

## 页岩气及其勘探研究意义

张金川, 汪宗余, 聂海宽, 徐波, 邓飞涌, 张培先, 殷毅, 郭华强,  
林拓, 张琴, 张德明

(中国地质大学 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 与传统意义上的泥页岩裂缝气并不完全相同, 现代概念的页岩气是主体上以吸附和游离状态同时赋存于具有生烃能力泥岩及页岩等地层中的天然气聚集, 具有自生自储、吸附成藏、隐蔽聚集等地质特点。美国的页岩气勘探取得巨大成功, 是投入工业性勘探开发的三大非常规天然气类型之一, 目前已形成了区域性页岩气勘探开发局面。中国的页岩气研究正在起步, 许多盆地及研究区具有页岩气成藏的地质条件。与美国东部地区页岩气成藏地质条件进行初步对比, 中国南方具有有利的页岩气发育条件, 开展页岩气研究具有重要意义。

**关键词:** 页岩气; 非常规天然气; 勘探

**中图分类号:** TE122

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8527(2008)04-0640-07

## Shale Gas and Its Significance for Exploration

ZHANG Jin-chuan, WANG Zong-yu, NIE Hai-kuan, XU Bo, DENG Fei-yong, ZHANG Pei-xian,  
YIN Yi, GUO Hua-qiang, LIN Tuo, ZHANG Qin, ZHANG De-ming

(Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Ministry of Education,  
China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Unlike the conventional concept of hydrocarbon in fractures, the current definition of shale gas is the absorbed and free gas accumulation that exists in mudstone and/or shale layers with autogenic gas. Gas accumulation in shale is of many particular geological characteristics, some of which are self-generation and self-reservation, absorption accumulation, subtle aggregation, and so on. Exploration and exploitation for shale gas have achieved great success in USA in which shale gas has become one of the three economic types of unconventional gas with pervasive exploration value and profitable industrial exploitation. Many basins and regions in China are of favorable geological settings for shale gas, and the research on shale gas develops quickly. In contrast with the geological condition in the eastern USA, the southern China has the favorable geology conditions for shale gas exploration. It is important and significant to research and explore shale gas in China.

**Key words:** shale gas; non-unconventional gas; exploration

## 0 引言

页岩气是美国目前已投入工业性勘探开发的主要非常规天然气聚集类型之一, 2008年4月20-23日在美国 San Antonio 召开的 AAPG 年会表明,

页岩气在近年来再次成为油气地质研究的热点。本文主要以笔者在2002年完成的页岩气调研报告为基础, 通过对近年来相关文献进行适当的补充, 对页岩气勘探现状及研究意义简做讨论以飨读者。

收稿日期: 2008-05-10; 改回日期: 2008-06-28; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40672087, 40472073); 国土资源部公益项目(200811041)。

作者简介: 张金川, 男, 教授, 博士生导师, 1964年出生, 石油地质学专业, 主要从事非常规油气、成藏机理、资源评价及盆地流体等方面的教学与研究工作。Email: zhangjc@cugb.edu.cn。

## 1 页岩气

Curtis 2002 年对页岩气 (shale gas) 进行了描述性界定并认为,页岩气在本质上与其他类型的气藏有较大的差异,具有生物化学成因气、热成因气或两者混合的多成因特点,具有普遍的地层饱含气、隐蔽聚集机理等特点,赋存方式复杂<sup>[1]</sup>。结合页岩气成藏机理的认识,可以将页岩气概括为:主体上以吸附和游离状态赋存于泥页岩地层中的天然气聚集<sup>[2-3]</sup>,其中吸附作用是页岩气的重要机理之一。需要指出的是,虽然泥岩和页岩并不完全相同,但国外及台湾研究者习惯于使用 shale 术语,译为“页岩”;大陆研究者则更倾向于使用 mudstone 术语,对应于“泥岩”。针对这种情况,国内研究者也使用“泥页岩”术语。但国外目前的“页岩气”与国内传统的“泥页岩气”在理解上存在一定的差异,前者强调吸附和游离相天然气的同时存在,而后者则多指游离相天然气。

根据前人研究结果<sup>[1-7]</sup>,页岩气具有如下基本特征(表1):岩石类型多样,可包括富含有机质的暗色—黑色泥页岩、高碳泥页岩及含沥青质泥页岩等,泥页岩类地层与粉砂岩类的薄互层是其基本特点之一<sup>[5-6]</sup>;页岩气主要来源于生物作用或热成熟裂解作用<sup>[4,7]</sup>,也可形成于有机质演化的高或过成熟阶段( $R_o$ 最大可达4%);泥页岩本身既是气源岩,又是储集层和封盖层<sup>[7]</sup>,一般表现为致密物性特点,若含气则有效孔隙度一般只为1%~5%。页岩中具有广泛的饱含气特点<sup>[8-9]</sup>,天然气的赋存相态多变但以吸附态或游离态为主,吸附状态天然气的含量变化于20%~85%之间,一般为50%左右,溶解态仅少量存在。页岩气成

藏具有隐蔽性特点<sup>[1,10]</sup>。

## 2 美国页岩气勘探现状

随着油气勘探开发程度的提高,多种机理类型的天然气聚集不断被发现并投入工业性开发<sup>[11-14]</sup>。美国是天然气地质勘探程度和开发技术水平相对较高的国家,页岩气是其中已投入工业性勘探开发的三大非常规天然气类型之一<sup>[2-3]</sup>(三大非常规天然气即致密砂岩气,包括深盆地中心气和根缘气,以及煤层气和页岩气)。

页岩气勘探生产和开发研究最早开始于美国,它的第一口工业性天然气钻井(1821年钻至8m深度时产出裂缝气)就是页岩气井(Chautauqua 县浅埋的泥盆系 Dunkirk 页岩)<sup>[5]</sup>,当时由于产气量少而没有引起人们的重视,但却就此拉开了美国天然气工业发展的序幕<sup>[1]</sup>。此后,美国的页岩气藏陆续被发现,到1926年时,东肯塔基和西弗吉尼亚气田(泥盆系页岩)成为当时世界上最大的天然气田。1973年阿以战争期间的石油禁运和1976—1977年间的第一次石油危机促使美国能源部(DOE)加快了天然气勘探研究的步伐:1976年,美国能源部及其以后的能源研究和开发署(ERDA)联合了美国国家地质调查局、州级地质调查所、大学以及工业团体,发起并实施了针对页岩气研究与开发(R & D)的东部页岩气工程(EGSP,主要包括阿巴拉契亚、密执安和伊利诺斯盆地),主要目的是加强对页岩气地质、地球化学、开发工程等方面的研究,使得页岩气产量大幅度增加且产出了一批科研成果;从1980年开始,美国天然气研究所开始对东部页岩气进行系统研究,主要目的是摸清页岩气分布规律并进行资源潜力评价,不

表1 美国含气页岩主要特征  
Table 1 Main characteristics of gas-bearing shale in USA

盆地	页岩名称	埋藏深度/m	毛厚度/m	净厚度/m	TOC/%	$R_o$ /%	含气孔隙度/%		地层压力系数	单井日产量/m <sup>3</sup>	采收率/%	单井储量/万 m <sup>3</sup>
							度/%	吸附气总孔隙度/%				
阿巴拉契亚	Ohio	610~1 524	91~305	9~31	0~4.7	0.4~1.3	2/4.7	50	0.35~0.92	850~14 159	10~20	425~1 699
密执安	Antrim	183~730	49	21~37	0.3~24	0.4~0.6	4/9	70	0.81	1 133~1 4159	20~60	566~3 398
伊利诺斯	New Albany	183~1 494	31~122	15~30	1~25	0.4~1.0	5/(10~14)	40~60	0.99	283~1 416	10~20	425~1 699
富特沃斯	Barnett	1 981~2 591	61~91	15~60	4.5	1.0~1.3	2.5/(4~5)	20	0.99~1.02	2 832~28 317	8~15	1 416~4 248
圣胡安	Lewis	914~1 829	152~579	61~91	0.45~2.5	1.6~1.88	(1~3.5)/(3~5.5)	60~85	0.46~0.58	2 832~5 663	5~15	1 699~5 663

注:表中数据摘自 Curtis(2002)。

不断地发现新的页岩气田并使页岩气产、储量进一步提高;随后的页岩气勘探和研究迅速向其他地区扩展,页岩气研究全面展开。

20 世纪 70 年代以来,美国政府相关机构投入了大量资金用于页岩气的地质和地球化学探索研究。通过这些努力,尤其是地质和技术研究的不断深入,美国的页岩气年产量从 1979 年到 1999 年净增了 7 倍<sup>[1]</sup>,其中最重要的进展是认识到页岩气的吸附作用机理,从而使其产、储量得到了大幅度的提高。页岩气是目前经济技术条件下天然气工业化勘探开发的重要领域和目标,美国目前已在多个盆地中发现并开采了页岩气,在 1981—1999 年期间,美国的页岩气钻井总数超过了 2.8 万口,2006 年时已超过了 3.95 万口,页岩气年产量逐年递增。1998 年时的页岩气产量占到了美国干气总产量的 1.6%,为全美探明天然气储量的 2.3%<sup>[1]</sup>(煤层气为 7%<sup>[4]</sup>)。2005 年美国页岩气产量占其天然气总产量的 4.5% (Bustin, 2005)<sup>①</sup>。根据美国国家石油委员会、地质调查局和天然气研究所 20 世纪 90 年代以来提供的数据<sup>[1,13]</sup>,阿巴拉契亚和密执安盆地页岩气资源量就分别达到 6.37~7.02 万亿 m<sup>3</sup>和 0.99~2.15 万亿 m<sup>3</sup>,页岩气可采储量分别为 0.41~0.78 万亿 m<sup>3</sup>和 0.31~0.54 万亿 m<sup>3</sup>,两盆地在 1999 年时的页岩气产量总和大约为 110 亿 m<sup>3</sup>。

美国的页岩气主要发现于中—古生界(D—K)

地层中,目前勘探开发正由东北部地区的盆地(阿巴拉契亚、密执安、伊利诺斯等盆地)向中西部地区的盆地(威利斯頓 Bakken 页岩),以及圣胡安、丹佛(Niobrara 白垩岩)、富特沃斯、阿纳达科(Woodford 页岩)等盆地扩展<sup>[15-16]</sup>。美国天然气研究所和 Curtis 等<sup>[17]</sup>近年公布资料表明,美国落基山地区盆地中的页岩气资源量为 1 120 亿 m<sup>3</sup>,逐渐形成了区域性页岩气勘探开发局面。

3 我国页岩气勘探研究

3.1 泥页岩气的两种认识

与美国的早期研究类似,我国研究者通常使用“泥页岩油气藏”、“泥岩裂缝油气藏”以及“裂缝性油气藏”等术语对该类气藏进行描述和研究,并在主体上将该类油气藏理解为<sup>[18-23]</sup>“聚集于泥页岩裂缝中的游离相油气”,认为油气的存在主要受裂缝控制而较少考虑其中的吸附作用。随着研究程度的深入,美国的“页岩气”自 20 世纪 80 年代中期以来发生了概念和认识上的重大变化,页岩气逐渐被赋予了新的含义<sup>[1-10]</sup>。正如前文所述,页岩气是指以吸附相、游离相甚至溶解相赋存于泥页岩地层中的天然气,其中强调吸附作用机理(这一点影响成藏与开发)。如表 2 所示,与通常所理解的传统泥页岩裂缝油气不同,现代概念的页岩气在概念、成因来源、赋存介质以及聚集方式等方面均具有较强的特殊性,尤其是吸附机理和

表 2 传统泥页岩油气与典型页岩气异同点  
Table 2 Similarities and differences between traditional and modern shale gases

特点	泥页岩裂缝油气	页岩气	共性
界定	赋存于泥页岩裂缝中的油气	同时以吸附和游离状态赋存于以泥页岩为主的地层中的天然气	泥岩或页岩地层中含烃
天然气成因	热成熟	从生物气到高、过成熟气	热成熟产气为主
赋存介质	泥岩或页岩裂缝	泥页岩及其砂岩夹层中的裂缝、孔隙、有机质等	泥岩或页岩裂缝
赋存相态	游离	游离+吸附	游离
主控因素	构造裂缝	各类裂缝、有机碳含量、有机质成熟度等	裂缝
理论模式	岩石破裂理论、幕式理论、浮力理论	吸附理论、活塞式与置换式复杂理论	岩石破裂理论、复杂成藏理论
成藏特点	以油为主的原地、就近或异地聚集	以气为主的原地聚集	近邻或烃源岩内部成藏
保存特点	良好的封闭和保存条件	抗破坏(构造运动)能力较强	适当保存
生产特点	采收率高,产量递减快	采收率低,生产周期长	特殊开发技术

①www. adv-res. com/pdf/ Annual-Gas-Shale-Production. pdf.

成藏特点的认识,丰富了天然气成藏的多样性,扩大了天然气勘探的领域和范围。因此,我国传统的“泥页岩裂缝性油气藏”概念与美国现今的“页岩气”内涵并不完全相同:一是天然气的存在相态不同,从“游离”到“吸附+游离”;二是烃类的物质成分不同,从“油+气”到以“气”为主。

### 3.2 早期泥页岩油气藏研究

自20世纪60年代以来,我国陆续开始在不同盆地中发现了工业性泥岩裂缝油气藏,已在许多盆地,如松辽、渤海湾(包括车镇凹陷、沾化凹陷、东濮凹陷等)以及南襄、苏北、江汉、四川、酒西、柴达木、吐哈等盆地中发现并开发了泥岩裂缝油气藏<sup>[18-28]</sup>。我国在泥页岩气的研究方面已完成大量工作,如高瑞祺<sup>[29]</sup>对泥岩异常高压带油气的生成和排出特征及泥岩裂缝油气藏的形成进行了探讨;张绍海等<sup>[30]</sup>认为,页岩气储层物性致密、含气特征(含烃饱和度、储存方式及压力系统)差异较大、产量低但生产周期长等;关德师等<sup>[27]</sup>和戴金星等<sup>[28]</sup>将泥页岩气的基本地质特征总结为:自身构成一套生储盖体系、多具高压异常、储集空间多样且以裂缝为主、圈闭类型以非背斜和岩性为主以及单个储量小、产能低等;张金功等<sup>[20]</sup>研究认为,开启超压泥质岩裂隙是在一定深度区间内集中发育的,超压泥质岩裂隙开启的条件是泥质岩中的流体热增压要超过泥质岩抗压强度,控制上述条件的主要因素是泥质岩孔隙度、地温与埋深;王德新等<sup>[31]</sup>从钻井和完井技术角度出发将泥页岩裂缝性油气藏的特点归结为:油气分布主要受裂缝系统控制、油气分布范围不规则、单井产量变化较大(产量不稳定、递减快)以及既是烃源岩又是储集层等;刘魁元等<sup>[21]</sup>认为,沾化凹陷“自生自储”泥岩油气藏的泥岩储集层形成于半深水-深水、低能、强还原环境中;徐福刚等<sup>[22]</sup>进一步对沾化凹陷油气藏进行研究并指出,厚层富含有机质的暗色生油岩是油气储层之一,泥质岩油气显示段主要分布在斜坡带上靠近断层附近并具有高压异常;马新华等<sup>[32]</sup>认为,中国东部一些地区(如东濮和沾化凹陷)已在页岩中获得商业气流;慕小水等<sup>[19]</sup>探讨了东濮凹陷泥岩裂隙油气藏的形成条件及其分布特点,指出高压区及超高压区、盐岩分布区和构造转换带是寻找该类油气藏的有利地区,稳定的泥岩标志层可以作为寻找该类油气藏的有利层段;王志刚<sup>[23]</sup>指出,泥岩裂缝性油藏的成藏机理服从流体封存箱

成藏机制和流体异常高压成藏机制的复合作用,斜坡带的断鼻构造部位是发育裂缝性泥质岩圈闭的最有利部位;此外,尚有许多研究者也都在此方面展开了不同侧重点的相关研究,恕不一列举。

结合实验分析,对页岩中游离相天然气的聚集又可按其动力作用机理类型及运聚方式而分为活塞式及置换式两种<sup>[33]</sup>。由于着眼点不尽相同,对泥页岩(油)气藏的地层压力尚有不同看法。一是以张金功等<sup>[20]</sup>、关德师等<sup>[27]</sup>、高瑞祺<sup>[29]</sup>等为代表的观点,认为泥页岩气藏多具高异常地层压力;二是以张绍海等<sup>[30]</sup>为代表的观点,即认为页岩气藏孔隙度小、渗透率低,表现为低异常压力特点。两者均有事实依据并得到了不同程度的认可,因此异常地层压力受地质条件影响较大。

许多研究者认为<sup>[18,20,27-29,31]</sup>,我国存在泥页岩气发育的广泛空间。关德师等<sup>[27]</sup>、戴金星等<sup>[28]</sup>在对泥页岩气论述基础上,分析了中国的泥页岩气勘探前景。张爱云等<sup>[34]</sup>对海相暗色页岩建造的地球化学特点进行了研究,指出中国南方早古生代发育着一套分布广泛的黑色页岩建造,具有一定的找矿地质意义。由于其中的有机碳含量一般达到了5%~20%,因此具有很高的页岩气成藏意义<sup>[27-28]</sup>;王德新等<sup>[31]</sup>指出,在泥页岩中寻找油气资源是今后油气勘探开发的重要领域,我国有较广泛的泥页岩分布,许多地区已在泥页岩中找到了裂缝性油气藏。

上述研究丰富了油气成藏地质研究内容,推动了中国泥页岩气研究发展,为吸附特点页岩气研究奠定了重要基础。

### 3.3 现代概念页岩气研究现状与远景

近年来,许多研究者<sup>[14,28,35-36]</sup>逐渐注意到“页岩气”在成藏机理及其分布规律上的特殊性,认为它是一种极富有勘探潜力和前景的天然气聚集基本类型。目前已有越来越多的研究者认同Curtis 2002年和Martini等人2003年提出的观点,即吸附作用是页岩气聚集的基本属性之一。国内许多研究者也注意到了页岩气的勘探开发价值,在研究过程中已经注意到了泥页岩中天然气存在的吸附性问题。如杨登维等<sup>[37]</sup>翻译引入了现代概念的页岩气;张绍海等<sup>[30]</sup>指出,页岩中可能有较大一部分天然气是以气体分子形式吸附于页岩表面或溶解于页岩内部的流体之中;樊明珠等<sup>[38]</sup>进一步指出,页岩中存在大量吸附状天然气;金之

钧等<sup>②</sup>、张金川等<sup>[39]</sup>认为,与深盆气和煤层气并行,页岩气是三大类非常规天然气聚集机理类型之一,并进一步探讨了页岩气的成藏机理及分布特点;张杰等<sup>[40-48]</sup>、陈建渝等<sup>[49]</sup>、刘成林等<sup>[50]</sup>、刘丽芳等<sup>[51]</sup>、薛会等<sup>[52]</sup>、张金川等<sup>[53-56]</sup>、李新景等<sup>[57]</sup>、孙超等<sup>[58]</sup>以及中国石油和中国石化等单位又分别从不同侧面对页岩气进行了研究,分别从不同视角指出了中国页岩气的勘探与开发前景。中国页岩气研究进入快速起步阶段。

从成藏机理的角度出发,并结合部分勘探数据分析可以认为,我国的四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、江汉盆地、吐哈盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地等含油气盆地及其周缘均有页岩气成藏的地质条件,同时,在含油气盆地以外,如我国南方寒武系、志留系、二叠系等分布区的页岩气勘探前景亦不可忽视<sup>[56]</sup>。南方地区是中国进行油气勘探研究较早的地区之一,但是到目前为止区域勘探工作程度仍然很低,除在四川盆地、江汉盆地、苏北盆地和楚雄盆地等地区发现了不同规模的油气田及油气显示外,大面积的碳酸盐岩发育区还存在油气钻探空白。南方地区分布的黑色页岩厚度巨大(四川盆地的页岩最大厚度超过1 400 m)、埋藏深度小(黑色页岩广泛出露)、有机质丰度高、生气能力强,结合美国东部地区页岩气成藏地质条件进行初步对比,中国南方地区具有有利的页岩气发育条件,两者在地层岩性、构造背景、地质演化、天然气生成条件、区域破坏与保存条件,甚至地质年代特征上均存在一系列相似之处。中国南方地区是页岩气发育的良好区域,具有广阔前景,是开展页岩气研究及勘探开发生产的重要目标。

## 4 页岩气研究意义

大面积广泛分布的页岩有其自身的天然气成藏特点,由于泥页岩地层的吸附作用、孔隙度较小等原因,排烃系数小,常会形成大量的烃类残留,而裂缝作用又提供了有效储集空间;因此泥页岩中的天然气资源量巨大,地质分布具有普遍意义,当其聚集丰度达到工业开采标准时即形成所谓的泥页岩气(页岩气)藏。根据 Asakawa<sup>[59]</sup>及

Tyler 等<sup>[60]</sup>的研究结果,页岩气是盆地中天然气聚集的基本方式之一,并常与煤层气、深盆地以及常规圈闭气等同时存在。Schmoker 等<sup>[61]</sup>和 Curtis<sup>[1]</sup>将这些类型的气藏同时出现归结为“连续型”天然气聚集,因此其他类型气藏的发育在不同程度上也反映页岩气的存在。

Perroden 等人<sup>[6]</sup>接受了 Unitar 的观点,即认为页岩气在全球广泛分布,其中亚洲占其总量的1/3。进一步,其他研究者<sup>[18]</sup>提供的资料认为,泥页岩裂缝油气藏已发现于俄罗斯(西西伯利亚)、拉丁美洲、亚洲等地区和国家,并产出了大量油气;如果引用 Ahlbrandt(转引自 Curtis<sup>[1]</sup>)的现代页岩气观点,即强调吸附态和游离态天然气同时大量赋存的“页岩气”概念,则除了美国之外,其他地区尚没有页岩气产出的报道(但最近几年来,加拿大等国的页岩气研究也已经如火如荼地开展起来),其主要原因不是缺乏产气页岩的存在,而是由于其经济价值的认识不足。

页岩气在成藏机理上既具有典型的煤层气特征、也具有游离相气水驱替特点,同时还由于泥页岩“储层”致密,又具有自身明显的特殊性,成藏过程复杂,具有吸附聚集、活塞式推进、置换式运移、非典型性过渡成藏、抗破坏能力强等一系列特殊性,成藏机理复杂,勘探及开发方式特殊,因此页岩气研究具有重要的科学探索意义。

中国许多盆地具有泥页岩气成藏地质条件<sup>[3,27-28]</sup>,而国内的“页岩气”基本上还未进行系统研究,许多盆地高碳泥页岩的 TOC 高达30%,是页岩气聚集的重要条件,尤其是中国南方扬子地区沉积岩经历地质时代长、地质背景复杂、构造破坏严重、油气保存条件较差,页岩气将有可能成为区域性油气勘探发现的重要突破口。结合美国的非常规天然气勘探研究现状及其发展趋势分析,页岩气不久将会成为我国能源地质研究领域中的热点。

页岩气储量大、生产周期长,美国已发现埋深最浅的工业性页岩气只有182 m,平均深度也只有1 200 m,通常介于450~2 300 m之间(Curtis, 2002),与其他非常规类型气藏相比,页岩气勘探成本并不昂贵。因此,开展具有中国地质特点的页岩气研究具有重要的实践意义。

②金之钧. 吐哈盆地台北凹陷深盆气储层条件及有利勘探区带预测. 石油大学(北京), 1999.

③金之钧. 台北凹陷深盆气有利勘探目标选择. 石油大学(北京), 2000.

## 参考文献:

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理 [J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
- [3] 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): 15-18.
- [4] Martini A M, Walter L M, Ku T C W, et al. Microbial production and modification of gases in sedimentary basins: A geochemical case study from a Devonian shale gas play, Michigan basin [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(8): 1355-1375.
- [5] Milici R C. Autogenic gas (self sourced) from shales: an example from the Appalachian basin [M] // Howell D G. The Future of Energy Gases, US Geological Survey Professional Paper. Washington: US Geological Survey, 1993, 1570: 253-278.
- [6] Perrodon A, Laherrere J H, Campbell C J. The World's Non-conventional Oil and Gas [M]. London: Petroleum Economist Ltd, 1998.
- [7] Scholl M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(5): 649-661.
- [8] Schmoker J W. Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs [J]. AAPG Bulletin, 1981, 62: 1285-1298.
- [9] Schmoker J W. Use of formation density logs to determine organic-carbon content in Devonian shales of the western Appalachian basin, and an additional example based on the Bakken Formation of the Williston basin [M] // Roen J B, Kepferle R C. Petroleum Geology of Devonian and Mississippian Black Shale of Eastern North America. Washington: US Geological Survey, 1993, 1909: 1-14.
- [10] Martini A M, Walter L M, Budai J M, et al. Genetic and temporal relations between formation waters and biogenic methane-Upper Devonian Antartim shale, Michigan basin, USA [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(10): 1699-1720.
- [11] Schettler P D, Parnely C R. The measurement of gas desorption isotherms for Devonian shale [J]. Gas Shales Technology Review, 1990, 7(1): 4-9.
- [12] Roen J B. Introductory review Devonian and Mississippian black shale, eastern North America [M] // Roen J B, Kepferle R C. Petroleum Geology of the Devonian and Mississippian black shale of eastern North America. Washington: US Geological Survey, 1990: A1-A8.
- [13] Hill D G, Nelson C R. Gas productive fractured shales: an overview and update [J]. Gas TIPS, 2000, 6(2): 4-13.
- [14] 贾承造, 赵文智, 魏国齐, 等. 国外天然气勘探与研究最新进展及发展趋势 [J]. 天然气工业, 2002, 21(4): 5-9.
- [15] Schmoker. Thermal maturity of the Anadarko basin [M] // Johnson D G. Anadarko Basin Symposium, 1988. Oklahoma: Geological Survey Circular, 1989, 90: 25-31.
- [16] Pollastro R M, Scholle P A. Exploration and development of hydrocarbons from low-permeability chalks: An example from the Upper Cretaceous Niobrara Formation, Rocky mountain region [M] // Spencer C W, Mast R F. Geology of Tight Gas Reservoirs, AAPG Studies in Geology. New York: AAPG, 1986, 24: 129-142.
- [17] Curtis B C, Montgomery S L. Recoverable natural gas resource of the United States: Summary of recent estimates [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(10): 1671-1678.
- [18] 王德新, 江裕彬, 吕从容. 在泥页岩中寻找裂缝油、气藏的一些看法 [J]. 西部探矿工程, 1996, 8(2): 11-14.
- [19] 慕小水, 苑晓荣, 贾贻芳, 等. 东濮凹陷泥岩裂隙油藏形成条件及分布特点 [J]. 断块油气田, 2003, 10(1): 12-14.
- [20] 张金功, 袁政文. 泥质岩裂缝油气藏的成藏条件及资源潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 336-338.
- [21] 刘魁元, 吴恒志, 康仁华, 等. 沾化、车镇凹陷泥岩油气藏储集特征分析 [J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(6): 9-12.
- [22] 徐福刚, 李琦, 康仁华, 等. 沾化凹陷泥岩裂缝油气藏研究 [J]. 矿物岩石, 2003, 23(1): 74-76.
- [23] 王志刚. 沾化凹陷裂缝型泥质岩油藏研究 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 41-43.
- [24] 苏朝光, 刘传虎, 高秋菊. 泥岩裂缝储层特征参数提取及反演技术的运用 [J]. 石油物探, 2002, 41(3): 339-342.
- [25] 姬美兰, 赵旭亚, 岳淑娟, 等. 裂缝性泥岩油气藏勘探方法 [J]. 断块油气田, 2002, 9(3): 19-22.
- [26] 李守田, 汪玉泉, 袁伯琰. D 指数在泥岩裂缝储层解释中的应用 [J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(5): 15-16.
- [27] 关德师, 牛嘉玉, 郭丽娜, 等. 中国非常规油气地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [28] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学 (卷二) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 76-79.
- [29] 高瑞祺. 泥岩异常高压带油气的生成排出特征与泥岩裂缝油气藏的形成 [M] // 中国隐蔽油气藏勘探论文集. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1984.
- [30] 张绍海, 宋岩, 陈明霜, 等. 美国天然气勘探 [M] // 胡文海, 陈冬晴. 美国油气田分布规律和勘探经验. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [31] 王德新, 彭礼浩, 吕从容. 泥页岩裂缝油、气藏的钻井、完井技术 [J]. 西部探矿工程, 1996, 8(6): 15-17.
- [32] 马新华, 钱凯, 魏国齐, 等. 关于 21 世纪初叶中国天然气勘探方向的认识 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 1-4.
- [33] 金之钧, 张金川. 天然气成藏的二元机理模式 [J]. 石油学报, 2003, 24(4): 13-16.
- [34] 张爱云, 伍大茂, 郭丽娜, 等. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [35] 张金川, 唐玄, 边瑞康, 等. 游离相天然气成藏动力连续方程 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(1): 73-79.

- [36] 戴金星. 我国天然气资源及其前景 [J]. 天然气工业, 1999, 19(1): 3-6.
- [37] Howell D G. 能源气的未来 [M]. 杨登维, 李大良, 译. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [38] 樊明珠, 王树华. 高变质煤区的煤层气可采性 [J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(2): 87-90.
- [39] 张金川. 深盆气成藏机理及其应用研究 [D]. 北京: 石油大学, 1999.
- [40] 张杰. 非常规天然气成藏机理及资源评价方法研究 [D]. 北京: 石油大学(北京), 2002.
- [41] 张德明. 页岩气成藏分布及应用 [D]. 北京: 中国地质大学, 2003.
- [42] 聂海宽. 辽河西部凹陷天然气成藏模式 [D]. 北京: 中国地质大学, 2005.
- [43] 李敬含. 天然气成藏机理序列中的动力界变 [D]. 北京: 中国地质大学, 2005.
- [44] 王刚. 中国主要盆地和地区页岩气勘探潜力分析 [D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [45] 林拓. 天然气吸附气量影响因素 [D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- [46] 蒲伯伶. 四川盆地页岩气成藏条件分析 [D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2008.
- [47] 张琴. 中国南海相碳酸盐岩地区页岩气分布预测 [D]. 北京: 中国地质大学, 2008.
- [48] 王广源. 辽河东部凹陷天然气成藏机理类型 [D]. 北京: 中国地质大学, 2008.
- [49] 陈建渝, 唐大卿, 杨楚鹏. 非常规含气系统的研究和勘探进展 [J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 55-59.
- [50] 刘成林, 李景明, 李剑, 等. 中国天然气资源研究 [J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(1): 9-12.
- [51] 刘丽芳, 徐波, 张金川, 等. 中国海相页岩及其成藏意义 [M] //中国科协 2005 年学术年会论文集——以科学发展观促进科技创新(上). 北京: 科学技术出版社, 2005: 457-463.
- [52] 薛会, 张金川, 刘丽芳, 等. 天然气机理类型及其分布 [J]. 地球科学与环境学报, 2006, 18(2): 53-57.
- [53] 张金川, 薛会, 卞昌蓉, 等. 中国非常规天然气勘探雏议 [J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 53-56.
- [54] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国天然气勘探的两个重要领域 [J]. 天然气工业, 2007, 27(11): 1-6.
- [55] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件 [J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
- [56] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源潜力 [J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- [57] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- [58] 孙超, 朱筱敏, 陈菁, 等. 页岩气与深盆气成藏的相似与相关性 [J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(1): 26-31.
- [59] Asakawa T. Outlook for unconventional natural gas resources [J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 1995, 2: 128-135.
- [60] Tyler R, Scott A R, Kaiser W R, et al. Geologic and hydrologic controls critical to coalbed methane productivity and resource assessment: Williams Fork Formation Pisceans Basin, Northwest Colorado [R]. Gas Research Institute Topic Report, GRI95/0532, 1995.
- [61] Schmoker J W. Gas in the Uinta basin, Utah - Resources in continuous accumulations [J]. Mountain Geology, 1996, 33(4): 95-104.