

文章编号:1001-6112(2012)03-0234-12

# 油气盖层研究现状与认识进展

周雁,金之钧,朱东亚,袁玉松,李双建

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 构造与沉积储层实验室,北京 100083)

**摘要:**综述了油气盖层研究历史和国内外研究现状,分别总结了泥岩盖层及蒸发岩类盖层认识进展,分析了封盖机理研究现状。提出油气盖层研究经历了5个阶段,逐渐由早期侧重于盖层物性研究发展到变形过程及成藏过程中的盖层有效性研究,包括优质盖层研究、盖层力学性质研究以及盖层封盖性与成藏条件匹配关系研究等。蒸发岩类是世界各地重要的油气盖层,后期岩溶改造会对其封盖性能产生一定的影响;泥岩的沉积结构、构造、成分组成,特别是粘土含量对泥岩盖层封闭性能影响较大;深埋地下的高演化泥岩仍具有优质的封盖性能。尽管发现毛管物理封闭、超压封闭和毛管多相封闭等多种封闭类型,但是,毛管物理封闭作用是最基本的封闭机制。总体上,国际上目前研究盖层较多的国家主要有美国、挪威、澳大利亚、英国、意大利、德国等,研究单位包括高校、政府机构和油气公司等。

**关键词:**保存条件;油气盖层;封盖机理;圈闭;成藏

**中图分类号:**TE122.2<sup>+</sup>5

**文献标识码:**A

## Current status and progress in research of hydrocarbon cap rocks

Zhou Yan, Jin Zhijun, Zhu Dongya, Yuan Yusong, Li Shuangjian

(Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology,  
SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** It was reviewed in this paper the history and current status of the research of hydrocarbon cap rocks. The research progress in both mud and evaporite cap rocks was summarized, and the current research status of dynamic sealing mechanism was analyzed. There are 5 stages in the research development of cap rocks, and the focus of research has shifted from rock physics to deformation process and sealing effectiveness during hydrocarbon accumulation, such as study in high quality seals, mechanical properties of cap rocks, matching between sealing capacity and accumulation conditions, and so on. Extensive literature review suggests that evaporites are very important hydrocarbon seals all over the world and karstification in later stages would affect the sealing capacity; sedimentary texture, structure, and composition (especially clay content) of the mud rocks show fairly important influences on sealing capacity of mud rock seals; deeply buried mud rocks which have been through high diagenetic evolution still show excellent sealing capacity. Capillary physical sealing, overpressure sealing, capillary multiphase sealing and several other types of sealing mechanism have been discovered and studied, but the capillary physical sealing is the most fundamental sealing mechanism. Countries that are active in cap rock research include the United States of America, Norway, Australia, Britain, Italy, Germany, and so on. Institutions involved are mainly colleges and universities, government institutions, and petroleum companies.

**Key words:** preservation condition; hydrocarbon seal/cap rocks; sealing mechanism; trap; hydrocarbon accumulation

油气在圈闭中聚集成藏,盖层的封盖是一个重要的因素。不同的勘探阶段,对盖层封盖性能要求不同,也对应不同的研究方法和手段。我国南方海相勘探,现阶段主要以找气为主,对盖层封闭性能要求更加苛刻。为了适应天然气勘探对盖层的要求,完善盖层的研究,重点对国外盖层研究情况进行了调研。本文从油气盖层研究历史、国外盖层研

究状况、国外主要研究机构和人员、盖层研究主要认识和进展等几个方面进行了系统的总结,以促进国内对盖层的研究。

## 1 油气盖层研究历史

从国内外研究发展过程来看,油气盖层研究大约经历了5个阶段(图1)。

收稿日期:2012-02-27;修订日期:2012-03-23。

作者简介:周雁(1967—),男,博士,高级工程师,从事石油地质研究工作。E-mail:zhouyan.syky@sinopec.com。

基金项目:国家油气重大专项05-02项目,国家自然科学基金项目(40739904)和国家重点基础研究发展计划“973计划”项目(2012CB214806)资助。

阶段	准备阶段	奠基阶段	发展阶段	完善阶段	深化阶段
时间	1970年代以前	1980年代	1990年代	2000-2006年	2006-现今
研究成果	针对油研究,很少关注盖层	针对复杂地区及天然气研究,盖层研究成果不断增多			
主要特点		物性研究 力学性质研究,膏盐岩研究 匹配研究			
部分标志		1983年AAPG 1984年Downey 1987年Grunau	1993年AAPG 1996年NPF 1997年大庆石油学院及大庆油田	2000年NPF 2002年AAPG 2006年金之钧	国家973项目 国家专项 国家自然科学基金
国外主要的研究机构	澳大利亚阿德莱德大学澳大利亚石油学院、CSIRO石油公司 挪威国家石油公司(Statoil)技术研究中心、Sintef石油公司石油研究中心 美国纽约州大学、雪佛龙Texaco公司、科罗拉多州立大学等 德国Aachen大学地质系 英国主要有Newcastle大学 法国石油天然气研究中心,等				

图1 油气盖层研究发展阶段及特点示意

Fig. 1 Development stages and features of research in hydrocarbon cap rocks

在早期的油气勘探中,由于勘探的重点对象是石油,而石油的分子直径较大,对盖层的要求不是很苛刻,因此,在相当长的一段时间内,对盖层研究很少被关注,而且只作定性评价。尽管早在1860年, Henry 已经认识到盖层的重要性,认为非渗透性的泥质岩对易挥发的油气具有重要的保护作用而使之免遭散失<sup>[1]</sup>。但是,盖层研究起步较晚,当储层和烃源岩的研究已经进行得非常广泛和深入时,盖层研究却很少。

自20世纪70年代以来,随着对天然气藏的深入研究,逐渐认识到盖层的重要性。认为在油气成藏的要素中,生烃是基础、保存是关键,盖层是保存条件研究的核心内容。盖层的好坏及分布,直接影响着油气在储集层中的聚集和保存,是含油气系统的重要组成部分。随着对盖层重要性认识的不断提高,相关研究也逐渐活跃起来。

Downey(1984)<sup>[2]</sup>首次对盖层封闭性评价进行了全面系统的总结,认为盖层是油气勘探评价中的重要因素,有效的盖层往往是厚度大、侧向连续性好、排替压力高的塑性岩石;盖层评价需要从微观和宏观两个方面进行。Grunau(1981)<sup>[3]</sup>从全球范围内就油气盖层相关的问题进行了综述,总结认为最常见的盖层是页岩和蒸发岩,厚度几十至几百米;区域性蒸发岩盖层往往形成于萨布哈环境、区域性泥页岩盖层形成于海浸、海退层序体系;扩散速率和裂缝的形成与演化是盖层评价的重要参数。

AAPG先后于1983、1993和2002年举办了针对盖层和油气保存方面的专题研讨会,提供了盖层封闭性研究领域的知识交流平台,形成了盖层封闭性研究相关的学术论文摘要集,并出版了多本专著和论文集。1988年出版了《Traps and Seals》<sup>[4]</sup>、1997

年出版《Traps, Seals and Petroleum System》<sup>[5]</sup>、2003年出版《Clay Seals of Oil and Gas Deposits》<sup>[6]</sup>、2005年出版《Evaluating Fault and Cap Rock Seals》<sup>[7]</sup>的文集或专著,对盖层以及断层封闭机制、影响因素等进行了专门的讨论和深入的研究。

NPF(挪威石油地质协会)也于1996年和2000年分别召开了2次关于盖层以及断裂封闭性的专题研讨会,并于1997年和2002年分别出版了《Hydrocarbon Seals - Importance for Exploration and Production》<sup>[8]</sup>和《Hydrocarbon Seal Quantification》<sup>[9]</sup>2本专辑,专门对盖层和断裂封闭性进行讨论。

近几年来,油气盖层的研究向着包括沉积学、层序地层学、岩石矿物学、岩石物理学、岩石力学、地球化学、分子扩散理论、流体岩石相互作用理论等多学科方向发展。受到较多关注的研究包括:通过沉积学、岩石矿物学、成岩演化等综合评价盖层封盖性能;通过蒸发岩的研究来评价区域勘探潜力;通过孔隙流体压力、应力、岩石物理、地质力学等综合分析盖层完整性;通过多相流体特性来研究储集层差压封闭机制。

随着对优质盖层重要性认识的深化,2006年以来,针对膏盐岩盖层的研究迅速增多<sup>[10]</sup>。国家油气重大专项、国家海相碳酸盐岩973项目、石油化工联合基金项目及油田企业科研项目的相继实施,逐渐形成了盖层物性研究为基础,盖层力学行为研究为重点,构造变形过程及成藏过程中盖层有效性为关键的研究流程,盖层研究进入了深化阶段。

## 2 国外研究现状

从调研情况来看,国际上研究盖层较多的国家主要是美国、挪威、澳大利亚、英国、意大利、德国等,研究单位包括高校、政府机构和油气公司。研究内容主要包括泥岩盖层、蒸发岩类盖层、封闭作用机理、盖层完整性分析等几个方面。

### 2.1 泥岩盖层封闭性

在泥岩盖层封闭性研究方面,主要研究了泥岩发育环境、成分组成、成岩演化等方面对封盖性能的影响。雪佛龙Texaco公司的Almon和Castelblanco-Torres以及科罗拉多州立大学的Ethridge(2005)<sup>[11]</sup>研究了页岩盖层的沉积学和岩石学特征;澳大利亚CSIRO石油公司的Dewhurst和Raven以及Woodside能源公司的Jones(2002)<sup>[12]</sup>研究了页岩微观孔隙结构及岩石物理特征与封盖风险之间的关系。日本Oyo公司的Kameya等(2011)<sup>[13]</sup>研究了细粒沉积物的毛细管封盖效率;法国石油天然气研究中心的

Dewhurst、Sarda 以及英格兰 Newcastle 大学的 Aplin、Yang (1998)<sup>[14]</sup> 通过实验方法研究了泥岩盖层中孔隙度渗透率与压实作用的演化关系; 英国 Newcastle 大学的 Yang 和 Aplin (2010)<sup>[15]</sup> 建立了泥岩孔隙度—渗透率之间的关系。

美国纽约州大学的 Lash (2006)<sup>[16]</sup> 研究了盖层封闭性能的演化过程和机制; 澳大利亚 Adelaide 大学 Hunt 和南澳大利亚矿产能源资源办公室的 Boulton (2005)<sup>[17]</sup> 通过应力模拟研究了盖层封闭性能; 日本地球物理公司 Nakayama 和日本石油公司的 Sato (2002)<sup>[18]</sup> 研究了盖层封盖性能的预测方法。

## 2.2 泥岩盖层完整性

在盖层完整性研究方面, 主要通过储层孔隙流体超压、应力环境、岩石力学参数、地质力学特征等方面探讨了水压裂缝或断裂重新活动对盖层封盖完整性的影响。挪威 Statoil 石油公司 Hermanrud 等 (2005)<sup>[19]</sup> 和 Sintef 石油公司 Lothe 等 (2005)<sup>[20]</sup> 研究了盖层封闭失效的原因; 挪威 Oslo 大学 Nygard、美国弗吉尼亚州大学 Gutierrez 和阿联酋 Høeg (2006)<sup>[21]</sup> 研究了泥页岩中塑性—脆性转化特征; 挪威的 Statoil 石油公司的 Teige 等 (2002)<sup>[22]</sup> 研究了盖层完整性的评价方法; 苏格兰大学 Lewis 等 (2002)<sup>[23]</sup> 对盖层封闭完整性进行了模拟。

英国 Newcastle 大学 Aplin 和加拿大阿尔伯特大学 Larte (2005)<sup>[24]</sup> 研究了泥岩盖层的流体泄漏特征; Cardiff 大学的 Cartwright 和 Huuse 以及 Newcastle 大学的 Aplin (2007)<sup>[25]</sup> 研究了盖层的封闭旁通问题; 德国 Aachen 大学的 Nollet、Hilgers 和 Urai (2005)<sup>[26]</sup> 研究了盖层流体通道的愈合作用。

挪威地质调查局的 Helset 等 (2002)<sup>[27]</sup> 研究了成岩演化与超压的关系; Oslo 大学的 Bjørlykke 和 Høeg (1997)<sup>[28]</sup> 研究了埋藏成岩作用对盖层应力、压实、流体特征等方面的影响; 英国 Newcastle 大学的 Rouainia、Glasgow 大学的 Pearce 以及 Heriot-Watt 的 Couples 等 (2006)<sup>[29]</sup> 研究了超压盆地中盖层行为的水力—地质力学模型; SINTEF 石油研究中心 Lothe 和 Borge 以及 Bergen 大学 Gabrielsen (2004)<sup>[30]</sup> 通过压力和应力的模拟建立了盖层水压裂缝发育的模型; 意大利 Terra 大学 Caputo 和英国 Bristol 大学 Hancock (1998)<sup>[31]</sup> 研究了应力周期性变化过程中裂隙产生特征; 美国 Shell 公司的 Ingram、德国 Aachen 大学地质系的 Urai 等 (1997)<sup>[32]</sup> 给出了较为完整的评价盖层完整性的流程并具体给出了毛管封闭、水压裂缝、构造破裂等的评价方法, 并进一步对泥岩特征在水压裂缝/构造裂缝对

泥岩盖层完整性影响中的作用进行了探讨<sup>[33]</sup>; 法国 Maine 大学 Mourgues 和 Bodet 等 (2011)<sup>[34]</sup> 通过孔隙压—应力耦合特征研究了盖层的完整性。

苏格兰大学 Couples 等 (2002)<sup>[23]</sup> 讨论了地质力学在盖层研究中的作用; 澳大利亚 CSIRO 石油公司 Dewhurst 和 Hennig (2003)<sup>[35]</sup> 研究了盖层泄漏与地质力学特征之间的关系, 石油科技研究中心的 Gartrell 和 Bailey 以及 Woodside 能源公司的 Brincat (2006)<sup>[36]</sup> 研究了评价隆起期后与断裂重新活动有关的盖层完整性和油气风险评价模型。

## 2.3 蒸发岩盖层封闭性

在蒸发岩盖层研究方面, 主要探讨了蒸发岩类盖层在世界各地油气勘探中的重要性, 并研究了蒸发岩类盖层封盖失效的风险。美国 Alabama 州大学的 Mancini 和 Puckett 以及 Wichita 州立大学的 Parcell 等 (2003)<sup>[37]</sup> 研究了美国墨西哥湾上侏罗统 Smackover 组蒸发岩盖层发育特征; 加拿大地质调查局的 Dewing 和 Obermajer (2009)<sup>[38]</sup> 研究了加拿大北极群岛地区的蒸发岩盖层发育特征, 地质调查局的 Chen、Osadetz 和 Li (2005)<sup>[39]</sup> 研究了加拿大 Albert Rainbow 地区蒸发岩发育特征; 前苏联莫斯科油气研究所的 Kuznetsov (1996)<sup>[40]</sup> 研究了俄罗斯克拉通盆地蒸发岩盖层发育情况; 俄国莫斯科大学的 Konyuhov 和 Maleki (2006)<sup>[41]</sup> 研究了波斯湾地区蒸发岩盖层发育特征; 德国联邦地质和自然资源研究院的 Grassmann 等 (2005)<sup>[42]</sup> 研究了德国北部 Mittelplate 油田蒸发岩盖层发育情况; 美国得克萨斯州矿业大学的 Wagner III 和 Jackson (2011)<sup>[43]</sup> 研究了盐岩的塑性流动对油气保存的影响。

美国 Oklahoma 大学的 Johnson (2008)<sup>[44]</sup> 研究了美国的蒸发岩岩溶作用; 西班牙的 Zaragoza 大学的 Gutiérrez 等 (2008)<sup>[45]</sup> 研究了西班牙蒸发岩岩溶的地质条件和环境。

## 2.4 盖层封闭机制

在盖层封闭机理方面, 主要研究了盖层超压封闭作用以及多相流体的封闭作用。美国 Auburn 州大学的 Lee 和 Williams (2000)<sup>[46]</sup> 研究了西得克萨斯 Delaware 盆地超压发育情况, 怀俄明州大学的 Iverson、Martinsen 和 Surdam (1994)<sup>[47]</sup> 研究了超压状态下两相流体的封闭机制, Oklahoma 大学的 Lee 和 Deming (2002)<sup>[48]</sup> 提出了新的毛细管压力计算模型, 康奈尔大学的 Revil、法国欧洲地质教育研究中心的 Pezard 和法国钻井实验室的 Larouziere (1998)<sup>[49]</sup> 认为两相流体毛管封闭作用是超压存在的重要原因; 挪威 Statoil 油气公司的 Bjørkum、

Walderhaug 和 Nadeau (1998)<sup>[50]</sup> 研究了超压封闭的物理控制因素, Statoil 油气公司的 Bolås、Hermanrud 和 Teige (2005)<sup>[51]</sup> 通过孔隙压力预测了盖层的封盖性能, Statoil 油气公司的 Wilson 和 Bolås (2005)<sup>[52]</sup> 研究了超压条件下两相流体的渗流特征, Statoil 油气公司的 Teige、Hermanrud、Thomas 等 (2005)<sup>[53]</sup> 通过实验说明了超压下两相流体中的油能封闭保留下来; 德国 Aachen 大学 Broichhausen、Littke 和 Hantschel (2005)<sup>[54]</sup> 研究了泥岩压实与超压产生的关系; 图尼西亚 Gabès 大学的 Akrouit 和 Ahmadi, Sfax 大学的 Montacer 以及法国 Nantes 大学 Ahmadi (2011)<sup>[55]</sup> 研究了超压盖层对油气的封盖特征。

### 3 国外主要的研究机构和人员

从上面可以看出, 世界上对盖层研究较多的国家依次主要有澳大利亚、挪威、美国、德国、英国、法国等, 其他的如加拿大、日本、意大利、俄罗斯、西班牙、阿联酋等国家或多或少都开展了相关的研究。

澳大利亚盖层方面研究较多的为澳大利亚阿德莱德大学澳大利亚石油学院, 研究人员有 Kovack、Mildren、Hunt 等, 该学院有封闭研究组 (Seal Research Group) 和应力、构造及地球物理研究组 (Stress, Structure and Seismic Group), 前者具有压汞法分析毛管压力、扫描电镜及 X 衍射分析泥岩结构、矿物组成的能力, 后者研究地应力和进行地质力学分析, 具有通过地质力学分析盖层完整性的能力。CSIRO 石油公司/澳大利亚石油合作技术研究中心盖层研究组也有不少研究人员进行盖层方面的研究, 如 Dewhurst、Raven、Henning、Gartrell、Bailey、Underschultz、Raven 等。澳大利亚 Shell 国际勘探开发技术服务中心 Ingram 也做了大量的研究。此外, 研究人员还有 Woodside 能源公司的 Brincat 和南澳大利亚矿产能源资源办公室的 Boulton。

挪威国家石油公司技术研究中心针对盖层封闭机制、盖层完整性、盖层和断层封闭模拟等开展了不少的研究, 研究人员主要有 Teige、Hermanrud 等。此外还有 Sintef 石油公司石油研究中心的 Lothe, Bergen 大学 Gabrielsen, 地质调查局的 Helset, Oslo 大学 Nygard、Bjørlykke、Høeg 等。

美国也有较多的研究机构和研究人员。主要有纽约州大学的 Lash, 雪佛龙 Texaco 公司的 Almon 和 Castelblanco-Torres, 科罗拉多州立大学的 Ethridge, Virginia 州大学 Gutierrez, Oklahoma 大学的 Johnson、Lee 和 Deming, Alabama 州的 Man-

cini 和 Puckett, Wichita 州立大学的 Parcell, 得克萨斯州矿业大学的 Wagner III 和 Jackson, Auburn 州立大学的 Lee 和 Williams, 怀俄明州大学的 Iverson、Martinsen 和 Surdam。

德国的主要研究机构为 Aachen 大学地质系, 研究方向包括盐构造分析、断层封闭和盖层评价、应力分析等; 主要研究人员如 Nollet、Hilgers、Urai、Broichhausen、Littke、Hantschel。此外还有德国联邦地质和自然资源研究院的 Grassmann 等。

英国主要有 Newcastle 大学的 Aplin、Yang、Rouainia, Glasgow 大学的 Pearce, Heriot-Watt 大学的 Couples, Cardiff 大学的 Cartwright 和 Huuse, 苏格兰大学的 Lewis 和 Couples, Bristol 大学的 Hancock 等。

法国主要有法国石油天然气研究中心的 Dewhurst、Sarda, Maine 大学的 Mourgues 和 Bodet, 法国欧洲地质教育研究中心的 Pezard, 法国钻井实验室的 Larouziere, Nantes 大学 Ahmadi 等。

加拿大的主要研究人员有阿尔伯特大学的 Larter、加拿大地质调查局的 Dewing、Obermajer、Chen、Osadetz、Li 等。

日本的研究机构和研究人员包括日本应用地质株式会社的 Hiroshi Kameya, 日本地球物理公司的 Nakayama 和日本石油公司的 Sato。他们研究盖层颗粒大小与封闭能力的关系, 并给出了盖层封盖能力评价的一般流程。

俄罗斯的包括莫斯科大学的 Konyuhov 和 Maleki。意大利的包括 Palermo 工程学院的 Liguori、Manno、Mortellaro 以及意大利 Terra 大学 Caputo。西班牙的包括 Zaragoza 大学的 Gutiérrez 等。

### 4 国内研究简况

由于我国含油气盆地, 特别是古生界海相油气盆地, 经历了漫长而复杂的构造演化过程, 油气保存条件一直是油气勘探的主要风险所在。所以, 国内的一些教育科研机构及石油公司也针对油气盖层保存方面开展了不少的研究。

大庆石油学院的吕延防等 (2000)<sup>[56]</sup>、付广等 (2006)<sup>[57]</sup> 开展了超压盖层定量评价研究; 黄劲松等 (2009)<sup>[58]</sup>、李建民等 (2006)<sup>[59]</sup> 开展了多参数盖层评价方法; 康德江等 (2006)<sup>[60]</sup> 对盖层宏观特征—地球物理信息—微观特征相结合方法进行了综合; 付广等 (1997)<sup>[61]</sup> 利用地震、测井资料开展了对盖层的评价。中石化石油勘探开发研究院的金之钧等<sup>[10,62]</sup> (2010, 2006) 较早开展了膏盐岩盖层封盖性研究; 吴世祥、金之钧等 (2007)<sup>[63]</sup>、张军涛

等(2011)<sup>[64]</sup>开展了盖层水岩相互作用方面的研究;周雁等(2011)<sup>[65]</sup>开展了盆地基底演化、构造变形与盖层关系的研究;范明等(2011)<sup>[66]</sup>通过突破压力和比表面积联合判识盖层封闭性能,俞凌杰等(2011)<sup>[67]</sup>开展了盖层封闭机理和封闭能力的定量评价。中国地质大学邓军等(2005)<sup>[68]</sup>开展了盆地基底演化、构造变形与盖层关系的研究。西南石油学院的张祥等(1997)<sup>[69]</sup>通过研究认为高孔隙度、高成烃浓度和低突破压力盖层在含高矿化度地层水后,突破压力大幅提高、扩散系数大幅下降,可以作为一个有效盖层<sup>[69]</sup>。

## 5 泥岩盖层研究主要认识和进展

### 5.1 沉积环境

从宏观上看,盖层发育与沉积环境有着密切的关系。Корчагин(1999)<sup>[70]</sup>研究了盖层在油气藏形成与分布的作用及世界区域盖层发育层位,认为任何沉积盆地的含油气潜力皆与盖层的质量、数量及分布面积有关,在可靠盖层与良好储集岩或者半盖层与较差储集岩的匹配关系上存在一定的规律性。分析世界许多含油气盆地大油气田盖层及储集层的地层分布特点表明,世界上最佳盖层大都属于一定的层位。这种现象可能与全球海平面升降振荡作用有关。在海进初期及海退末期最利于形成可靠盖层,而在海进末期及海退初期形成储集岩。世界性区域盖层与储集岩有类似之处,即有一定的等时性,而其岩性可以是泥岩或者是盐层。

近年来,已经开始了在层序地层研究体系内,研究盖层的封闭性<sup>[71]</sup>。在层序格架内页岩成分和结构的变化为盖层风险评价奠定了基础,页岩相的封盖性在层序格架内部展示出系统的变化。Almon等(2002)<sup>[71]</sup>用层序地层学的方法研究了怀俄明州 Cheyenne 西部上侏罗统 Lewis 组页岩和泥岩在岩石物理特征上的变化规律,建立了封闭性盖层分布的预测模型。认为在水进积体系域顶部和凝结段发育的页岩具有优秀的封盖性能,主要产生在海洋沉积体系的远端;高水位体系域和低水位体系域沉积的泥/页岩因含有较多的硅质碎屑物质(>25%),封闭能力降低。另外,沉积速率、早期海相胶结、沉积构造均影响封盖性。

Lash等(2006)<sup>[16]</sup>研究了纽约州西部 Catskill 三角洲杂岩体 Dunkirk 黑色页岩盖层发育特征,认为 Dunkirk 黑色页岩的沉积环境以及在层序地层中的位置控制着盖层的岩性特征,进而控制着盖层的封闭性能。高水位体系域的还原环境下沉积的

泥岩有利于有机质的富集保存并能形成细的层理结构,这样的泥岩具有非常高的封闭能力。缺少生物扰动构造的沉积物,如钙质富粘土层,经历快速的机械压实、片状碎屑的重定向以及塑性有机质的挤压入孔,都进一步促使泥岩孔隙和孔吼的减小。

### 5.2 成分组成及内部结构

泥岩盖层的封盖能力随着沉积结构、构造、成分组成的变化而发生显著的变化。厚度大、颗粒细、塑性强、蒙脱石等粘土矿物成分含量高、富含灰质、富含沥青及分散有机质、具有平行微层理,是提高泥质岩封闭性的主要因素<sup>[70]</sup>。那些富含有机质岩层,包括富含干酪根的地层,在褶皱变形时,往往具有塑性特征。

Dewhurst(2002)<sup>[12]</sup>研究澳大利亚西北陆棚 Carnarvon 盆地 Muderong 页岩盖层时发现页岩为粘土支撑结构,遭受压实的粘土环绕在刚性的粉砂质颗粒之外,尽管发育有微裂缝,但都不连续。因而能有较高的毛细管压力,具有封闭 250 m 高气柱的能力。Dewhurst等(1998)<sup>[14]</sup>通过实验研究发现,泥岩孔隙度的降低主要是较大孔隙的破坏,颗粒较细的样品比颗粒粗的样品更具有可压实性。

对单一相流体,泥岩盖层有效压力、渗透率、毛细管突破压力和孔隙度之间的关系与泥岩颗粒大小分布以及粘土含量有着非常重要的关系。Yang 和 Aplin(2010)<sup>[15]</sup>发现孔隙度和渗透率之间的关系具有不确定性,可以差 2~3 个数量级。他们认为粘土(<2 μm)含量对渗透率和孔隙度之间的关系影响较大,并通过 376 个实验数据建立了垂直渗透率  $K$  与粘土(2 μm 以下)含量、孔隙比  $e$  的关系(相关系数达 0.93)(图 2)<sup>[15]</sup>;该关系式表明粘土的存在可以使相同孔隙度的岩石渗透率降低 2~5 个数量级。

Kameya等(2011)<sup>[13]</sup>研究了不同沉积物类型的毛细管封闭能力,发现不同类型沉积物在毛细管

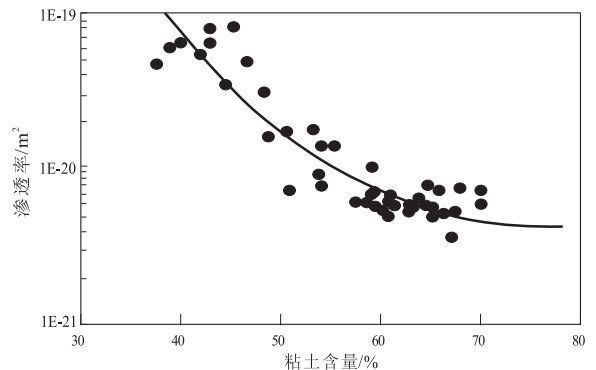


图2 泥岩渗透率与粘土含量关系

Fig. 2 Relationship between permeability and clay content in mud rocks

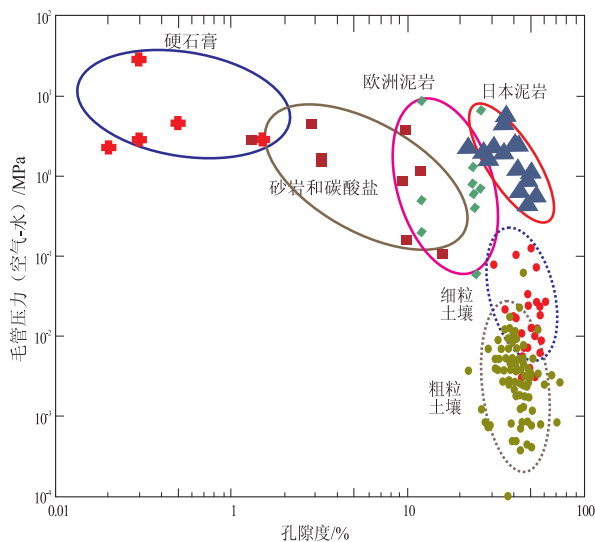


图3 不同类型岩石毛管压力与孔隙度关系<sup>[13]</sup>

Fig. 3 Relationship between entry pressure and porosity in different types of rock

压力、孔隙度、渗透率方面有着较大的差别(图3)。来自日本的细粒沉积物样品孔隙度虽然较大,但孔隙都比较小,主要是由于其中富含粘土造成的。

盖层毛管突破压力的大小由孔吼大小决定,孔吼大小与岩石颗粒大小有密切的关系。所以可以用颗粒大小来表征评价盖层封盖能力。Nakayama和Sato(2002)<sup>[18]</sup>统计世界范围内的90个油田,发现碎屑页岩(clastic shales)盖层等效颗粒大小主要在9~10 nm之间,为粉晶级别,比通常意义上的泥页岩盖层颗粒半径大,主要是因为封闭性能由其中的最大的孔吼决定。

泥/页岩内部通常具有一定的非均质性,影响其封盖性能。非均质性通常由蒙脱石含量、有机质含量、应力状态、应力历史、裂缝的发育以及孔隙流体的物理化学作用等因素影响。Dewhurst和Henning(2003)<sup>[35]</sup>通过测试一定应力条件下的页岩的声波特性来研究页岩内部的非均质性。发现纵横波速度比值 $V_p/V_s$ 与应力和蒙脱石含量有关。蒙脱石的含量显著影响着S波的速度,另外应力强度、裂缝方向等都影响着声波的非均质性。

### 5.3 成岩演化

众多研究者都认为,超过一定埋藏深度的泥岩盖层,封闭性变差。如前苏联学者乌斯认为,埋深4 000~6 000 m时,泥质盖层处于高温高压状态,塑性降低,岩石变脆,容易发生压缩脱水作用,产生裂缝,封闭性能减弱;付广和姜振学(1994)<sup>[72]</sup>认为,当泥岩埋深大于3 500 m时,压实接近极限,含水量减小,脆性增加,微裂缝产生后很难愈合,封闭

性变差;张树林和田世澄(1993)<sup>[73]</sup>认为,埋藏深度在1 500~3 500 m时,泥岩盖层的封盖状态最佳;周文等(1994)<sup>[74]</sup>认为,当泥岩埋深超过1 500 m时,随着成岩作用增强,岩石塑性降低,脆性增加,在超压和其它地应力作用下易产生微裂缝,排驱压力降低。

与上述关于泥岩盖层封闭性与埋深的关系所取得的认识相一致,过去一般认为高演化泥岩的封闭性差。高演化泥岩通常具有埋藏深度大、成岩作用强、有机质热演化程度高的特点,往往地层时代也较老,如中国南方寒武系泥岩和志留系泥岩。随着压实成岩程度的增强(晚成岩阶段B亚期以后),泥质岩中富含结合水的蒙脱石含量减少,可塑性逐渐下降,内部异常高的孔隙流体压力逐渐释放,泥质岩变为脆性,极易受构造应力作用产生裂缝,使其毛细管封闭能力变差(图4)<sup>[75]</sup>。

实验测试获得的盖层封闭参数与埋深的关系研究表明(图5),随着埋深增加,泥岩压实作用增强,孔隙度和中值半径由大变小,密度和突破压力由小变大,盖层质量逐渐变好<sup>[76]</sup>。

野外观察到的古老岩层的褶皱变形以及三轴抗剪抗压实验结果显示,深埋地下的高演化泥岩,仍然具有塑性特征,具有对天然气很强的封盖能力。一方面,围压(埋深)条件对盖层力学性质影响明显,随着围压的增加、泥质盖层的屈服极限、强度极限以及抗剪强度、抗压强度都增加(图6,7),而且,围压越大,塑性变形阶段越长<sup>[77]</sup>;另一方面,围压条件还对岩石的变形方式有影响,完整结构岩体在无围压条件下破裂方式表现为张破裂,中等围压下为剪破裂,高围压下出现糜棱化塑性变形<sup>[78]</sup>。

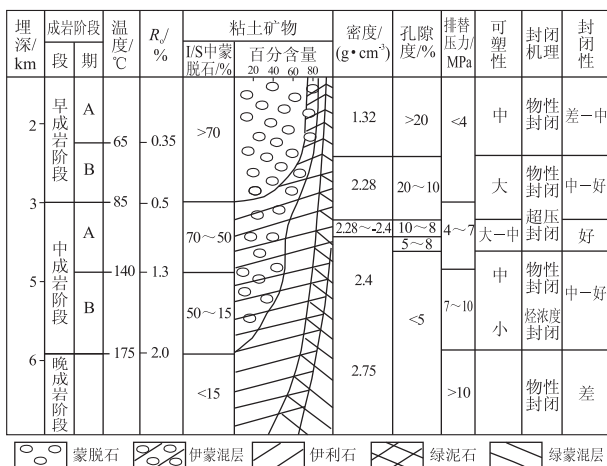


图4 盖层封闭性演化<sup>[75]</sup>

Fig. 4 Evolution of sealing capacity in cap rocks

○ 蒙脱石    [Diagram] 伊蒙混层    [Diagram] 伊利石    [Diagram] 绿泥石    [Diagram] 绿蒙混层

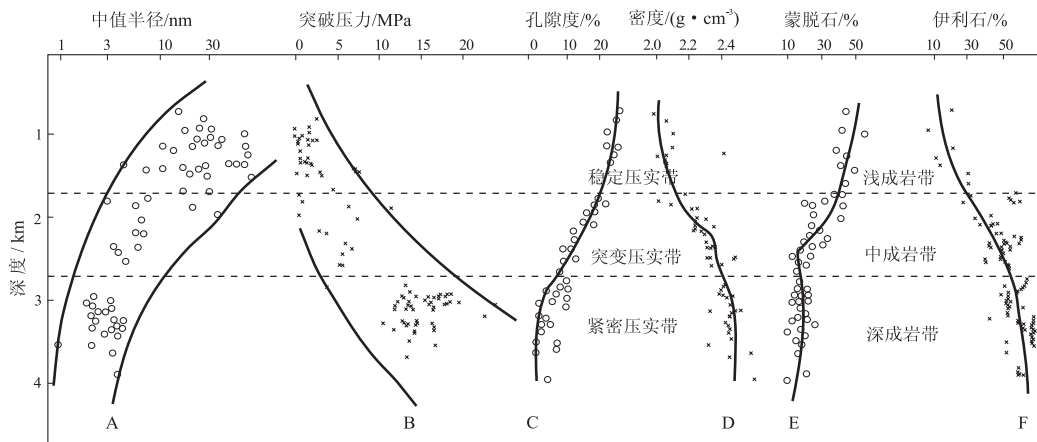


图 5 盖层封闭参数与埋深关系<sup>[76]</sup>

Fig. 5 Relationship between sealing parameters and burial depth

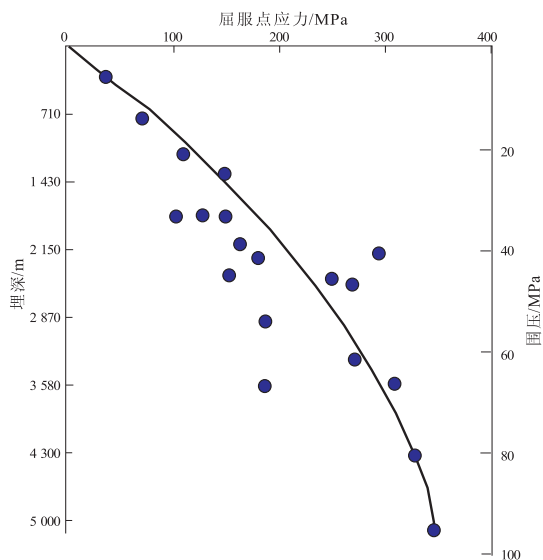


图 6 围压(埋深)与屈服应力的关系<sup>[77]</sup>

Fig. 6 Relationship between confining pressure/burial depth and yielding point stress

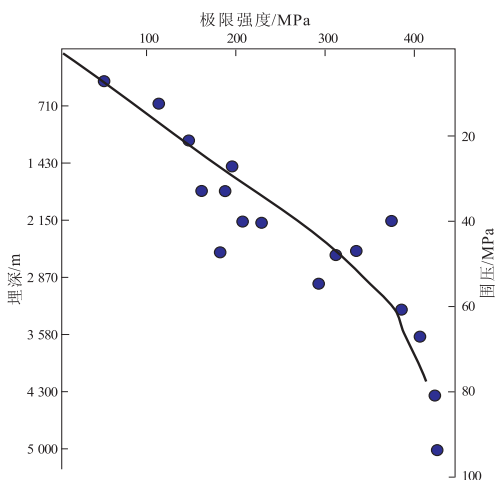


图 7 围压(埋深)与强度极限的关系<sup>[77]</sup>

Fig. 7 Relationship between confining pressure/burial depth and ultimate strength

四川盆地已发现的油气田也表明,高演化泥质盖层在深埋地下时具有非常好的封闭性能。例如威远气田震旦系气藏,盖层为下寒武统牛蹄塘组泥页岩,厚度 410 ~ 540 m,现今埋深小于 3 000 m,古埋深 7 000 ~ 8 000 m,有机质热演化程度高, $R_o$  已达 4.9%。据岩石力学分析,该页岩属可塑性较强的良好盖层<sup>[79]</sup>,测试得到的岩石饱和挤压强度为 42.4 ~ 46.6 MPa,抗剪强度为 5.2 ~ 7.6 MPa。

综合以上分析认为,一方面,盖层封盖能力与压实程度密切相关,而与成岩演化程度关系不明显。在持续埋藏条件下,泥质盖层主要表现为孔隙度逐渐降低、渗透率不断减小、排替压力增大,封闭性增强。深埋地下的高演化泥岩,只要后期构造改造作用过程中没有遭受破坏,同样可以具有优质的封闭性能<sup>[77]</sup>。

## 6 蒸发岩类盖层

### 6.1 蒸发岩类封盖特征

蒸发岩的形成是石盐、石膏等矿物从水溶液中结晶析出,通常较为致密,具有很高的毛管突破压力,具有很强的油气封堵能力。蒸发岩类由于在一定埋深的温度和压力下具有塑性的特征,能防止断裂裂缝的破坏,所以能形成良好的油气盖层。

除通常意义上作为上覆盖层对下面储层中油气产生封盖外,蒸发岩向上刺穿穹窿也能对油气产生侧向封堵。Grassmann 等(2005)<sup>[42]</sup>研究德国北部 Mittelplate 油田,发现二叠系蒸发岩向上刺穿形成的穹窿对下侏罗统砂岩油藏形成了侧向封堵作用(图 8)。

此外蒸发岩类在埋藏过程中,孔隙水保持着较高的盐度,阻止了外来流体的进入及对有机质的氧化破坏,从而能使有机质保存下来直至后期成熟生

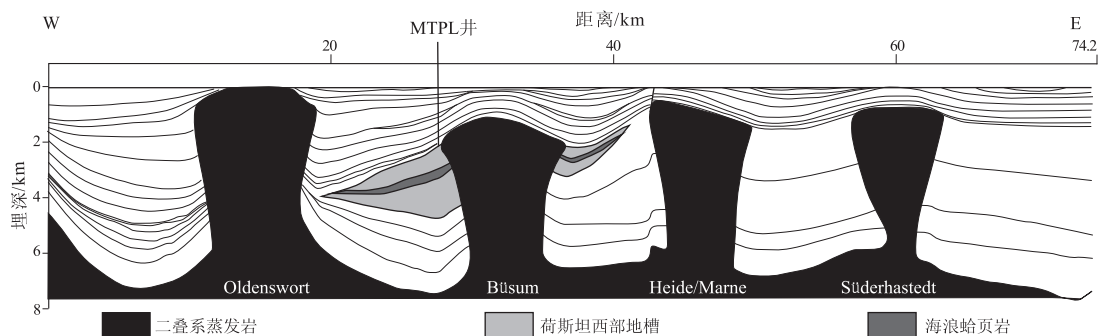


图8 Mittelplate 油田东西向剖面蒸发岩侧向封堵示意图<sup>[42]</sup>

Fig. 8 Lateral sealing of evaporites in an east-west cross section in Mittelplate oil field

烃,并且蒸发岩对所生油气又进一步起到了封闭保存作用。

## 6.2 蒸发岩类盖层的重要性

由于蒸发岩与油气之间密切的关系,长期以来在世界各个盆地油气勘探潜力评价时一直受到重视。如 Surkov 等(1991)<sup>[80]</sup>认为东西伯利亚 Riphean 盆地上文德统泥质岩石和蒸发岩构成优质的盖层;Kuznetsov(1996)<sup>[40]</sup>认为下二叠统区域性分布的盐岩和局部发育的膏盐岩构成了俄罗斯东北克拉通盆地的盖层;Dewing 和 Obermajer(2009)<sup>[38]</sup>认为加拿大北极群岛地区石炭系蒸发岩对下古生界油气保存起着重要的作用;Chen 等(2005)<sup>[39]</sup>认为加拿大阿尔伯特西北部 Rainbow 坳陷中泥盆油气得益于区域性蒸发岩盖层的存在;Mancini 等(2003)<sup>[37]</sup>认为美国墨西哥湾东北部密西西比内盐盆地区上三叠统 Smackover 和 Buckner 碳酸盐岩作为储层、无水石膏层作为盖层。Duncan 等(1998)<sup>[81]</sup>研究发现爱尔兰中部海盆由于三叠系 Mercia 盖层缺少膏盐岩导致下面三叠系 Sherwood 砂岩中油气勘探失利;但东部盆地中,因三叠系 Mercia 盖层含有膏盐岩,下面三叠系 Sherwood 砂岩中发现了大量油气。波斯湾盆地是世界上油气最富集的地区,中新生界发育稳定的以碳酸盐岩、蒸发岩和泥岩为主的沉积,形成泥岩为优质的烃源岩、碳酸盐岩为储集岩、蒸发岩为盖层的完美组合<sup>[41]</sup>。

据统计,全世界沉积盖层中,盖层为膏盐岩的油气田占油气田总评价单元数的 8%,但它控制了 55% 的油气储量<sup>[10]</sup>。我国近年来的一些重大天然气田的发现多与膏盐岩盖层密切相关。我国 13 个主要含气盆地,其中 4 个盆地发育膏盐岩,发现气田 171 个。到 2009 年底,已探明天然气储量  $23\ 660 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,探明石油地质储量  $208\ 940.33 \times 10^4 \text{ t}$ ,显示膏盐岩下油气勘探潜力巨大<sup>[10]</sup>。膏盐岩盖层由于封闭性能较好,即使厚度较薄(一般大

于 1m)也能封闭形成油气藏<sup>[10]</sup>。

当埋藏超过一定的深度时,由于上覆岩层压力和地层温度的增加,蒸发岩类盖层在构造变形挤压作用下具有一定的塑性特征,使其即使在构造变形强烈的条件下,仍可保持盖层的封闭性。对世界最大的 25 个气田特征分析表明,所有分布在逆掩断层带内的气田,都依赖于其具有蒸发岩盖层<sup>[3,82]</sup>。然而在埋藏浅的地层中,蒸发岩则变为相当脆性的地层,因此,地表、近地表蒸发岩样品分析测试数据可能难以反映地下实际情况。

世界上所有的逆掩断层带,地层变形和断裂活动都非常强烈,在这类地区进行油气圈闭的盖层评价时,塑性就成为很重要的一个因素。对于怀俄明和犹他州中央逆掩断层带的油气圈闭来说,蒸发岩盖层的存在是一重要因素<sup>[82]</sup>。威远气藏气水界面海拔约为  $-2\ 374.5 \text{ m}$ ,与膏盐尖灭线相近,表明现今埋深大于 2 000 m 的中寒武统膏岩盖层的分布,对最终成藏具有明显的控制作用。

## 6.3 蒸发岩盖层的破坏

受大气降水、地层水等流体作用影响,蒸发岩类会发生岩溶作用,形成溶蚀洞穴或导致蒸发岩的局部缺失等,导致蒸发岩盖层封盖失效,在蒸发岩盖层评价时需要注意这方面的风险。

Liguori 等(2008)<sup>[83]</sup>发现了西西里地区蒸发岩由于大气降水或地层水作用发生的岩溶作用。Johnson(2008)<sup>[44]</sup>研究发现美国 48 个相连的州中的 32 个都有蒸发岩的发现,占陆地面积的 40%。野外露头蒸发岩岩溶作用形成了塌陷坑、洞穴、暗溪等现象。许多蒸发岩地区见有老的岩溶作用,如蒸发岩中的溶蚀角砾、角砾柱、塌陷层、塌陷构造等现象。除大气降水、地层水作用会导致蒸发岩岩溶外,人类的活动,如石盐开采、石油注水开发等也能导致蒸发岩的岩溶作用。Gutiérrez 等(2008)<sup>[45]</sup>研究认为西班牙中生代地层中蒸发岩岩溶作用是由



于地表水的水化学退化作用造成的。

除岩溶作用之外,蒸发岩在一定水动力和区域应力环境下会发生侧向流动或向上刺穿,导致某些区域蒸发岩的缺失而形成蒸发岩窗,造成盖层封闭失效。在蒸发岩窗存在的区域,油气向上运移至盐上圈闭中聚集成藏<sup>[84-85]</sup>。墨西哥湾、坎波斯盆地以及安哥拉海域都发现了相关的油气运移<sup>[43]</sup>。

### 7 盖层封闭机制

尽管发现毛管物理封闭、超压封闭和毛管多相封闭等多种封闭类型,但是,毛管物理封闭作用是最基本的封闭机制。

#### 7.1 盖层超压封闭作用

##### 7.1.1 盖层超压的产生

在正常情况下,泥质岩的压实程度随深度的增加而增强。随着埋深的增加,泥岩中的流体被排出,岩石孔隙度变小,岩石变得致密。压实初期,岩石孔径较大,渗透率较高,吸附阻力较小,孔隙水容易排出,没有明显的孔隙流体超压。随着地层埋藏深度的增加,地层压实程度增强,岩石密度增大,渗透率降低,吸附阻力增大,正常静水压力梯度下流体无法排泄,产生孔隙水滞流现象,泥岩层产生欠压实。处于欠压实状态的泥岩中的流体部分地承受上覆岩层的压力,这样泥岩中流体压力就超过正常的静水压力,从而形成异常高压(超压)(图9)。

此外,化学成岩作用、流体的增加(热膨胀、蒙脱石脱水和伊利石化、干酪根生烃、油气转化)等也能导致储集层孔隙超压的产生。25%~80%的现

今孔隙流体超压的产生与化学成岩作用有关。Helset 等(2002)<sup>[27]</sup>认为深层超压的形成主要由于砂岩中石英的压溶和胶结以及泥岩中蒙脱石向伊利石的转变,导致孔隙体积减少,产生超压。并认为深层超压的产生可能不是主要由于早期欠压实产生的超压而保存下来的,而是后期成岩作用造成的。因为,经过漫长的地质历史时期,早期形成的超压会逐渐释放掉。储集岩内由于烃类的聚集、油气转化<sup>[46]</sup>等作用也会产生较高的孔隙压力(超压)。

超压现象在世界年轻的沉积盆地中分布十分广泛,它主要存在于快速沉积的厚层泥质岩中。泥岩产生超压的主要原因除压实作用外,还有粘土矿物脱水作用、烃类生成作用、地壳抬升、剥蚀作用以及胶结作用等,其中最主要的地质原因可能是压实作用和油气生成作用<sup>[73]</sup>。

Broichhausen 等(2005)<sup>[54]</sup>充分考虑了泥岩的机械压实作用、化学压实作用、有机质生烃、粘土矿物含量、孔隙率等多种因素,建立了孔隙流体压力的预测模型。用该模型研究了北海北部的有效应力,一个具有强烈超压的3D实例,异常高压是在地层埋藏过程中伴随生烃产生的,机械压实和化学压实作用保证了超压能够保存下来。

##### 7.1.2 超压封闭作用

超压封闭虽不如物性封闭那样广泛,但它是一种重要的天然气藏盖层封闭机理,在泥岩盖层中较为常见。不少学者研究表明,超压泥岩盖层封闭天然气的的能力明显优于常规泥岩盖层的物性封闭能力。主要原因是游离相气体要穿过盖层必须克服两种阻力,即下段正常压实和中部异常孔隙流体压力,显然,二者的综合阻力大于压实泥岩毛细管压力。这种依靠孔隙流体超压阻止天然气向上渗漏的封闭就是压力封闭,也称超压封闭<sup>[87-88]</sup>。

Magara (1993) 认为,压力封闭既可以封闭水溶相烃类,也可以封闭游离相烃类;压力封闭层常与毛细管封闭层相伴随,两者联合的封闭效应比单纯的毛细管封闭更有效<sup>[89]</sup>。吕延防等(2000)认为盖层超压的封闭能力是该盖层超压值的2倍,超压盖层的总封闭能力是盖层底部岩石排替压力与盖层超压2倍值之和<sup>[56]</sup>。

Akrouit 等(2011)<sup>[55]</sup>研究突尼斯南部 Saharan 台地时发现,当上覆超压地层存在,超压层系能阻止烃类的向上运移,从而在超压层系之下形成油气的聚集和保存(图10)。

盖层超压的存在还表明了盖层本身具有很高的毛管封闭能力。Nordgård Bolås 等(2005)<sup>[86]</sup>建

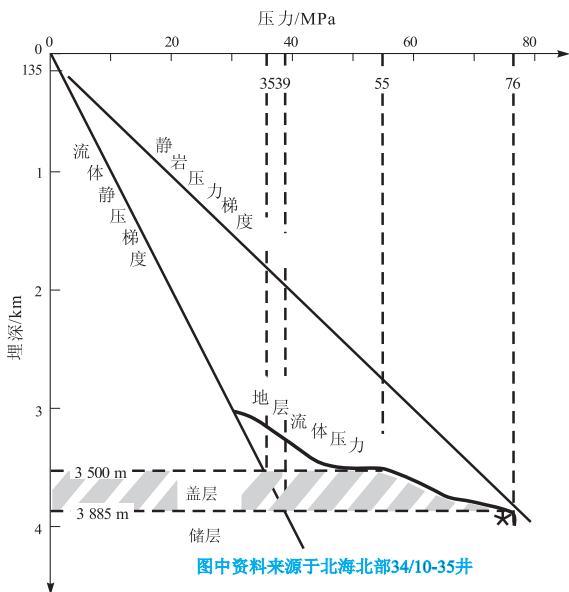


图9 泥岩盖层超压示意<sup>[86]</sup>

Fig.9 Overpressure of mud rock seals

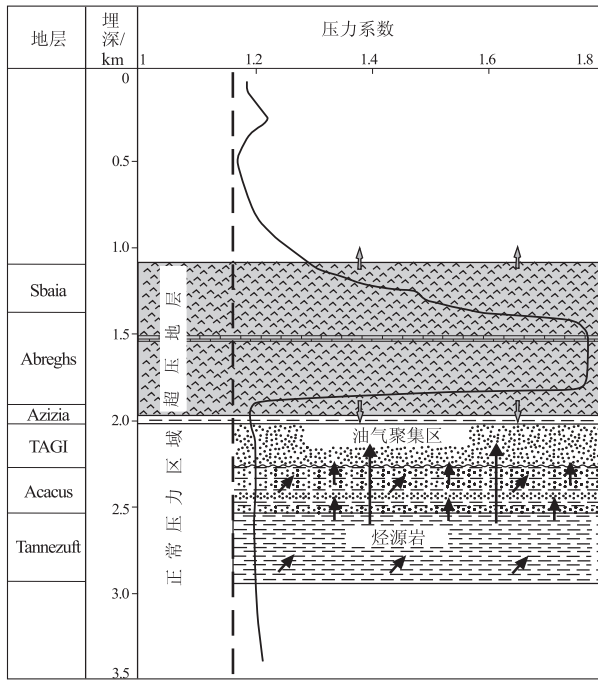


图10 Ghadames盆地盖层超压与油气聚集关系<sup>[55]</sup>

Fig. 10 Relationship between cap rock overpressure and hydrocarbon accumulation in Ghadames Basin

立了通过孔隙压力评价盖层封闭能力的方法。首先通过测试的盖层超压梯度推测盖层的渗透率,再通过渗透率和孔吼半径的关系来计算孔吼半径,最后结合孔隙流体物理性质计算盖层毛管封闭能力。

## 7.2 毛管多相封闭作用

在异常压力储层中毛细管封闭是目前研究的热点。要稳定封闭储层内的压差 1 Ma 所需的最小渗透率为  $(1 \sim 100) \times 10^{-23} \text{ m}^{2[90]}$ 。Lee 和 Williams(2000)<sup>[46]</sup> 研究西得克萨斯 Delaware 盆地上古生界地层中的超压现象,发现压差要持续存在 250Ma 应该需要  $10^{-11}$  达西的低渗透盖层的存在,但常规泥岩渗透率比这个值高好几个数量级,并不能对储层超压起到封闭作用。

美国 Oklahoma 大学的 Lee 和 Deming(2002)<sup>[48]</sup> 在前人研究的基础上,结合 Anadark 盆地实际地质情况,提出了新的毛细管压力计算模型,认为砂泥互层的复合盖层中毛细管作用具有可加性,为解决盆地内部储层异常压力的封闭问题提供了新的解决思路。

但事实上,储集岩内压力单元的完全封闭需要有两相或多相流体的存在。对水湿性的盖层岩石来说,水充填于盖层的孔隙中,并以很强的作用力吸附在颗粒表面。对要通过盖层的油气来说可以视为要通过完全封闭的塑性盖层,需要比通过干的泥岩盖层大得多的压力。

Iverson 等(1994)<sup>[47]</sup> 研究怀俄明州 Powder River 盆地超压封存单元时认为任何岩石类型都不能对单相流体产生有效的封盖,仅单相流体存在的情况下,超压并在较短的地质时期散失;只有在多相流体存在的条件下,压力封存单元才能长期存在。

Björkum 等(1998)<sup>[50]</sup> 认为对水湿性盖层来说,储层顶部至盖层底部的压力差可以无限大,意味着超压并不能促使油藏中的烃类通过水湿性盖层,超压油藏也不一定比非超压油藏更易于发生毛细管泄漏;压力梯度的存在使水持续的从油藏向盖层流动。Pezard 和 Larouziere(1998)<sup>[91]</sup> 研究 ODP975 点时,认为单纯的差异压实作用不足以形成巨大的压差现象并保存下来,两相流体毛管封闭作用是超压存在的重要原因。Teige 等(2005)<sup>[53]</sup> 通过实验说明了在足够大的水压力差的作用下,水能通过饱含油的水湿性砂岩样品,但油仍被保留下来。

## 8 结论

世界各地许多石油公司、高校、政府机构等广泛开展了有关油气盖层方面的研究。油气盖层的研究经历了准备阶段、奠基阶段、发展阶段、完善阶段,目前正在向深化阶段发展,逐渐由早期侧重于岩性、沉积相的研究发展至现今的包括沉积、成岩、地质力学、岩石物理等多学科综合研究的方法,由盖层物性研究为主逐渐发展成为变形过程及成藏过程中盖层有效性研究。蒸发岩类是世界各地重要的油气盖层,后期岩溶改造会对其封盖性能产生一定的影响。泥岩的沉积结构、构造、成分组成,特别是粘土含量对泥岩盖层封闭性能影响较大;深埋地下的高演化泥岩仍具有优质的封盖性能。差异压实、化学成岩作用、孔隙流体的增加(流体热膨胀、蒙脱石脱水和伊利石化、干酪根生烃、油气转化)等能导致储集层孔隙超压的产生,形成超压封闭作用。水、油两相流体的存在使盖层对油的封闭能力大幅增加,形成良好的封闭作用。

### 参考文献:

- [1] Dott R H, Reynolds M J. Source book for petroleum geology: Semicentennial commemorative volume[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1969: 1-471.
- [2] Downey M W. Evaluating seals for hydrocarbon accumulation[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(11): 1752-1763.
- [3] Grunau H R. Worldwide review of seals for major accumulations of natural gas (abs.) [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65: 933.
- [4] Johannesen V. Traps and Seals[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 1988: 1-355.

- [5] Surdam R C. Seals, Traps & the Petroleum System (AAPG Memoir 67) [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 1997; 1-355.
- [6] Osipov V I, Sokolov V N, Eremeev V V. Clay Seals of Oil and Gas Deposits [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 2003; 1-284.
- [7] Boulton P, Kaldi J. Evaluating Fault and Cap Rock Seals (AAPG Hedberg Series) [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 2005; 1-268.
- [8] Møller-Pedersen P, Koestler A G. Hydrocarbon Seals - Importance for Exploration and Production [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1997; 1-262.
- [9] Koestler A G. Hydrocarbon Seal Quantification [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2002; 1-280.
- [10] 金之钧, 周雁, 云金表, 等. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31 (6): 715-724.
- [11] Almon W R, Dawson W C, Ethridge F G, et al. Sedimentology and petrophysical character of Cretaceous Marine Shale sequences in foreland basins—potential seismic response issues [C]// Boulton P, Kaldi J. AAPG Hedberg Series 2: Evaluating fault and cap rock seals. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 2005; 215-235.
- [12] Dewhurst D N, Jones R M, Raven M D. Microstructural and petrophysical characterization of Muderong Shale: application to top seal risking [J]. Petroleum Geoscience, 2002, 8(4): 371-383.
- [13] Kameya H, Ono M, Takeshima J, et al. Evaluation for the capillary-sealing efficiency of the fine-grained sediments in Japan [J]. Energy Procedia, 2011, 4(4): 5146-5153.
- [14] Dewhurst D N, Aplin A C, Sarda J P, et al. Compaction-driven evolution of porosity and permeability in natural mudstones: an experimental study [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103 (B1): 651-661.
- [15] Yang Y, Aplin A C. A permeability - porosity relationship for mudstones [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27 (8): 1692-1697.
- [16] Lash G G. Top seal development in the shale-dominated Upper Devonian Catskill Delta Complex, western New York State [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(3): 317-335.
- [17] Hunt S, Boulton P J. Distinct-element stress modeling in the Penola Trough, Otway basin, South Australia [C]// Boulton P, Kaldi J. AAPG Hedberg Series 2: Evaluating fault and cap rock seals. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 2005; 199-213.
- [18] Nakayama K, Sato D. Prediction of sealing capacity by the equivalent grain size method [J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 2002, 11 (1): 51-60.
- [19] Hermanrud C, Bols H M N, Teige G M G. Seal Failure Related to Basin-scale Processes [C]// Boulton P, Kaldi J. AAPG Hedberg Series 2: Evaluating fault and cap rock seals. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 2005; 13-22.
- [20] Lothe A E, Borge H, Sylta. Evaluation of Late Cap Rock Failure and Hydrocarbon Trapping Using a Linked Pressure and Stress Simulator [C]// Boulton P, Kaldi J. AAPG Hedberg Series 2: Evaluating fault and cap rock seals. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 2005; 163-178.
- [21] Nygard R, Gutierrez M, Bratli R K, et al. Brittle - ductile transition, shear failure and leakage in shales and mudrocks [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(2): 201-212.
- [22] Teige G M G, Hermanrud C, Kløfving O S, et al. Evaluation of caprock integrity in the western (high-pressure) Haltenbanken area - a case history based on analyses of seismic signatures in overburden rocks [J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 2002, 11 (6): 233-242.
- [23] Lewis H, Olden P, Couples G D. Geomechanical simulations of top seal integrity [J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 2002, 11 (1): 75-87.
- [24] Aplin A C, Larte S R. Fluid flow, pore pressure, wettability, and leakage in mudstone cap rocks [C]// Boulton P, Kaldi J. AAPG Hedberg Series 2: Evaluating fault and cap rock seals. Tulsa: American Association of Petroleum Geologist, 2005; 1-12.
- [25] Cartwright J, Huuse M, Aplin A. Seal bypass systems [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (8): 1141-1166.
- [26] Nollet S, Hilgers C, Urai J. Sealing of fluid pathways in overpressure cells: a case study from the Buntsandstein in the Lower Saxony Basin (NW Germany) [J]. International Journal of Earth Sciences, 2005, 94 (5-6): 1039-1055.
- [27] Helset H M, Lander R H, Matthews J C, et al. The role of diagenesis in the formation of fluid overpressure in clastic rocks [J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 2002, 11 (1): 37-50.
- [28] Bjørlykke K, Høeg K. Effects of burial diagenesis on stresses, compaction and fluid flow in sedimentary basins [J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14 (3): 267-276.
- [29] Rouainia M, Lewis H, Pearce C, et al. Reynolds. Hydro-geomechanical modelling of seal behaviour in overpressured basins using discontinuous deformation analysis [J]. Engineering Geology, 2006, 82 (4): 222-233.
- [30] Lothe A E, Borge H, Gabrielsen R H. Modelling of hydraulic leakage by pressure and stress simulations and implications for Biot's constant: an example from the Halten Terrace, offshore Mid-Norway [J]. Petroleum Geoscience, 2004, 10(3): 199-213.
- [31] Caputo R, Hancock P L. Crack-jump mechanism and its implications for stress cyclicity during extension fracturing [J]. Journal of Geodynamics, 1998, 21 (1): 45-60.
- [32] Ingram G M, Urai J L, Naylor M A. Sealing processes and top seal assessment [J]. Norwegian Petroleum Society Special Publication, 1997, 7 (1): 165-174.
- [33] Ingram G M, Urai J L. Top-seal leakage through faults and fractures; the role of mudrock properties [J]. Geological Society, London, Special Publication, 1999, 158: 125-135.
- [34] Mourgues R, Gressier J B, Bodet L, et al. "Basin scale" versus "localized" pore pressure/stress coupling: Implications for trap integrity evaluation [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(5): 1111-1121.
- [35] Dewhurst D N, Hennig A L. Geomechanical properties related to top seal leakage in the Carnarvon Basin, Northwest Shelf, Aus-

- tralia[J]. *Petroleum Geoscience*,2003,9(3):255-263.
- [36] Gartrell A, Bailey W R, Brincat M. A new model for assessing trap integrity and oil preservation risks associated with post-rift fault reactivation in the Timor Sea[J]. *AAPG Bulletin*,2006,90(12):1921-1944.
- [37] Mancini E A, Parcell W C, Puckett T M. Upper Jurassic (Oxfordian) Smackover carbonate petroleum system characterization and modeling, Mississippi Interior Salt Basin area, northeastern Gulf of Mexico, USA[J]. *Carbonates and Evaporites*,2003,18(2):125-150.
- [38] Dewing K, Obermajer M. Lower Paleozoic Thermal Maturity and Hydrocarbon Potential of the Canadian Arctic Archipelago[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*,2009,57(2):141-166.
- [39] Chen Z, Osadetz Z G, Li M W. Spatial characteristics of Middle Devonian oils and non-associated gases in the Rainbow area, northwest Alberta[J]. *Marine and Petroleum Geology*,2005,22(3):391-401.
- [40] Kuznetsov V G. Early Permian Facies and Paleogeography of the Southeastern Russian Craton[J]. *Facies*,1996,34(1):151-157.
- [41] Konyuhov A I, Maleki B. The Persian Gulf Basin: Geological History, Sedimentary Formations, and Petroleum Potential[J]. *Lithology and Mineral Resources*,2006,41(4):344-361.
- [42] Grassmann S, Cramer B, Delisle G, et al. Winsemann. Geological history and petroleum system of the Mittelplate oil field, Northern Germany [J]. *International Journal of Earth Sciences*,2005,94(5-6):979-989.
- [43] Wagner III B H, Jackson M P A. Viscous Flow During Salt Welding[J]. *Tectonophysics*,2011,510(3-4):309-326.
- [44] Johnson K S. Evaporite-karst problems and studies in the USA[J]. *Environmental Geology*,2008,53(5):937-943.
- [45] Gutiérrez F, Calaforra J M, Cardona F, et al. Geological and environmental implications of the evaporite karst in Spain[J]. *Environmental Geology*,2008,53(5):951-965.
- [46] Lee M K, Williams D D. Paleohydrology of the Delaware Basin, Western Texas: Overpressure Development, Hydrocarbon Migration, and Ore Genesis[J]. *AAPG Bulletin*,2000,84(7):961-974.
- [47] Iverson W P, Martinsen R S, Surdam R C. Pressure Seal Permeability and Two-Phase Flow[J]. *AAPG Special Volumes: Basin Compartments and Seals*,1994,61(1):313-319.
- [48] Lee Y, Deming D. Overpressures in the Anadarko Basin, Southwestern Oklahoma: Static or Dynamic [J]. *AAPG Bulletin*,2002,86(1):145-160.
- [49] Revil A, Shosa J D, Pezard P A, et al. Capillary sealing in sedimentary basins: A clear field example[J]. *Geophysical Research Letters*,1998,25(3):389-392.
- [50] Bjørkum P A, Walderhaug O, Nadeau P H. Physical constraints on hydrocarbon leakage and trapping revisited [J]. *Petroleum Geoscience*,1998,4(3):237-239.
- [51] Bolás H M N, Hermanrud C, Teige G G. Seal capacity estimation from subsurface pore Pressures [J]. *Basin Research*,2005,17(4):583-599.
- [52] Wilson O B, Bolás H M N. Capillary resistance and trapping of hydrocarbons: a laboratory experiment [J]. *Petroleum Geoscience*,2005,11(2):125-129.
- [53] Teige G M G, Hermanrud C, Thoms W H, et al. Capillary resistance and trapping of hydrocarbons: a laboratory experiment[J]. *Petroleum Geoscience*,2005,11(2):125-129.
- [54] Broichhausen H, Littke R, Hantschel T. Mudstone compaction and its influence on overpressure generation, elucidated by a 3D case study in the North Sea[J]. *International Journal of Earth Sciences*,2005,94(5-6):956-978.
- [55] Akrouit D, Ahmadi R, Mercier E, et al. Natural hydrocarbon accumulation related to formation overpressured interval: study case is the Saharan platform (Southern Tunisia) [J]. *Arabian Journal of Geosciences*,2011,4(1-2):1-9.
- [56] 吕延防,付广,张发强,等. 超压盖层封烃能力的定量研究[J]. *沉积学报*,2000,18(3):465-468.
- [57] 付广,王有功,苏玉平. 超压泥岩盖层封闭性演化规律及其研究意义[J]. *矿物学报*,2006,56(4):453-459.
- [58] 黄劲松,刘长国,牟广山. 贝尔凹陷大一段下部旋回泥岩盖层封闭能力综合评价[J]. *大庆石油学院学报*,2009,33(6):19-24.
- [59] 李建民,王树海. 贝尔凹陷布达特群潜山盖层封闭能力综合评价[J]. *大庆石油学院学报*,2006,30(3):8-10.
- [60] 康德江,付广,吕延防. 贝尔断陷布达特群泥岩盖层综合评价[J]. *油气地质与采收率*,2006,13(5):44-46.
- [61] 付广,陈章明. 利用测井资料综合评价泥质岩盖层封闭性的方法及应用[J]. *石油地球物理勘探*,1997,32(2):271-276.
- [62] 金之钧,龙胜祥,周雁,等. 中国南方膏盐岩分布特征[J]. *石油与天然气地质*,2006,(5):571-583.
- [63] 吴世祥,金之钧,汤良杰. 盖层水岩相互作用研究及其油气地质意义——以黔中隆起及周缘为例[J]. *地质学报*,2007,81(8):1110-1117.
- [64] 张军涛,吴世祥,李宏涛,等. 川东南志留系泥岩盖层水岩相互作用的实验模拟及其研究意义[J]. *石油实验地质*,2011,33(1):36-39.
- [65] 周雁,李双建,范明. 构造变形过程中盖层封闭性研究[J]. *地质科学*,2011,46(1):226-232.
- [66] 范明,陈宏宇,俞俊杰,等. 比表面积与突破压力联合确定泥岩盖层评价标准[J]. *石油实验地质*,2011,33(1):87-90.
- [67] 俞俊杰,范明,刘伟新,等. 盖层封闭机理研究[J]. *石油实验地质*,2011,33(1):91-95.
- [68] 邓军,王庆飞,高帮飞,等. 鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布[J]. *现代地质*,2005,19(4):538-545.
- [69] 张祥,纪宗兰. 柴达木盆地第四系泥岩盖层的封盖机理[J]. *天然气工业*,1997,17(5):75-76.
- [70] Корчагин В И. Стратиграфическое положение глобальных покровных и искусственные ловушки нефти и газа[J]. *Геол нефти и газа*,1999,35(3-4):61-64.
- [71] Almon W R, Dawson W C, Sutton S J. Sequence stratigraphy, facies variation and petrophysical properties in deepwater shales, Upper Cretaceous Lewis Shale, south - central Wyoming [J]. *GCAGS Transactions*,2002,52(1):1041-1053
- [72] 付广,姜振学. 影响盖层形成和发育的地质因素分析[J]. *天然气地球科学*,1994,5(5):6-12.
- [73] 张树林,田世澄. 盖层的研究方法及其在油气勘探中的意义[J]. *地质科技情报*,1993,12(1):73-78.

成的条件。该区构造稳定,断裂不发育,保存条件较好;泥页岩全区覆盖,分布面积较大且连续、埋深适中,成为川东北下侏罗统页岩气勘探的有利地区。

3) 应加大对四川盆地东部地区侏罗系的地质评价和针对性工程工艺试验,建立陆相页岩气勘探开发试验工程示范区,为我国广泛开展陆相页岩气勘探开发开拓道路。

#### 参考文献:

[1] 李大荣. 美国页岩气资源及勘探历史[J]. 石油知识, 2004, 104(1): 61.

[2] 陈会年, 张卫东, 谢麟元, 等. 世界非常规天然气的储量及开采现状[J]. 断块油气田, 2010, 17(4): 439-442.

[3] 周庆凡. 世界页岩气资源量最新评价[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 614.

[4] 张大伟. 加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 135-139.

[5] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.

[6] Caldwell R. Unconventional resources; are they for real? [J]. Scotia Newsletter, 2006, (March): 1-2.

[7] 范昌育, 王震亮. 页岩气富集与高产的地质因素和过程[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 465-469.

[8] 李智锋, 李治平, 王杨, 等. 页岩气储层渗透性测试方法对比分析[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 761-764

[9] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas; Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.

[10] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究; 以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 219-225.

[11] 聂海宽, 何发岐, 包书景. 中国页岩气地质特殊性及其勘探对策[J]. 新能源, 2011, 31(11): 1-6.

[12] 董大忠, 程克明, 王玉满, 等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 288-299.

[13] 陈祥, 王敏, 严永新, 等. 泌阳凹陷陆相页岩油气成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 568-576.

[14] 陈祥, 严永新, 章新文, 等. 南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩气形成条件研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(2): 137-141.

[15] 李军, 陶士振, 汪泽成, 等. 川东北地区侏罗系油气地质特征与成藏主控因素[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(5): 732-741.

[16] 邓康龄. 四川盆地柏垭—石龙场地区自流井组大安寨段油气成藏地质条件[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(2): 9-13.

[17] 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 8-17.

[18] 张林晔, 李政, 朱日房. 页岩气的形成与开发[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 124-128.

(编辑 韩 彧)

(上接第 245 页)

[74] 周文, 刘文碧, 程光瑛. 海拉尔盆地泥岩盖层演化过程及封盖机理探讨[J]. 成都理工学院学报, 1994, 21(1): 62-70.

[75] 付广, 张绍臣. 盖层发育的有利地质因素分析[J]. 南方油气地质, 1995, 1(4): 8-13.

[76] 李学田, 张义纲. 天然气盖层质量的影响因素及盖层层形成时间的探讨: 以济阳拗陷为例[J]. 石油实验地质, 1992, 14(3): 282-290.

[77] 陈劲人, 彭秀美. 从三轴抗剪抗压实验看埋深对区域盖层遮挡性能的影响[J]. 石油实验地质, 1994, 16(3): 282-289.

[78] 陶振宇. 岩石力学的理论与实践[M]. 北京: 水利出版社, 1981: 1-409.

[79] 戴金星. 中国大气田及其气源[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-199.

[80] Surkov V S, Grishin M P, Larichev A I, et al. The Riphean sedimentary basins of the Eastern Siberia Province and their petroleum potential[J]. Precambrian Research, 1991, 54(1): 37-44.

[81] Duncan W I, Green P F, Duddy I R. Source rock burial history and seal effectiveness; key facets to understanding hydrocarbon exploration potential in the East and Central Irish Sea Basins[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(7): 1401-1415.

[82] McIntyre J F. Presence and control of evaporite top seals on occurrence and distribution of hydrocarbon traps: main fairway, central overthrust belt. Wyoming and Utah (abs.) [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(1): 221.

[83] Liguori V, Manno G, Mortellaro D. Evaporite karst in Sicily[J]. Environmental Geology, 2008, 53(5): 975-980.

[84] Guardado L R, Spadini A R, Brandão J S L. Petroleum system of

the Campos Basin, Brazil [M]//AAPG Memoir 73. Tulsa: AAPG, 2000: 317-324.

[85] Rowan M G. Do salt welds seal? [C]// Post P J, Olson D L, Lyons S L, et al. Salt-sediment interactions and hydrocarbon prospectivity: concepts, applications, and case studies for the 21st century: 24th Annual Gulf Coast Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Foundation Bob F. Perkins Research Conference. Houston: Gulf Coast Section of SEPM, 2004: 390-403.

[86] Nordgård Bolås H M, Hermanrud C, Teige G M G. Seal capacity estimation from subsurface pore pressures[J]. Basin Research, 2005, 17(4): 583-599.

[87] 张义纲. 天然气的生成聚集与保存[M]. 南京: 河海大学出版社, 1991: 1-176

[88] 卢双舫, 付广, 王朋岩, 等. 天然气富集主控因素的定量研究[J]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 1-230.

[89] Magara K. Pressure sealing: An important agent for hydrocarbon entrapment[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1993, 9(1): 67-80.

[90] Deming D. Factors necessary to define a pressure seal[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(6): 1005-1009

[91] Pezard P A, Larouziere F D. Capillary sealing in sedimentary basins: A clear field example[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(3): 389-392.

(编辑 叶德燎)