

纳米石油地质学

——非常规油气地质理论与研究方法探讨

王崇孝¹, 罗群², 宋岩², 姜振学², 刘云生³

(1. 中国石油 玉门油田勘探开发研究院, 甘肃 酒泉 735000; 2. 中国石油大学(北京)
非常规天然气研究院, 北京 102249; 3. 中国石化 江汉油田勘探开发研究院, 武汉 430000)

摘要: 常规油气资源的勘探开发已经步履艰难, 以纳米油气为主体的非常规油气资源潜力巨大, 即将成为石油勘探开发的主要领域。然而, 由于纳米油气与常规油气的特征差异巨大, 指导常规油气勘探开发的传统石油地质学不适用于非常规油气资源的勘探开发。纳米石油地质学是纳米科技与石油地质学之间的交叉学科, 它伴随着非常规油气资源勘探开发的迫切需要、纳米科技的迅速发展而诞生, 以纳米油气的生成、滞留、运移、聚(富)集、赋存、散失的机理和分布规律为主要研究内容, 以非常规油气形成、产出状态和分布特征为研究目标。纳米科技理念及其高分辨分析测试技术、物理模拟实验、典型实例剖析是纳米石油地质学的主要指导思想和研究手段。纳米石油地质学将是一门全新的石油地质理论体系, 在未来的油气勘探开发中将发挥重要的指导作用。

关键词: 纳米油气; 纳米石油地质学; 非常规油气; 油气勘探开发; 纳米科技

中图分类号: TE19

文献标识码: A

Nano-meter petroleum geology:

Discussion about geology theory and research method of unconventional petroleum

Wang Congxiao¹, Luo Qun², Song Yan², Jiang Zhenxue², Liu Yunsheng³

(1. *Exploration and Development Institute of Yumen Oilfield, PetroChina, Jiuquan, Gansu 735000, China;*

2. *Unconventional Natural Gas Institute, China University Of Petroleum, Beijing 102249, China;*

3. *Exploration and Development Institute of Jianghan Oilfield, SINOPEC, Wuhan, Hubei 430000, China)*

Abstract: At present, conventional petroleum explorations have become more and more difficult. On the contrary, unconventional petroleum reservoirs represented by nano-meter oil and gas have a great potential, and are the main fields for petroleum explorations. Due to the obvious differences between conventional and unconventional petroleum, traditional petroleum geology which was used to guide conventional petroleum explorations is no longer suitable for unconventional petroleum explorations. Nano-meter petroleum geology is an interdiscipline between nanotechnology and petroleum geology. It came into being due to the demands of unconventional petroleum explorations and the booming of nanotechnology. The mechanisms and laws of nano-meter petroleum generation, retention, migration, accumulation, preservation and escaping are the main research tasks of nano-meter petroleum geology. The forming, output states and distribution features of unconventional petroleum are the main aims of nano-meter petroleum geology. Nanotechnological idea and its high-resolution testing techniques, physical simulation experiments, typical example analyses are the main guiding thought and research measures. As a new petroleum geology theory system, nano-meter petroleum geology will play an important role in future petroleum exploration and development.

Key words: nano-meter petroleum; nano-meter petroleum geology; unconventional petroleum; petroleum exploration and development; nano-meter technology

收稿日期: 2014-03-02; 修订日期: 2014-09-10。

作者简介: 王崇孝(1964—), 男, 博士, 高级工程师, 从事油田勘探开发与科技管理工作。E-mail: wangcx@petrochina.com.cn。

通讯作者: 罗群(1963—), 男, 博士, 副教授, 从事盆地构造与油气成藏机理、非常规油气地质研究与评价工作。E-mail: luoqun2002@263.net。

基金项目: 国家自然科学基金“云质岩致密油储层微米—纳米孔喉网络体系及其流体耦合流动机理与流动下限”(41372145)和中国石油股份有限公司“十二五”科技重大专项“玉门油田重上百万吨勘探开发关键技术研究”(2012E-3301)项目资助。

1 问题的提出

自从1859年美国第一口油井(井深21 m,日产油3~5 t)诞生以来,世界石油工业走过了150多年的历程,发现和开采了大量的油气,为人类文明社会的发展注入了强劲的活力。油气勘探开发的历史,伴随着一个又一个石油地质理论的诞生和创新,掀起了一个又一个的油气发现的高潮。从1861年背斜理论的提出,到1930年圈闭概念的诞生,从19世纪60年代干酪根晚期成烃理论的提出,到19世纪70年代板块构造理论的兴起、80年代含油气系统理论的提出,无不给世界石油工业的发展带来了新的繁荣。中国20世纪40年代“陆相生油理论”的横空出世,打破了中国贫油论的神话;60年代“源控论”的提出,为中国陆相湖盆发现大规模油气田提供了理论依据;70年代诞生的渤海湾复式油气藏聚集理论,使得中国东部地区“盘子摔破还被踢一脚”极复杂断块区的油气产量长期高产稳产;90年代以后到本世纪初岩性油气藏等隐蔽油气藏理论的提出,使得油气勘探的领域从构造高部位逐渐向斜坡、凹陷延伸,油气储量、产量稳中有升^[1-2]。邹才能等(2009)针对中国广泛分布的煤层气、四川页岩气、川陕致密砂岩气、松辽和鄂尔多斯致密油、南海天然气水合物等非常规资源,发展了非常规油气的连续型油气聚集理论,暗示世界石油工业将迎来新的曙光。石油地质理论的不断发展和创新,使得预言家们预测的世界油气产量的峰值不断后延。

进入新世纪以来,包括我国在内的世界石油工业出现新的变化,勘探难度越来越大,勘探风险越来越高,这是因为经过一个半世纪的勘探,容易发现的常规油气藏已经找得差不多了。然而,以美国为代表的北美一些国家,却在页岩气、页岩油、致密油、致密气、煤层气等非常规油气藏勘探领域取得重大突破^[3-11],改变了世界油气分布的格局。研究越来越清楚地表明^[12-28],以页岩油、页岩气、致密油、致密气和煤层气等为代表的非常规油气资源具有巨大的勘探潜力,保守估计是常规油气资源的4倍以上,常规油气资源只是油气资源“冰山的一角”。随着理论、技术和市场的不断发展,非常规油气资源将成为未来油气勘探开发的主要领域。

非常规油气是指用目前常规的理论和技术难以发现和开发的油气资源,它们赋存于地下极其致密的储层中。邹才能等^[12-13,16-17]通过纳米-CT、高分辨率发射电子显微镜等纳米技术,发现页岩气主要

赋存于20~500 nm的页岩层纳米孔隙中,致密油主要赋存于50~900 nm的致密岩孔隙中。他们将赋存于纳米孔隙中,用纳米技术才能开发的油气叫纳米油气^[13,16-17],统计发现致密储层中纳米级孔隙占到总孔隙的85%^[13]。由此可知,占据相当比例的非常规油气资源主要由纳米油气组成,它们赋存于致密储层的纳米级孔隙系统之中。

现代科技研究表明,处于纳米级尺度的物体与其在常规尺度(毫米—微米级)相比具有截然不同的特性(如物理、化学性质和能量等),即所谓的“纳米效应”,如小尺寸效应、表面效应、量子效应、界面效应等^[29-32]。例如,一块巴掌大的页岩(300 g),放在水中能连续密集不停地大量冒气达数天,2个月以后还有气泡冒出,这是用传统的石油地质理论知识难以解释的。显然,能对常规油气藏(常规油气的尺度为毫米—微米级)进行合理解释、指导常规油气藏进行有效勘探的传统的石油地质学(包括前面提到的各种油气勘探开发理论)是不适用于非常规油气资源的勘探开发的。也就是说,我们现在所用的各种石油地质学理论以及其他一切油气勘探理论,它们都是从常规油气的形成、演化、分布规律中总结出来的理论,限于当时的科技条件,他们无法识别与研究纳米级油气的运动规律。这些理论只能指导常规油气藏的勘探和开发,而不适用于纳米油气(非常规油气的主体)资源的勘探和开发。

因此,我们迫切需要关切的是,剩余在地下潜力巨大的纳米油气(非常规油气的主体)是如何形成的;它们是如何运移和滞留于致密储层中的;在储层中是如何聚集成藏并进一步富集的,又是如何散失或保存的,其分布规律是什么。换句话说,在纳米尺度空间里,纳米油气的生、留、聚(富)、散和分布的机理和规律是什么,主要控制因素又是什么。这是我们迫切需要解决的科学问题,即是纳米尺度下石油地质学要解决的科学问题。

可以预见,伴随着这些科学问题的逐渐解决和非常规油气勘探开发的不断发展,必将诞生一门新的学科——纳米石油地质学。

2 概念、研究思路与内容

2.1 纳米石油地质学的概念

纳米石油地质学是石油地质学与纳米科技相结合而形成的、在纳米尺度空间研究油气的生成、滞留、排出、运移、聚集、散失机理和分布规律的一门交叉学科,是传统石油地质学在纳米尺度空间的延伸,同时,由于纳米尺度下纳米油气所表现出的

与常规油气截然不同的特性,使得纳米石油地质学将是一门与传统石油地质完全不同的崭新的学科,必将对世界石油工业产生重大而深远的影响,并对非常规油气资源的勘探开发具有重要的指导作用。这里,纳米油气在纳米孔隙结构、纳米孔喉网络体系的流动、富集机理和分布(富集)规律是纳米石油地质学研究的核心内容,而纳米技术则是进行纳米石油地质学研究的关键手段。和传统石油地质学不同,纳米石油地质学研究的是纳米油气在地壳中的形成过程、产出状态和分布规律,即运用纳米科技的理念、技术和方法,对纳米尺度油气(纳米油气)的生、留、排、运、聚、散与分布富集的规律进行研究,其理论来自于纳米油气在特定的纳米空间中特殊的运动规律的总结,又将具体指导非常规油气的勘探开发。

2.2 纳米石油地质学的研究思路与方法

由于纳米油气在纳米尺度空间(如纳米孔隙结构、纳米孔喉网络体系)具有独特的纳米效应(如小尺度效应、界面效应、量子效应等),使得它们与常规油气在赋存状态、流动方式、聚集机制和分布富集规律等方面存在巨大的差异,因而,纳米石油地质学的研究思路与传统石油地质学的研究思路也有重大的不同。

研究纳米油气,第一,必须应用先进的纳米技术手段,在纳米视域内进行;第二,必须以纳米科技的思想、理念为指导。纳米科技是近年发展起来的一门新兴科技,具有全新的思想和理念,其重要理念之一是纳米尺度的物质具有其常规尺度(毫米—微米级)不具备的超常的纳米效应^[17],纳米油气也具有相应的纳米效应,这种纳米效应将极大地影响纳米油气的生、留、排、运、聚、散和分布,进而产生与常规油气截然不同的形成过程、产出状态和分布富集规律;第三,研究表明以纳米油气为主体的非常规油气的基本特征是源储一体(如页岩油气)或源储共生(如致密油气)^[5,12-13],因此,源储空间匹配及其共生组合关系、共生机制是进行纳米油气研究的基础。非常规油气呈大面积连续分布,没有圈闭的存在,浮力不起主要作用,所以,在纳米油气地质研究过程中其成藏动力、聚集空间等方面与传统石油地质学研究迥然不同^[33-35];第四,由于纳米油气在纳米尺度空间下的流动机制、流动规律是纳米石油地质学的核心内容,因此源储及其共生组合的纳米孔隙结构、纳米孔喉网络体系的表征和精细刻画将是纳米石油地质学研究的至关重要的环节;第五,纳米油气地质学的研究是在微观尺度

下进行,是否与实际油气的宏观地质特征和分布规律相匹配,需要典型实例剖析与理论研究的有机结合、物理模拟实验与分析测试结果的相互验证和补充,以及物理模拟实验与典型实例剖析的对比分析等方面加强研究力度,以保证纳米石油地质学研究成果更接近客观实际;最后用系统论的观点总结、提升研究成果,形成纳米石油地质学的理论体系。为此,纳米石油地质学的研究思路是:以纳米科技的理念为指导,以纳米技术方法为手段,针对纳米油气地质研究中存在的关键科学问题,通过典型实例剖析与理论分析研究相结合、物理模拟实验与样品分析测试相结合,开展纳米油气的源储组合及其共生机制、纳米尺度下有机质成烃演化、纳米孔隙结构与孔喉网络体系下油气的滞留、排运渗流机制与聚集特征、纳米油气的散失机理以及分布富集规律等方面的研究,总结纳米油气在地壳中的形成过程、产出状态和分布特征规律性的认识,最终运用系统论原理对成果进行总结、提升,形成纳米石油地质学理论,指导非常规油气资源的勘探与开发,并在“理论—实践—理论”的循环中不断发展和完善纳米石油地质学。具体思路如图1。

2.3 纳米石油地质学的研究内容与方法

2.3.1 纳米石油地质学的研究内容

与传统的石油地质学不同,纳米石油地质学研究内容是纳米油气在地壳中的形成过程、产出状态和分布富集规律。具体涉及到纳米油气的生成、滞留、排出、运移、聚集(富集)、赋存、散失和分布等

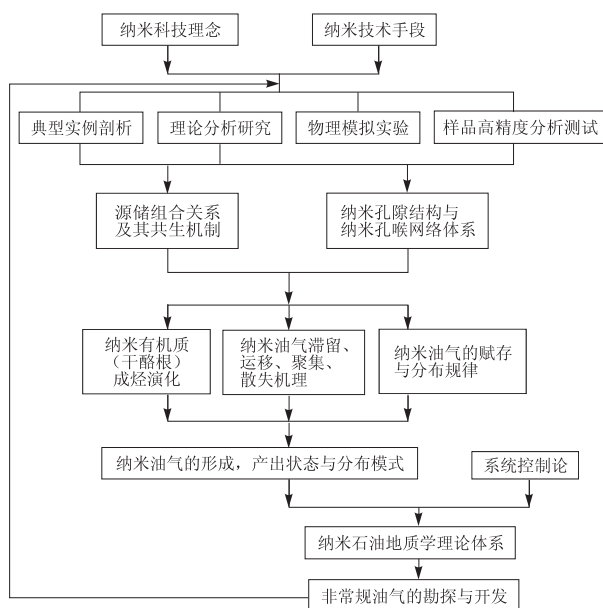


图1 纳米石油地质学研究技术路线

Fig.1 Research technical route of nano-meter petroleum geology

多个方面。

(1) 非常规油气的源储组合关系及其共生机制

源储一体或源储共生是以纳米油气为主体的非常规油气藏的基本地质特征,也是纳米石油地质学研究的最基础内容,其目的是要弄清非常规油气源储共生形成的构造背景(构造沉降及稳定性)、沉积发育条件(沉积旋回与相匹配)、成岩演化(包括储层的致密化)的影响,阐明不同地质背景和条件下不同源储组合的空间匹配关系及其共生机制,为纳米油气形成与富集机制、赋存状态、分布规律的研究奠定宏观地质背景和条件基础。

具体研究内容如下:①非常规油气源储共生空间匹配关系及其共生组合类型;②非常规油气源储共生的构造背景、沉积发育特征与成岩演化条件;③非常规油气源储共生机制与共生组合模式。

(2) 纳米有机质(干酪根)的成烃演化研究

纳米油气可以是常规尺度(毫米—微米甚至更大尺度)的有机质(干酪根)生成的,也可能是纳米尺度的有机质(干酪根)生成的,我们这里研究后者(纳米有机质)的成烃特征。

纳米尺度的有机质(干酪根)由于其特殊的纳米效应,具有与常规(尺度的)干酪根截然不同的油气生成特征和成烃模式。这里要研究那些分散或集中的纳米级干酪根是如何演化生成油气的,其生成油气的条件、控制因素和成烃规律是什么,温度是否还是主要控制因素,是否还有别的因素等等。

纳米有机质(干酪根)的成烃演化包括以下研究内容:①纳米干酪根类型、特征及其纳米效应;②纳米干酪根生成油气的基本条件及控制因素;③纳米干酪根演化与生烃模式。

(3) 纳米油气的滞留与排出机制研究

烃源岩中的干酪根(包括纳米干酪根)生成油气后,大部分将滞留于烃源岩的纳米孔隙系统中,形成现今的页岩油、页岩气,其余油气将被排出,或进入常规尺度(毫米—微米级)的孔隙、裂缝系统中,经过长距离运移,在圈闭中聚集形成常规油气藏;或进入纳米级为主的孔喉网络体系中,经过大面积短距离运移,储存于与烃源岩互层共生的纳米级孔隙结构的致密储层中,形成非常规油气聚集(如致密油藏和致密气藏)。这里主要研究纳米油气在烃源岩中的滞留(赋存状态、赋存机理等)与排出机制(动力、阻力、相态、方式、路径等)及其控制因素。比如,成熟油气从烃源岩中被排入纳米级致密储层(相当于常规油气的初次运移),其动力是不是传统石油地质学中的分子扩散力、生烃膨

胀力、异常高压等,阻力是否还是颗粒吸附力,毛细管力是动力还是阻力,还有哪些动力(如有机质网络的扩散力)和阻力;油气以什么方式排入纳米孔隙系统的储层中,是以扩散相还是以分子团或游离态或溶解态;是通过高压产生的微裂缝运移,还是通过微—纳米孔喉网络运移,或二者兼而有之;其排烃效率怎样,控制因素又是什么等。即纳米油气初次运移的条件、相态、方式、动力、通道、规律与模式,从烃源岩到储层是否存在界面效应,对初次运移有什么影响,等等,这些都是必须要研究的课题。

本部分要研究的内容有:①纳米油气滞留与排出的动力条件;②纳米油气滞留与排出的状态、方式;③纳米油气排出的路径与通道网络;④纳米油气排出的效率及其控制因素;⑤纳米油气排出的机理与模式。

(4) 纳米油气运移与聚集机理研究

油气在致密储层中大面积短距离二次运移是非常规油气聚集的一个基本特征^[5,12,14],而油气在致密储层的纳米孔隙和孔喉网络体系中的流动、聚集机理与渗流规律是纳米石油地质学的核心内容,包括油气从源岩进入致密储层后在储层的纳米孔隙空间、纳米孔喉网络通道中渗流、运移、聚集的动力、阻力、相态、路径、方式、赋存状态及流体流动的临界条件及其控制因素等。这些研究中,储层的纳米孔隙结构是否决定着油气流体的聚集空间,而纳米孔喉网络体系是否明显影响油气流体的流动机理和渗流规律,孔喉直径下限是否制约着纳米油气的最大运移距离和非常规油气藏(场)的最大分布范围,孔喉中值是否影响油气流动优势通道和“甜点区”的形成与展布,等等,都是需要深入研究的重要内容。由于纳米效应的影响,纳米油气本身就具有特殊的流动、渗透和赋存性质;同时,纳米级的孔隙结构、孔喉网络体系也具有与常规储层的孔隙结构、孔喉体系不同的特征,这些都使得纳米油气在纳米孔隙—孔喉体系中的流动和聚集机制和渗流规律更加复杂和神秘。深入研究和揭示纳米油气的流动、聚集机理和规律成为研究非常规油气形成与分布的关键环节。

其主要研究包括以下几个方面:①非常规油气储层纳米孔隙结构、孔喉网络(输导)体系基本特征;②不同类型非常规油气储层纳米孔隙结构与孔喉网络体系中油气流体耦合流动与富集机理(动力、路径、相态、方式及控制因素)与模式;③纳米孔隙结构与孔喉网络体系中油气流动临界地质条件(如储层孔喉直径下限)及其控制因素;④纳米

油气在纳米孔隙系统中的赋存状态、甜点形成条件及其主控因素。

(5) 纳米油气的散失机理与保存条件

与常规油气藏一样,作为对周边环境的变化极为敏感的以纳米油气为主的非常规油气藏,也存在一个保存与破坏的问题。由于构造变动、成岩变化,致密储层中的孔喉体系、断裂—裂缝体系也将发生变化,脆弱的非常规油气系统的平衡将被打破,必然导致致密储层中赋存的纳米油气发生散失和泄露。那么在纳米孔隙体系内导致纳米油气散失的主要地质因素是什么,它们是如何破坏纳米油气的动态平衡的,纳米油气在纳米孔喉网络体系中散失、流动的动力、流动相态、散失通道是什么,散失速度及其影响因素、阻止纳米油气散失的条件又是什么,这些都是需要研究的问题。

具体研究内容包括以下几方面:①影响纳米孔隙储层中纳米油气散失的地质因素及其控制作用;②纳米油气散失条件、类型、机理与模式;③纳米油气的散失与保存动态平衡条件与评价。

(6) 纳米油气聚集的时空匹配关系研究

源储组合类型决定了源储共生的空间匹配关系,也许三明治型(又称夹心饼型)源储组合最有利于致密油(气)等非常规油(气)藏的形成。而烃源岩成烃演化与储层演化(致密化)的时间配置影响着致密储层的含油气性及其甜点区的分布。显然,先成藏后致密的非常规油(气)储层比先致密后成藏的非常规油(气)储层可能含有更丰富的油气资源。另一方面,不同源储空间匹配关系的源储组合,其油气成藏机制会有很大的差异,导致成藏结果(储层含油性)的不同,上生下储型、下生上储型、三明治型、泥包砂型、砂包泥型、侧变型等不同的源储组合类型,都含有各自的油气充注成藏机制,显然也有不同的充注成藏结果。由此可见,①源储组合不同,纳米油气充注机制不同,成藏与分布富集结果不同;②同一组合时间配置不同,成藏结果也不一样。那么,什么样的源储组合及其时间配置最有利于纳米油气藏(非常规油气藏)的形成,不同类型源储组合在不同的时间配置关系下,如何研究和评价其含油气性,预测其分布,是本节要研究的内容。

具体研究内容如下:①不同类型的源储组合纳米油气充注成藏机制及其差异性;②源储组合的成烃作用与成岩演化时间配置对成藏结果的影响;③纳米油气聚集的时空匹配成藏特征总结。

(7) 纳米油气的分布特征与甜点区预测

弄清以纳米油气为主的非常规油气的分布富集规律,评价其资源潜力,寻找纳米油气的富集区(甜点区)是纳米石油地质学研究的主要任务之一,目的是为非常规油气勘探开发提供科学依据。纳米油气的分布与甜点区受其形成演化历史的制约,具体与源储组合空间分布、源岩的供烃能力、源储压差(动力)大小、储层孔喉网络体系特征以及油气流动的临界条件等因素有密切的关系。主要研究内容如下:①控制纳米油气分布与甜点区形成的地质条件的地质因素;②纳米油气分布规律与甜点区分布模式总结。

(8) 纳米油气系统研究

依据系统论的观点和原理,从纳米油气的静态地质条件(源储组合及其共生关系),到动态地质过程(纳米油气在致密储层纳米孔隙结构和孔喉网络中的流动机理、聚集特征和散失规律),以及源储时空的有机配置,全面系统地概括和总结纳米油气生成、滞留、运移、聚(富)集、散失和分布的研究成果,进行理论提升,形成纳米石油地质学的理论体系,并在非常规油气资源的勘探开发实践中不断充实、修正和完善。

纳米石油地质学的构成如图2。

2.3.2 纳米石油地质学的研究方法

从前面对纳米石油地质学研究内容的阐述可知,可将研究内容进一步归纳为3个方面:一是研究纳米油气的赋存环境和空间—源储共生组合;二是研究因纳米效应而导致的纳米油气独特的生成、滞留、运移、聚(富)集、散失的机理;三是研究纳米油气独特的(不同于非常规油气的)分布与富集规律。这些以纳米空间为研究尺度的特点,决定了纳米石油地质学独特的研究方法。

(1) 高分辨的分析测试手段及其研究方法

要实现在纳米尺度内研究油气的赋存状态、渗流机理、富集规律和散失特征,必须借助高分辨率

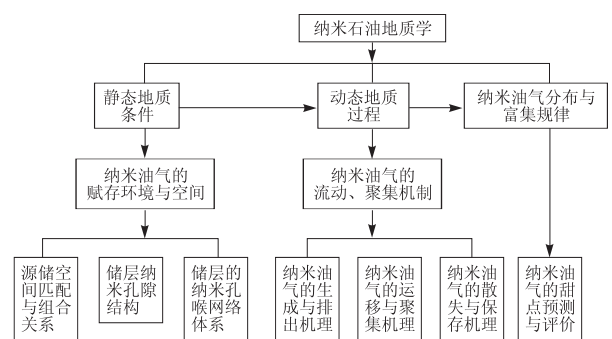


图2 纳米石油地质学的构成

Fig.2 Constitutive diagram of nano-meter petroleum geology

的测试和分析仪器及其技术,如纳米-CT、高分辨率场发射扫描电子显微镜技术、恒速压汞装置及技术等,可以获得致密储层孔隙度、渗透率等重要物性参数、精细刻画致密储层的纳米孔隙结构、纳米孔喉网络体系,观察纳米油气赋存状态、精确测定进汞压力、退汞压力等,进而进行纳米油气运移、聚集、散失机理的研究^[35-49]。

同时,配合全岩电镜扫描、X-衍射等技术,可获得纳米油气致密储层的矿物成分、结构、构造等信息,为纳米油气形成、演化与富集提供依据。

(2) 交叉学科的研究思路和研究方法

纳米石油地质学是传统(经典)石油地质学与纳米科技交叉形成的一门边缘学科,因此研究纳米石油地质学,除了借用经典石油地质学一些研究思路、方法外,还应借用纳米科技的理念、研究思路和方法,吸取两者有价值的东西来促进纳米石油地质学的形成和发展。

(3) 模拟实验与典型实例剖析相结合的研究方法

纳米石油地质学的研究内容多涉及微观领域的东西,尤其是其核心内容纳米油气的流动机制和流动规律的研究。为了使研究成果更好地反映宏观上非常规油气的赋存、运移、聚集特征,应加强相关物理模拟实验的分析研究,尽量与微观分析测试的研究成果和典型实例剖析的成果相匹配,相结合,互相补充、完善和互相验证。

3 纳米石油地质学提出的背景和条件

3.1 勘探实践需要新的石油地质理论

非常规油气勘探的理论研究落后于其勘探实践,严峻的形势呼唤创新的石油地质理论。我国的石油对外依存程度已超过 56%,常规油气藏的勘探开发步履艰难,东部油田普遍进入开发中后期,中西部油田储产量增长缓慢,远远赶不上国家对油气需求的增长。而潜力巨大的非常规油气资源的研究,在我国才刚刚起步,但非常规油气资源的勘探开发实践已经走在前面,如鄂尔多斯盆地、四川盆地致密油气的勘探已经取得一定成效,四川、重庆、云南等南方地区页岩气的勘探也取得重要进展,但是传统的石油地质学理论不能指导非常规油气的勘探开发,而适宜于非常规油气勘探开发的理论还没有出现,因而造成潜力巨大的非常规油气的勘探开发因指导理论的“真空”而面临尴尬的局面,进展缓慢。因此,以纳米油气为主体的潜力巨大的非常规油气的勘探开发,急需一套针对纳米油

气的地质理论来指导。

3.2 纳米石油地质学诞生的条件

纳米科技是 20 世纪 80 年代针对纳米尺度空间物质运动规律而诞生的新兴科技,是研究由尺寸在 0.1~100 nm 之间的物质组成的体系的运动规律和相互作用以及实际应用中的技术问题的科学技术。纳米不仅是一个空间尺度上的概念,而且是一种新的思维方式,基本原理之一是纳米尺度的物质由于其奇特的纳米效应,具有与常规尺度(毫米—微米及以上)物质截然不同的物理、化学、能量特性。运用高分辨的纳米技术,如纳米-CT、高分辨率场发射电镜扫描技术等,可观察、研究和精细刻画纳米级物质的形态、大小、形状、成分、结构(组构)、性质(包括物理性、化学性质等)以及其运动、变化规律等。正是纳米科技的提出和进展成果,才为我们分析、研究纳米油气的性质及其运动规律,揭示纳米油气的生、留、运、聚、散和分布的机理和规律提供了可能。

4 纳米石油地质学的意义与展望

4.1 纳米石油地质学的意义

毫无疑问,非常规油气资源是未来油气勘探开发的主要领域,而纳米油气是非常规油气的主体,因此,未来的非常规油气勘探开发,实际上主要是纳米油气的勘探开发。纳米石油地质学的重要意义是不言而喻的。

4.1.1 将成为未来勘探开发基础理论

利用传统石油地质学理论,以及目前所有的油气地质学理论指导常规油气藏勘探开发的时代将逐渐成为历史,非常规油气的勘探开发将成为世界石油工业的主流,纳米石油地质学揭示以纳米油气为主的非常规油气形成、分布(富集)机理与规律为己任,其成果将有效地指导非常规油气资源的勘探开发,因此,纳米石油地质学将取代传统的石油地质学理论,而成为未来油气勘探开发的经典理论。

4.1.2 纳米石油地质学将是一次革命性创新

纳米石油地质学研究的是微观世界(纳米级尺度)油气藏的形成与分布(富集)机理与规律,由于纳米尺度是一个独立的空间世界,与常规油气所在毫米—微米尺度具有重大的差异,尤其是因纳米油气的纳米效应,使得纳米油气的生成、滞留、运移、聚集、散失与分布等石油地质学研究的关键环节与常规油气的不同,因此,纳米油气的形成机理与分布(富集)规律必然与研究常规油气的传统石油地质学也会截然不同,与此相对应,研究纳米油

气的纳米石油地质学与研究常规油气的传统石油地质学也会截然不同。因此,纳米石油地质学不是一种普遍意义上的理论创新,而将是一门全新的理论体系,是一个革命性的、空前的重大进步。

4.2 对纳米石油地质学的展望

本文只是提出纳米石油地质学的概念和初步构想,要真的形成纳米石油地质学的理论体系,还要经历一段“实践—理论—实践”的艰苦探索,但这段时间不会太长。毕竟非常规油气勘探急需石油地质理论的指导,而纳米科技的发展也提供了保障和条件。可以预言,纳米石油地质学将带人类进入一片崭新的油气勘探开发天地,它带给人类的将不仅是比常规油气资源更为丰富的非常规油气资源,更多是带给人类对微观世界的思考和对未知领域的不懈探索。

4.2.1 从根本上转变对油气勘探开发的理念

以纳米油气为主体的非常规油气和毫米—微米尺度的常规油气分别处于两个完全不同的物质层次领域,其形成、分布、赋存规律和特征几乎不具有可比性。常规油气强调的生、储、盖、运、圈、保六大成藏要素,以圈闭为核心的油气聚集空间、以油气长距离长期、多期沿各类输导体运移、在局部圈团中聚集成藏为重点的研究思路等,在非常规油气资源的研究中几乎都不是重点。相反,纳米油气的各种奇特、神秘的纳米效应,以及由这些纳米效应产生的独特油气生成、滞留、运移、聚(富)集、散失和分布的机理和规律,将成为纳米石油地质学研究的热点和重点。尽管目前人们对非常规油气资源的认识还很肤浅,纳米油气的纳米效应及其成藏机理与分布规律还是一个迷,但是,随着人们对纳米油气认识的不断加深,将不断修正和改变对纳米油气资源的观念和研究思路,使认识不断接近客观世界。在这个过程中,纳米石油地质学的原理和思路将起到重要的引导和启迪作用。

4.2.2 极大拓宽勘探开发视野

纳米石油地质学研究的对象是纳米尺度为主的非常规油气,研究的内容是非常规油气主体——纳米油气的形成机理与分布(富集)规律,研究的目的是揭示以纳米石油气为主体的非常规油气资源形成的机制和分布(富集)规律,为数倍于常规油气资源的非常规油气勘探开发提供科学依据。依据纳米油气特性及其分布特征,纳米石油地质学将把人们的勘探视野从局部宏观拓展到整个宏观和微观世界,将油气勘探的领域从常规油气的局部圈闭点带到整个含油气盆地,即从“局部圈闭勘

探”带到“整个盆地勘探”,进一步证实了“勘探无禁区”的真理,这将大大拓展油气资源的勘探开发领域。随着纳米石油地质理论的不断成熟和勘探开发技术(水平井、分段压裂等)不断创新,巨大而难以估算的油气资源将不断地被发现和开发利用,全球石油产量的峰值又将大大往后推迟。纳米石油地质学将逐渐取代目前传统的石油地质学,在未来油气勘探开发中发挥至关重要的指导作用。

参考文献:

- [1] 罗群.试论中国石油地质勘探理论的进一步创新:理论创新的概念、模式与思考[J].中国石油勘探,2010,15(5):6-10,16.
Luo Qun. Discussion on theoretical innovation of Chinese petroleum geology and exploration: Concept and models of theoretical innovation and thinking [J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(5): 6-10, 16.
- [2] 关德范.试论石油地质基础研究与理论创新[J].中外能源,2009,14(12):47-53.
Guan Defan. A discussion on fundamental researches and theoretical innovation in petroleum geology [J]. Sino-Global Energy, 2009, 14(12): 47-53.
- [3] 景东升,丁锋,袁际华.美国致密油勘探开发现状、经验及启示[J].国土资源情报,2012(1):18-19,45.
Jing Dongsheng, Ding Feng, Yuan Jihua. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication [J]. Land and Resources Information, 2012(1): 18-19, 45.
- [4] 林森虎,邹才能,袁选俊,等.美国致密油开发现状及启示[J].岩性油气藏,2011,23(4):25-30,64.
Lin Senhu, Zou Caineng, Yuan Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication [J]. Northwest Oil & Gas Exploration, 2011, 23(4): 25-30, 64.
- [5] 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):344-350.
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 Petroli Sinica, 2012, 33(3): 344-350.
- [6] Rankin R R, Thibodeau M, Vincent M C, et al. Improved production and profitability achieved with superior completions in horizontal wells: A Bakken/Three Forks case history, SPE 134595 [R]. 2010.
- [7] Houston M C, McCallister M A, Jany J D, et al. Next generation multi-stage completion technology and risk sharing accelerates development of the Bakken play, SPE 135584 [R]. 2010.
- [8] Zander D M, Seale R A, Snyder D. Well completion strategy and optimization in a North Dakota Bakken Oilfield, SPE 142741 [R]. 2011.
- [9] Schmoker J W, Hester T C. Organic carbon in Bakken Formation, United States portion of Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(12): 2165-2174.
- [10] Miller B A, Paneitz J M, Yakeley S, et al. Unlocking tight oil: Selective multi-stage fracturing in the Bakken shale, SPE 116105 [R]. 2008.
- [11] Webster R L. Petroleum source rocks and stratigraphy of Bakken

- Formation in North Dakota(in 1984 AAPG Rocky Mountain Section Meeting, Anonymous)[J].AAPG Bulletin,1984,68(7):593-596.
- [12] 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.
- [13] 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):14-26.
- 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):14-26.
- [14] 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 resource in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(2):129-136.
- [15] 庞正炼,邹才能,陶士振,等.中国致密油形成分布与资源潜力评价[J].中国工程科学,2012,14(7):60-67.
- Pang Zhenglian,Zou Caineng,Tao Shizhen, et al.Formation, distribution and resource evaluation of tight oil in China[J].Engineering Sciences,2012,14(7):60-67.
- [16] 邹才能,陶士振,杨智,等.中国非常规油气勘探与研究新进展[J].矿物岩石地球化学通报,2012,31(4):312-322.
- Zou Caineng,Tao Shizhen,Yang Zhi, et al.New Advance in unconventional petroleum exploration and research in China[J].Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,2012,31(4):312-322.
- [17] 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 nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J].Acta Petrologica Sinica,2011,27(6):1857-1864.
- [18] 周德华,焦方正.页岩气“甜点”评价与预测:以四川盆地建南地区侏罗系为例[J].石油实验地质,2012,34(2):109-114.
- Zhou Dehua,Jiao Fangzheng.Evaluation and prediction of shale gas sweet spots;a case study in Jurassic of Jiannan area, Sichuan Basin [J].Petroleum Geology & Experiment,2012,34(2):109-114.
- [19] 许长春.国内页岩气地质理论研究进展[J].特种油气藏,2012,19(1):9-16.
- Xu Changchun.Progress in research on shale gas geological theory in China[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2012,19(1):9-16.
- [20] 葛忠伟,樊莉.页岩气研究中应注意的问题[J].油气地质与采收率,2013,20(6):19-22.
- Ge Zhongwei,Fan Li.Some notable problems about shale gas in the scientific research[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2013,20(6):19-22.
- [21] 侯读杰,包书景,毛小平,等.页岩气资源潜力评价的几个关键问题讨论[J].地球科学与环境学报,2012,34(3):7-16.
- Hou Dujie,Bao Shujing,Mao Xiaoping, et al.Discussion on the Key Issues of Resource Potential Evaluation for Shale Gas[J].Journal of Earth Sciences and Environment,2012,34(3):7-16.
- [22] 邵珠福,钟建华,于艳玲,等.从成藏条件和成藏机理对比非常规页岩气和煤层气[J].特种油气藏,2012,19(4):21-24.
- Shao Zhufu,Zhong Jianhua,Yu Yanling, et al.Compare shale gas with CBM in accumulation conditions and mechanisms[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2012,19(4):21-24.
- [23] 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,2011,27(3):61-65.
- Li Yuxi,Zhang Jinchuan.Type of unconventional oil and gas in china and their development potential [J].International Petroleum Economics,2011,27(3):61-65.
- [24] Jarvie D M,Hill R J,Ruble T E, et al.Unconventional shale-gas systems:The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J].AAPG Bulletin,2007,91(4):475-499.
- [25] Han G.Natural fractures in unconventional reservoir rocks:identification, characterization, and its impact to engineering design [J]. American Rock Mechanics Association,2011,47(3):1-7.
- [26] 马宁,侯读杰,包书景,等.页岩气资源潜力评价方法[J].油气地质与采收率,2012,19(6):25-29.
- Ma Ning,Hou Dujie,Bao Shujing, et al.Evaluation method of shale gas resource potential [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2012,19(6):25-29.
- [27] 孟庆峰,侯贵廷.页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J].油气地质与采收率,2012,19(1):11-14.
- Meng Qingfeng,Hou Guiting.Geological controls on shale gas play and potential of shale gas resource in upper Yangtze region, China [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2012,19(1):11-14.
- [28] 何发岐,朱彤.陆相页岩气突破和建产的有利目标:以四川盆地下侏罗统为例[J].石油实验地质,2012,34(3):246-251.
- He Faqi,Zhu Tong.Favorable targets of breakthrough and built up of shale gas in continental facies in Lower Jurassic, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment,2012,34(3):246-251.
- [29] 刘端直.论当今纳米科技革命的酝酿和发展[J].成都理工大学学报:社会科学版,2008,16(2):91-95.
- Liu Duanzhi.The development of nano science and technology [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Social Sciences,2008,16(2):91-95.
- [30] 蔡建岩.纳米科技发展现状及趋势[J].长春大学学报,2005,15(4):71-75.
- Cai Jianyan.Developmental situation and trend of nano science and technology [J].Journal of Changchun University,2005,15(4):71-75.
- [31] 史红云.纳米效应与成矿作用[J].西安工程学院学报,1998,20(1):87-88.
- Shi Hongyun.Nano effects and mineralization [J].Journal of Xi'an Engineering University,1998,20(1):87-88.
- [32] 裘晓辉,白春礼.中国纳米科技研究的进展[J].前沿科学,2007,1(1):6-10.
- Qiu Xiaohui,Bai Chunli.The advances of nanoscience and nano-

- technology in China[J]. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 6-10.
- [33] 孙怡. 成藏动力对束缚水饱和度的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(2): 64-66.
- Sun Yi. The influence of reservoir-forming dynamic on irreducible water saturation[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(2): 64-66.
- [34] 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: 411-441.
- Sun Zandong, Jia Chengzao, Li Xiangfang, et al. *Unconventional oil and gas exploration and development*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 411-441.
- [35] 陈杰, 周改英, 赵喜亮, 等. 储层岩石孔隙结构特征研究方法综述[J]. *特种油气藏*, 2005, 112(4): 11-14.
- Chen Jie, Zhou Gaiying, Zhao Xiliang, et al. Overview of study methods of reservoir rock pore structure[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2005, 112(4): 11-14.
- [36] 蔡忠. 储集层孔隙结构与驱油效率关系研究[J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(6): 45-49.
- Cai Zhong. The study on the relationship between pore structure and displacement efficiency[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(6): 45-49.
- [37] 唐海发, 彭仕宓, 赵彦超. 大牛地气田盒2+3段致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其分类评价[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(3): 107-113.
- Tang Haifa, Peng Shimi, Zhao Yanchao. An characteristics of pore structure and reservoir evaluation in H2+3 tight gas reservoir, daniud gas field[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(3): 107-113.
- [38] 王海军, 顾芳. 单链高分子通过薄膜上纳米孔隙的输运过程: 链间相互作用的影响[J]. *高等学校化学学报*, 2006, 27(7): 1343-1346.
- Wang Haijun, Gu Fang. Translocation of single polymer chain through nanopore on a membrane: the effect of interactions between polymer chains[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2006, 27(7): 1343-1346.
- [39] 胡志明, 把智波, 熊伟, 等. 低渗透油藏微观孔隙结构分析[J]. *大庆石油学院学报*, 2006, 30(3): 51-54.
- Hu Zhiming, Ba Zhibo, Xiong Wei, et al. Analysis of micro pore structure in low permeability reservoirs[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2006, 30(3): 51-54.
- [40] 王翊超, 王怀忠, 李炼民, 等. 恒速压汞技术在大港油田孔南储层流动单元微观孔隙特征研究中的应用[J]. *天然气地球科学*, 2011, 27(2): 335-339.
- Wang Yichao, Wang Huaizhong, Li Lianmin, et al. Application of constant velocity mercury injection technique to study microscopic pore structures on various reservoir flow unit in Kongnan Area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 27(2): 335-339.
- [41] 杨正明, 郭和坤, 姜汉桥, 等. 火山岩气藏微观孔隙结构特征参数[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2009, 28(增刊): 286-289.
- Yang Zhengming, Gu Hekun, Jiang Hanqiao, et al. Characteristic parameter of microcosmic pore configuration in volcanic gas reservoir[J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2009, 28(Sup 1): 286-289.
- [42] 黄书先, 张超谟. 孔隙结构非均质性对剩余油分布的影响[J]. *江汉石油学院学报*, 2004, 26(3): 124-126.
- Huang Shuxian, Zhang Chaomo. Effect of pore structural heterogeneity on residual oil distribution[J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2004, 26(3): 124-126.
- [43] 杨全红, 刘敏, 成会明, 等. 纳米碳管的孔结构、相关物性和应用[J]. *材料研究学报*, 2001, 15(4): 375-385.
- Yang Quanhong, Liu Min, Cheng Huiming, et al. Nanometer-sized porous texture of carbon nanotubes, related properties and potential applications[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2001, 15(4): 375-385.
- [44] 林景晔. 砂岩储集层孔隙结构与油气运聚的关系[J]. *石油学报*, 2004, 25(1): 44-47.
- Lin Jinghua. Relationship of pore structure of sand reservoir with hydrocarbon migration and accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(1): 44-47.
- [45] 李卫成, 张艳梅, 王芳, 等. 应用恒速压汞技术研究致密油储层微观孔隙特征: 以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组为例[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(6): 60-65.
- Li Weicheng, Zhang Yanmei, Wang Fang, et al. Application of constant-rate mercury penetration technique to study of pore throat characteristics of tight reservoir: A case study from the Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(6): 60-65.
- [46] 洪秀娥, 戴胜群, 郭建宇, 等. 应用毛细管压力曲线研究储层孔隙结构: 以卫城油田 Es₄ 储层为例[J]. *江汉石油学院学报*, 2002, 24(1): 53-55.
- Hong Xiue, Dai Shengqun, Gu Jianyu, et al. Study on reservoir pore structure by using capillary pressure curve: taking Es₄ reservoir in Weicheng oilfield as an example[J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2002, 24(1): 53-55.
- [47] 赵碧华. 用 CT 扫描技术观察油层岩心的孔隙结构[J]. *西南石油学院学报*, 1989, 11(2): 57-64.
- Zhao Bihua. The study of the pore structure parameters in rocks by CT scanning technology[J]. *Journal of Southwestern Petroleum Institute*, 1989, 11(2): 57-64.
- [48] 王尤富, 鲍颖. 油层岩石的孔隙结构与驱油效率的关系[J]. *河南石油*, 1999, 13(1): 23-25.
- Wang Youfu, Bao Ying. The relationship between reservoir pore structure and flushing efficiency[J]. *Henan Petroleum*, 1999, 13(1): 23-25.
- [49] 刘伟新, 承秋泉, 王延斌, 等. 油气储层特征微观分析技术及其应用[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(5): 489-492.
- Liu Weixin, Cheng Qiuquan, Wang Yanbin, et al. Micro-analysis and its application of oil and gas reservoir characteristics[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(5): 489-492.