由于致密储层孔隙结构复杂,评价难度较大,现主要采用核磁共振、微电阻率等成像测井,以期建立针对性的孔隙度和渗透率模型;烃源性评价目前主要采用自然伽马能谱测

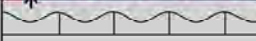
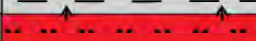
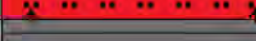
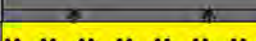
资源类型	分布特征	聚集类型	聚集形态	聚集机理	聚集方式	资源比例	关键技术	实 例
常规油气	单体型	构造油气藏		远源浮力	常规圈闭	20%±	二维或三维地震	松辽盆地长垣白垩系
	集群型	岩性地层油气藏						准噶尔西北缘二叠系-侏罗系
非常规油气	准连续型	油砂+重油		近源压差	非常规储层	80%±	直井或水平井	辽河西斜坡新近系
		变质岩油气						松辽盆地白垩系
		火山岩油气						塔里木盆地奥陶系
		碳酸盐岩缝洞油气						
	连续型	致密油				80%±	三维地震 微地震监测 “人工油气藏” 水平井“体积”压裂 “平台式”-“工厂化”开采	鄂尔多斯盆地三叠系
		页岩油						鄂尔多斯盆地石炭-二叠系
		致密气						四川盆地寒武-志留系
		煤层气						
		页岩气						

图 13 油气资源类型与聚集方式(据邹才能等,2013a)

Fig. 13 Types and accumulation modes of oil & gas resources (after Zou Caineng et al. , 2013a)

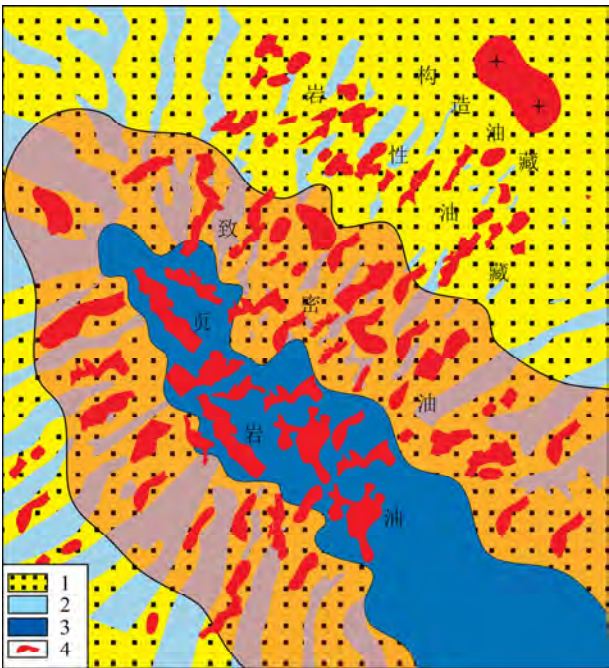


图 14 常规—非常规油气平面有序分布模式图
(据邹才能等,2014b)

Fig. 14 Sequential distribution model of conventional-unconventional oil & gas (after Zou Caineng et al. , 2014b)

1—砂岩;2—泥岩;3—页岩发育区;4—石油聚集;
1—Sandstone;2—mudstone;3—shale developed area;
4—hydrocarbon accumulation

井统计、电阻率与孔隙度测井曲线重叠 $\Delta \lg R$ 和核磁共振与密度测井组合的干酪根含量转换等 3 种方法,主要实现对烃源岩有机质丰度的计算;脆性评价主要采用岩石组份计算和岩石弹性参数计算等 2 种方法,刻画岩石的脆性特征;地应力评价主要指水平地应力(σ_{H1} 和 σ_{H2})评价,包括方位确定、大小计算以及地应力纵横向各向异性、地应力平面展布特征等,可借助电成像测井和阵列(或扫描)声波测井实现。

2.5.2 “甜点区”评价研究进展

“甜点区”定义是非常规油气分布中相对富集高产的有利区带。评价优选“甜点区”也是非常规油气勘探研究的核心,贯穿整个勘探开发过程(Harris Cander, 2012; Beau Tinnin et al. , 2014; 邹才能等, 2014b)。非常规油气甜点包括“地质甜点、工程甜点、经济甜点”。提出了油气富集“甜点区”评价的 8 个指标,其中 3 个关键指标是:TOC 值大于 2% (其中页岩油 $S_1 > 2\text{mg/g}$)、孔隙度较高(致密油气 $> 10\%$,页岩油气 $> 3\%$)和微裂缝发育。地质甜点着眼于烃源岩、储集层与裂缝等综合评价,工程甜点着眼于埋深、岩石可压性、地应力各向异性综合评价,经济甜点着眼于资源规模、地面条件等评价。如当前非常规致密油和气、页岩油和气的“甜点区”评价,

主要着眼于烃源层、储集层、裂缝、局部构造等地质甜点要素评价,和压力系数、含油气饱和度、脆度、地应力特性、埋深等工程甜点要素评价(表 5)。

“甜点区”评价包括 5 项关键技术:①烃源岩“甜点区”预测技术:通过岩样测试、声波/电阻率计算、核磁共振+密度法等综合评价纵向烃源岩甜点分布,连井对比结合沉积相、地震相分析,明确烃源岩甜点平面分布特征。②储集层“甜点区”预测技术:综合岩心实测物性资料与有利目的层段的沉积相、成岩相研究,进行孔、渗分布等多图叠合,确定储集层甜点区。③脆性评价与预测技术:通过 X-衍射等方法进行矿物组分分析,结合应力实验及动态测井脆性分析确定有利层段,利用叠前地震属性反演确定平面分布。④地应力评价技术:通过岩石力学实验结合阵列声波等测井资料,计算岩石弹性模量,提供孔隙压力、上覆岩层压力、最大/最小水平应力等参数,指导井眼轨迹设计、确定压裂方式和规模。⑤“甜点区”地震属性综合预测技术:利用多参数交会分析与叠前弹性反演,确定岩性、孔隙度、脆性等关键参数的平面分布;利用叠后多属性裂缝预测技术,预测和解释裂缝发育区;集成岩性、物性、脆性等多参数分析,预测甜点区分布。

2.6 非常规油气开发工程技术研究进展

北美页岩气、致密油等非常规油气“革命性发展”,主要得益于微地震监测、水平井压裂钻完井、平台式“工厂化”生产、“人工油气藏”开发等 4 项核心理论技术的重大进步。

2.6.1 微地震监测技术研究进展

微地震监测技术最早于 20 世纪 40 年代由美国矿业局提出,历经 70 余年发展,国外已经具备了微地震监测专有技术、软件、设备等一体化的服务能力。我国微地震监测技术起步晚,但发展迅速,已初步具备微地震采集设计、处理解释、油藏建模等一体化服务功能,在四川盆地南部页岩气勘探开发实践中取得了一定应用效果。应用集中在六大方面:①储层压裂监测;②油藏动态监测;③识别可能引起储层分区,或充当过早见水流动通道的断层或大裂缝,描述断层封堵性;④以裂缝为主的储层,可以用于速度成像和横波各向异性分析,对裂缝性储层有关的流动各向异性进行成像;⑤对微地震波形和震源机制研究,可提供有关油藏内部变形机制、传导性裂缝和再活动断裂构造形态信息,及流体流动分布和压力前缘移动情况;⑥微地震监测与其它井中地震和反射地震技术结合,可大大降低储层监测周期和费

用。

2.6.2 水平井压裂技术研究进展

水平井钻井最早是在 1863 年由瑞士工程师提出,20 世纪 80 年代是国外水平井钻井技术快速发展、逐步完善并开始大规模应用的重要时期,特别是美国,随着页岩气、致密油等非常规油气资源的大规模勘探开发,水平井钻井数几乎成指数增长(吴奇等, 2011a, 2011b),从 2000 年的 1144 口增长到 2012 年的 17721 口左右,增长了 15 倍多,水平井数占总井数的比例也快速升至 36.7%。近年来,随着水平井综合能力和工艺技术的发展,特别是水平井的轨迹设计技术、随钻测量(MWD)、随钻测井(LWD)、旋转导向钻井系统(SRD)、钻井液等技术的发展,催生了多种水平井新技术出现,并逐步成为非常规油气资源勘探开发的重要技术手段。目前,水平井钻井技术正在向结合地质、地球物理、油层物理、工程技术等多种因素的集成系统发展。

水平井分段压裂技术,国内外于 20 世纪 80 年代开始研究,在水力裂缝的起裂、延伸,水力裂缝条数和裂缝几何尺寸的优化,分段压裂施工工艺技术与井下分隔工具等方面均已取得重要进展。水力喷射压裂技术、裸眼封隔器分段压裂技术、限流法分段压裂技术、体积改造技术(Stimulated Reservoir Volume,简称 SRV)、高速通道压裂技术(HiWAY Channel Fracturing)是几种常见的压裂工艺。

2.6.3 平台式“工厂化”生产研究进展

平台式“工厂化”生产模式是指应用系统工程的思想和方法,集中配置人力、物力、投资、组织等要素,以现代科学技术、信息技术和管理手段,用于传统石油开发施工和生产作业。实现多井平台式“工厂化”生产,必须具备 4 个要素:①整体研究、批量布井,②模块装备、标准设计,③交叉施工、流水作业,④用料用水、重复利用。目前,“工厂化”作业只针对北美和中国等页岩气、致密油单一非常规油气类型进行施工,该模式强调油气生产将突破一个井场只钻一口井、只钻一种非常规油气类型的传统油气生产方式。未来发展的趋势是多层多井平台式“工厂化”生产模式,是指对含油气单元内不同层系、不同类型的常规与非常规油气资源,按照大平台布井方式,集中部署一批井身结构、完井方式不尽相同的井,采用标准化、模块化的技术装备,以流水线作业方式进行数口井的钻井、完井、返排、生产同步作业。中国油气资源分布区地表环境复杂,以山地、黄土塬、沙漠、海洋等为主,可供钻探地区有限,环境脆

表 5 致密油气与页岩油气“甜点区”评价标准(邹才能等,2014b)

Table 5 Evaluation criterions for ‘sweet spot zone’ of tight oil & gas (Zou Caineng et al., 2014b)

油气类型		地质甜点			工程甜点					
		烃源层	储集层	裂缝	局部构造	压力系数	含油气饱和度/%	脆性指数/%	水平主应力差/MPa	埋深/m
致密油气	评价标准	$TOC>2\%$ 厚100~130 m, TOC 值为5%~6%, R_o 值为0.8%~1.0%	孔隙度10%~15% 厚度25~50 m,孔隙度12%~20%,含油饱和度大于70%	微裂缝发育	相对高部位	>1	>60	>40	<6	$<4\ 500$
	实例	准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油		微裂缝发育	斜坡相对高部位	$1.2\sim1.5$	>90	>50	<6	$1\ 000\sim4\ 500$
		鄂尔多斯盆地苏里格盒 ₈ 段致密气	厚6~20 m; TOC :煤60%~70%,炭泥质岩3%~5%; R_o 值为1.3%~2.5%	孔隙度20~40 m,孔隙度10%~14%,含气饱和度大于50%	微裂缝发育	平缓斜坡相对高部位	$0.70\sim0.95$	>60	$40\sim60$	<8
页岩油气	评价标准	$TOC>2\%$ (其中页岩油 $S_1>2\text{ mg/g}$)	孔隙度大于3%	微裂缝发育	相对高部位	>1.2	>60	>40	<10	$<4\ 500$
	实例	鄂尔多斯盆地华庆地区长7段页岩油	厚10~30 m, TOC 值为3%~25%, R_o 值为0.8%~1.2%, S_1 值为1~8 mg/g	微裂缝发育	斜坡相对高部位	$0.8\sim1.0$	>70	$30\sim50$	<15	$1\ 000\sim3\ 000$
		松辽盆地青一段页岩油	厚度40~60 m, TOC 值为2%~8%, R_o 值为0.7%~1.4%, S_1 值为1~7 mg/g	孔隙度2%~5%,含油饱和度大于80%	微裂缝发育	斜坡相对高部位	$1.2\sim1.6$	>60	$30\sim60$	<10
		四川盆地蜀南龙马溪组页岩气	孔隙度3%~8%, 含气量大于3 m ³ /t	微裂缝发育	稳定斜坡区	$1.3\sim2.0$	含气量 $>4.0\text{ m}^3/\text{t}$	>40	<20	$1\ 500\sim4\ 000$

弱,这决定了诸如四川盆地等常规与非常规油气重叠发育区,更需要走多井平台式“工厂化”生产模式的发展之路。

2.6.4 “人工油气藏”开发

非常规页岩层系油气(页岩油气、致密油气)开发存在“高产难、稳产难、补充能量难”等“三难”问题,有效开发页岩层系油气藏,本文作者通过系统调研和试验,提出“人工油气藏”开发理念,即从页岩层系油气藏的物质基础、流动通道、流动能量等 3 个要素着手,通过置换驱替,促使油气物质基础充分释放,通过体积改造,构建油气流动缝网通道,通过多轮次增加地层能量,有效补充油气流动能量,最终实现页岩层系油气较高程度采出(图 15)。非常规“人工油气藏”开发内涵与天然油气藏不同。天然油气藏开发是指,圈闭中具有统一油气水界面的油气,依靠自然渗透率和浮力作用,通过达西渗流,实现天然能量开采。“人工油气藏”开发涵义,是指基本无渗透能力的致密地层,通过驱油压裂、气体压裂、原位加热等方法,形成裂缝型“人造渗透率”,与地下基质微纳米孔喉构成油气产出系统,实现人工能量开发。“人工油气藏”体积改造,通过提高油藏改造体积(SRV)、提高裂缝与油藏接触面积(Contact)、提高裂缝导流能力匹配程度(Conductivity)、提高地层压力(Pressure)等四方面提高改造效果。“人工油气藏”体积改造,具有三个内因和三个外因。三个内因是指弱面(天然裂缝、层理、节理等)、水平应力差和脆度,弱面越发育、地应力差越小、岩石脆度越大,越

易形成复杂裂缝;三个外因是指液体黏度、净压力和应力干扰,低液体黏度、高施工净压力、合理裂缝干扰,有利于形成复杂裂缝。“人工油气藏”体积改造,可通过定量压裂缝网进行监测,微地震监测解决缝网位置刻画难题,微形变监测获取地下有效改造体积(ESRV),光纤监测全生命周期的改造和生产信息。新一代的压裂技术,是实现“人工油气藏”体积改造的利器,如 LPG 压裂技术:在北美已完成 1863 井层,增产倍数提高 1.5 倍,100% 回收利用。国内研发 LPG 压裂液体系,耐温 105℃,黏度 50mPa·s,性能达国际水平;如液态 CO₂ 压裂技术:在北美应用 1200 口井,国内开始现场试验,研发增稠剂及增稠助剂,耐温 90℃,目前最大的瓶颈是液态 CO₂ 交联后粘度低,携砂性能有限,长庆油田试验 1 口井,吉林试验 1 口井,计划实施 3 口井。非常规“人工油气藏”开发的实现,需要持续攻关压裂形成最大缝网机理、压裂液无伤害地层机理、改变油水界面驱油机理、控压生产地层流动机理等关键问题。

需要指出的是,大型水平井体积压裂可能并不是未来页岩层系石油开发的主流技术,原位转化/改质技术很可能是页岩层系石油高程度采出的杀手铜技术,成为石油工业产生里程碑式影响的重大革新技术。原位转化/改质技术,通过大规模体积加热,原位改质或原地转化,将地上炼油厂搬到地下,成为“地下炼油厂”,使原地粘稠液态烃轻质化、凝析化,同时伴生新的地下天然缝网系统、超压和气体,形成新的人工有效驱替系统,地面条件需要经济发达的

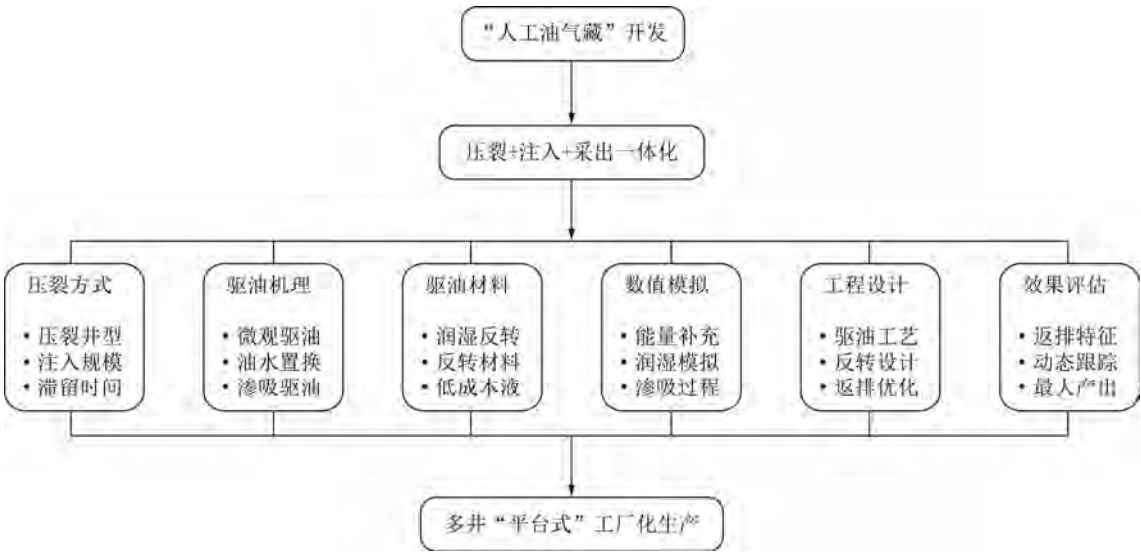


图 15 非常规“人工油气藏”开发流程图

Fig. 15 Unconventional “man-made reservoir” development workflow

供热电网、煤等热源,实现低渗透油、致密油、页岩油一体化开采,采收率可达到 30%~60%,具有不受地质条件限制、地下转化轻质油、较低污染等明显技术优势。

3 非常规油气突破的启示、意义、挑战及地位

3.1 非常规油气突破的重要启示

一是:坚持长期的基础理论创新,是非常规油气突破的前提。美国非常规天然气的发展经历了很长时间的地质理论准备。美国政府在 20 世纪 70 年代就投入大量资金,用于开展非常规油气基础研究、资源调查和关键技术攻关。1978 年,美国能源部就组织开展了致密气、煤层气基础研究,1980 年启动了页岩气开采理论技术攻关项目。

二是:坚持核心技术进步与规模化应用,是非常规油气突破的关键。非常规油气能否经济有效开发,关键在于能否提高单井产量,降低成本。美国页岩气开发初期主要采用直井压裂,单井平均日产量不足 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$,2003 年以后主要采用水平井分段压裂,单井平均日产量超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。目前,水平井钻完井、水平井多段压裂、微地震监测等核心技术的进步与大规模工业化应用,正推动全球范围的非常规油气大发展。

三是:市场机制完善、国家政策扶持与高油价,是非常规油气突破的动力。完善的市场机制与优惠的国家政策,激发了石油公司开发非常规油气资源的积极性。1978 年,美国解除了天然气价格管制,逐步形成了市场定价机制,天然气价格逐步攀升,从事非常规天然气开发变得有利可为,吸引了大批公司进入这一领域。1980 年,美国政府又颁布了《能源意外获利法》,对非常规能源开发实施税收补贴,鼓励和支持致密气与煤层气开发,根据修订条例,这项税收政策优惠期长达 23 年。页岩气的发展也离不开政策的支持,20 世纪 90 年代以来,美国得克萨斯州对页岩气开发免征生产税,使得克萨斯州成为美国页岩气开发最活跃的地区。据统计,2008 年美国从事页岩气开发的公司超过 60 家,既有壳牌、埃克森美孚等大油气田开发公司,更有一大批的独立小公司参与非常规油气开采。另外,高油价也为非常规油气开发提供了投入保障。

四是:相对完善的地面基础设施,是非常规油气发展的基础。美国天然气管网经过数十年的发展,形成了覆盖全国、连接主要气区和终端用户的完善

的管网体系,输气干线约有 $50 \times 10^4 \text{ km}$,配气管道 $300 \times 10^4 \text{ km}$,为非常规天然气开发利用提供了重要基础条件。

3.2 非常规油气突破的重大意义

全球非常规油气突破,尤其是页岩气突破,对油气领域、世界政治、经济和军事秩序产生了深远影响。

一是:延长了石油工业的生命周期,增加了资源类型与资源量。突破了资源禁区,增加了资源类型,传统常规勘探开发将页岩作为生油气层,而非储层,没有把页岩油气作为有效资源。突破了传统成藏理论,不断挑战常规储层下限和传统圈闭成藏理论,证实页岩中发育纳米级孔喉系统,没有圈闭也能聚集油气。突破了传统技术,水平井规模压裂、平台式“工厂化”开采成为新的工业化开发技术。

二是:引发了油气科技革命,推动了整个石油工业理论技术升级换代和快速发展。伴随全球新科技革命浪潮的来临,生命科技、信息科技与纳米科技等交叉融合成为未来技术发展的主体,石油工业将进入纳米科技时代,纳米、信息等新技术将成为石油工业的核心技术。油气科技革命有 3 个显著标志:一是理论的颠覆性,二是技术的突破性,三是生产的工业性。

三是:改变了全球传统能源格局,影响世界发展秩序。非常规油气的突破,推动全球正在形成以中东为核心的东半球“常规油气”版图及以美洲为核心的西半球“非常规油气”新版图。这必然会导致世界大国作出政治、经济、军事等战略调整和新布局。

3.3 非常规油气发展的挑战

非常规油气工业化发展还面临十个方面挑战:①传统粗粒沉积学遇挑战,需发展泥页岩、粉细砂岩为核心的细粒沉积学;②传统油气地球化学遇挑战,需发展全过程生烃为核心非常规油气地球化学;③常规孔隙储集层遇挑战,需发展纳米级孔隙为核心的非常规储层地质学;④常规圈闭成藏理论遇挑战,需发展连续型油气聚集理论为核心的非常规油气地质学;⑤传统地球物理学遇挑战,需发展“六特性”“甜点区”评价为重点预测技术;⑥传统资源储量评价遇挑战,需建立技术与经济可采储量体系与标准;⑦直井钻探技术遇挑战,需发展直井缝网与水平井规模压裂技术;⑧开采方式遇挑战,需发展多井多层平台式“工厂化”生产模式;⑨“非技术”问题挑战,需有政策、油价、资金、环保、管理等有效支撑;⑩院校教育遇挑战,需倡导本科常规油气、研究生非常规油

气教育。

3.4 中国非常规油气勘探开发战略定位

不同类型的非常规油气资源,其储层性质、油气聚集特点和工艺技术要求不同,需要分层次勘探开发。近年来,全球非常规油气勘探取得重大突破,以美国非常规油气、加拿大油砂和委内瑞拉重油最为典型,发展迅速,从早期突破的致密气、煤层气、油砂、重油,再到近年发现的页岩气和致密油。就国外而言,致密气、煤层气、页岩气是非常规天然气优先发展的勘探领域,美洲的油砂、重油和致密油是非常规石油勘探的现实领域。

中国地质背景与国外差异较大,具有多旋回构造演化、以陆相地层为主、岩相变化大等特点,非常规油气聚集具有一定的特殊性,主要体现在构造动力学背景、沉积环境、烃源岩分布、沉积物分选性、储层非均质性、运聚机理和油气水关系等方面,这就决定了中国非常规油气开发不能照搬国外开发模式。中国发育与煤系地层广泛伴生的致密气、与生油岩大规模共生的致密油,资源潜力很大;而页岩气面临地表条件复杂、埋藏深度大、水源条件差、管网设施不完善等诸多不利因素,限制了中国页岩气的勘探开发速度。

中国近期非常规油气发展战略定位是:第一层次是加快致密气、致密油工业化速度,增储上产;第二层次是加大页岩气、煤层气、油页岩等工业化试验区建设,尽快实现打规模工业化经济性开采;第三层次是加强页岩油、天然气水合物等基础理论研究和攻关,力争形成接替资源。

4 结语

(1)国内外非常规油气勘探取得重大进展。中国在致密气、页岩气、致密油、煤层气等非常规油气资源勘探开发获重要突破,油页岩、天然气水合物、重油、油砂矿等获重要进展。

(2)中国非常规油气研究取得快速发展。细粒沉积学、非常规油气储层地质学、非常规油气地质学地质理论和方法技术、非常规油气地质学理论体系框架、“甜点区”地球物理评价、“人工油气藏”开发等非常规油气地球物理、开发工程技术等理论技术研究均取得很大进展。

(3)非常规油气的突破,带来了坚持理论创新、坚持核心技术进步等4点重要启示,对延长石油工业生命周期、推动理论技术升级换代、改变能源格局具有深远意义,中国近期应分层次分阶段发展非常

规油气,致密气和致密油是第一重点,页岩气等将规模发展。

致谢:本文由国家973重点基础研发项目(编号:2014CB239000)和国家科技重大专项(编号2011ZX05001)联合资助。本文总结尚有非作者的共同研究成果,以及为文章出版付出辛苦劳动的各位科技工作者,在此一并致谢!

参考文献

- 戴金星,倪云燕,吴小奇. 2012. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义. 天然气地球科学,39(3): 257~264.
- 丹尼尔·耶金. 能源重塑世界. 朱玉桃, 阎志敏, 译. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- 关德师,牛嘉玉,郭丽娜,许化政等. 中国非常规油气地质. 北京: 石油工业出版社,1996.
- 郭彤楼,张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式. 石油勘探与开发,2014,419(1): 28~36.
- 侯启军,赵占银,黄志龙. 松辽盆地深盆油藏门限及勘探潜力. 石油勘探与开发,2011,38(5): 523~529.
- 胡见义,徐树宝,等. 非构造油气藏. 北京: 石油工业出版社,1986.
- 胡文瑞,翟光明,李景明. 2010. 中国非常规油气的潜力和发展. 中国工程科学,2010,12(05): 25~29.
- 贾承造,郑民,张永峰. 2012a. 中国非常规油气资源与勘探开发前景. 石油勘探与开发,39(02): 129~136.
- 贾承造,郑民,张永峰. 2014. 非常规油气地质学重要理论问题. 石油学报,2014,35(01): 1~10.
- 贾承造,邹才能,李建忠,李登华,郑民. 2012b. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景. 石油学报, 33(3): 343~350.
- 姜在兴,梁超,吴靖,张建国,张文昭,王永诗,刘惠民,陈祥. 2013. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题. 石油学报, 34(6): 1031~1039.
- 金之钧,张金川. 深盆气藏及其勘探对策. 石油勘探与开发,1999, 26(1): 4~5-5.
- 邱中建,邓松涛. 2012. 中国油气勘探的新思维. 石油学报,33(S1): 1~5.
- 邱中建,赵文智,邓松涛. 2012. 致密气与页岩气发展路线图. 中国石油石化,17:18~21.
- 孙龙德,江同文,徐汉林,单家增. 非稳态成藏理论探索与实践. 海相油气地质,2008,13(3):11~16.
- 孙赞东,贾承造,李相方. 2011. 非常规油气勘探与开发. 北京:石油工业出版社.
- 童晓光,郭建宇,王兆明. 2014. 非常规油气地质理论与技术进展. 地学前缘,21(1):9~20.
- 吴奇,胥云,刘玉章,丁云宏,王晓泉,王腾飞. 2011a. 美国页岩气体积改造技术现状及对我国的启示. 石油钻采工艺,33(2):2~7.
- 吴奇,胥云,王腾飞,王晓泉. 2011b. 增产改造理念的重大变革—体积改造技术概论. 天然气工业, 31(4): 7~12,14.
- 吴松涛,朱如凯,崔京钢,崔景伟,白斌,张响响,金旭,朱德升,游建昌,李晓红. 2015. 鄂尔多斯盆地长7湖相泥页岩孔隙演化特征. 石油勘探与开发,42(2): 167~176.
- 袁亮,薛俊华,张农,卢平. 2013. 煤层气抽采和煤与瓦斯共采关键技术现状与展望. 煤炭科学技术,41(9):6~17.
- 袁选俊,林森虎,刘群,姚涇利,王岚,郭浩,邓秀芹,成大伟. 2015. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆

- 地延长组长 7 油层组为例. 石油勘探与开发, 42(1): 34~43.
- 张金川. 根缘气(深盆地)的研究进展. 现代地质, 2003, 17(2): 210
- 赵文智, 胡素云, 李建忠, 王红军, 王兆云, 卞从胜. 2013. 我国陆上油气勘探领域变化与启示—过去十余年的亲历与感悟. 中国石油勘探, 18(4): 1~10.
- 邹才能, 杨智, 张国生, 侯连华, 朱如凯, 陶士振, 袁选俊, 董大忠, 王玉满, 郭秋麟, 王岚, 毕海滨, 李登华, 武娜. 2014b. 常规—非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义. 石油勘探与开发, 41(1): 14~27.
- 邹才能, 董大忠, 王社教, 李建忠, 李新景, 王玉满, 李登华, 程克明. 2010a. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. 石油勘探与开发, 37(6): 641~653.
- 邹才能, 陶士振, 侯连华. 2014a. 非常规油气地质学. 北京: 地质出版社, 2014.
- 邹才能, 陶士振, 朱如凯, 袁选俊, 李伟, 张光亚, 张响响, 高晓辉, 刘柳红, 徐春春, 宋家荣, 李国辉. 2009. “连续型”气藏及其大气区形成机制与分布—以四川盆地须家河组煤系大气区为例. 石油勘探与开发, 36(3): 307~319.
- 邹才能, 杨智, 崔景伟, 朱如凯, 侯连华, 陶士振, 袁选俊, 吴松涛, 林森虎, 王岚, 白斌, 姚泾利. 2013b. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策. 石油勘探与开发, 40(1): 14~26.
- 邹才能, 杨智, 陶士振, 等李伟, 吴松涛, 侯连华, 朱如凯, 袁选俊, 王岚, 高晓辉, 贾进华, 郭秋麟, 白斌. 2012a. 纳米油气与源储共生型油气聚集. 石油勘探与开发, 39(1): 13~26.
- 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, 梁英波, 杨智, 李欣, 梁坤. 2015a. 全球常规—非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测. 石油勘探与开发, 42(1): 13~25.
- 邹才能, 张光亚, 陶士振, 胡素云, 李小地, 李建忠, 董大忠, 朱如凯, 袁选俊, 侯连华, 翟辉, 赵霞, 贾进华, 高晓辉, 郭秋麟, 王岚, 李新景. 2010b. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质. 石油勘探与开发, 37(2): 129~145.
- 邹才能, 张国生, 杨智, 陶士振, 侯连华, 朱如凯, 袁选俊, 冉启全, 李登华, 王志平. 2013c. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学. 石油勘探与开发, 40(4): 385~399.
- 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 杨智, 陶士振, 袁选俊, 侯连华, 杨华, 徐春春, 李登华, 白斌, 王岚. 2012b. 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. 石油学报, 2012, 33(2): 173~187.
- Beau Tinnin, Hector Bello1, and Matthew McChesney. 2014. Multi-Source Data Integration to Predict Well Performance; Eagle Ford Sweet Spot Mapping [J]. AAPG Search and Discovery Article, #41397.
- BP Company. BP statistical review of world energy June 2013 [EB/OL]. (2013-06-13) [2014-02-10]. http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf.
- Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, Boswell R. 2009. Natural gas hydrates; A Review, in Collett T, Johnson A, Knapp C, Boswell R, eds., Natural gas hydrates-energy resource potential and associated geologic hazards. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 89: 146~219.
- Dai Jinxing, Ni Yunyan, Wu Xiaoqi. 2012. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. Natural Gas Geosciences, 39(3): 257~264.
- Gautier D L, Mast R F. 1995. US geological survey methodology for the 1995 national assessment; American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 78: 1~10.
- Hampton M A. 1975. Competence of fine-grained debris flows. Journal of Sedimentary Petrology, 45: 834~844.
- Harris Cander. 2012. Sweet Spots in Shale Gas and Liquids Plays; Prediction of Fluid Composition and Reservoir Pressure. AAPG Search and Discovery Article, #40936.
- Jarvie D M. Unconventional oil petroleum systems; Shales and shale hybrids. AAPG Conference and Exhibition, Calgary, Alberta, Canada. 2010, September 12~15.
- Law B E, Curtis J B. 2002. Introduction to unconventional petroleum systems. American Association of Petroleum Geologists bulletin, 86(11): 1851~1852.
- Law B E. 2002. Basin-centered gas systems. American Association of Petroleum Geologists bulletin, 86(11): 1891~1915.
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the mississippian barnettshale. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(11/12): 848~861.
- Nelson P H. 2009. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales. American Association of Petroleum Geologists bulletin, 93(3): 329~340.
- Schmoker J W. 1995. National assessment report of USA oil and gas resources [DB/CD]. Reston: USGS.
- Schmoker J W. 2002. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems. American Association of Petroleum Geologists bulletin, 86(11): 1993~2000.
- Shanmugam G, Moiola R J. 1995. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackford Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 79: 672~695.
- SPE, SPEE, AAPG, WPC. 2007. Petroleum resources management system [R]. Washington D C: IEA, 1~47.
- U. S. Energy Information Administration (EIA). 2015. Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2041, 1~154.
- U. S. Energy Information Administration (EIA). U. S. Crude Oil and Natural Gas Proved Reserves, 2013: 1~47.
- USGS. 2013a. World petroleum assessment [EB/OL]. [2013-03-01]. <http://pubs.usgs.gov/dds/dds-060>.
- USGS. 2013b. An estimate of recoverable heavy oil resources of the Orinoco oil belt, Venezuela [EB/OL]. [2013-03-01]. <http://energy.cr.usgs.gov/oilgas>.
- Wilson W B. 1934. Proposed classification of oil and gas reservoirs// Wrather W. E., Lahee F. H. Problems of petroleum geology. AAPG Memoir, 433~445.
- Zou C N, Yang Z, Tao S Z, Yuan X J, Zhu R K, Hou L H, Wu S T, Sun L, Zhang G S, Bai B, Wang L, Gao X H, Pang Z L. 2013a. Continuous hydrocarbon accumulation over a large area as a distinguishing characteristic of unconventional petroleum: The Ordos Basin. Earth-Science Reviews, 126: 358~369.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Dai Jingxing, Dong Dazhong, Zhang Baomin, Wang Yuman, Deng Shenghui, Huang Jinliang, Liu Keyu, Yang Chun, Wei Guoqi, Pan Songqi. 2015b. The characteristics and significance of conventional and unconventional Sinian-Silurian gas systems in the Sichuan Basin, central China. Marine and Petroleum Geology, 386~402.

Progress in China's Unconventional Oil & Gas Exploration and Development and Theoretical Technologies

ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, ZHANG Guosheng, HOU Lianhua, WU Songtao,
TAO Shizhen, YUAN Xuanjun, DONG Dazhong, WANG Yuman, WANG Lan,
HUANG Jinliang, WANG Shufang

Petro China Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, 100083

Abstract

The new century has witnessed a strategic breakthrough in unconventional oil & gas. Hydrocarbon accumulated in micro-/nano-scale pore throat shale systems has become an important domain that could replace current oil & gas resources. Unconventional oil & gas plays an increasingly important role in our energy mix. Tight gas, CBM, heavy oil and asphaltic sand have served as a key domain of exploration & development, with tight oil becoming a 'bright spot' domain and shale gas becoming a 'hotspot' domain. China has made great breakthroughs in unconventional oil & gas resources, such as tight gas, shale gas, tight oil and CBM, and great progress in oil shale, gas hydrate, heavy oil and oil sand. China has an estimated $(223\sim 263)\times 10^8$ t of unconventional oil resources and $(890\sim 1260)\times 10^{12}$ m³ of gas resources. China has made a breakthrough for progress in unconventional oil & gas study. New progress achieved in fine-grained sedimentary studies related to continental open lacustrine basin large-scale shallow-water delta sand bodies, lacustrine basin central sandy clastic flow sediments and marine-continental fine-grained sediments provide a theoretical basis for the formation and distribution of basin central reservoir bodies. Great breakthroughs have been made in unconventional reservoir geology in respect of research methodology & technology, multi-scale data merging and physical simulation of formation conditions. Overall characterization of unconventional reservoirs via multi-method and multi-scale becomes increasingly popular and facilitates the rapid development of unconventional oil & gas geological theory, method and technology. The formation of innovative, continuous hydrocarbon accumulation theory, the establishment of the framework of the unconventional oil & gas geological theory system, and the determination of the implications, geological feature, formation mechanism, distribution rule and core technology of unconventional oil & gas geological study lays a theoretical foundation for extensive unconventional oil & gas exploration and development. Theories and technologies of unconventional oil & gas exploration and development developed rapidly, including some key evaluation techniques such as 'sweet spot zone' integrated evaluation and a six-property evaluation technique that uses hydrocarbon source, lithology, physical property, brittleness, hydrocarbon potential and stress anisotropy, and some key development & engineering technologies including micro-seismic monitoring, horizontal drilling & completion and "factory-like" operation pattern, "man-made reservoir" development, which have facilitated the innovative development of unconventional oil & gas. These breakthroughs define a new understanding in four aspects: ① theoretical innovation; ② key technologies; ③ complete market mechanism and national policy support; and ④ well-developed ground infrastructure, which are significant for prolonging the life cycle of petroleum industry, accelerating the upgrade and development of theories and technologies and altering the global traditional energy structure.

Key words: Unconventional oil and gas; fine-grained sedimentology; unconventional reservoir geology; "man-made reservoir" development; micro-/nano-scale pore throat; tight gas; tight oil; shale gas; shale oil