

文章编号: 1000-0747(2017)01-0001-11 DOI: 10.11698/PED.2017.01.01

# 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

贾承造

(中国石油天然气集团公司, 北京 100724)

**摘要:** 面对非常规油气规模快速发展引发的全球能源行业诸多重大转变, 亟需深入思考非常规油气革命对经典石油天然气地质学理论的深刻影响, 重新审视油气成藏要素地质概念和油气系统理论框架, 赋予石油天然气地质学新时期全新的学科内涵。基于此, 总结了近期全球非常规油气勘探开发的重大进展, 指出非常规油气革命不仅具有油气资源大幅增加的经济意义, 而且对石油天然气地质学理论带来重大革新, 因此具有重要的科学意义。归纳了经典石油天然气地质学学生烃、储集层、分布和开发等 4 方面的理论核心内容, 全面回顾了石油天然气地质学理论发展历史中的 5 个重要节点, 包括背斜与圈闭理论、有机质生烃与油气系统理论、陆相油气地质、海洋深水油气地质、连续型油气聚集与非常规油气地质理论。非常规油气对经典石油天然气地质学在圈闭、储集层、盖层、资源分布、富集规律等基本理论概念方面产生了重大突破, 推动油气地质基础研究向全过程生烃、全类型储集层、全成因机制、全种类油气资源转变, 深化非常规油气地质理论研究, 推动石油天然气地质学理论体系发展与重构, 对中国乃至世界油气从常规向非常规战略发展具有重要意义。图 4 参 78

**关键词:** 石油天然气地质学; 非常规油气地质理论; 连续型油气聚集; 致密油气; 页岩油气; 油气产量

中图分类号: TE12

文献标识码: A

## Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory

JIA Chengzao

(China National Petroleum Corporation, Beijing 100724, China)

**Abstract:** Great changes of the global energy industry have been caused by the rapid development of unconventional oil and gas. It is necessary to deeply consider the profound influence of the unconventional oil and gas revolution on the classical petroleum geological theory and to review geological conception of oil and gas accumulation elements and theoretic framework of petroleum system, giving the petroleum geology a new academic connotation. The author summarizes the significant progresses of global unconventional oil and gas exploration and development, and points out that the unconventional oil and gas revolution not only has a significant economic significance of oil and gas resource increment, but also brings great innovation to the theory of petroleum geology, thus having important scientific significances. This paper summarizes the core contents of four aspects of hydrocarbon generation, reservoir, distribution and development in classical petroleum geology, and comprehensively reviews the five important nodes in the developmental history of petroleum geology, which include anticline and trap theory, hydrocarbon generation from organic matter and petroleum system theory, continental petroleum geology, marine deepwater petroleum geology, continuous hydrocarbon accumulation and unconventional oil and gas geological theory. Unconventional oil and gas has made a great breakthrough to classical petroleum geology on the basic theoretical concepts such as trap, reservoir, caprock, resource distribution, and enrichment, thereby promoting the basic research on petroleum geology to transform into the whole process of hydrocarbon generation, whole type of reservoir, and whole genetic mechanism, deepening unconventional petroleum geology theory, promoting the development and reconstruction of petroleum geology system, representing great significances to the strategic development from conventional to unconventional oil and gas in China or even in the world.

**Key words:** petroleum geology; unconventional petroleum geological theory; continuous oil and gas accumulation; tight oil and tight gas; shale oil and shale gas; oil and gas production

引用: 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 geological theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.

## 0 引言

近 10 年来,非常规油气规模快速发展,已带来全球能源行业资源供需格局、开采方式、技术创新等方面全方位的重大转变<sup>[1-8]</sup>,深入思考非常规油气革命对传统石油天然气地质学理论的革新,重新审视成藏要素地质概念和油气系统理论框架,赋予石油天然气地质学全新的学科内涵,对于发展油气地质基础理论,指导含油气盆地常规-非常规一体化资源评价、区带目标优选、提高勘探开发整体效益等方面均具有重要的理论和实践意义。

## 1 非常规油气勘探开发重大进展

非常规油气在全球油气产量中的作用和地位不断加强,继油砂、致密气和煤层气等资源规模有效开发之后,近年来美国“非常规油气革命”实现了页岩气、致密油产量的高速增长,推动非常规油气发展进入了全新阶段<sup>[1-8]</sup>。

### 1.1 非常规油气勘探开发成果

#### 1.1.1 全球非常规石油产量

非常规油主要包括油页岩、油砂及重油、致密油(含页岩油)等资源。2015 年,全球非常规油产量  $4.8 \times 10^8 \text{ t}$ ,占原油总产量的 11%<sup>[9]</sup>。油页岩开发的成本和污染问题尚未解决,产量规模有限;油砂及重油资源分布高度集中,加拿大和委内瑞拉是主产国;致密油开发在美国率先突破,引领非常规油产量快速增长。

西加拿大盆地聚集了全球 70% 以上的油砂资源。1968 年采用地面开采技术实现油砂油产量  $8.6 \times 10^4 \text{ t}$ ,沥青作为原油资源进入储量序列,当年新增原油探明储量  $10 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[10]</sup>。1982 年采用热采法实现沥青产量  $13 \times 10^4 \text{ t}$ <sup>[10]</sup>。2000 年加拿大油砂中沥青产量达到  $3.893 \times 10^4 \text{ t}$ ,油砂产量形成了相当规模,2015 年产量增长至  $1.4 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[10]</sup>。据 IHS 预测,受低油价影响 2020 年油砂产量约  $40 \times 10^4 \text{ t/d}$ <sup>[9]</sup>。

美国引领全球致密油资源规模开发。水平井分段压裂技术突破,实现了致密油商业开发,助推美国原油产量再创高峰,2000 年致密油产量  $1.800 \times 10^4 \text{ t}$ <sup>[9]</sup>。2008 年应用于页岩气开发的水平井分段压裂技术广泛用于致密油资源的开发,使其产量进入快速增长阶段。2015 年美国致密油产量达到  $2.1 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[9]</sup>,与 2008 年相比增长了 7.2 倍。1970 年美国常规原油产量达到峰值  $5.3 \times 10^8 \text{ t}$  之后呈现递减,2008 年递减至  $3.0 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[11]</sup>。致密油成功开发使其原油产量快速增长,2015 年达到

$5.7 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[11]</sup>,实现了原油产量的二次高峰,并仍然具有持续增产的潜力。

#### 1.1.2 全球非常规天然气产量

非常规天然气主要包括致密气、煤层气、页岩气和天然气水合物等资源。2015 年,全球非常规天然气产量  $8.227 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占天然气总产量的 23%。

致密气是最先实现规模开采的非常规天然气,资源开发已进入稳步发展期。1955 年美国首次在 Cauthage 气田进行酸化压裂,实现日产量  $340 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,1976 年成为当时美国最大气田。1990 年,美国致密气产量突破  $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,1998 年突破  $1.000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,2011 年达到产量峰值  $1.300 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;之后致密气产量保持稳定,2015 年产量  $1.200 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[9]</sup>。另外,加拿大、中国等也实现了致密气资源的有效开发,2015 年全球致密气产量  $2.450 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

煤层气是第 1 个实现规模有效开发的自生自储式非常规油气资源。20 世纪 50 年代,美国一些公司在圣胡安盆地开始对高压煤层中的天然气进行开采,煤层气成为一种天然气资源。1980 年美国联邦颁布了《能源意外获利法》,有效促进了煤层气资源的开发。到 1992 年美国煤层气产量达到  $260 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[12]</sup>。裸眼洞穴完井技术和多分支水平井技术促进了煤层气产量快速增长,2008 年美国煤层气产量达到峰值  $557 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[12]</sup>,2015 年产量为  $280 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[12]</sup>。同时,加拿大、澳大利亚和中国煤层气也实现了商业开发,2015 年全球煤层气产量为  $1.000 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[12]</sup>。

页岩气有效开发具有革命性意义,推动非常规油气发展进入全新阶段。早在 1821 年美国陆上就钻探了第 1 口页岩气井;1914 年美国发现了第 1 个页岩气田——Big Sandy;1981 年被誉为页岩气之父的乔治·米歇尔采用大型水力压裂技术实现了 Barnett 页岩气商业开发,页岩气作为一种天然气资源日益受到重视<sup>[9]</sup>;2000 年实现了 Antrim、Barnett 等一批页岩气的规模开发,总产量  $230 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;2005 年水平井分段压裂技术日趋成熟,页岩气产量快速增长,随着 Marcellus 等大型页岩气田开发,2015 年产量达到  $4.250 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[9]</sup>。此外,加拿大、中国和巴西也实现了页岩气的商业开发,2015 年全球页岩气产量  $4.693 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[9]</sup>。

#### 1.2 非常规油气资源大幅增加的经济意义

勘探开发实践和新的全球油气资源评价证实,全球非常规油气资源丰富,而常规油气采出程度并不高,因此预计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<sup>[4-8]</sup>。1956

年哈尔伯特提出的石油产量“峰值理论”已被颠覆，随着非常规大型油气田不断被发现，油气产量峰值预测结果不断攀升，全球油气生产的生命周期可能超过 300 年<sup>[4-8]</sup>，足以支撑人类发展到新的能源时代。预计油气工业发展不会因为资源的枯竭而终结，而是被更清洁的可再生能源发展逐步代替，以实现人类的绿色环保需求。

全球非常规油气资源丰富，非常规油资源与常规

油资源相当，非常规气则远大于常规气。全球非常规油可采资源量  $6\,200 \times 10^8 \text{ t}$ ，其中重油  $1\,079 \times 10^8 \text{ t}$ 、油砂  $1\,067 \times 10^8 \text{ t}$ 、油页岩油  $1\,051 \times 10^8 \text{ t}$ 、致密油  $473 \times 10^8 \text{ t}$ （见图 1a）。全球非常规天然气可采资源量近  $4\,000 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，其中致密气  $210 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、煤层气  $256 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、页岩气  $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、天然气水合物  $3\,000 \times 10^{12} \text{ m}^3$ （见图 1b）<sup>[9-12]</sup>。

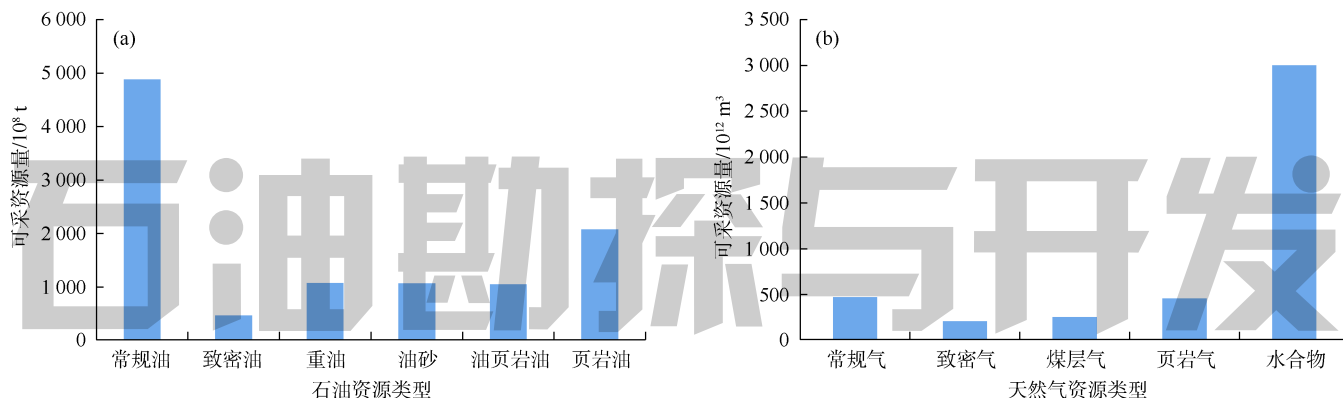


图 1 全球常规和非常规油气资源对比<sup>[9-11]</sup>

常规油气经过 100 多年的开发，为人类工业发展提供了强劲动力。常规油采出  $1\,732 \times 10^8 \text{ t}$ ，采出程度约 35%；常规天然气采出  $79 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，采出程度约 17%。因此常规油气剩余资源仍可以保障全球油气长期稳定生产供应，非常规油气作为新兴资源，其采出程度微不足道，具有巨大的增产潜力。据 EIA 预测，全球非常规气产量将由 2015 年的  $8\,227 \times 10^8 \text{ m}^3$  增至 2040 年的  $2.48 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[9]</sup>，占天然气总产量约 42%；其中页岩气  $1.70 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、致密气  $0.46 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、煤层气  $0.32 \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[9]</sup>，分别占天然气总产量的 29%、8%和 5%。全球非常规油产量将由 2015 年的  $4.8 \times 10^8 \text{ t}$  增至 2040 年的  $10 \times 10^8 \text{ t}$  以上，占原油总产量约 20%；其中致密油产量  $5.1 \times 10^8 \text{ t}$ ，油砂油产量  $3.4 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[9]</sup>，分别占原油总产量的 10%和 7%。因此，丰富的资源和不断进步的技术将支撑油气工业的长期稳定生产，为人类做出巨大的贡献。

## 2 石油天然气地质学的理论核心与发展重要节点

### 2.1 石油天然气地质学的理论核心

石油天然气地质学 (Geology of Petroleum)，是研究地壳中油气成因、成藏原理和油气分布规律的应用基础学科，是油气勘探开发的理论基础<sup>[13-20]</sup>。石油天然气地质学作为石油与天然气勘探开发的理论核心，

是随着人类大量的油气勘探和开发实践活动，不断积累有关油气生成、聚集与分布规律等知识，逐渐形成的一门集理论性与应用性于一体的学科。它既是人类在油气勘探开发中对油气形成、分布规律认识的总结，又是指导人类进行油气勘探开发活动的理论指南。

人类认识和利用油气的历史由来已久，但现代油气勘探开发一般以 1859 年美国成功钻探的世界上第 1 口工业油井作为标志。1917 年美国石油地质学家协会 (AAPG) 成立，并出版了《美国石油地质学家协会通报》(AAPG Bulletin)，1921 年 Emmons 出版《Geology of Petroleum》，标志着石油天然气地质学成为一门独立的学科<sup>[13]</sup>。1934 年 McCollough 正式提出“圈闭学说”<sup>[14]</sup>，成为常规油气地质理论的核心内容。1956 年 Levorsen 的《Geology of Petroleum》问世<sup>[15]</sup>，实现了石油天然气地质学理论的系统化、科学化，推动了世界石油工业的快速发展。

石油天然气地质学是地质学的分支学科，它既遵循构造地质学、矿物岩石学、沉积学、地球化学与地球物理学等基础学科揭示的地学基础原理，又建立了聚焦于油气生成、成藏、分布和开发的理论核心。经典的石油天然气地质学的理论核心如下。

#### 2.1.1 盆地沉降增温增压、有机质干酪根生烃与含油气系统理论

沉积盆地沉降增温增压是油气生成与成藏的地球动力学背景，有机质干酪根生烃是油气主要来源，含

油气系统包括油气生成、运移、成藏、调整破坏的全动态过程与温压流体环境。

### 2.1.2 由岩石骨架、有效孔隙及充注的可动流体构成的油气储集层理论

油气储集层由岩石骨架、有效孔隙及充注的可动流体构成。油气储集层物性由孔隙度和渗透率描述。渗透率受孔隙结构、流体相态和表面亲油性影响。地层压力指可动流体压力,是油气藏最重要的地质特征与产能指标,地应力场主要由岩石骨架承受。

### 2.1.3 含油气盆地、区带、圈闭与油气藏的油气分布理论

油气与含油气系统均赋存在含油气沉积盆地中。区带(Play,又译作成藏组合),指储集层特征相似、空间相关的一批圈闭和油气藏,揭示油气藏空间分布的基本规律。圈闭是具有储集层和封堵条件的油气聚集场所,油气藏是油气分布的基本单元,具有统一的储集层、压力与油气水边界。

### 2.1.4 能量与物质守恒,由人工干预形成油气储集层不同部位流体压差,从而形成了产生和控制流动的油气开发理论

油气藏流体体积与能量变化遵循能量与物质守恒原理。由人工干预形成油气储集层不同部位流体压差,从而产生和控制流体流动是油气开发的基本原理。储集层渗透率、流体性质、人工干预效果是影响开发效益的主要因素。

## 2.2 石油天然气地质学发展历史的重要节点

石油天然气地质学历经百年历史,其发展历史深受石油工业勘探开发实践、地质学相关基础学科进展和探测与计算机技术发展的推动。石油工业油气勘探从背斜圈闭油气藏发展到岩性地层油气藏;从陆地推进到海洋,进而到深水;从常规发展到非常规,这些都推动了石油天然气地质学理论的重大突破和新理论、新概念的出现。而地质学基础学科不断出现的重大进展,包括板块构造理论、层序地层学理论、有机质生烃理论都被及时融入石油天然气地质学核心理论之中。地震与测井等地球物理学勘探技术、地球化学分析技术与计算机技术的飞速发展推动了油气勘探开发技术进步,也推动了石油天然气地质学理论的进步与完善。

纵观百年石油天然气地质学发展历史,可以看到5个重要节点:①背斜与圈闭理论(19世纪80年代—20世纪30年代);②有机质生烃与油气系统理论(20世纪60—70年代);③陆相油气地质理论(20世纪40年代—21世纪初);④海洋深水油气地质理论(20世

纪80年代—21世纪初);⑤连续型油气聚集与非常规油气地质理论(21世纪初至今)。

### 2.2.1 背斜与圈闭理论

1885年White等在《Science》杂志上发表《The Geology of Natural Gas》,第1次系统地阐述了背斜油气藏理论,并成功地应用于井位部署<sup>[21]</sup>。背斜油气藏理论认为:石油和天然气聚集于背斜构造中,石油、天然气和地层水按其密度分异,石油、天然气密度低占据背斜的顶部,地层水密度高位于背斜底部,背斜褶皱的顶部被认为是勘探油气的最佳对象。在背斜油气藏理论指导下发现了一大批大型、特大型油气田,推动了世界石油工业的发展。1934年McCollough正式提出了“圈闭学说”,认为圈闭需具备3个条件,即储集层、盖层和遮挡条件,具有统一的油、气、水界面,储量严格按圈闭面积、闭合度、孔隙度等计算<sup>[14]</sup>。1934年Wilson将油气藏分为闭合油气藏和开放油气藏两大类,其分类涵盖了构造、岩性地层及复合油气藏类型<sup>[22]</sup>。1956年Levorsen在其所著的《Geology of Petroleum》中建立了较为完善的圈闭分类体系,将圈闭划分为构造、地层和复合圈闭,其中地层圈闭包括原生地层圈闭和次生地层圈闭两类<sup>[15]</sup>。圈闭学说指出储集层、盖层和遮挡条件是油气藏形成的必要条件,背斜是最简单的特例,圈闭油气成藏是常规油气聚集机理的理论内核。

### 2.2.2 有机质生烃与油气系统理论

20世纪60年代,随着有机地球化学的发展和现代分析测试技术的进步,地球化学家们对油气有机成因的认识取得重要发展,形成了干酪根热降解生油说。以Tissot为代表的干酪根热降解生烃理论认为,原始有机质沉积以后,首先经过复杂的生物化学作用和聚合缩合作用形成不同类型干酪根,干酪根在达到一定的埋藏深度后,在温度的作用下发生热降解作用逐渐生成石油,石油生成于一定的温度范围内(称为“液态石油窗”)<sup>[23]</sup>。在干酪根热降解生烃理论指导下,从有机地球化学和光学测定总结出了一套反映有机质热成熟度的参数,如最高热解峰温、镜质体反射率、热埋藏指数等,可直接应用于判别干酪根类型、成熟度及生烃潜力等。有机质成烃理论与分析测试技术的发展,为定量评价烃源岩、计算生烃量奠定了理论基础。随着油气工业的发展,石油地质学家开始关注油气从烃源岩到储集层再到圈闭的成藏全过程。这一时期的板块学说、含油气盆地构造学、沉积储层学、层序地层学等相关学科的重大进展,以及干酪根热降解生烃理论与油气运移的创新性理论,促进了含油气系

统研究快速发展。油气动态成藏过程由 Dow 等于 1972 年首次在“Oil System”的概念中提出,1994 年 Magoon 和 Dow 将“Petroleum System”概念进一步丰富和完善,强调油气“从源岩到圈闭”,通过地质作用过程将各成藏要素链接为一个有机的整体<sup>[16]</sup>。含油气系统理论立足于沉积盆地整体,在静态地质要素分析基础上,详细刻画油气生成、运移、聚集、成藏的整个动态过程,全面深入了解油气藏形成机理及分布规律。

2.2.3 陆相油气地质理论

2.2.3.1 陆相生烃有机地球化学理论

20 世纪 30 年代,中国地质学家通过野外露头石油地质调查,发现了酒泉盆地老君庙油田和陕西省北部延长油田,打破了“非海相沉积不能生油”的禁锢。提出石油也能够来自淡水沉积物<sup>[24]</sup>、陆相地层可以形成具有经济价值的油田<sup>[25]</sup>、陆相生油多期多层含油<sup>[26]</sup>、新华夏构造体系 3 个沉降带找油远景<sup>[27]</sup>等认识,明确了中国陆相沉积的生油特征。1960 年以来,深入研究陆相生油层的形成和陆相生油的基本条件,系统建立陆相烃源岩和石油地球化学系列指标和参数<sup>[28-30]</sup>;建立了煤成烃、未熟—低熟油、超压盆地生烃动力学等重要理论<sup>[28-33]</sup>。

2.2.3.2 大庆油田陆相湖盆特大型砂岩油田成藏理论与开发技术

20 世纪 50—60 年代,中国石油地质学家总结了松辽盆地生油区控制油气田分布的规律,提出“源控论”,强调勘探要寻找主力烃源岩中心和层系,寻找生油气范围内的有利目标<sup>[34-35]</sup>;同时发展了针对陆相砂岩油田开发的“高产稳产注水开发”、“化学驱”等针对性

技术,支撑大庆油田特大型砂岩油田持续高产稳产<sup>[36]</sup>。

2.2.3.3 渤海湾陆相裂谷盆地复式油气聚集理论

20 世纪 60—70 年代,以渤海湾断陷盆地为重点,提出复式油气聚集带(区)理论,指出陆相层序背斜构造、断块圈闭及岩性地层圈闭,形成了不同层系、不同圈闭类型相互叠置的复式油气聚集带(区)<sup>[37-38]</sup>,有效指导了油气勘探。

2.2.3.4 中西部陆相前陆及拗陷盆地构造沉积与油气聚集理论

20 世纪 80 年代以来,中国加强了中西部陆相前陆盆地与叠合盆地、东部陆相成熟探区岩性地层油气藏油气勘探,取得重大进展,形成了陆相前陆盆地及冲断带控油气<sup>[39-40]</sup>、陆相岩性地层油气藏大面积成藏<sup>[41]</sup>、富油气凹陷满凹含油<sup>[42]</sup>等重要地质理论。

2.2.4 海洋深水油气地质理论

海洋深水油气勘探近 30 年取得重大发现,已成为储量增长主力。深水勘探开发揭示了大量新认识,推动了深水油气地质理论创新,目前仍在发展中。

2.2.4.1 深水碎屑岩沉积体系

全球深水盆地中普遍发育陆源碎屑岩体系,75%的深水油气储量分布于由大型河流供应沉积物的具塑性层盆地和由小型河流供应沉积物的具塑性层盆地<sup>[43-46]</sup>。深水储集层主要发育于新生界深水砂岩中,具有高孔渗、成岩差、连续型差等特点<sup>[43-46]</sup>。

2.2.4.2 白垩纪大西洋扩张早期构造沉积组合的重大油气资源潜力

仅在巴西桑托斯盆地深水区就发现了 10 多个世界级大油气田(见图 2),可采储量规模超过  $50 \times 10^8$  t。证明大西洋扩张早期裂谷沉积的盐下储盖组合具有巨

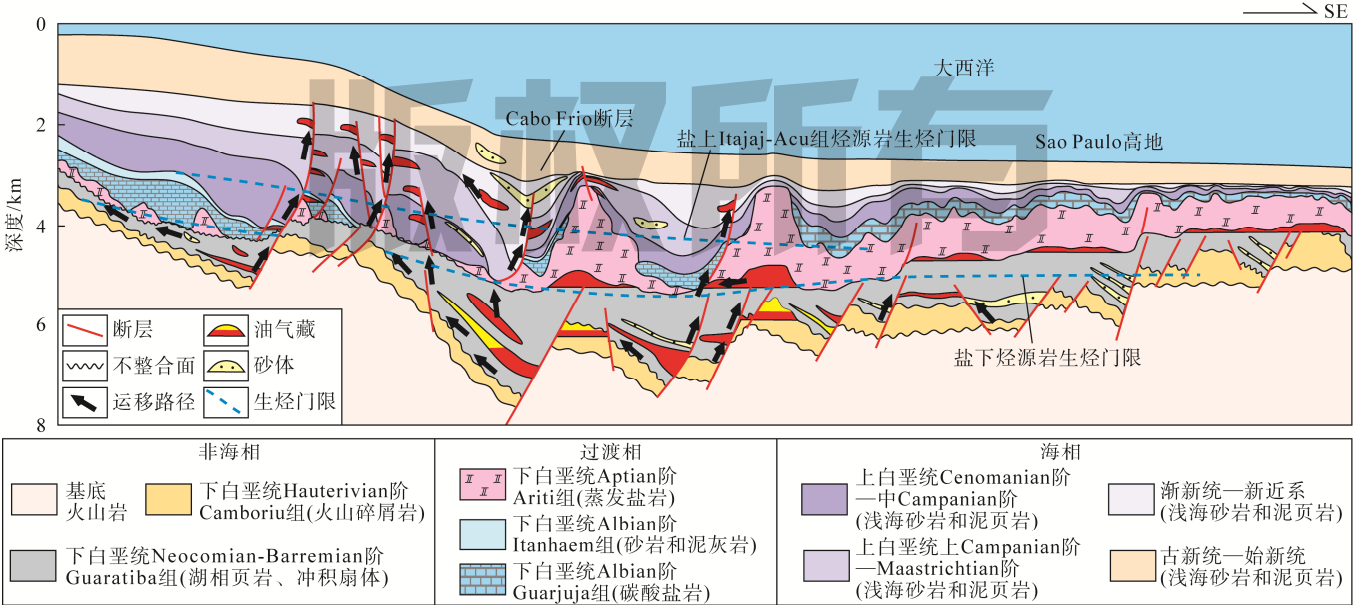


图 2 巴西 Santos 盆地盐下油气分布图<sup>[46]</sup>



大资源潜力。

同时具有巨大油气资源潜力的被动大陆边缘洋-陆过渡性地壳及其浅层地质过程(拉张、分异与油气聚集规律),洋底低地表温度油气系统及其烃类、储集层演化效应等也成为新的理论研究前沿。

#### 2.2.5 连续型油气聚集与非常规油气地质理论

近年来,勘探实践发现非常规油气具有与常规油气不同的地质与空间分布特征(见图3)。进一步的地质研究初步形成了连续性油气聚集与非常规油气地质理论,核心内容包括:①非常规油气连续型聚集,大面积分布,只有“甜点区”和非“甜点区”之分,没有明显的油气水圈闭边界;②储集层致密(孔隙度4%~12%,渗透率小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ),微—纳米级孔喉系统发育,需水平井和压裂技术改造才能产出,是一种“人工油气藏”;③多种相态共存(固、液、气相及游离态、吸附态等);④“近源”或“源内”成藏,源储一体,油气受层系控制、分布稳定、资源规模大;⑤具有特殊的油气聚集机理和流动机理。

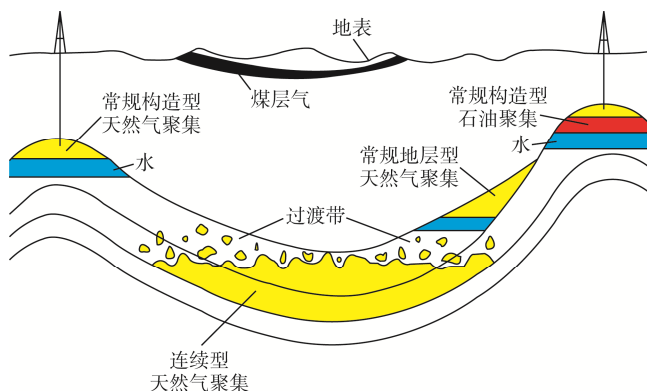


图3 含油气盆地常规-非常规油气全油气系统成藏模式<sup>[47]</sup>

众多学者和机构投入非常规油气地质研究,至今方兴未艾。USGS的Schmoker<sup>[48]</sup>和Gautier等<sup>[49]</sup>提出了“连续型油气聚集”概念,并评价了致密砂岩气、页岩气等非常规天然气资源。2002年Law等提出了非常规油气系统概念<sup>[50]</sup>。2007年SPE、SPEE、AAPG、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<sup>[8]</sup>。2007年Loucks和Reed等利用场发射扫描电镜实验观测分析,表征了Barnett页岩储集层的有机质微观孔喉特征<sup>[51]</sup>。

中国学者引入、吸收国外非常规油气地质理念,结合中国特殊地质条件,创新研发非常规油气地质学理论和方法技术,取得了一批居于国际学科前沿的重要研究成果,也推动了中国非常规油气工业起步和快

速发展<sup>[8,52]</sup>。在非常规油气基础地质理论方面:①在中国首先发现和表征致密储集层中纳米级孔喉系统,建立油气聚集微纳米孔喉结构模式,突破了页岩、致密砂岩无储集空间的局限认识<sup>[6,8,53-54]</sup>;②揭示非常规油气“连续型”聚集规律,提出其与常规圈闭油气藏10个特征差异,并创新提出含油气盆地常规-非常规油气“有序聚集”规律<sup>[8,52,55-56]</sup>;③揭示非常规油气聚集中“非浮力作用”起主导作用,并提出非浮力作用机理,指出该作用的顶底深度界限<sup>[53,57]</sup>;④建立陆相湖盆大型浅水三角洲与砂质碎屑流及富有机质黑色页岩细粒沉积分布模式,揭示了陆相致密油气、页岩油气富集层序特征与分布规律<sup>[8,58-59]</sup>。在中国非常规油气勘探评价与地质规律方面:①煤层气,在具有中国特点的高煤阶煤层气吸附特征、赋存条件和成藏模式、构造演化和水动力控藏作用、高丰度富集区形成机理等方面取得了创新性成果,构建了高煤阶煤层气地质理论体系<sup>[60-62]</sup>;②页岩气,重点针对五峰组—龙马溪组和筇竹寺组海相地层页岩气,在笔石生物层对比、页岩储集空间表征、赋存特征及富集机理、资源评价及选区选段、“甜点区”评价预测等方面取得重大进展,初步形成了中国热高演化程度海相页岩气地质理论体系<sup>[63-68]</sup>;③致密油,在致密油基本特征及形成条件、致密储集层储集空间表征、聚集机理及成藏模式、评价标准及资源评价等方面取得重要进展,初步构建了中国陆相致密油地质理论框架<sup>[69]</sup>;④致密气,在致密砂岩气地球化学组成特征及气源、生烃动力学研究、致密砂岩成因及储集空间表征、运聚动力及成藏机理、评价参数及标准、富集区评价预测等方面取得显著进展,认为中国致密砂岩气主要成因类型为煤成气,提出发育“连续型”和“圈闭型”两类致密砂岩气藏,建立了中国致密砂岩气地质理论体系<sup>[70-73]</sup>。

### 3 非常规油气理论对经典石油天然气地质学的重大突破、研究进展与展望

#### 3.1 非常规油气理论对经典石油天然气地质学的重大突破

非常规油气突破对石油天然气地质学创新和世界石油工业发展均具有重大战略影响。以发现致密储集层纳米孔喉系统、建立“甜点区”评价方法、创新“连续型”油气聚集、提出“人工油气藏”等为核心的非常规油气地质学理论的建立,是对经典石油天然气地质学的重大突破,也为中国乃至世界油气从常规向非常规发展战略提供了理论指导,有重大的科学价值和

经济意义<sup>[8,52]</sup>。

非常规油气突破了经典石油天然气地质学中的许多认识局限，包括传统的含油气系统理论受到巨大冲击，主要体现在 5 个方面：①连续型油气聚集理论，层状储集体可储存油气，大面积连续分布，没有明显的圈闭界限，突破了储集层界限，也打破了传统圈闭成藏的概念<sup>[17]</sup>；②致密储集层中发现纳米级孔喉系统，突破了传统的储集层界限，打破了页岩、致密砂岩“磨刀石”基本无储集空间的局限认识，开辟致密砂岩、致密碳酸盐岩和页岩等非常规油气储集层新类型<sup>[6]</sup>；③非常规油气源储一体，致密储集层、泥页岩本身具有盖层功能，不需要盖层封堵<sup>[74]</sup>；④非常规油气聚集，其运聚动力少数为浮力作用、多数为非浮力作用，油气运聚并不遵循传统的生烃灶、运聚系统、汇聚域的油气系统模式，源内成藏表明残留烃也可成为有效资源<sup>[53,57]</sup>；⑤非常规油气生烃层系，控制油气大面积连续分布，局部“甜点区”富集，突破了传统区带聚集概念，非常规油气分布受原型盆地生油岩层系、相带控制，多数分布在盆地斜坡、中心等构造部位<sup>[8,74-75]</sup>。

### 3.2 非常规油气理论进展

近年来，随着非常规油气勘探开发快速发展，非常规油气地质已成为石油天然气地质学科前沿，非常规油气地质理论研究已全面展开，并呈现新的发展趋势。如果说 1934 年 McCollough 提出的“圈闭学说”是常规油气地质理论形成的重要标志，1995 年 Schmoker 等提出的“连续型油气聚集”观点则是非常规油气理论开启的里程碑，并已展现良好的发展前景。

①生烃研究：传统生烃研究注重生烃高峰期研究，非常规油气地质注重生烃全过程研究，烃源不仅来自有

效烃源岩，也包括滞留烃源岩中的可能有机质生烃。聚焦所有富有机质岩石，强调全过程含油气系统理念，重视全过程生排烃对源内滞留页岩油气、近源充注致密油气或二次运移到常规致密相带中致密油气等非常规油气资源分布的控制作用<sup>[52,74-75]</sup>。

②储集层研究：传统储集层研究注重发现微米—毫米级孔喉的优良储集层，非常规油气地质注重纳米级孔喉的储集层描述、认识与评价，储集体不仅包括油气运移终端的高孔渗储集体，也包括生烃层系、运移路径上的致密储集体，聚焦供烃范围内的所有储集空间，重视细粒沉积体系的源储配置关系、细粒沉积体系的整体研究和综合勘探等方面的研究<sup>[52,74-75]</sup>。

③油气成因机制研究：传统油气运聚注重具有碳酸盐岩缝洞储集层的“管流”聚集和微米—毫米孔喉储集层的“渗流”运聚，非常规油气地质关注致密条件的纳米级孔喉储集层的“滞留”储集，油气资源从常规圈闭油气扩展到滞留烃形成的非常规资源，包括页岩气、页岩油、致密油等<sup>[52,74-75]</sup>。

④油气运移动力研究：认识到孔喉直径大小决定油气聚集方式和流体相态，传统的运移动力局限于浮力驱动，非常规油气地质关注压差驱动、扩散等作用，揭示出不同类型的油气资源具有不同的孔喉分布下限与常规-非常规油气分布规律<sup>[8,52]</sup>（见图 4）。

⑤油气聚集研究：揭示了连续性油气聚集基本规律及甜点代表的非均质性。同时在含油气盆地中揭示常规-非常规不同类型油气资源空间共生与伴生分布规律，提出重视常规-非常规油气整体研究、立体勘探<sup>[56]</sup>。

⑥资源分布研究：非常规油气更注重技术可采资源量与经济可采资源量空间预测，应从地质评价、物探资料、开发数据、参数标准、方法优选等方面综合研究，合理评价非常

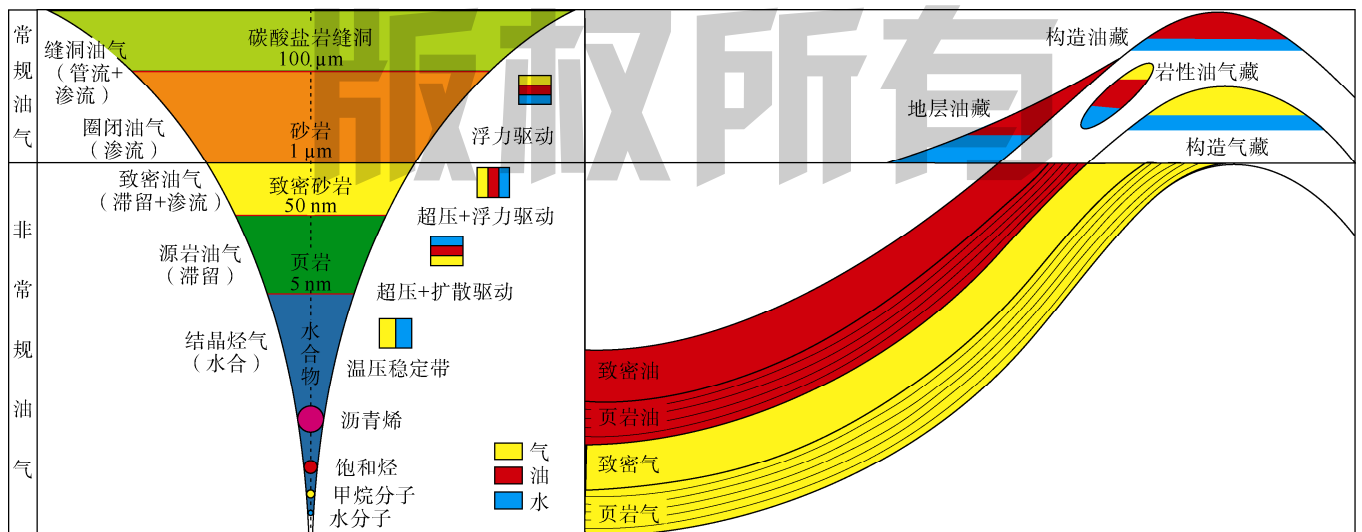


图 4 常规-非常规油气聚集孔喉结构与聚集类型<sup>[52]</sup>

规油气的可采资源量<sup>[7,8,74-77]</sup>。⑦非常规油气是经人工压裂才形成的“人工油气藏”，其油气开发流动机理与提高采收率途径极为复杂，尚待更深入研究；人工干预技术尚待进一步发展。

### 3.3 石油天然气地质学的未来

非常规油气勘探开发突破是世界石油工业的重大变化，为石油天然气地质学创新带来了全新的发展机遇。

未来石油天然气地质学应是一个新的经过重大发展的理论体系，涵盖常规油气与非常规油气，吸收勘探实践与科学研究的最新进展，着眼于油气全过程规模效益勘探开发，重新定义生、储、盖、圈、运、保等关键地质要素内涵，系统总结常规油气与非常规油气在分布特征、储集层特征、源储组合、聚集单元、运移方式、聚集机理、渗流特征、流体特征、资源特征等方面的显著区别，推动常规-非常规油气整体研究、整体开发<sup>[78]</sup>。

未来石油天然气地质学，应是一个新的全油气系统理论模型，不局限于“从烃源岩到圈闭”的视角，而是从“源储耦合、有序聚集”的新视角，包括长距离运移烃、近距离运移烃、滞留烃，包括常规与非常规油气两种资源，从烃类生—排—运—聚全过程定量研究的4个关键问题出发，分析常规-非常规油气聚集机理，实现油气生、运、聚全过程分析，发现全部类型的油气资源，勘探、开发、工程、集输所有油气上游领域，整体研究评价，立体勘探开发，最终实现整个含油气单元内常规-非常规油气最大限度的经济性采出。

## 4 结论

非常规油气具有连续分布、储集层致密、多相态共存、近源或源内聚集、特殊成藏机理等5个不同于常规油气的新特征，对传统油气地质理论带来重大挑战。非常规油气革命不仅具有油气资源大幅增加的经济意义，对石油天然气地质学理论创新也具有重要的科学意义。

经典石油天然气地质学包括生烃、储集层、分布和开发等4方面的理论核心内容，经历了背斜与圈闭、有机质生烃与油气系统、陆相油气地质、海洋深水油气地质等重要理论发展节点，现在已进入连续型油气聚集与非常规油气地质理论新阶段。

非常规油气对经典石油天然气地质学在圈闭、储集层、盖层、有效资源、富集规律等基础理论方面产生了重大突破，油气地质基础研究将呈现出向全过程生烃、全类型储集层、全成因机制、全种类资源转变

的新趋向，推动非常规油气地质学理论建立，这种突破和革新对经典石油天然气地质学理论体系重构、全油气系统理论模型建立，对中国乃至世界油气从常规向非常规战略发展具有重要理论指导和科学价值。

作者注：英文 Petroleum 指烃类化合物，包括液体 Crude oil（原油）、气体 Natural gas（天然气）和固体（超重油、沥青）等，中文译为石油。因此 Petroleum Geology 应为石油地质学。但近年国内部分业界使用“石油”一词指 Crude oil，与原油混用，Petroleum 的中文翻译成为石油天然气，因此出现了“石油天然气地质学”等词汇，作者这里屈从大众。

### 参考文献：

- [1] 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.
- [2] 耶金. 能源重塑世界[M]. 朱玉桦, 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] 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.
- [4] 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.
- [5] 胡文瑞, 翟光明, 李景明. 中国非常规油气的潜力和发展[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 25-29.  
HU Wenrui, ZHAI Guangming, LI Jingming. Potential and development of unconventional hydrocarbon resources in China[J]. China Engineering Science, 2010, 12(5): 25-29.
- [6] 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. 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.
- [7] 孙赞东, 贾承造, 李相方, 等. 非常规油气勘探与开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.  
SUN Zandong, JIA Chengzao, LI Xiangfang, et al. Unconventional petroleum exploration and exploitation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [8] 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.



- [9] IEA. World energy outlook 2016[EB/OL]. [2016-06-30]. [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf).
- [10] CAPP. Statistical handbook for Canada's upstream petroleum industry[EB/OL]. [2016-10-30]. <http://www.capp.ca/publications-and-statistics/statistics/statistical-handbook>.
- [11] BP. BP 世界能源统计[EB/OL]. [2016-11-20]. [http://www.bp.com/content/dam/bp-country/zh\\_cn/Publications/StatsReview2016/BP%20Stats%20Review\\_2016\\_中文版报告.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp-country/zh_cn/Publications/StatsReview2016/BP%20Stats%20Review_2016_中文版报告.pdf).
- [12] EIA. U S. Coalbed methane production[EB/OL]. (2015-11-19) [2016-11-20]. [https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngr52nus\\_1a.htm](https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngr52nus_1a.htm).
- [13] EMMONS W H. Geology of petroleum[M]. New York: McGraw-Hill, 1921.
- [14] MCCOLLOUGH E H. Structural influence on the accumulation of petroleum in California[M]. Tulsa: AAPG, 1934: 73-760.
- [15] LEVORSEN A I. Geology of petroleum[M]. San Francisco: W H Freeman and Company, 1956.
- [16] MAGOON L B, DOW W G. The petroleum system[C]//MAGOON L B, DOW W G. The petroleum system-from source to trap. Tulsa: AAPG, 1994: 2-24.
- [17] 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. “连续型”油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669-682.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, YUAN Xuanjun, et al. Global importance of “continuous” petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682.
- [18] 胡见义. 石油地质学理论若干热点问题的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 1-4.
- HU Jianyi. Discussion on hot spots in petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 1-4.
- [19] 张厚福. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- ZHANG Houfu. Petroleum geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [20] 何生, 叶加仁, 徐思煌, 等. 石油及天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2010.
- HE Sheng, YE Jiaren, XU Sihuang, et al. Petroleum geology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010.
- [21] WHITE I C, ASHBURNER C A. The geology of natural Gas[J]. Science, 1885, 128(6): 40-44.
- [22] WILSON W B. Proposed classification of oil and gas reservoirs[M]. Tulsa: AAPG, 1934: 433-445.
- [23] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978.
- [24] PAN C H. Nonmarine origin of petroleum in north Shensi, and the Cretaceous of Szechuan, China[J]. AAPG Bulletin, 1941, 25(11): 2058-2068.
- [25] 黄汲清. 中国地质构造基本特征的初步总结[J]. 地质学报, 1960, 40(1): 1-31.
- HAUNG Jiqing. A preliminary summary of the basic features of geological structure in China[J]. Acta Geologica Sinica, 1960, 40(1): 1-31.
- [26] 翁文波. 中国石油天然气总公司院士文集: 翁文波集[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1997.
- WENG Wenbo. China National Petroleum Company academy collection: Weng Wenbo[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1997.
- [27] 朱夏. 活动论构造历史观[J]. 石油实验地质, 1991, 13(3): 201-209.
- ZHU Xia. Activity theory structure history view[J]. Experimental Petroleum Geology, 1991, 13(3): 201-209.
- [28] 傅家谟, 盛国英, 许家友, 等. 应用生物标志化合物参数判识古沉积环境[J]. 地球化学, 1991(1): 1-12.
- FU Jiamo, SHENG Guoying, XU Jiayou, et al. Application of biomarker compounds in assessment of paleoenvironments of Chinese terrestrial sediments[J]. Geochimica, 1991(1): 1-12.
- [29] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 中国低熟油的几种成因机制[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 75-83.
- WANG Tieguan, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. Several genetic mechanisms of immature crude oils in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 75-83.
- [30] 黄第藩, 李晋超, 张大江. 干酪根的类型及其分类参数的有效性、局限性和相关性[J]. 沉积学报, 1984, 2(3): 18-33.
- HUANG Difan, LI Jinchao, ZHANG Dajiang. Kerogen types and study on effectiveness, limitation and interrelation of their identification parameters[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984, 2(3): 18-33.
- [31] 胡见义. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- HU Jianyi. Theoretical basis of continental petroleum geology in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [32] 戴金星. 成煤作用中形成的天然气和石油[J]. 石油勘探与开发, 1979, 6(3): 10-17.
- DAI Jinxing. Oil and gas in the process of coal measures formation[J]. Petroleum Exploration and Development, 1979, 6(3): 10-17.
- [33] 郝芳. 超压盆地生烃动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- HAO Fang. Hydrocarbon generation kinetics and hydrocarbon accumulation in overpressure basin[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [34] 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.
- [35] 李德生. 中国石油天然气总公司院士文集: 李德生集[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1997.
- LI Desheng. China National Petroleum Company academy collection: Li Desheng[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1997.
- [36] 王德民. 中国石油天然气总公司院士文集: 王德民集[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1997.
- WANG Demin. China National Petroleum Company academy collection: Wang Demin[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1997.
- [37] 李德生. 渤海湾盆地复合油气田的开发前景[J]. 石油学报, 1986, 7(1): 1-21.
- LI Desheng. Prospect of the composite megastructural oil and gas field in Bohai Gulf of China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(1): 1-21.

- 1-21.
- [38] 胡见义, 徐树宝, 董晓光. 渤海湾盆地复式油气聚集区带的形成和分布[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(1): 1-8.
- HU Jianyi, XU Shubao, TONG Xiaoguang. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(1): 1-8.
- [39] 贾承造, 魏国齐, 李本亮, 等. 中国中西部两期前陆盆地的形成及其控气作用[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 13-17.
- JIA Chengzao, WEI Guoqi, LI Benliang, et al. Tectonic evolution of two-epoch foreland basins and its control for natural gas accumulation in China's mid-western areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 13-17.
- [40] 宋岩, 赵孟军, 方世虎, 等. 中国中西部前陆盆地油气分布控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 265-274.
- SONG Yan, ZHAO Mengjun, FANG Shihu, et al. Dominant factors of hydrocarbon distribution in the foreland basins, central and western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 265-274.
- [41] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏地质理论与勘探技术[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 257-272.
- JIA Chengzao, ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, et al. Geological theory and exploration technology for lithostratigraphic hydrocarbon reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 257-272.
- [42] 赵文智, 邹才能, 汪泽成, 等. 富油气凹陷“满凹含油”论: 内涵与意义[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 5-13.
- ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, WANG Zecheng, et al. The intension and signification of “Sag-wide Oil-Bearing Theory” in the hydrocarbon-rich depression with terrestrial origin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 5-13.
- [43] 吴时国, 袁圣强. 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 693-699.
- WU Shiguo, YUAN Shengqiang. Advance of exploration and petroleum geological features of deep-water hydrocarbon in the world[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6): 693-699.
- [44] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.
- ZOU Caineng, ZHANG Guangya, TAO Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [45] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 全球深水盆地群分布格局与油气特征[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 369-378.
- ZHANG Gongcheng, MI Lijun, QU Hongjun. A basic distributional framework of global deepwater basins and hydrocarbon characteristics[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 369-378.
- [46] 马中振. 典型大西洋型深水盆地油气地质特征及勘探潜力: 以巴西桑托斯盆地为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1108-1115.
- MA Zhongzhen. Petroleum geology and favorable exploration potential of typical South Atlantic deep water basin: Taking Brazil Santos Basin as an example[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 1108-1115.
- [47] POLLASTRO R M. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 551-578.
- [48] SCHMOKER J W. Method for assessing continuous-type (unconventional) hydrocarbon accumulations[R]. Washington: U S Geological Survey, 1995.
- [49] GAUTIER D L, DOLTON G L, TAKAHASHI K I, et al. National assessment of United States oil and gas resources-results, methodology, and supporting data[R]. Washington: U. S. Geological Survey, 1995.
- [50] LAW B E, CURTIS J B. Introduction to unconventional petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1851-1852.
- [51] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. 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.
- [52] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术: 兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399.
- ZOU Caineng, ZHANG Guosheng, YANG Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399.
- [53] 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.
- [54] ZOU Caineng, JIN Xu, ZHU Rukai, et al. Do shale pore throats have a threshold diameter for oil storage?[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 1-6.
- [55] ZOU Caineng, YANG Zhi, TAO Shizhen, et al. Continuous hydrocarbon accumulation over a large area as a distinguishing characteristic of unconventional petroleum: The Ordos Basin, North-Central China[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 126: 358-369.
- [56] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHANG Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: Concept and practical significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-27.
- [57] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1457-1469.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research process and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [58] 邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1065-1075.
- ZOU Caineng, ZHAO Zhengzhang, YANG Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1065-1075.

- [59] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 689-701.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I)[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 689-701.
- [60] 宋岩, 张新民, 柳少波. 中国煤层气基础研究和勘探开发技术新进展[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 1-7.  
SONG Yan, ZHANG Xinmin, LIU Shaobo. Process in the basic studies and exploration & development techniques of coalbed methane in China[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 1-7.
- [61] 宋岩, 柳少波, 赵孟军, 等. 煤层气藏边界类型、成藏主控因素及富集区预测[J]. 天然气工业, 2009, 29(10): 5-9.  
SONG Yan, LIU Shaobo, ZHAO Mengjun, et al. Coalbed gas reservoirs: Boundary types, main controlling factors of gas pooling, and forecast of gas-rich areas[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(10): 5-9.
- [62] 宋岩, 柳少波, 琚宜文, 等. 含气量和渗透率耦合作用对高丰度煤层气富集区的控制[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 417-426.  
SONG Yan, LIU Shaobo, JU Yiwen, et al. Coupling between gas content and permeability controlling enrichment zones of high abundance coal bed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 417-426.
- [63] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 13-17.  
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 13-17.
- [64] 陈旭, 樊隽轩, 张元动, 等. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J]. 地层学杂志, 2015, 39(4): 351-358.  
CHEN Xu, FAN Junxuan, ZHANG Yuandong, et al. Subdivision and delineation of the Wufeng and Longmaxi black shales in the subsurface areas of the Yangtze Platform[J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(4): 351-358.
- [65] HAO Fang, ZOU Huayao, LU Yongchao. Mechanisms of shale gas storage: Implications for shale gas exploration in China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(8): 1325-1346.
- [66] 赵文智, 李建忠, 杨涛, 等. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 499-510.  
ZHAO Wenzhi, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 499-510.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 戴金星, 倪云燕, 胡国艺, 等. 中国致密砂岩大气田的稳定碳氢同位素组成特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(4): 563-578.  
DAI Jinxing, NI Yunyan, HU Guoyi, et al. Stable carbon and hydrogen isotopes of gases from the large tight gas fields in China[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2014, 57(1): 88-103.
- [72] 彭平安, 邹艳荣, 傅家谟. 煤成气生成动力学研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 297-306.  
PENG Ping'an, ZOU Yanrong, FU Jiamo. Progress in generation kinetics studies of coal-derived gases[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 297-306.
- [73] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.  
LI Mingcheng. Petroleum migration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [74] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 1-10.  
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 1-10.
- [75] 邱中建, 邓松涛. 中国油气勘探的新思维[J]. 石油学报, 2012, 33(增1): 1-5.  
QIU Zhongjian, DENG Songtao. New thinking of oil-gas exploration in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Suppl.1): 1-5.
- [76] 董晓光, 郭建宇, 王兆明. 非常规油气地质理论与技术进展[J]. 地质前缘, 2014, 21(1): 9-20.  
TONG Xiaoguang, GUO Jianyu, WANG Zhaoming. The progress of geological theory and technology for unconventional oil and gas[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 9-20.
- [77] 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]. China Engineering Science, 2012, 14(6): 22-30.
- [78] 邹才能, 翟光明, 张光亚, 等. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 13-25.  
ZOU Caineng, ZHAI Guangming, ZHANG Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 13-25.

作者简介: 贾承造(1948-), 男, 出生于甘肃兰州, 博士, 中国科学院院士, 主要从事构造地质学、石油地质学研究和油气勘探工作。地址: 北京市西城区六铺炕街6号, 中国石油天然气集团公司, 邮政编码: 100724。  
E-mail: Jiacz@petrochina.com.cn

收稿日期: 2016-12-01 修回日期: 2016-12-22

(编辑 郭海莉 许怀先)