引文：聂海宽, 党伟, 张珂, 等. 中国页岩气研究与发展20年：回顾与展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 20-52.
NIE Haikuan, DANG Wei, ZHANG Ke, et al. Two decades of shale gas research & development in China: Review and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 20-52.

中国页岩气研究与发展 20 年：回顾与展望

聂海宽[1,2,3] 党 伟[4] 张 珂[3,5] 苏海琨[5] 丁江辉[6] 李东晖[3] 刘喜武[1,2,3] 李 沛[1,2,3]
李 鹏[1,2,3] 杨升宇[7] 赵建华[7] 刘 秘[3] 陈 前[3] 孙川翔[1,2,3] 王鹏威[1,2,3] 刘子驿[3]

1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室 2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室
3. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院 4. 西安石油大学地球科学与工程学院
5. 中国地质大学 (北京) 能源学院 6. 中国石油国家卓越工程师学院 7. 中国石油大学 (华东)

摘要：中国页岩气科学研究和勘探开发已历经 20 年，创新形成了以中国南方海相页岩气富集规律为代表的诸多理论与认识，支撑了国内页岩气产业健康快速发展，2023 年中国页岩气产量达 250×10^8 m^3，在当年全国天然气总产量中的占比超过 10%，页岩气已经成为中国天然气产量增量的主力军之一。为了给中国页岩气产业高质量发展提供借鉴和参考，系统回顾了国内页岩气科学研究和勘探开发历程，归纳总结了富有机质页岩发育机理、页岩气优质储层特征及其成因机制、页岩气源—储协同演化机制、页岩气赋存机理与含气性评价、页岩气富集高产机理与评价、页岩气储层改造、页岩气开采等理论和技术进展，分析研判了面临的技术难题和挑战，指出了海相 / 陆相 / 海陆过渡相页岩气富集高产机理、基于动态演化过程的页岩气富集区评价方法、低丰度页岩气高效开发技术以及提高页岩气采收率技术等 4 个亟需攻关的研究方向。进而针对中国页岩气商业化勘探开发所面临的挑战，提出以下建议：从新区新领域、老区挖潜及提高采收率现场试验等方面开展页岩气勘探开发攻关探索，以期早日实现中国页岩气多领域多层系、由点到面的大突破和大规模高效勘探开发，全方位推进中国页岩气革命，提升能源高效供给能力，保障国家能源供应安全。

关键词：页岩气；富集机理；赋存机理；储层特征；储层改造；高产机理；提高采收率；勘探方向
中图分类号：TE132.2、TE37 **文献标识码**：A DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.03.003

Two decades of shale gas research & development in China: Review and prospects

NIE Haikuan[1,2,3], DANG Wei[4], ZHANG Ke[3,5], SU Haikun[5], DING Jianghui[6], LI Donghui[3], LIU Xiwu[1,2,3], LI Pei[1,2,3], LI Peng[1,2,3], YANG Shengyu[7], ZHAO Jianhua[7], LIU Mi[3], CHEN Qian[3], SUN Chuanxiang[1,2,3], WANG Pengwei[1,2,3], LIU Ziyi[3]

(1. *State Key Laboratory of Shale Oil & Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development*, *Beijing* 102206, *China*; 2. *Sinopec Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production*, *Beijing* 102206, *China*; 3. *Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute*, *Beijing* 102206, *China*; 4. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Xi'an Shiyou University*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710065, *China*; 5. *School of Energy Resources*, *China University of Geosciences - Beijing*, *Beijing* 100083, *China*; 6. *CNPC National Elite Institute of Engineering*, *Beijing* 100096, *China*; 7. *China University of Petroleum - East China*, *Qingdao*, *Shandong* 266580, *China*)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.3, p.20-52, 3/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The research, exploration and production of shale gas in China have made great progress during the past two decades. A series of innovative recognitions formed in the past time, such as the mechanism of marine shale gas enrichment in southern China, have supported the rapid development of shale gas. In 2023, China's shale gas production reached 250×10^8 m^3, accounting for more than 10% of the total natural gas production. Thus, shale gas is a major contributor to China's additional gas production. Based on a comprehensive review on the history of research, exploration and production of shale gas in China, this paper summarizes the progress in some theories and technologies, including the organic-rich shale formation mechanism, the characteristics and genetic mechanisms of high-quality reservoirs, the source–reservoir co-evolution mechanism, the shale gas occurrence mechanism and gas content evaluation, the enrichment and high-yield mechanisms and evaluation technologies, the reservoir stimulation techniques, and the production technique. Additionally, the paper identifies the technical challenges and delineates four research directions (the enrichment and high-yield mechanisms of marine, continental and transitional shale gases, the methods for evaluating shale gas enrichment zones based on dynamic evolution process, the efficient development techniques for low-abundance shale gas, and the enhanced gas recovery (EGR) techniques. In light of the challenges confronted by commercial shale gas exploration and production in China, the paper recommends to carry out shale gas exploration and production from three aspects: new zones/areas, tapping the potential and increasing the reserves recovery in old areas, and EGR field tests. These efforts are expected to support the extensive and efficient exploration and production of shale gas in multiple fields and multiple layers, so as to effectively contribute to China's shale gas revolution in an all-round way and ultimately ensure the national energy security.

Keywords: Shale gas; Enrichment mechanism; Occurrence mechanism; Reservoir characteristics; Reservoir stimulation; High-yield mechanism; Enhanced gas recovery; Exploration direction

基金项目：国家自然科学重点基金项目“复杂构造带常压页岩气动态赋存机理与可动性研究”（编号：42130803）、国家自然科学基金项目“四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气储层演化机理及评价方法”（编号：41872124）、中国石油化工股份有限公司科技部研究项目“川东南深层—超深层页岩气演化与差异富集机制”（编号：P23132）。

作者简介：聂海宽，1982 年生，博士，研究员，本刊编委；主要从事非常规油气地质研究工作。地址：（102206）北京市昌平区沙河镇百沙路 197 号。ORCID: 0000-0002-3634-1523。E-mail: niehk.syky@sinopec.com

0　引言

从 2004 年《天然气工业》发表该刊第一篇页岩气学术论文——《页岩气成藏机理和分布》[1] 至今，中国页岩气研究和勘探开发从起步到初见成效已历经 20 年，正迎来页岩气革命 [2-4]。从 2009 年渝东南地区渝页 1 井发现页岩气 [5]，到 2010 年第一口页岩气气流井——威 201 井 [6] 的发现；从 2011 年第一口具有商业开发价值的页岩气井——宁 201-H1 井 [7]，到 2012 年涪陵页岩气田发现井——焦页 1 井、2014 年上报我国第一个页岩气探明地质储量 1 067.5×10^8 m^3[8-9]，中国页岩气产业取得了一个又一个重大突破，逐步揭开了页岩气商业化开发的序幕 [10-13]。20 年间，中国页岩气发展突飞猛进、硕果累累，目前已成为仅次于美国的全球第二大页岩气生产国。迄今为止，借助于成熟的页岩气勘探开发技术，中国已经发现了数个埋深 3 500 m 以浅、探明储量超过 1 000×10^8 m^3 的页岩气田，并在埋深 3 500 ～ 4 500 m 深度段获得工业页岩气流 [14-16]，正在攻关深层（埋深介于 3 500 ～ 4 500 m）—超深层（埋深超过 4 500 m）页岩气的勘探开发技术 [17]。

目前，中国超过 95% 的页岩气产量都来自四川盆地及其周缘的上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩。尽管在中国其他地区、其他层系也获得了页岩气产出，例如：四川盆地寒武系筇竹寺组 [18-19]，侏罗系自流井组 [20]，二叠系梁山组、龙潭组、吴家坪组和大隆组 [21-24]；鄂西—渝东寒武系水井沱组，震旦系陡山沱组 [25-26]，二叠系孤峰组、吴家坪组、大隆组 [27-29]；滇黔桂地区泥盆系榴江组、罗富组、纳标组以及打屋坝组 [30-31]；南华北盆地石炭系—二叠系太原组—山西组 [32]；松辽盆地下白垩统沙河子组 [33]；鄂尔多斯盆地三叠系延长组 [34]、二叠系山西组 [35]、奥陶系乌拉力克组 [36] 等；但尚未实现页岩气大规模商业开发。需要说明的是，上述页岩分布面积广、累计厚度大、生烃潜力大，是国内多个大型含油气盆地的重要烃源岩，页岩气资源潜力巨大，将是未来中国页岩气产业可持续发展的重要保障。

以上页岩气勘探开发成绩的取得，得益于理论与技术的快速发展和进步。四川盆地五峰组—龙马溪组已经并将继续成为中国页岩气勘探开发的主要目的层系 [37-38]，目前围绕上述层系在页岩气地质理论、工程工艺和开发技术等方面已经取得了巨大进展，主要包括以下方面：①页岩岩相古地理，认识到深水陆棚相是富有机质页岩发育的有利环境 [9,39]；②富有机质页岩精细刻画，引入生物等时地层的概念 [40]，并在相关生产企业取得良好的应用效果 [41-42]；③页岩气储层成因机理，认识到生物成因硅和有机质孔的重要作用 [43-45]；④页岩气赋存机理，揭示出单分子层吸附、多分子层吸附、微孔填充等机理 [17,46]，含气量评价方面提出“三段式”现场解析 [47-48]、页岩含气结构的同位素和测井评价 [49-50] 等方法技术；⑤页岩气富集高产机理，认识到有机碳含量和优质页岩气储层厚度是其主控因素，探索并提出了复杂构造区海相页岩气“二元富集”规律 [9]，明确 WF2—LM4 笔石带硅质页岩是五峰组—龙马溪组页岩气富集高产层段 [41]；⑥有利区和甜点评价，认识到需要从以静态指标为主评价向以动态指标为主评价转变 [51-52]，地球物理和测井技术在甜点评价、裂缝预测和水平井靶区优化等方面取得重要进展；⑦开发技术，认识到长水平段 + 密切割 + 强支撑 + 大排量等工艺技术有助于页岩气增产 [53-55]；⑧页岩气开采，认识到基于储层认识和甜点分布进行立体开发井网合理部署，可以实现页岩气田储量动用率和采收率的最大化 [56-57]。以上成果和认识为其他页岩层系富有机质页岩评价、储层形成机制分析、含气量评价、资源潜力评价和富集高产层段识别等探索研究提供了参考，但其理论与方法技术的适用性仍需进一步评价、验证和发展。

为了给中国页岩气产业可持续、高质量发展提供借鉴和参考，笔者回顾了 20 年来中国页岩气相关科学研究和勘探开发历程，总结了理论研究和勘探开发实践所取得的主要成果与认识、经验和教训，分析了中国页岩气勘探开发和研究面临的挑战，展望了未来的页岩气勘探开发领域和攻关研究方向。

1　页岩气勘探开发历程

不少学者对中国页岩气勘探开发阶段都进行过划分。笔者基于理论—实践—理论这一认识到再认识过程，综合页岩气理论研究和勘探开发实践的相关成果，将中国页岩气勘探开发历程划分为以下 3 个阶段。

1）页岩气发现与目标探索阶段（2004—2012 年）。该阶段是汲取页岩气勘探开发经验，理论探索和选区评价阶段，以 2004 年《页岩气成藏机理和分布》发表、老井复查复试、新钻井试验等为标志。在产业界，2005 年中国石油天然气股份有限公司（以下简称中国石油）与美国新田石油勘探公司（Newfield Exploration Company）联合在国内开展页岩气评价研究，依据多口老井中丰富的页岩含气显示现象，提

出四川盆地及其周缘下古生界具备海相页岩气形成与富集的基本地质条件，并且开展了长芯 1、桥亭页 1 等井的钻探评价工作 [6]；中国石油化工股份有限公司（以下简称中国石化）开展“中国页岩气早期资源潜力分析”研究，初步提出页岩气选区评价方法，优选中国南方海相页岩分布区作为重点勘探领域 [11]，随后开展了方深 1 井老井压裂以及宣页 1、河页 1、黄页 1 等井的钻探工作，并逐渐认识到页岩气保存条件的重要性 [11]，勘探方向也逐渐由中国南方向四川盆地内部聚焦。2008 年，中国地质大学（北京）张金川团队完成“中国南方地区油气新区新领域优选——页岩气”研究，指出中国南方古生界页岩气藏最有利发育层系是志留系，确定了各层系页岩气有利勘探区，初步计算了中国页岩气资源量 [58-60]；同期，中国海洋石油集团有限公司（以下简称中国海油）、陕西延长石油（集团）有限责任公司（以下简称延长石油）、中国科学院、北京大学、南京大学、西北大学、兰州大学、中国地质大学（武汉）、中国石油大学（北京、华东）、中国矿业大学（北京、徐州）、成都理工大学、长江大学、西南石油大学、西安石油大学等油气田企业、科研院所和高等院校也进行了国外页岩气勘探开发经验分享和国内页岩气早期评价研究。在国家层面，2009 年，原国土资源部组织启动了“中国重点地区页岩气资源潜力及有利区带优选”科研项目，开展了“川渝黔鄂页岩气先导试验区”建设，钻探渝页 1 井并发现页岩气 [5,61-62]；2010 年，以“中国页岩气资源基础及勘探开发基础问题”为主题，召开第 376 次香山科学会议；2012 年，向社会公布中国页岩气地质资源量为 131.42×10^{12} m^3，可采资源量为 25.08×10^{12} m^3（不含青藏区）[63]。2011—2012 年，先后开展了两轮页岩气探矿权出让招标 [64]，并在重庆南川和贵州岑巩等区块发现页岩气。这一时期除了对中国南方上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组、下寒武统筇竹寺组和牛蹄塘组开展研究外，对四川盆地上三叠统须家河组 [65]、下侏罗统自流井组 [66]，鄂尔多斯盆地上三叠统延长组 [67]，渤海湾盆地济阳坳陷古近系 [68]，黔南坳陷寒武系、二叠系 [69]，辽河东部凹陷古近系 [70]，下扬子地区二叠系 [71] 等页岩层系也开展了页岩气评价工作，其中部分钻井发现了页岩气。

2）页岩气勘探突破和快速建产阶段（2012—2021 年）。该阶段以四川盆地川南地区宁 201-H1、YS108H1-1，重庆彭水地区彭页 1、涪陵地区焦页 1 等井页岩气高产突破为标志，其中 2012 年，中国石化在重庆东部涪陵焦石坝地区以五峰组—龙马溪组为目的层钻探了焦页 1 井，获页岩气测试产量 20.3×10^4 m^3/d，继而发现了涪陵页岩气田 [9]（截至 2023 年 10 月，该气田累计页岩气产量已经超过 600×10^8 m^3）。至此，中国页岩气勘探历经近 10 年艰难工作终获发现并随即进入加速发展阶段。2012—2013 年，国家先后设立了四川长宁—威远、滇黔北昭通、重庆涪陵等国家级页岩气示范区，出台了一系列页岩气开发利用补贴政策 [72]。中国石油和中国石化在太阳、武隆等地区常压页岩气和泸州、南川、永川、白马、丁山、威荣（威远—荣县）等地区深层页岩气勘探也获得重要进展；2018 年，中国石化提交中国第一个深层页岩气田——威荣页岩气田探明储量 1 247×10^8 m^3[45]。中国海油在芜湖上二叠统大隆组和中二叠统孤峰组，延长石油在鄂尔多斯盆地下二叠统山西组和上三叠统延长组，以及中国地质调查局在油气区块以外空白区的震旦系、寒武系、志留系、泥盆系等开展了大量调查工作，在贵州正安五峰组—龙马溪组和湖北宜昌下寒武统水井沱组等层系获得页岩气发现。

3）页岩气创新与全面发展阶段（2022 年以来）。该阶段以侏罗系、二叠系和寒武系等页岩气勘探突破为标志。在五峰组—龙马溪组页岩气持续增储上产的同时，四川盆地二叠系海陆过渡相龙潭组、二叠系海相吴家坪组和大隆组、侏罗系陆相自流井组和凉高山组、寒武系海相筇竹寺组等探井均获得页岩气流，尤其是绵阳—长宁拉张槽中心资 201 井和西斜坡金石 103 井寒武系的突破，展示了寒武系海相页岩气巨大的资源潜力。目前正在对涪陵地区自流井组、川东—川东北吴家坪组和大隆组、川西南井研—犍为和资阳等地筇竹寺组、松辽盆地梨树断陷下白垩统营城组等页岩气藏开展科研攻关。如果产能建设得以顺利实施，上述层系将有望成为继五峰组—龙马溪组之后的高产页岩气目的层。

2023 年中国页岩气总产量为 250×10^8 m^3（图 1）；

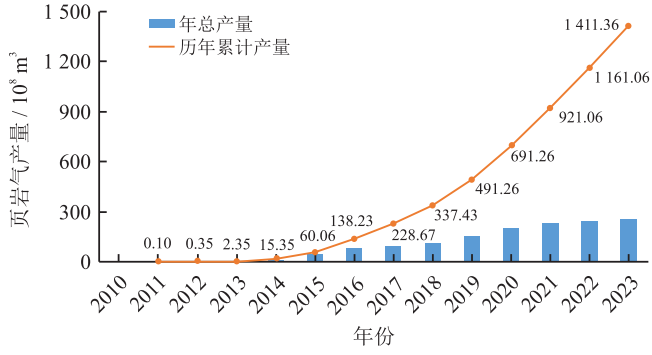


图 1　中国历年页岩气产量统计图

截至 2023 年底，中国历年累计页岩气产量已经超过 1 400×10^8 m^3，并且在四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组累计探明页岩气地质储量 2.96×10^{12} m^3。

2　页岩气地质理论和勘探开发关键技术进展

20 年来从无到有，中国在富有机质页岩发育机理、页岩气储层特征及其成因机制、页岩气源—储协同演化机制、页岩气赋存机理与含气性评价、页岩气富集高产机理及评价技术、页岩气地球物理勘探技术、页岩气储层改造技术和页岩气开采技术等方面取得了一系列重要进展，逐步形成了适应于中国独特地质特征的页岩气地质理论、勘探开发关键技术及多方面配套的页岩气产业技术系列，页岩气一跃成为中国发展速度最快的天然气类型之一。

2.1　富有机质页岩发育控制因素及其特征

富有机质页岩是页岩气富集高产的物质基础[9,39,73]，其形成非单一因素所决定，而是由构造背景、古气候、初级生产力、水体氧化还原条件、沉积速率和陆缘碎屑输入等多种要素与火山活动、海底热液等地质事件相互配置与耦合的结果[74-79]。

富有机质页岩形成与其沉积时的构造背景和沉积环境密切关联，构造作用通过控制海—陆分异格局、海底地貌格局从而控制页岩的时空分布[80]。在陆相沉积盆地中，半深湖—深湖是有利于富有机质黑色页岩发育的主要沉积环境[81]；而在海相沉积盆地中，富有机质页岩主要发育于被动大陆边缘背景下的裂谷、克拉通内裂谷、克拉通内坳陷盆地和克拉通边缘坳陷盆地，主要形成模式包括上升洋流模式、大洋缺氧事件模式和黑海滞流盆地模式[80,82]。如四川盆地及其周缘在晚奥陶世—早志留世处于被动大陆边缘向前陆盆地的转换时期，在闭塞和缺氧的克拉通边缘坳陷盆地和克拉通内坳陷盆地的深水陆棚—底栖藻席模式下发育了一套广泛沉积的黑色页岩[82]，自下而上划分为五峰组和龙马溪组，是中国南方重要的海相烃源岩和页岩气发育层。

古气候不仅影响母岩风化、沉积物侵蚀和搬运，还影响海洋水体分层、生物种属和种群密度等。通常情况下，高丰度有机质往往形成于温暖潮湿的气候背景下，气候旋回的周期性变化影响着沉积物中有机质的分布。尽管由气候变化引起的风暴不利于有机质保存，但其形成的水体对流却可以极大地提高水体的营养程度，进而提高生物生产力。气候由冰冷快速转暖不但可以使得海平面升高，而且会引起水体分层，利于有机质保存[83]。温湿气候有助于大气水循环，加速母岩化学风化，有助于营养物质向海、湖输送，促进表层水体微生物发育繁盛，有机质埋藏量增加，随着水体进一步缺氧，有利于有机质的富集和保存。

初级生产力和保存条件（主要包括水体氧化还原条件和沉积速率）也是控制页岩有机质富集的重要因素[84]。初级生产力是指生物在能量循环过程中固定能量的速率，即单位面积、单位时间内所产生有机物的量，其高低直接影响着有效烃源岩的形成和分布[85-86]。海底热液、陆源输入、上升洋流等往往会携带或者分解释放大量益于生物繁盛的 N、P、Fe、Cu、Zn 等营养元素，能为藻类等低等水生生物勃发提供充沛的营养，有利于初级生产力的提高。高的初级生产力为有机质富集提供了充足的物质基础，早期有机质矿化作用形成的缺氧环境是有效保存原始沉积有机质的必要条件[28,84,87]；不同生物及其成烃生物组合对烃类生成的贡献不同[88]，进一步控制着烃源岩生烃潜力和页岩气储层有机质孔的发育能力。

沉积速率（*SR*）在有机质富集与保存中扮演着双重角色。前人的研究成果表明，当 $SR < 5$ cm/kyr 时，有机质含量随着沉积速率的增加而增大，说明一定范围内相对高的沉积速率有利于有机质保存；当 $SR > 5$ cm/kyr 时，有机质含量随着沉积速率的增加而降低，意味着过高的沉积速率会对有机质进行稀释，不利于有机质富集[77]。这种现象可以理解为过低的沉积速率使得有机质在富氧水体环境中遭受氧化降解和底栖生物的消耗，而过高的沉积速率则使得有机质受矿物的稀释作用增强，在一定程度上降低了有机质含量[89]。因此，沉积速率并非越高或者越低越好，只有在一定速率范围内才最为有利。

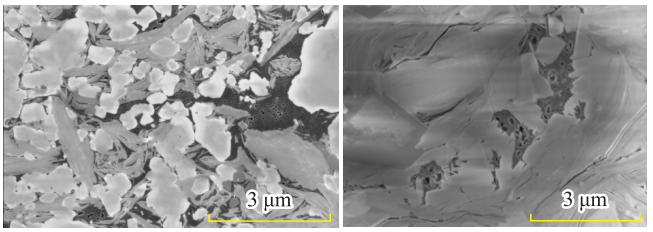
火山活动通过影响生物生产力和保存条件间接控制着页岩有机质富集[79]。火山活动对有机质富集的有利作用本质上是提高生物生产力[90]，其所带来的火山灰在水体中会发生水解，释放大量有益于生物繁殖的营养元素，如 P、Cu、Si、Fe 等，促进浮游生物和藻类的繁盛，提高海洋生物生产力[91-92]。适当频率与强度的火山活动有助于促进海洋中生物繁盛，为有机质的富集提供物质基础，但过于剧烈的火山活动则会造成生态环境破坏和海水性质恶化，导致大量生物死亡[93]。火山活动释放的 SO_2、H_2S 等酸性气体会在空气中氧化形成 H_2SO_4 气溶胶，溶于雨水形成酸雨，进入海洋中使水体硫化，造成水体缺氧

形成还原环境[94-95]；火山活动引起的海洋表层生物勃发会消耗水体中的溶解氧，进一步增强水体的还原性，缺氧的环境会造成海洋生物死亡快速堆积埋藏，有机质得以保存。海底热液同样富含丰富的营养元素，可以为菌藻类等生物群落繁盛提供丰富的营养物质[76-77]，有助于提高生物生产力水平。

在富有机质页岩地层精细划分方面，陈旭等[40]建立了扬子地区五峰组、龙马溪组和南江组的高分辨率笔石生物带，并建立了龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式和圈层展布模式[96-97]。该高精度地层划分方案为页岩气甜点层段和甜点区评价提供了依据，在油田企业获得了良好的应用效果[41-42,98-102]，在页岩气勘探开发中发挥了重要作用[103]。在页岩岩相划分方面，不同学者先后提出了多种划分方法，主要包括四组分三端元分类方案[104]、基于不同算法的测井识别法[105]，已达成共识的是分类方案应以矿物组成与沉积构造作为两个核心指标，并且考虑总有机碳含量的作用。研究认为，对于寒武系、志留系海相页岩来说，硅质页岩相较为有利[41]；对于侏罗系陆相页岩层段来说，普遍具有页岩与夹层频繁互层发育的特点，并且夹层类型（砂岩、介壳石灰岩等）多样、厚度大小不一（从毫米级到米级），目前认为纯页岩型、页岩夹纹层—薄层状介壳石灰岩型岩相组合较为有利[106]。

2.2　页岩气储层特征及其成因机制

对于海相页岩气储层最重要的认识就是有机质孔的发现，通过光学显微镜识别出有机质中存在微裂缝和孔隙[107]，并通过氩离子抛光＋扫描电镜技术发现了纳米级有机质孔[108]（图 2），明确了有机质孔是页岩气储层的主要储集空间类型和页岩气藏评价的主要参数[109-110]，对于有机质孔的评价已经成为页岩气储层评价和富集高产评价的主要内容之一[111-112]。研究认为，有机质孔是页岩有机质热成熟度达到一定阶段的产物[113-114]，其发育主要受有机质类型（成烃生物类型）、成熟度、矿物类型及其成岩作用阶段、矿物组合特征等的控制[43,115-116]，有机质与有机质孔的耦合演化保证了高演化海相页岩气的富集成藏[117]。石英对页岩气储层的形成具有重要的控制作用[118-119]，尽管所有石英均有抵抗压实的能力，但考虑到对干酪根保存和原油滞留等所起到的作用，认为石英形成的时间越早、形成的格架越早，越有利于有机质孔的保持和保存[45,120]。因此，即使相同石英含量的页岩，由于其不同的石英类型及其成因、不同石英的形成时间使得有机质孔的发育有较大差异。生物成因石英对于优质页岩气储层的形成最为重要[44,121-122]，结合蛋白石 A →蛋白石 CT →石英演化历史与氧同位素等的研究成果，认为生物成因硅主要在早成岩 A 期生成[44]，说明生物成因石英形成于页岩低成熟阶段的早成岩 A 期和 B 期。这一时间早于干酪根的生油窗，有利于原生孔隙的保存。因此，生物成因石英含量与页岩的储集能力密切相关。聂海宽等[45]认为硅质页岩具有“多藻控烃源、生硅控格架、协同演化控储层”的优质储层成因机制。鉴于有机质孔和生物成因硅对页岩气储层和页岩气重要的控制作用，张光荣等[123]建立了基于有机质孔和生物成因硅优选页岩气富集高产层段的“3+30”方法，该方法实现了页岩气富集高产层储集能力和改造能力评价的有机统一。有机质孔隙度大于 3%、生物成因硅含量大于 30% 且页岩厚度大于 10 m 的区域，与已发现的页岩气藏存在着良好的对应关系（图 3），表明该方法在页岩气有利层段优选和储量预测方面，具有一定的应用价值。需要说明的是，四川盆地筇竹寺组低有机质丰度粉砂质页岩气藏的储集空间主要为矿物质孔，改变了只在富有机质黑色页岩中寻找页岩气的传统思维[124]，拓展了页岩气的勘探开发领域。



a. JY11井，志留系龙马溪组，海相硅质页岩中的有机质孔，主要发育在生物成因石英和陆缘碎屑石英格架间的有机质中

b. FY10井，侏罗系自流井组东岳庙段，陆相黏土质页岩中的有机质孔，主要发育在黏土矿物和石英刚性格架间的有机质中

图 2　典型页岩的微观储集空间类型镜下照片

天然裂缝是页岩气的重要储集空间和主要渗流通道。天然裂缝发育特征关乎页岩气的富集、保存、单井产能及开发效果[125]，对页岩气勘探开发具有重要意义。按成因类型可将其划分为构造裂缝、成岩裂缝和异常高压裂缝[125]；按规模可将其划分为巨型裂缝、大型裂缝、中型裂缝、小型裂缝和微型裂缝等 5 类[107]。通常认为，小型裂缝和微型裂缝对于页岩气藏保存和页岩气开采都起着积极作用，而大中型的穿层断裂对页岩气藏则起破坏作用。受多期构造运动的影响，中国南方海相页岩裂缝普遍较发育，页岩气保存条件是当下研究的重点和难点[126-127]，主要基于裂缝中充填脉体的类型、期次、包裹体均一温度、

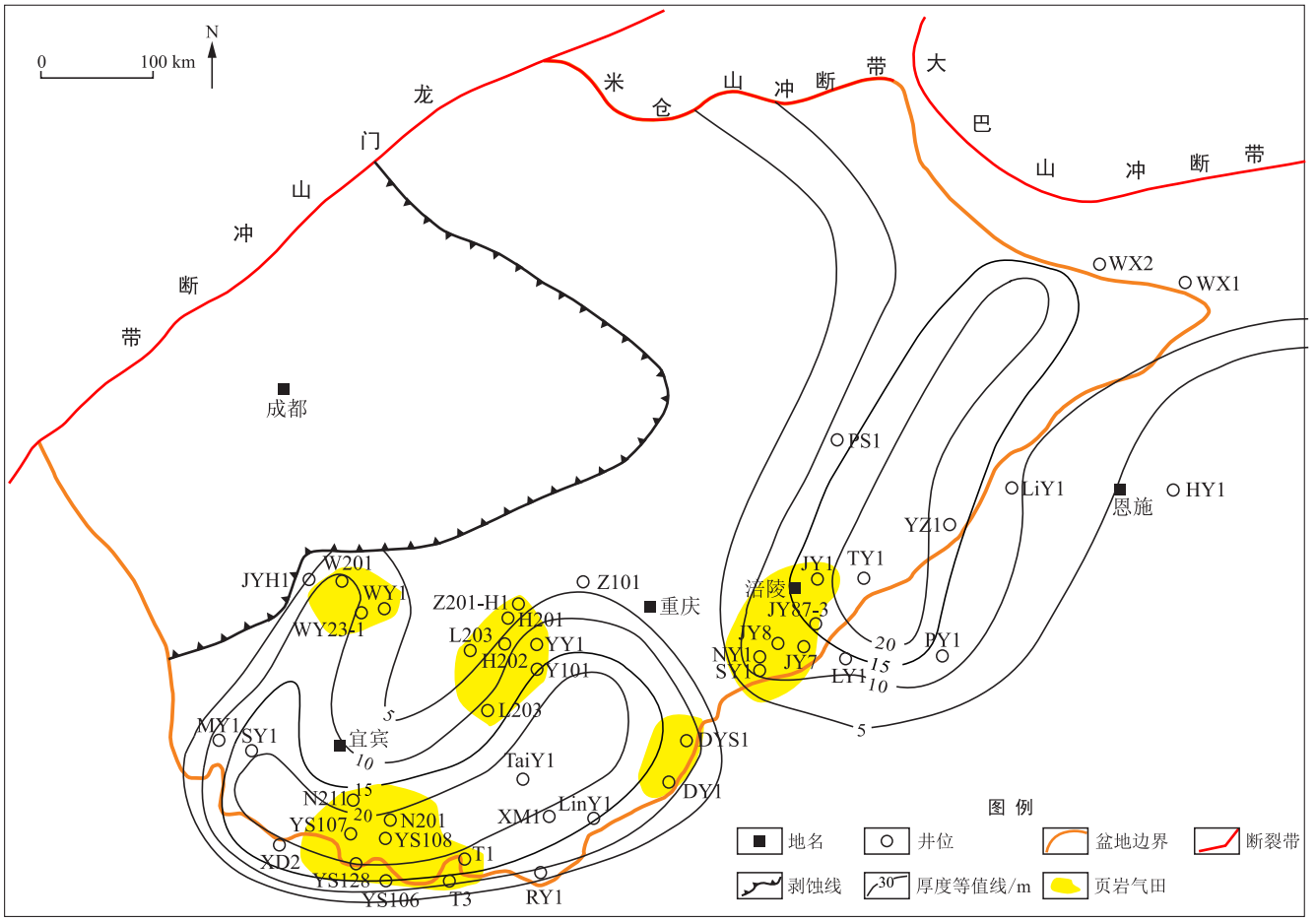


图 3　四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组硅含量超过 30% 的页岩厚度与已发现页岩气田分布图

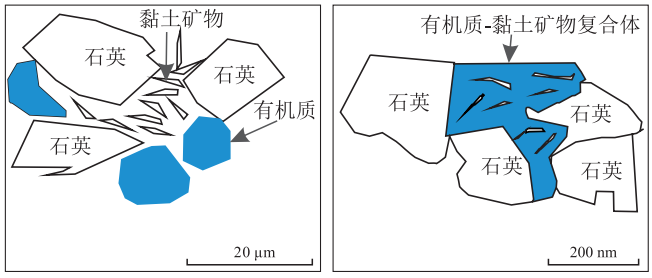
U-Pb 年代等参数，结合页岩埋藏史、生烃史开展页岩气保存条件研究 [128-129]，目前基本明确了裂缝—流体（脉体）活动期次和页岩含气量之间的定性关系，但要厘清相关定量规律仍需开展科研攻关。

陆相、海陆过渡相页岩层系物质组成与沉积构造更为复杂多变 [130]，其中不同程度地发育多种类型的夹层（介壳石灰岩、白云岩、粉细砂岩类），并且由于陆源碎屑、生物介壳等的输入，使得页岩有机质丰度及类型、矿物组成、岩相类型及组合表现出多样性与复杂性 [106,131]。上述两种页岩的黏土矿物总量略高于海相页岩，而脆性矿物含量则低于海相页岩，其石英含量（15.0% ～ 56.0%）明显低于黏土矿物含量（34.0% ～ 62.5%），生物成因石英含量较低。储集空间以矿物质孔为主，有机质孔为辅（图 2），局部发育微裂缝；矿物成分及含量控制着无机孔的发育，有机显微组分类型控制着有机质孔的发育；孔隙形态主要表现为线状、缝状或不规则状，孔径多为纳米级微、介孔，连通性较差 [132-134]。陆相页岩孔隙整体表现为形状多样、小孔径和低面孔率，如四川盆地下侏罗统大安寨段页岩孔隙类型以溶蚀孔、黏土矿物晶间孔、微裂缝为主 [135]；鄂尔多斯盆地延长组页岩孔隙类型多为黏土矿物粒间孔、构造张裂缝等 [136]。总之，陆相页岩总有机碳含量（*TOC*）一般不超过 5%，孔隙度和渗透率都较低，并且孔隙度与 *TOC* 的相关性也较差。就含气性而言，陆相页岩一般比海相页岩要差，并且由于陆相页岩中黏土矿物含量较高，在页岩气勘探开发中对储层压裂改造效果也有一定程度的影响，因而有可能制约了现阶段对陆相页岩气的大规模高效开发。

在储层评价方面，主要针对有机质孔、矿物质孔和微裂缝等储集空间类型 [107,137]，孔隙度、渗透率和裂缝发育等储集物性 [111,138]，气体赋存方式、含气结构和含气量 [139-140]，页岩气储层主要特征及其对储层改造的影响 [107,137,141]，以及压后动态评价等方面开展了研究 [142]，认识到有机质孔是页岩气富集的主要空间并决定着储层质量和气藏品质 [107-108,143]，建立了页岩气储层评价参数标准，开展了储层分级评价和有利储层预测 [144-145]。

2.3　页岩气源—储协同演化

源—储协同演化（有机—无机相互作用）是页岩气研究的重点和难点 [146]。有机质与矿物经历着相似的埋藏过程，主要无机成岩作用与有机质热成熟作用均存在着明显的联系 [10]。研究结果表明，矿物、放射性元素、深部无机流体、水和过渡金属等无机组分在页岩气的形成和演化过程中具有举足轻重的作用 [147]。黏土矿物具有较强的催化作用和吸附能力，该认识由来已久 [148-149]，Tannenbaum 和 Kaplan [150] 认为蒙脱石、高岭石和伊利石的催化能力逐次降低。学者们目前普遍认为黏土矿物的存在可以促进页岩气的生成和保存 [151]，其中矿物类型、含量以及与有机质的空间接触关系（图 4）被认为是控制黏土矿物催化效率的主要因素 [152-153]。然而，Lewan 等 [154] 基于块状页岩样品的热模拟实验结果却表明蒙脱石夹层倾向于锁住初次裂解形成的石油，致使其转化为焦沥青而不是二次裂解成天然气，因而降低了页岩气的生成和保存效率。



a. 松散接触，黏土矿物催化效率低　b. 紧密接触，黏土矿物催化效率高

图 4　有机质与矿物的空间接触关系示意图

（资料来源：本文参考文献 [153]，有修改）

沉积岩中 99% 以上的放射性由铀、钍、钾这 3 种元素贡献，其中铀的作用最为重要。首先，放射性元素衰变放热可以有效提高地温梯度并促进油气的生成 [155]，例如四川盆地埋深相近的五峰组—龙马溪组页岩的有机质成熟度与铀含量呈明显正相关性 [156]。其次，铀元素的原子结构决定了它具有良好的配位性，在油气生成过程中具有络合催化作用，从而促进油气的生成 [157-158]。近年来的研究成果表明，铀元素在衰变过程中释放的阿尔法射线可以直接改变干酪根的结构并释放天然气 [159]，释放量与受辐射强度和时间的累计有关 [160-161]。Silva 等 [162] 提出，被广泛认为是生物成因型的美国（密歇根盆地）Antrim 页岩气，有可能其中一部分就是由放射性元素辐射干酪根所形成的。

地球深部流体携带的物质（C、H、催化物质）和能量不仅能够促进烃源岩早熟和高成熟烃源岩活化加氢生烃，而且还可以促进费托合成反应生成无机 CH_4，使有机质热演化生烃形成“热液油气”[163-164]。除此之外，加水热模拟实验结果显示，水的存在也可以为油气的生成提供额外氢源并影响石油的二次裂解过程 [165-166]，从而提高油气的产率。然而对于生烃阶段页岩中水的来源和数量目前尚存在着较大的争议 [147,167]。Mango 等 [168] 提出页岩中的过渡金属是重要的轻烃催化剂，并被认为是页岩气重要的生成机理 [169]，不过 Lewan等 [170] 的有水热模拟实验结果则显示过渡金属的催化作用非常有限。这可能与水可以抑制催化剂的效能有关。

在有机质生烃演化过程对页岩矿物成岩作用以及矿物相关孔隙形成和演化的影响方面，研究还比较薄弱。页岩是由有机质、矿物和水等构成的一个复杂体系 [171-172]，有机质演化和矿物之间转化都是在热力学驱动下达到一个稳定状态的过程，有机质生烃和矿物的转化过程及其引起的一系列化学反应是页岩典型的成岩作用特征，其矿物的形成演化与砂岩、碳酸盐岩储层有着本质上的区别。早期成岩作用阶段，有机质在微生物作用下发生的氧化降解是成岩过程的主要驱动力 [173]，是典型的生物地球化学过程。有机质分解过程中释放二氧化碳、甲烷、氢、乙酸等低分子有机酸使得孔隙水化学性质发生变化，从而打破原始矿物与孔隙水之间的化学平衡，促使矿物溶解以及次生矿物沉淀，引发多种有机—无机反应 [147,174-176]。有机—无机相互作用遵循有机质依次被 O_2、NO_3^{2-}、Fe^{3+}、SO_4^{2-} 氧化的基本原理，不同沉积环境中各主要氧化剂的优势还原作用具有分带特征 [177]。磷酸盐矿物、碳酸盐矿物、硫化物、纳米级硅球、氧化钛等次生矿物在这一过程中形成 [178-181]。中期和晚期成岩作用阶段，温度和压力的驱动作用是目前成岩作用理论认识方面比较成熟的领域 [182-183]，在有机质大量生油气阶段，油气生成以及超压抵消了部分压实作用，共同形成了有利于有机质孔形成和保存的环境；另一方面，由于地层水排出和油气生成，矿物的成岩作用受到抑制，主要是残留水和矿物的相互作用，黏土矿物的转化受影响较小，伊蒙混层、伊利石的演化主要受温度控制，受有机质生烃的影响较小。

总之，页岩气源—储协同演化是页岩生排烃、优质储层和储集能力评价的主要内容，需要对有机—无机作用机理、有机质生排烃历史及生排烃量、矿物类型及其成岩作用、有机质孔和矿物质孔的动态演化历史过程等方面开展综合研究。

2.4　页岩气赋存机理与含气性评价

页岩气在微纳米级孔缝中的赋存机理和含气结构是页岩含气性评价所包含的重要内容。前人借助气体吸附、分子动力学模拟等手段，系统揭示了页岩气的微观赋存机理，主要包括以下 3 种 [17,184-185]。

1）游离。它是页岩气最简单的赋存机理，即气体分子以游离相态聚集于孔隙空间内，在压差或浓度差驱动下可以自由流动。因此，游离态页岩气含量越高，页岩气的勘探开发前景越佳。一般来说，在页岩气供应充足的情况下，影响游离气量的主要因素包括温度、压力、孔隙体积以及含水饱和度 [186]。此外，孔隙连通性、气体组成、吸附相占据空间等因素也会影响页岩中游离气的含量 [187-189]。

2）吸附。它是页岩气藏有别于常规天然气藏最显著的特征机理，气体分子在气—固分子间作用力（范德华力）的驱动下吸附并堆积在孔隙表面形成吸附气膜，为一个自发的物理吸附过程 [46,190]。过去多数研究结果都认为，页岩气是单层吸附，气膜厚度与甲烷的分子动力学直径相同，但借助分子动力学模拟研究却发现，页岩气在高压条件下也存在多层吸附现象，包括一个紧密堆积层和一个松散堆积层，两层的吸附相密度非恒定且后者明显降低（图 5），在孔径减小到微孔后吸附相密度将发生叠加，形成微孔填充 [191]。这在游离气量的计算过程中需要有针对性地考虑。影响页岩气吸附的因素包括内因和外因两大类，前者包括有机质类型、有机质丰度、有机质成熟度、岩矿组成、气体组成、孔隙结构（主要是比表面积）、润湿性以及孔隙水等；后者包括温度和压力 [192-198]。对于各因素的影响机理已有许多探讨，此不赘述。

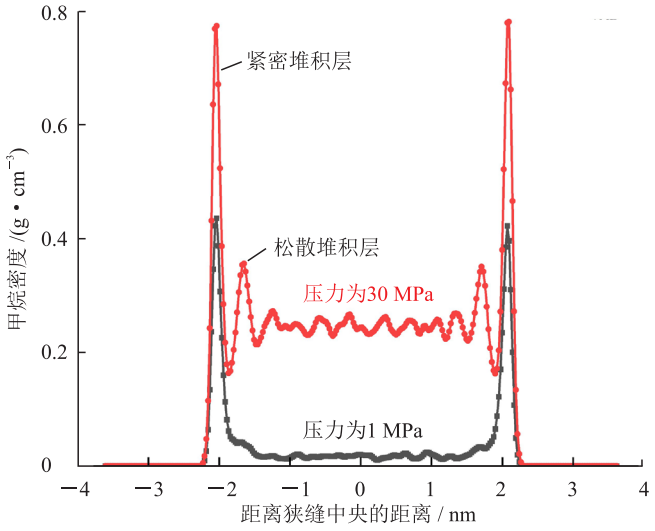


图 5　不同压力条件下吸附态甲烷密度分布曲线图

3）溶解。它是指页岩气呈游离分散状态溶解于孔隙流体之中的赋存状态，在前期高成熟度海相页岩气研究过程中，由于溶解态的页岩气含量较少，在地质评价中多被忽略不计。但近年来的实验研究和生产实践则发现，高过成熟页岩中也有地层水的存在。因此在储层压力条件下，必然有部分页岩气溶解在地层水中，特别是对于低熟的陆相页岩气而言，孔隙流体不仅有地层水还有石油，此时溶解态页岩气则有可能是陆相页岩气的重要组成部分，不容忽视 [199-200]。一般来说，影响页岩溶解气含量的因素包括温度、压力、气体组成、石油组成及物理性质、地层水矿化度等 [201-202]。因此，进一步探究页岩溶解气量主要影响因素并建立评价和预测方法，是页岩含气量评价后续研究的重要内容之一。

明确页岩气赋存机理是为了更准确、科学地评价页岩含气量，页岩含气量评价尤其是损失气量准确计算目前仍然是页岩气研究领域的一个技术瓶颈。在早期的研究中，页岩含气量的评价方法和手段主要是从煤层气行业借鉴过来的。经过几十年的发展，目前页岩含气量评价方法已自成体系，测定仪器已基本实现了自动化、智能化、信息化和数字化 [203-204]，评价结果的可靠性也有大幅度提升。根据含气量的获取方式，可以将含气量评价方法划分为直接法和间接法 [205]。①直接法包括保压取心解吸法 [206-208]、现场解吸法 [48] 以及浸水观察法 [209]，其中现场解吸法因成本低、可靠性高而被确定为页岩含气量评价的主要方法 [205]。在该方法中，页岩总含气量由损失气量、解吸气量和残余气量构成。“保压取心”方法的应用避免了损失气量恢复难度大的不足 [208,210]，提高了含气量的测试精度，但由于成本过高，大规模现场应用仍然受限。②间接法并不直接测定岩心样品释放的气量，而是通过理论计算获取游离气量、吸附气量及溶解气量，进而求取总含气量，主要包括等温气体吸附实验 [46,211]、基于孔隙类型的压力—体积—温度（PVT）计算 [188,212]、测井解释法 [213-215]、气测全烃录井法 [216]、地震解释法 [217-218]、产量分析法 [219]、同位素分馏法 [49,220-222] 以及分子动力学模拟法 [223-224] 等。从理论上讲，直接法获取的含气量应等同于间接法获取的含气量，但由于两者在测定方法、计算过程等方面存在着较大的差异且受诸多因素的影响，导致两种结果往往不一致，其中损失气量无法可靠获取是造成上述现状的重要原因之一。目前针对损失气量来源在认识上还存在着不同，有专家认为页岩的损失气全部为游离气 [225]，但也有专家发现页岩损

失气不仅有游离气而且还有吸附气[226]。但无论如何，游离气作为损失气的主要来源这一认识应该是毋庸置疑的。典型的损失气量计算方法包括 USBM 直线回推法[227]、二项式拟合法[228]、Amoco 曲线拟合法[229]等；也有专家提出了其他非线性拟合法用于损失气量的计算[228,205]。但上述方法的建立均基于对煤层吸附气解吸—扩散行为的研究，未充分考虑压缩游离气的膨胀—渗流。对此，近年来还提出了许多新的数学模型或方法用来估算损失气量，如 Hosseini 气体释放模型[230]、非等温流动模型[231]、改进的 USBM 回归法[232]、解吸过程分析法[233]、准 Langmuir 动力学模型[234]、分段可变边界模型[235]和逸散全过程分析数学模型[236]。这些模型考虑了游离气的体积膨胀和渗流，因而可能会得出一个比较合理的估算值，但仍需现场应用验证。

目前，越来越多的学者都认识到页岩气埋藏史和生排烃史决定着页岩含气量的评价[237-239]，页岩埋藏史、生排烃史、关键构造变革期的生排烃量、抬升剥蚀过程中构造改造强度以及有机质类型、热演化程度共同控制着烃类滞留程度，以四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气藏为例，加里东期和燕山期的最大埋深以及印支期、燕山期以来的抬升时间与幅度对该气藏现今含气量具有重要的控制作用。

2.5　页岩气富集高产机理及评价技术

在页岩气富集机理和评价方面，不同学者提出了不同的认识和评价标准，如张金川等[1]认为页岩气成藏与演化可分为 3 个主要的作用过程，自身构成了从吸附聚集、膨胀造隙富集到活塞式推进或置换式运移的机理序列，并指出岩性特征变化和裂缝发育状况对页岩气赋存特征和分布规律具有控制作用；聂海宽等[39]在系统研究美国页岩气成藏理论和成藏条件的基础上，从内部因素和外部因素分析了页岩气成藏的主要控制因素；郭旭升[9]探索并提出了复杂构造区海相页岩气“二元富集”规律，即深水陆棚优质泥页岩发育是页岩气“成烃控储”的基础，良好的保存条件是页岩气“成藏控产”的关键；Xiao 等[240]认为页岩有机质成熟度、储层特征、流体压力、保存条件和含气量等是页岩气富集的主控因素；邹才能等[10]提出页岩气“构造型甜点”和“连续型甜点区”的富集模式；Nie 和 Jin[241]、Jin 等[242]从“源盖控藏”分析认为源—盖空间匹配关系的数量（静态匹配）和质量（动态匹配）控制着页岩气富集位置和富集程度，三叠系膏盐岩与已发现页岩气藏有着良好的对应关系（图 6），进一步指出 WF2—LM4 笔石带页岩具有较好的页岩气物质基础，是五峰组—龙马溪组页岩气富集的有利层段；何治亮等[243]提出页岩气“建造—改造”评价思路，认为优越的原始沉积条件与成岩过程（地质建造作用）与后期适度的构造变形改造与抬升剥蚀（地质改造作用）的有机组合，是页岩气富集高产的前提与关键；腾格尔等[244]认为复杂构造区高热演化海相页岩气的形成与富集，受缺氧的沉积环境、优质的烃源品质、优越的储集空间和良好的封存条件综合控制；姜振学等[245]认为生—储—保有效综合匹配决定了页岩气成藏品质，指出有效生气量和时段、适度孔隙演化、良好保存条件在时空上的良好匹配是页岩气富集的关键；贾承造等[246]指出页岩气成藏机理的核心是自封闭作用，其动力是分子间作用力。总之，前人均认识到了页岩气自生自储特征、有机质孔是其主要储集类型以及页岩品质和保存条件是页岩气评价的主要内容。这些研究成果促进了中国页岩气地质理论进步以及五峰组—龙马溪组页岩气勘探快速突破和开发建产。

由于目前中国页岩气主要勘探开发对象——志留系、寒武系页岩具有时代老、构造复杂等特征，保存条件便成为页岩气评价的重点内容，主要从页岩的顶底板、构造作用和演化历史、断裂 / 裂缝发育程度及其活动期次、地层水条件、盖层及其微观性质、天然气组分和压力系数等方面对页岩气的保存条件进行研究[247-249]。最近的研究成果认为，不同的 $\delta^{13}C$ 分馏效应归因于生烃体系状态的差异性[239]，地层抬升作用，以及地层水、矿物、金属等对页岩气中烃类的后期改造可能是造成页岩气碳同位素值倒转的重要原因；碳同位素值倒转可能更多地体现了页岩气后期保存过程的影响[250]，进一步，Nie 等[50]根据页岩气藏甲烷碳同位素差值评价了页岩气的保存条件，并估算了每百万年页岩气的散失量。

中国南方海相页岩气开发涉及非常复杂的基础理论与方法，王红岩等[251]指出需要抓住关键科学问题，进行开发地质学、渗流力学、岩石力学、气藏工程、钻完井与采气工程等多学科联合与交叉研究。在富集高产层段评价方面，基于岩性和测井特征的小层划分与对比方法在油气田获得了广泛的应用，但这种划分未考虑等时地层的概念，在页岩缺失或减薄的地区应用效果可能不够理想。由于在五峰组—龙马溪组页岩中发现了笔石化石的存在，陈旭等[40]基于笔石分子特征，建立了页岩笔石带的详细划分方案。不同学者采用该方案对五峰组—龙马溪组页岩气富

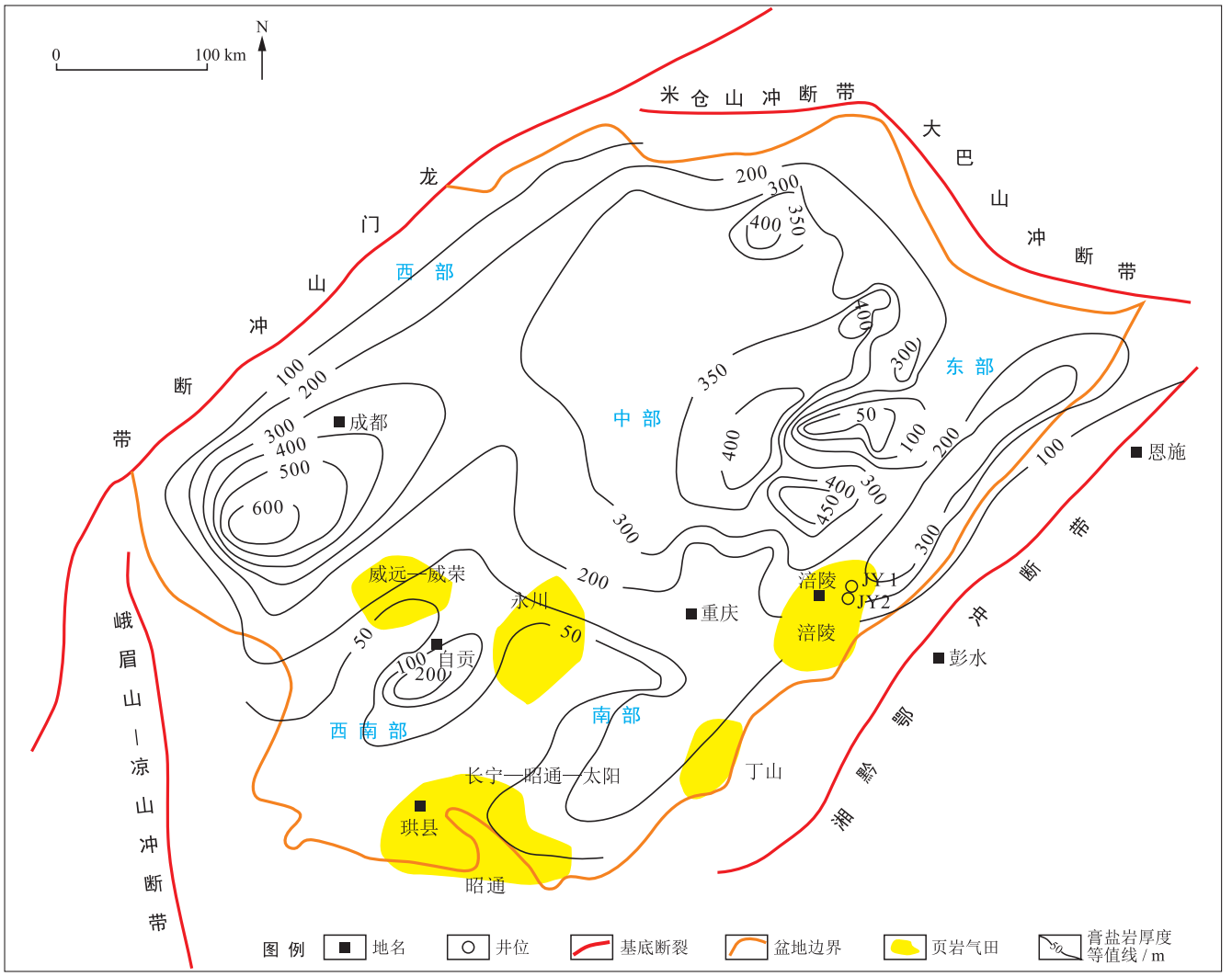


图 6　四川盆地及其周缘三叠系膏盐岩厚度与页岩气田分布图

（资料来源：本文参考文献 [52]）

集高产层段（黄金靶窗和铂金靶窗）进行了详细刻画 [41,98-99,252]。该方案提高了页岩小层划分精度和对比的可靠性，显著提高了油气田企业对页岩气井水平靶窗的预测精度和页岩气产量，WF2—LM4 笔石带硅质页岩厚度与页岩气井单井最终可采储量（*EUR*）有着良好的对应关系（图 7）。与五峰组—龙马溪组页岩类似，其他层系页岩气富集高产层段的确定也主要依据 *TOC* 的高低，但不同时代页岩判定的标准差异很大，如在筇竹寺组低 *TOC* 粉砂质页岩勘探中取得了重大突破 [124]，改变了多在富有机质（*TOC* > 2%）黑色页岩中寻找页岩气的传统思维，中低 *TOC* 页岩层系也成为勘探目标，极大地拓展了页岩气勘探开发范围；但同时也面临着页岩气富集高产层段不明的难题，需要根据页岩特征、气井产量以及工程工艺等具体分析，以确定不同开发层系的高产层段。

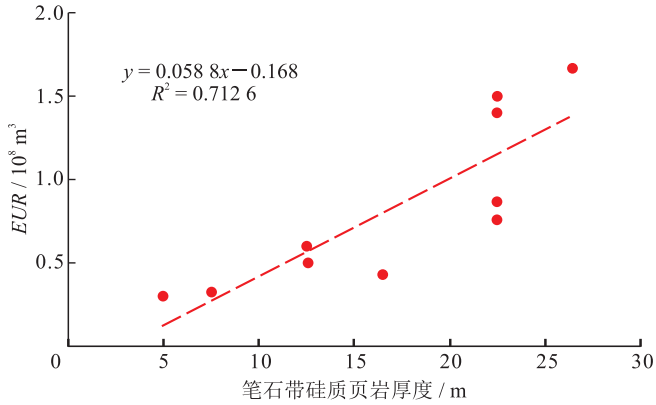


图 7　四川盆地典型页岩气井五峰组—龙马溪组 WF2—LM4 笔石带硅质页岩厚度与 *EUR* 的关系图

（资料来源：本文参考文献 [253]）

在资源评价和储量计算方面，主要采用类比法、成因法、体积法、数值模拟法和综合分析法 [254-258]，

具体采用哪种计算方法主要受研究区研究程度和勘探程度控制。一般在低勘探程度的地区采用类比法，类比刻度区的选择和解剖至关重要；在有一定研究程度的地区，一般采用体积法，各项参数的获取和选择成为关键（其中含气量的确定是研究的重点和难点）。勘探程度越高、数据越丰富，计算结果可靠性越强。在单井储量计算方面，主要采用经验法、解析法、数值模拟法，其中前者为常用方法，计算结果的可靠性主要受气井生产时间和模型选择的控制。

2.6　页岩气地球物理勘探技术

针对中国海相页岩气的特殊性，随着页岩气勘探开发工作的推进，地球物理勘探技术也不断取得进步。地震技术在复杂构造地震成像、甜点关键参数地震预测、天然裂缝预测、地层压力和地应力预测以及微地震压裂监测等方面取得重要进展，支撑了页岩气勘探开发中的井位部署、钻井轨迹设计与动态调整，以及压裂设计与储层改造等。测井技术在多类型孔隙组分测井精细评价、含气量测井定量评价、水平井测井响应校正及穿行轨迹优化、储层孔隙压力及地应力评价等方面取得重要进展，支撑了页岩气甜点段优选和高效开发。

2.6.1　地震方面

取得的进展主要包括：①复杂构造地震成像技术，采用对称轴倾斜的横向各向同性（TTI）速度建模及叠前深度偏移成像，剖面波组信噪比高且连续性好；基于照明补偿的各向异性逆时偏移成像（RTM）遵循全波动方程，且补偿复杂构造区地震采样的不足，相位准确、适应速度纵横向剧烈变化、陡倾角地层地震成像精度更高；采用深度域钻井信息约束速度建模及偏移成像，有效提高了井震吻合率。②甜点关键参数地震预测技术，基于页岩各向异性岩石物理建模，建立优质页岩气储层地震识别、脆性指数和甜点预测方法[259]。通过分析脆性矿物含量、裂缝密度、有机碳含量等参数对杨氏模量、泊松比的影响，构建新的脆性评价指标，实现页岩脆性定量表征[260]。基于岩心刻度测井的地质甜点参数敏感地震属性分析，建立 *TOC*、孔隙度、含气量与相关敏感属性间的数学计算模型，结合神经网络、多属性回归分析等统计岩石物理方法，预测页岩气甜点区。③天然裂缝预测技术，基于页岩各向异性岩石物理模型，采用高精度曲率方法预测大尺度高角度裂缝；基于对称轴垂直的横向各向同性（VTI）反演预测层理缝，推导了正交各向异性介质反射系数的简化公式，预测小尺度裂缝；利用机器学习、人工智能建立了多信息多尺度裂缝综合预测方法，降低了预测结果的多解性[261]（图 8），为裂缝参数的定量预测奠定基础。④地层压力和地应力预测技术，综合分析页岩层异常高压成因，以实测压力数据为约束求取速度校正系数，减小岩性、埋深、物性等其他诸多因素对速度的影响，获得高精度地震层速度来提高页岩气藏压力预测精度[262]。以声发射实验、测井资料为基础，采用组合弹簧模型，通过构造应变和地层弹性力学参数的双重约束[263]，建立了地应力预测技术，提高了强烈构造变形区的现今地应力预测效果。⑤微地震压裂监测技术，该技术主要研究人工裂缝（缝高、缝长、缝宽、裂缝方向等）的展布规律，实时指导压裂施工、优化施工方案、提高储层改造体积、节约压裂成本。通过分析压裂参数与改造效果的相关性，提高后续压裂段再设计的针对性和开发井网的再优化，为井网部署及合理配产提供依据，支撑了四川盆地涪陵、长宁等页岩气田的高效开发。

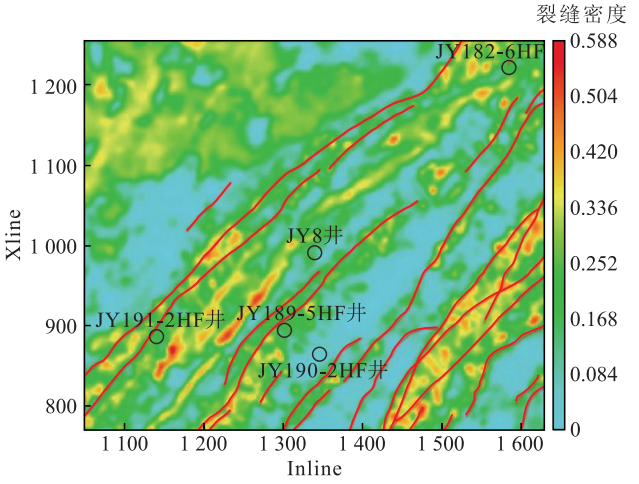


图 8　人工智能综合预测的某页岩气工区目的层顶面裂缝密度

2.6.2　测井方面

取得的进展主要体现在页岩气藏地质工程参数评价体系及水平井校正技术等方面，包括：①多类型孔隙测井精细评价技术，将页岩气储层孔隙划分为有机质孔、碎屑矿物孔、黏土矿物孔和微裂缝等 4 种类型，并根据岩石物理体积模型建立了孔隙的超定方程，通过优化求解确定了每一类孔隙的含量[264-265]。②含气量测井定量评价技术，通过人造岩心及实际岩样等温吸附实验，分析了黏土矿物类型、*TOC*、温度、压力、湿度及有机质热演化程度对页岩气储层吸附能力的影响，建立了吸附气测井评价模型[266]；根据等温吸附实验确定吸附相密度并计算吸附相所占孔隙

空间，推导出游离相所占空间、含气饱和度及游离气含量技术模型 [267]。③水平井声波测井响应校正技术，建立了基于 Bond 变换的声波测井三维有限差分数值模拟算法，模拟了各向异性对声波时差的响应规律，形成了各向异性地层声波时差的反演方法，可以借助于水平井声波测井资料进行校正 [268]。④储层孔隙压力及地应力定量评价技术，考虑有机质生烃增压，推导了构造抬升作用形成的“背景孔隙压力”条件下的附加孔隙压力模型，建立了页岩气储层孔隙压力测井评价新模型 [269]；改进传统的水平各向同性模型，建立了考虑层理面产状的 VTI 地层的水平地应力计算模型，提高了复杂构造地层地应力计算精度 [270]。

2.7　页岩气储层改造技术

页岩气藏属于“人造气藏”，由于具有低孔隙度、低渗透率特性，页岩气井基本无自然产能，需要采用“水平井＋体积压裂”技术构建地层中的三维流动体才能实现其有效开发 [271]。压裂形成的复杂缝网是气体运移的主要通道，压裂缝网的形成与地应力特征、天然裂缝发育程度及充填情况等密切相关 [272]，其中水平主应力差尤为关键。当水力裂缝与天然裂缝交汇时，水平主应力差决定了天然裂缝能否在压力作用下张开，以及在水力裂缝的主缝周围能否形成次级裂缝。通常情况下，水平主应力差、两向水平应力差异系数值越小，水力裂缝越容易沟通储层中的天然裂缝，压裂形成复杂缝网的可能性就越大。因此，正确认识页岩气藏的地应力场与天然裂缝系统是构建良好地层流动体的前提。压裂缝网的形成除受上述地质条件影响外，还受压裂液类型及用量、支撑剂类型及用量、施工排量、施工净压力等外界条件的影响。总体来讲，降低压裂液密度，提升支撑剂用量、总液量、施工排量，有利于页岩气藏复杂裂缝网络的形成 [273]。

自涪陵页岩气田投入商业开发以来，历经 10 余年的艰苦攻关与反复实践，中国已经成为全球第二个全面掌握页岩气开发核心技术的国家，实现了页岩气储层改造理论与技术从无到有、从引进来到自主化的跨越式发展；在基础理论研究、压裂材料、人工裂缝监测、压裂工艺技术等方面，创新形成了与我国地质条件相匹配的页岩气储层改造理论与技术体系 [54-55,274-276]。

1）基础理论研究：国内在大型压裂实验 / 试验方面尚处于起步阶段，目前基于页岩小尺度样品开展了裂缝扩展、单簇孔眼冲蚀、暂堵模拟等实验测试，初步建立了复杂缝网形成理论，完善了孔眼非均匀冲蚀模型 [54,276]；但对于多层理 / 多岩性 / 断裂发育等复杂地质体下缝网形成机理的认识尚不足，全域波及的缝间 / 井间协同设计还处于探索阶段。

2）压裂材料：聚焦压裂材料的降本和特殊功能问题，北美推进了自悬浮、200 目及更细粒支撑剂的研究应用，同时发展具有特殊功能的支撑剂材料 [277]。国内推广了石英砂替代陶粒和乳液体系为主的压裂液，形成了以可溶暂堵球、暂堵剂组合及绳结暂堵材料为主的暂堵剂体系 [54,273,278]；而 CO_2 干法压裂则处于试验阶段，适用于复杂工况的功能型压裂材料总体上还处于起步阶段。

3）人工裂缝监测：北美微地震、光纤、井下电视监测等人工裂缝监测解释方法及软件已经成熟，技术集成应用广泛，水力压裂试验场规模实施 [279]；而较之于北美，国内人工裂缝监测在硬件水平、数据采集质量、解释精度和技术集成应用等方面还存在着较大的差距，总体上以单项监测技术的应用为主，尚未形成多源监测数据耦合的人工裂缝系统评价技术。

4）压裂工艺技术：北美经过三轮次的迭代升级，主体工艺技术基本确立，参数模板基本定型。国内从最初的技术引进到技术国产化，形成体积压裂 1.0 工艺技术版本，再到目前以体积压裂 2.0 工艺技术为统领，初步建立了与我国地质特征相匹配的页岩气压裂技术体系（表 1）；但在地应力复杂和裂缝发育的地层，工艺技术的适配性和对于复杂问题的防控能力还需要进一步提升 [54-55,280]。分述如下：①体积压裂 1.0 工艺技术，储层改造技术由引进到技术自主，实现了技术国产化，支撑了页岩气储量有效开发；体积压裂 1.0 工艺技术内涵主要包括体积压裂优化设计方法、以多段少簇为核心的改造工艺、安全高效施工技术、国产化滑溜水压裂液体系、以陶粒为主体的支撑剂应用、国产化分段压裂工具、以微地震为核心的监测技术、平台井工厂化压裂技术等。②体积压裂 2.0 工艺技术，聚焦提产—提效—降本，以理论自主创新＋工艺参数全方面提升为标志，实现储层改造技术升级换代，支撑了页岩气储量效益开发；体积压裂 2.0 工艺技术内涵主要包括地质工程一体化体积压裂优化设计技术、以段内多簇＋暂堵转向为核心的改造工艺、低成本变黏滑溜水体系、以石英砂替代陶粒为核心的经济导流理念、高效低成本分段压裂工具、以光纤监测为核心的新一代监测技术等。

表 1　中国与美国页岩气压裂工艺技术及相关参数对比表

对比项目	美国		中国							
	Haynesville	Marcellus	长宁	威远	泸州	涪陵	白马	丁山	威荣	永川
改造理念	段内多簇 + 高强度用液加砂 + 变黏滑溜水连续加砂压裂工艺	段内多簇 + 控液提砂 + 低黏滑溜水连续加砂压裂工艺	段内多簇 + 高排量 + 低黏滑溜水连续加砂工艺	段内多簇 + 中高排量 + 低黏滑溜水连续加砂工艺	段内多簇 + 高排量 + 变黏滑溜水压裂工艺	段内多簇 + 高排量 + 变黏滑溜水复合压裂工艺	多簇密切割 + 暂堵促均衡 + 差异化变排量变黏度压裂工艺	多段少簇密切割 + 大液量高排量 + 双暂堵 + 段塞式高强度加砂工艺	多段少簇密切割 + 高排量 + 变黏滑溜水连续加砂工艺	多簇密切割 + 高排量 + 变黏滑溜水 + 双暂堵压裂工艺
压裂段长 /m	40 ～ 50	30 ～ 60	60 ～ 90	60 ～ 130	70 ～ 80	60 ～ 80	70 ～ 85	45 ～ 75	40 ～ 55	70 ～ 85
簇间距 /m	5 ～ 8	4 ～ 6	6 ～ 12	6 ～ 16	7 ～ 10	8 ～ 12	10 ～ 17	8 ～ 12	8 ～ 10	8 ～ 10
单段簇数	6 ～ 9	6 ～ 10	6 ～ 12	5 ～ 15	6 ～ 11	5 ～ 10	5 ～ 9	2 ～ 6	3 ～ 5	6 ～ 10
每簇射孔数	5 ～ 6	4 ～ 6	4 ～ 16	4 ～ 16	6 ～ 8	4 ～ 8	4 ～ 6	4 ～ 8	6 ～ 8	4 ～ 6
施工排量 /($m^3 \cdot min^{-1}$)	12 ～ 14	12 ～ 14	15 ～ 18	12 ～ 15	14 ～ 18	12 ～ 16	16 ～ 20	16 ～ 20	15 ～ 20	16 ～ 20
加砂强度 /($t \cdot m^{-1}$)	4.5 ～ 5.5	2.6 ～ 3.5	1.9 ～ 3.0	2.1 ～ 2.9	2.2 ～ 4.0	1.8 ～ 2.5	1.0 ～ 1.9	2.0 ～ 3.0	1.5 ～ 3.0	1.5 ～ 2.0
用液强度 /($m^3 \cdot m^{-1}$)	40 ～ 45	22 ～ 25	21 ～ 34	20 ～ 31	24 ～ 35	20 ～ 25	23 ～ 33	25 ～ 40	25 ～ 30	20 ～ 25
压裂液及其比例	低黏滑溜水＞ 70%	低黏滑溜水＞ 95%	低黏滑溜水＞ 95%	低黏滑溜水＞ 95%	低黏滑溜水 + 高黏胶液	变黏滑溜水	高黏滑溜水为主	低黏滑溜水＞ 90%	低黏滑溜水＞ 90%	低黏滑溜水＞ 70%
支撑剂及其比例	石英砂，70/140 目：40/70 目 = 7:3(8:2)	石英砂，70/140 目：40/70 目：30/50 目 = 6:2:2	石英砂，70/140 目：陶粒 40/70 目 =8:2	石英砂，70/140 目：陶粒 40/70 目 =8:2	石英砂，70/140 目：陶粒 40/70 目 =7:3	石英砂，70/140 目：40/70 目：30/50 目 = 6:2:2	石英砂，40/70 目：30/50 目 = 6:4	石英砂，70/140 目：陶粒 40/70 目 =7:3	石英砂，70/140 目：陶粒 40/70 目 =7:3	石英砂，100/200 目：陶粒 70/140 目：陶粒 40/70 目 = 2:7.5:0.5

（资料来源：根据本文参考文献 [54-55, 273, 280-284] 汇编）

随着页岩气勘探开发进程的深入推进，深层页岩气由于资源量丰富，具有巨大的勘探开发潜力。较之于中浅层页岩气，深层页岩气地质条件更加复杂，总体上表现为裂缝欠发育，地层温度高、压力大，岩石脆性弱、塑性强，地应力高（主体介于 80 ～ 100 MPa）且方向多变，两向应力差大（15 ～ 22 MPa），施工压力和破裂压力高，导致储层更难压开、裂缝更难起裂和扩展、裂缝更难转向和支撑，形成复杂缝网的难度大 [273,281]。此外，在四川盆地泸州区块实施的深层页岩气水平井套管变形、压窜风险高，*EUR* 偏低，钻完井成本高 [282]，给深层页岩气全面效益开发带来了巨大的挑战。

2.8　页岩气开采技术

页岩气开发的核心就是充分认识页岩气层，构建气层中的三维流动体，解放流动体，将地质工程一体化由单井或多井的局部尺度拓展到整个气田开发的全局尺度，形成人造页岩气田，最大限度地提高整体采收率 [273,285]。因此，如何合理部署开发井网、选择配套生产工艺成为页岩气田高效开发的关键。

2.8.1　开发井网的合理部署

页岩气储层品质的好坏是决定气井能否获得高产的关键因素之一。页岩气储层品质普遍具有一定的差异，并且存在地质甜点和工程甜点，因而开展页岩气勘探开发目标层段评价应综合考虑储层地质品质和压裂工程改造特点，识别有效产气储层，在平面上的地质工程“双甜点区”合理部署水平井网 [286]，同时优化水平井钻井轨迹，提高优质储层钻遇率，增加单井产量，以期实现页岩气高效开发。

国内页岩气勘探开发实践表明，页岩层段在部分地区厚度较大（如涪陵页岩气田其整体厚度为 85 ～ 102 m），基于目前的改造技术和改造强度，水力裂缝的垂向有效支撑厚度通常介于 10 ～ 20 m，单

层水平井网难以充分动用页岩气储量[287]，造成整体采收率低的问题。因此，对于较厚的页岩层段，纵向上可能存在一个或多个适合部署水平井网的“甜点段”。在页岩气体积开发过程中，合理规划实施多层系立体井网，对于提高气田资源动用率和采出程度是非常必要的，如焦石坝地区开展了下部气层、中部气层和上部气层 3 套层系的立体开发[57]。在部署立体井网或平面加密井时，除了考虑在平面或空间的井位优化，还要充分研究老井生产如何改变孔隙压力和地应力分布，并在后期布井过程中深入研究加密钻井时机选择、加密井完井与改造优化、压裂冲击监测及评估、加密井及邻井在产井的井筒完整性等课题，滚动部署立体开发井网，提高气田采收率。

2.8.2　生产工艺的配套选择

页岩气井具有单井产能高、产能递减较快和单井开发成本高等特点，为科学高效地开发页岩气田，必须选择合理的配产制度[288]。国外页岩气井投入开发后，多采用衰竭式开采，但国内页岩气井因受到产量销售、地面系统等因素制约，并不宜采用定油嘴放喷生产的方式。需要采用采气指示曲线法、流动物质平衡法等方法综合确定气井合理配产系数，结合页岩气井产量递减规律和生产特征，建立页岩气井全生命周期的动态配产方法[289-290]。最终判断气田页岩气井配产是否合理的原则是：能否在气井能力、井筒和地面系统条件、销售能力相协调的前提下，提高页岩气田的采收率和经济效益。

2.8.3　地质工程一体化建模

页岩气藏表征与建模涉及地震、测井、地质、地质力学等多学科。三维地质建模包括构造建模、地质工程甜点参数建模、不同尺度天然裂缝建模、地应力建模及压裂后的人工裂缝建模等内容，并将上述模型逐级融合叠加，形成页岩气藏综合地质模型[291-292]。页岩气藏三维地质模型实现了页岩气藏多维度地质工程参数一体化、精细化、定量化表征，一方面可以指导水平井优化设计，为钻井地质导向提供依据，提高水平段优质储层钻遇率；另一方面可以为页岩气藏数值模拟提供所需的模型数据体，有助于加密井部署和立体开发调整，同时还可以为压裂工艺设计及压裂优化提供依据，对页岩气藏高效开发具有重要的支撑作用。

2.8.4　地质工程一体化开发

地质工程一体化开发本质上是构建全新的体制机制，在对地质情况进行精细刻画的基础上，采用有针对性的工程工艺措施，最大限度地、低成本开发页岩气资源[273]：①实现地质工程一体最优甜点段准确识别，在钻井过程中井轨迹要穿越最优甜点段；②基于多维度地质工程参数的研究，开展压裂分段划分；③针对不同井段的改造难点，开展差异化设计，如针对构造、应力、天然裂缝复杂井段，在分段分簇、排量提升、加砂方式、暂堵工艺等方面采取有针对性的措施；④基于地质工程一体化建模、页岩气藏数值模拟结果，选择合理的开采方案和增产工艺措施。

2.8.5　产能评价方法

合理的产能评价方法是页岩气产建效果评价和提高效益的关键。目前，常用的页岩气产能评价方法主要包括经验法、解析法、数值模拟法。其中经验法是一种基于统计回归理论的油气藏工程方法，以 Arps 递减及其改进方法、扩展指数递减、Duong 递减和幂指数递减为代表[293-294]，仅需页岩气井生产数据即可预测生产动态，操作简单、快速，现场应用广泛，但评价结果受生产模式和流动阶段的影响较大。解析法和数值模拟法能够对页岩气井各阶段生产动态进行预测，模型输入参数相对复杂，评价结果的准确性依赖于模型输入参数[295]（如储层厚度、裂缝半长、渗透率等）的可靠性。页岩气产能预测模型研究面临的突出问题是复杂的裂缝形态和多变的渗流模式，目前的预测模型在裂缝形态方面没有考虑不规则的压裂改造区域以及裂缝不规则分布情况，亟需建立针对页岩气井分段压裂特点的裂缝扩展和产能预测模型。页岩气勘探开发实践证明，采用单一方法进行产能预测，效果并不理想，需要结合多种方法以及应用动态分析软件，才有可能获得相对较好的预测效果。

总之，页岩气田开发初期部署的水平井网应充分利用岩性、物性、敏感性、岩石力学参数、地应力分析等实验数据，掌握页岩气藏储层特点，优选完井方式，选择合理的压裂工艺和分段工具以及地面配套设备，同时结合压裂工艺的需求，对压裂材料进行优化。通过对射孔参数、分段参数、施工参数、压裂模式的优化，根据现场试验结果，不断调整和完善，以形成适应于目标气藏页岩气储层的水平井分段压裂技术体系。气田开发过程中滚动实施的立体开发井网，需要通过对地面装备的利用、管汇布设、供配液流程、压裂设备以及施工流程的组织进一步开展优化设计，开展地层应力场变化规律研究，明确不同压裂方式下裂缝间的干扰规律，指导压裂工艺参数优化，提高气层整体采收率；平面井网内的加密井部署应通过对相邻已压裂井的施工参数、压力以及气藏地质特征综合分析，建立改造范围评估方法，

定量化表征井间未改造区域，根据未改造区域分布特征开展井位设计、分段分簇及压裂工艺参数优化，以最大限度地动用井间未改造区域。

3　页岩气理论研究展望和勘探开发方向

20 年来，尽管中国海相页岩气理论研究和勘探开发取得了一系列重要进展，但也还存在着一些不足、面临着一些问题，如陆相、海陆过渡相页岩气富集理论尚不完善，基于动态演化过程的页岩气富集区评价方法有待攻关，低丰度常压页岩气藏开发的理论科学问题亟待攻关，新区新领域勘探突破、提高储量动用程度和提高采收率技术有待提升等，需要开展有针对性的攻关研究。

3.1　页岩气理论研究展望

3.1.1　陆相、海陆过渡相页岩气富集高产理论

目前，中国基本揭示了四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组海相页岩气富集机理，但在陆相、海陆过渡相页岩气富集高产机理方面还处于探索阶段，需要具体问题具体分析，有针对性地形成或建立具有地质适配性的机理认识和评价方法，尤其需加强海陆过渡相和陆相层系页岩气富集地质理论和评价方法的攻关研究。中国陆相盆地分布范围广、面积大，中、新生界多个层系均发育陆相泥页岩，陆相生油理论对中国石油工业的发展曾发挥了重大作用，使我们摘掉了贫油国的帽子[296]；陆相页岩气也是中国页岩气乃至天然气勘探开发的重要接替领域[132,297]，能否突破规模产能的难关对于保障中国能源安全至关重要。建议加强以下工作：①陆相、海陆过渡相页岩有机质富集、页岩气形成和非均质性研究；②陆相、海陆过渡相页岩有机—无机组分控制下的优质储层形成机制和评价方法研究；③陆相、海陆过渡相页岩含气性及其影响因素研究，准确可靠、简单易用的损失气量和含气量估算方法仍将是研究热点，将机器学习、人工智能、大数据等新手段与现场解吸、等温吸附、录井、测井、地震等技术相结合，有助于大幅度提高含气量预测结果的准确性和预测过程的便捷性，是未来页岩含气量评价的重要发展方向；④开展陆相、海陆过渡相页岩气富集高产机理、富集高产层段、有利区带研究，以及多套含气层系富集机理和立体开发技术攻关。

3.1.2　基于动态演化过程的页岩气富集评价方法

在中国页岩气早期评价中，多采用静态评价指标，而后采用静态、动态指标相结合的评价方法，优选了有利区和核心区，页岩气产量也快速增长。随着开发逐步进入深层页岩气和常压页岩气，在相同静态指标优选的有利区钻探的页岩气井产量差异较大，说明基于静态指标的评价不能完全反映气藏特征[298]，在解剖典型页岩气井和页岩气藏特征的基础上，还要加强对动态演化过程的研究。攻关内容主要包括：①沉积演化方面，加强分析富有机质优质页岩沉积演化和展布特征；②储层演化方面，加强分析矿物成岩演化、有机质生排烃的有机—无机相互作用机理、主要储集空间形成及动态演化过程以及储层改造后的动态评价；③生烃热演化方面，需要重建页岩埋藏史和生排烃历史，厘定关键地质时期的生排烃量、滞留量；④压力演化方面，加强分析地质历史时期压力成因和演化过程；⑤含气量方面，加强含气量、含气结构演化历史过程分析；⑥构造和保存条件方面，加强分析地层剥蚀、盖层和断裂条件等对页岩气保存条件的控制作用；⑦通过盆地沉积充填正演模拟与含油气系统耦合模拟，预测页岩气的成藏过程与有利区分布[299]。最终目标是要建立基于演化机制的页岩气富集动态评价方法和参数标准，从动态角度优选页岩气富集高产区。

3.1.3　精细化页岩气地球物理评价技术

尽管页岩气地球物理勘探技术取得了重要进展，但仍面临着一些问题和挑战：地表地下复杂探区地震成像效果不佳，成像精度不能满足水平井轨迹精度要求，压力系数预测精度不高、裂缝定量预测难度大、尚无成熟的水平应力差预测技术等。页岩气地球物理技术下一步的发展，需要提高微幅构造和低序级断裂的地震成像精度；在高分辨率地震反演的基础上，不断提高对低序级断裂、裂缝、地层压力、地应力、含气性和流体流动性等的预测精度。总之，以复杂构造精细成像、随钻地震成像、人工智能为核心的高精度、自动化地震处理技术和以提高复杂裂缝系统、地应力场、含气性预测精度为核心的“地质—工程—经济”一体化的甜点地球物理综合评价方法，是未来持续发展的两个重要方向。测井方面对于深层、超深层复杂页岩气储层，现有测井评价模型适用性差，需要开展高温高压条件下的物性、等温吸附、核磁共振、岩石力学等实验，建立高温高压条件下储层地质工程参数计算模型，形成考虑各向异性、层理、裂缝发育背景下的孔隙压力、地应力及可压性定量评价方法，进一步完善以地质工程参数为核心的甜点优选体系；引入人工智能技术，在岩相分类、甜

点优选等方面充分挖掘测井资料更深层次的信息。

3.1.4　精细化页岩气储层改造技术

新一代页岩气压裂技术将会以技术精细化、智能化为创新发展方向，通过工艺改造和材料定制化、裂缝控制与表征精细化、压裂设计与实施智能化发展，着力打造体积压裂 3.0 工艺技术利器，支撑页岩气储量高质量开发。以深层页岩气为例，深层页岩气储层改造理论及工艺技术处于探索起步阶段，复杂应力与天然裂缝条件下的裂缝起裂扩展机理，水力压裂应力压力传导机制，地质—工程—经济一体化压裂优化设计方法，改造体积提高技术，缝网复杂程度提升调控技术，全生命周期套管变形、压窜防控技术等都需要深化研究。

3.1.5　低丰度页岩气高效开发技术

受多期构造运动控制，中国发育大量常压页岩气藏[300-301]，主要包括四川盆地周缘的五峰组—龙马溪组、滇黔桂石炭系打屋坝组、鄂西渝东地区寒武系水井沱组、南华北盆地石炭系—二叠系山西组—太原组、湘中凹陷二叠系大隆组和龙潭组等，其具有压力系数低、含气量低和地层能量低的“三低”特征。在川南太阳地区和渝东南地区武隆向斜钻探的阳 101 井、隆页 1 井及其试验井组均取得了良好的开发试验效果，为常压页岩气勘探开发积累了技术和经验[302-303]。常压页岩气藏具有资源总量大和储量规模大等特征，但由于中—低丰度、中—低品位[300]，整体上尚未实现大规模商业开发。需要加强以下工作：①开展常压页岩气压力演化历史和含气量恢复研究，明确常压形成的时间及其对含气量的控制作用，计算现今含气量；②开展开发甜点区地质评价和工程工艺降本、增效攻关研究；③在尽力维持地层能量、延长生产周期的同时，开展注 CO_2、N_2 等增能增产工艺以及开发政策研究。

3.1.6　提高页岩气采收率的机制和技术

页岩中吸附态甲烷占比为 40% ～ 60%[184,1]，由于 CO_2 在页岩中的吸附能力是甲烷的 2 ～ 20 倍，向页岩气藏中注入 CO_2 在置换甲烷、大幅度提高页岩气采收率的同时，还能封存 CO_2、减缓温室效应[304]。这是因为页岩中 CO_2 除了依靠范德华力的物理吸附作用、在有机质上的化学吸附 / 溶解作用以及 CO_2 和 CH_4 在页岩上的竞争吸附机理之外，还有 CO_2 和页岩有机质、矿物以及页岩流体之间的有机—无机化学反应的矿化固碳作用。这些作用均可将 CO_2 地质封存在页岩气储层内。据估算，页岩气储层可以封存的 CO_2 量为页岩气储量的 2 ～ 5 倍。这一技术可以实现能源与环境的协调发展，具有潜在的经济效益和社会效益，有广阔的发展空间和应用前景。需要加强以下工作：① CH_4 和 CO_2 在页岩中赋存机理研究；② CO_2 置换 CH_4 机理及其动力学与热力学机制研究；③多尺度 CO_2 置换 CH_4 模型及物理模拟、数值模拟实验；④提高页岩气采收率机制研究。

3.2　页岩气勘探开发方向

3.2.1　新区新领域勘探开发

新区新领域主要指的是尚未获得大规模商业开发的页岩气藏，四川盆地侏罗系自流井组和凉高山组、寒武系筇竹寺组以及二叠系龙潭组、吴家坪组和大隆组等均已获得页岩气流，下一步需要加强对富集高产层段和高产区的试验攻关。四川盆地筇竹寺组和大隆组等海相页岩，主要寻找优质页岩发育、深度适中和保存条件良好的地区，筇竹寺组优选该盆地内绵阳—长宁拉张槽深部富有机质页岩发育区和拉张槽西部斜坡类似金石 103 井纹层页岩发育区；二叠系优选川东和川东北深水陆棚海相页岩发育区、川南页岩—煤—砂 / 灰等多套含气层发育区（开展立体勘探和开发）；侏罗系主要寻找页岩 *TOC* 高、有机质成熟度高、气油比较高的地区；中国东部陆相盆地白垩系、古近系、新近系页岩，主要勘探方向为埋深较大且有机质热演化成熟度达到生气阶段的区域，同时努力加强深层页岩气有效压裂技术、低成本开发技术攻关。另外，在四川盆地三叠系须家河组，鄂尔多斯盆地三叠系延长组和奥陶系乌拉力克组，塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组、奥陶系萨尔干组和黑土凹组、石炭系卡拉沙依组，南华北盆地石炭系—二叠系山西组—太原组等页岩层系也获得了良好的气显示或气流，下一步需要开展井组试验，明确高产层段、高产区，探索发展有针对性的工程工艺和开发技术。

3.2.2　老区挖潜及提高采收率

截至 2023 年底，在四川盆地及其周缘提交了 2.96×10^{12} m^3 页岩气探明储量，而根据已有井产量计算的采收率约为 20%[287]，考虑到目前页岩气井主要穿行在五峰组至龙马溪组底部 10 ～ 15 m 的层段，纵向上尚有大段未动用，井网布置、压裂方案和采气工艺等尚有进一步优化的空间[305]。因此，需要加强提高页岩气采收率研究，主要包括平面上加密井、纵向上加密层段等。例如，早期布置的水平井井距一般较大，后期油公司均采取了加密措施，在以后的工作中可以开展井组试验，走地质工程一体化的

道路，合理优化最佳井距。此外，受压裂技术、认识程度等的限制，目前开发井压裂裂缝所能达到的缝高小于储量计算的页岩厚度，这就导致了储量动用程度低；在纵向上油公司采取了立体开发的策略，如开发上部气层和中部气层 [306-307]，可以将天然气采收率提高至约 40%[287]，但这一开发策略主要在焦石坝背斜页岩气藏开展，对于威远、长宁等向斜页岩气藏还需要进一步攻关研究。随着页岩气开发的不断深入，勘探开发对象也逐渐向开发难度更大的深层页岩气和常压页岩气转移，需要针对不同类型页岩气田、不同生产阶段的不同挑战，定制页岩气压裂工艺技术，结合实际情况，动态开展工作。明确水平段上的剩余可采储量，开展重复压裂也是提高页岩气藏采收率的主要途径。对于老区已投产页岩气井，要根据气井生产动态强化“一井一策”精细管理，全面推进增压开采、排水采气、腐蚀治理等工作措施，确保老井生产时率，提升老井整体开发效果。另外，油气成藏体系的研究成果表明，页岩气、煤层气和致密砂岩气等非常规天然气藏在含油气盆地内有序分布 [308-309]，需要以油气成藏体系为指导开展立体勘探开发研究，尽可能实现多套商业含气层系同时开发，提高经济效益。考虑到页岩气已经成为中国天然气产量增量的主力军之一，按照目前的天然气勘探成效和新增天然气探明储量发展趋势，预计包括页岩气在内的非常规天然气产量将很快在中国天然气总产量中占据主导地位 [310]。

3.2.3　注 CO_2 提高页岩气采收率现场试验

研究认为注 CO_2 提高页岩气采收率是目前有希望获得突破的技术，可以实现地质碳封存一体化 [304]。因此，需要进行地理—地质—经济—环保条件约束下的页岩气提高采收率、页岩气储层 CO_2 封存机制及其能源—环境效应研究。在页岩气田开展不同地质、工程条件下的 CO_2 注采数值模拟研究；开展现场注 CO_2 试验和应用，获取注气井位以及合理的注气时间、吞吐周期数及注气量等关键技术参数，同时评估 CH_4 置换采收率、CO_2 封存效率、有效封存量和周期，形成页岩气储层 CO_2 封存地质理论，建立相应的技术体系以及制定适于规模应用的可行方案和远景战略规划。

4　结论与建议

1）中国页岩气研究已经历经 20 年，第一阶段为学习美国经验、开展理论探索研究和选区评价阶段，并开展了老井复查复试和新钻井试验等工作；第二阶段以一批勘探井突破、设立国家级页岩气示范区为标志，是中国页岩气快速建产阶段；第三阶段是以侏罗系、二叠系和寒武系等页岩气勘探突破为标志，页岩气创新与全面发展阶段。截至目前，已经形成了中国南方海相页岩气富集规律等新认识，涪陵、长宁和威远等多个规模性页岩气田获得商业开发。

2）综合中国页岩气地质研究现状，建议加强以下 4 个方面的理论技术攻关：陆相、海陆过渡相页岩气富集高产机理，基于动态演化过程的页岩气富集评价方法，低丰度页岩气高效开发技术，以及提高页岩气采收率技术。重点加强对页岩气动态演化的研究，从沉积演化、储层演化、埋藏和生排烃演化、压力演化、含气量演化、构造演化和保存条件演化等多角度开展研究，探讨页岩气差异富集主控因素和关键评价参数，建立基于演化机制的页岩气富集高产区 / 段的动态评价方法。

3）综合中国页岩气开发现状，建议强化以下几个方面的工程技术攻关：①在地球物理方面，加强以复杂构造精细成像、随钻地震成像以及人工智能为核心的高精度、自动化地震技术攻关，深化以提高深层和常压条件下复杂裂缝系统、地应力场、含气性预测精度为核心的地震和测井技术攻关；②在储层改造方面，拓展以技术精细化、智能化为创新发展方向的体积压裂 3.0 工艺技术，最大限度地提高缝网复杂程度和改造体积；③在开采技术方面，制订更加精细合理的生产工艺和有针对性的稳产措施，形成页岩气全生命周期排水采气技术和动态管理体系，最大限度地提高气田采收率。

4）结合中国商业页岩气勘探开发面临的挑战，未来应围绕新区新领域突破和发展、老区挖潜以及提高页岩气采收率现场试验等方面开展攻关。在新区新领域方面，战略展开四川盆地寒武系、二叠系和侏罗系等层系的页岩气勘探，战略准备四川盆地三叠系，鄂尔多斯盆地二叠系、三叠系和奥陶系，塔里木盆地寒武系和奥陶系，以及松辽、渤海湾、苏北等东部断陷盆地白垩系、古近系和新近系深层陆相等层系的页岩气勘探。老区挖潜和提高采收率主要是在四川盆地对奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气藏“精耕细作”，以期开创中国页岩气勘探全面突破和大规模商业开发的新局面，进而取得中国页岩气革命的最终胜利。

参　考　文　献

[1] 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.

ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.

[2] 金之钧 , 白振瑞 , 高波 , 等 . 中国迎来页岩油气革命了吗 ?[J]. 石油与天然气地质 , 2019, 40(3): 451-458.
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution?[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.

[3] 邹才能 , 潘松圻 , 荆振华 , 等 . 页岩油气革命及影响 [J]. 石油学报 , 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.

[4] 赵文智 , 王大锐 , 赵霞 . 中国陆相页岩油革命 [J]. 石油知识 , 2021(4): 14-15.
ZHAO Wenzhi, WANG Darui, ZHAO Xia. China's continental shale oil revolution[J]. Petroleum Knowledge, 2021(4): 14-15.

[5] 张金川 , 李玉喜 , 聂海宽 , 等 . 渝页 1 井地质背景及钻探效果 [J]. 天然气工业 , 2010, 30(12): 114-118.
ZHANG Jinchuan, LI Yuxi, NIE Haikuan, et al. Geologic setting and drilling effect of the shale cored Well Yuye-1, Penshui County of Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12): 114-118.

[6] 董大忠 , 邹才能 , 杨桦 , 等 . 中国页岩气勘探开发进展与发展前景 [J]. 石油学报 , 2012, 33(增刊 1): 107-114.
DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 107-114.

[7] 邹才能 , 赵群 , 丛连铸 , 等 . 中国页岩气开发进展、潜力及前景 [J]. 天然气工业 , 2021, 41(1): 1-14.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.

[8] 郭旭升 . 涪陵页岩气田焦石坝区块富集机理与勘探技术 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2014: 1-346.
GUO Xusheng. Enrichment mechanism and exploration technology of Jiaoshiba block in Fuling shale gas field[M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-346.

[9] 郭旭升 . 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识 [J]. 地质学报 , 2014, 88(7): 1209-1218.
GUO Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China—Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 马新华 , 谢军 . 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景 [J]. 石油勘探与开发 , 2018, 45(1): 161-169.
MA Xinhua, XIE Jun. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 161-169.

[14] 谢军 , 赵圣贤 , 石学文 , 等 . 四川盆地页岩气水平井高产的地质主控因素 [J]. 天然气工业 , 2017, 37(7): 1-12.
XIE Jun, ZHAO Shengxian, SHI Xuewen, et al. Main geological factors controlling high production of horizontal shale gas wells in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(7): 1-12.

[15] LI Shizhen, ZHOU Zhi, NIE Haikuan, et al. Distribution characteristics, exploration and development, geological theories research progress and exploration directions of shale gas in China[J]. China Geology, 2022, 5(1): 110-135.

[16] 郭旭升 , 赵永强 , 申宝剑 , 等 . 中国南方海相页岩气勘探理论 : 回顾与展望 [J]. 地质学报 , 2022, 96(1): 172-182.
GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, SHEN Baojian, et al. Marine shale gas exploration theory in southern China: Review and prospects[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 172-182.

[17] 郭旭升 , 腾格尔 , 魏祥峰 , 等 . 四川盆地深层海相页岩气赋存机理与勘探潜力 [J]. 石油学报 , 2022, 43(4): 453-468.
GUO Xusheng, BORJIGIN Tenger, WEI Xiangfeng, et al. Occurrence mechanism and exploration potential of deep marine shale gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(4): 453-468.

[18] 刘忠宝 , 高波 , 张钰莹 , 等 . 上扬子地区下寒武统页岩沉积相类型及分布特征 [J]. 石油勘探与开发 , 2017, 44(1): 21-31.
LIU Zhongbao, GAO Bo, ZHANG Yuying, et al. Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in Upper Yangtze area, South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 21-31.

[19] 朱光有 , 赵坤 , 李婷婷 , 等 . 中国华南地区下寒武统烃源岩沉积环境、发育模式与分布预测 [J]. 石油学报 , 2020, 41(12): 1567-1586.
ZHU Guangyou, ZHAO Kun, LI Tingting, et al. Sedimentary environment, development model and distribution prediction of Lower Cambrian source rocks in South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1567-1586.

[20] 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 and Experiment, 2012, 34(2): 109-114.

[21] 包书景 , 林拓 , 聂海宽 , 等 . 海陆过渡相页岩气成藏特征初探 : 以湘中坳陷二叠系为例 [J]. 地学前缘 , 2016, 23(1): 44-53.
BAO Shujing, LIN Tuo, NIE Haikuan, et al. Preliminary study of

the transitional facies shale gas reservoir characteristics: Taking Permian in the Xiangzhong Depression as an example[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 44-53.

[22] 郭旭升 , 胡东风 , 刘若冰 , 等 . 四川盆地二叠系海陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力 [J]. 天然气工业 , 2018, 38(10): 11-18.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, LIU Ruobing, et al. Geological conditions and exploration potential of Permian marine-continent transitional facies shale gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 11-18.

[23] 赵培荣 , 高波 , 郭战峰 , 等 . 四川盆地上二叠统海陆过渡相和深水陆棚相页岩气的勘探潜力 [J]. 石油实验地质 , 2020, 42(3): 335-344.
ZHAO Peirong, GAO Bo, GUO Zhanfeng, et al. Exploration potential of marine–continental transitional and deep-water shelf shale gas in Upper Permian, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(3): 335-344.

[24] 段文燊 , 王同 , 张南希 . 四川盆地威远构造带发现二叠系梁山组页岩气 [J]. 中国地质 , 2021, 48(4): 1298-1299.
DUAN Wenshen, WANG Tong, ZHANG Nanxi. New discovery of shale gas in Permian Liangshan Formation in the Weiyuan tectonic zone Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1298-1299.

[25] 翟刚毅 , 包书景 , 王玉芳 , 等 . 古隆起边缘成藏模式与湖北宜昌页岩气重大发现 [J]. 地球学报 , 2017, 38(4): 441-447.
ZHAI Gangyi, BAO Shujing, WANG Yufang, et al. Reservoir accumulation model at the edge of palaeohigh and significant discovery of shale gas in Yichang area, Hubei Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 441-447.

[26] 刘忠宝 , 王鹏威 , 聂海宽 , 等 . 中上扬子地区寒武系页岩气富集条件及有利区优选 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53(9): 3694-3707.
LIU Zhongbao, WANG Pengwei, NIE Haikuan, et al. Enrichment conditions and favorable prospecting targets of Cambrian shale gas in Middle-Upper Yangtze[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3694-3707.

[27] 翟常博 , 牟传龙 , 梁薇 , 等 . 鄂西地区二叠系孤峰组—大隆组沉积演化及其页岩气地质意义 [J]. 矿物岩石 , 2021, 41(4): 114-124.
ZHAI Changbo, MOU Chuanlong, LIANG Wei, et al. Sedimentary evolution characteristics of Permian Gufeng Formation–Dalong Formation in Western Hubei province and its geological significance for the geological survey of shale gas[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2021, 41(4): 114-124.

[28] LI Shizhen, ZHOU Zhi, NIE Haikuan, et al. Organic matter accumulation mechanisms in the Wufeng–Longmaxi shales in western Hubei Province, China and paleogeographic implications for the uplift of the Hunan-Hubei Submarine high[J]. International Journal of Coal Geology, 2023, 270: 104223.

[29] 包汉勇 , 赵帅 , 梁榜 , 等 . 川东红星地区二叠系吴家坪组页岩气富集高产主控因素与勘探启示 [J]. 中国石油勘探 , 2023, 28(1): 71-82.
BAO Hanyong, ZHAO Shuai, LIANG Bang, et al. Enrichment and high yield of shale gas in the Permian Wujiaping Formation in Hongxing area of eastern Sichuan and its exploration implications[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 71-82.

[30] 苑坤 , 方欣欣 , 闻涛 , 等 . 桂中坳陷西北部桂页 1 井泥盆系页岩气聚集条件研究 [J]. 中国石油勘探 , 2017, 22(4): 90-97.
YUAN Kun, FANG Xinxin, WEN Tao, et al. Accumulation conditions of Devonian shale gas in Well GY 1 in northwestern Central Guangxi Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(4): 90-97.

[31] 胡东风 , 魏志红 , 刘若冰 , 等 . 桂中坳陷下石炭统黑色页岩发育特征及页岩气勘探潜力 [J]. 天然气工业 , 2018, 38(10): 28-37.
HU Dongfeng, WEI Zhihong, LIU Ruobing, et al. Development characteristics and shale gas exploration potential of the Lower Carboniferous black shale in the Guizhong Depression[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 28-37.

[32] 李沛 , 张金川 , 唐玄 , 等 . 南华北盆地中牟—温县区块上古生界页岩气吸附特性 [J]. 岩性油气藏 , 2019, 31(3): 66-75.
LI Pei, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan, et al. Adsorption characteristics of Upper Paleozoic shale gas in Zhongmou–Wenxian Block, South North China Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(3): 66-75.

[33] 白静 , 徐兴友 , 刘卫彬 , 等 . 松辽盆地下白垩统沙河子组陆相页岩气首获高产突破 [J]. 地质学报 , 2022, 96(3): 1121-1123.
BAI Jing, XU Xingyou, LIU Weibin, et al. The breakthrough of continental shale gas in Lower Cretaceous Shahezi Formation of Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(3): 1121-1123.

[34] 王香增 , 高胜利 , 高潮 . 鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征 [J]. 石油勘探与开发 , 2014, 41(3): 294-304.
WANG Xiangzeng, GAO Shengli, GAO Chao. Geological features of Mesozoic continental shale gas in South of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 294-304.

[35] 张琴 , 邱振 , 张磊夫 , 等 . 海陆过渡相页岩气储层特征与主控因素——以鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块二叠系山西组为例 [J]. 天然气地球科学 , 2022, 33(3): 396-407.
ZHANG Qin, QIU Zhen, ZHANG Leifu, et al. Reservoir characteristics and its influence on transitional shale: An example from Permian Shanxi Formation shale, Daning–Jixian blocks, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(3): 396-407.

[36] 席胜利 , 莫午零 , 刘新社 , 等 . 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气勘探潜力——以忠平 1 井为例 [J]. 天然气地球科学 , 2021, 32(8): 1235-1246.
XI Shengli, MO Wuling, LIU Xinshe, et al. Shale gas exploration potential of Ordovician Wulalike Formation in the western margin of Ordos Basin: Case study of Well Zhongping 1[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1235-1246.

[37] 马永生 , 蔡勋育 , 赵培荣 . 中国页岩气勘探开发理论认识与实践 [J]. 石油勘探与开发 , 2018, 45(4): 561-574.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 561-574.

[38] 张烈辉 , 何骁 , 李小刚 , 等 . 四川盆地页岩气勘探开发进展、挑战及对策 [J]. 天然气工业 , 2021, 41(8): 143-152.
ZHANG Liehui, HE Xiao, LI Xiaogang, et al. Shale gas exploration and development in the Sichuan Basin: Progress, challenge and countermeasures[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 143-152.

[39] 聂海宽 , 唐玄 , 边瑞康 . 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩

气发育有利区预测 [J]. 石油学报 , 2009, 30(4): 484-491.
NIE Haikuan, TANG Xuan, BIAN Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491.

[40] 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 Juanxuan, 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.

[41] 聂海宽 , 金之钧 , 边瑞康 , 等 . 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气“源 - 盖控藏”富集 [J]. 石油学报 , 2016, 37(5): 557-571.
NIE Haikuan, JIN Zhijun, BIAN Ruikang, et al. The "source–cap hydrocarbon-controlling" enrichment of shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation–Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5): 557-571.

[42] 王红岩 , 施振生 , 孙莎莎 . 四川盆地及周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩生物地层及其储集层特征 [J]. 石油勘探与开发 , 2021, 48(5): 879-890.
WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha. Biostratigraphy and reservoir characteristics of the Ordovician Wufeng–Silurian Longmaxi shale in the Sichuan Basin and surrounding areas, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(5): 879-890.

[43] NIE Haikuan, JIN Zhijun, ZHANG Jinchuan. Characteristics of three organic matter pore types in the Wufeng–Longmaxi Shale of the Sichuan Basin, Southwest China[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 7014.

[44] 郭旭升 , 李宇平 , 腾格尔 , 等 . 四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨 [J]. 石油勘探与开发 , 2020, 47(1): 193-201.
GUO Xusheng, LI Yuping, BORJIGEN Tenger, et al. Hydrocarbon generation and storage mechanisms of deep-water shelf shales of Ordovician Wufeng Formation–Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 193-201.

[45] 聂海宽 , 何治亮 , 刘光祥 , 等 . 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气优质储层成因机制 [J]. 天然气工业 , 2020, 40(6): 31-41.
NIE Haikuan, HE Zhiliang, LIU Guangxiang, et al. Genetic mechanism of high-quality shale gas reservoirs in the Wufeng–Longmaxi Fms in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(6): 31-41.

[46] DANG Wei, ZHANG Jinchuan, NIE Haikuan, et al. Isotherms, thermodynamics and kinetics of methane–shale adsorption pair under supercritical condition: Implications for understanding the nature of shale gas adsorption process[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 383: 123191.

[47] LI Pei, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan, et al. Assessment of shale gas potential of the Lower Permian transitional Shanxi–Taiyuan shales in the southern North China Basin[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2020, 68(2): 262-284.

[48] 张金川 , 刘树根 , 魏晓亮 , 等 . 页岩含气量评价方法 [J]. 石油与天然气地质 , 2021, 42(1): 28-40.
ZHANG Jinchuan, LIU Shugen, WEI Xiaoliang, et al. Evaluation of gas content in shale[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 28-40.

[49] LIU Yang, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan. Predicting the proportion of free and adsorbed gas by isotopic geochemical data: A case study from Lower Permian shale in the southern North China Basin (SNCB)[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 156: 25-35.

[50] NIE Haikuan, SUN Chuanxiang, LI Pei, et al. Carbon isotope evidence for shale gas preservation conditions and large methane release over million years: A case study of shale gas reservoirs of Wufeng and Longmaxi formations in the Sichuan Basin[J]. Geoscience Frontiers, 2023, 14(6): 101642.

[51] 马新华 , 陈更生 , 陆家亮 , 等 . 页岩气勘探开发概论 [M]. 北京 : 石油工业出版社 , 2021.
MA Xinhua, CHEN Gengsheng, LU Jiangliang, et al. Introduction to shale gas exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.

[52] JIN Zhijun, NIE Haikuan. Evolution history of overpressured and normally pressured shale gas reservoirs in Wufeng Formation–Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China: An analysis from the perspective of source and seal coupling mechanism[J]. Energy & Fuels, 2022, 36(18): 10870-10885.

[53] 段华 , 李荷婷 , 代俊清 , 等 . 深层页岩气水平井“增净压、促缝网、保充填”压裂改造模式——以四川盆地东南部丁山地区为例 [J]. 天然气工业 , 2019, 39(2): 66-70.
DUAN Hua, LI Heting, DAI Junqing, et al. Horizontal well fracturing mode of "increasing net pressure, promoting network fracture and keeping conductivity" for the stimulation of deep shale gas reservoirs: A case study of the Dingshan area in SE Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(2): 66-70.

[54] 赵金洲 , 任岚 , 蒋廷学 , 等 . 中国页岩气压裂十年 : 回顾与展望 [J]. 天然气工业 , 2021, 41(8): 121-142.
ZHAO Jinzhou, REN Lan, JIANG Tingxue, et al. Ten years of gas shale fracturing in China: Review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 121-142.

[55] 雷群 , 胥云 , 才博 , 等 . 页岩油气水平井压裂技术进展与展望 [J]. 石油勘探与开发 , 2022, 49(1): 166-172.
LEI Qun, XU Yun, CAI Bo, et al. Progress and prospects of horizontal well fracturing technology for shale oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 166-172.

[56] 胡文瑞 , 曹耀峰 , 马新华 , 等 . 中国页岩气开发概论 [M]. 北京 : 石油工业出版社 , 2020.
HU Wenrui, CAO Yaofeng, MA Xinhua, et al. Introduction to shale gas development in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.

[57] 孙焕泉 , 蔡勋育 , 胡德高 , 等 . 页岩气立体开发理论技术与实践——以四川盆地涪陵页岩气田为例 [J]. 石油勘探与开发 , 2023, 50(3): 573-584.
SUN Huanquan, CAI Xunyu, HU Degao, et al. Theory, technology and practice of shale gas three-dimensional development: A case study of Fuling shale gas field in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 573-584.

[58] 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.
ZHANG Jinchuan, NIE Haikuan, XU Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.

[59] 张金川 , 徐波 , 聂海宽 , 等 . 中国页岩气资源勘探潜力 [J]. 天然气工业 , 2008, 28(6): 136-140.
ZHANG Jinchuan, XU Bo, NIE Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140.

[60] 张金川 , 姜生玲 , 汪宗余 , 等 . 中国南方地区油气新区新领域优选——页岩气 [R]. 北京 : 中国地质大学 (北京), 2008.
ZHANG Jinchuan, JIANG Shengling, WANG Zongyu, et al. The new oil and gas new area of South China is selected—shale gas[R]. Beijing: China University of Geosciences，Beijing (CUGB) , 2008.

[61] 余显成 . 国内第一口页岩气勘探井在重庆彭水开钻 [N]. 中国国土资源报 , 2009-12-09(05).
YU Xiancheng. China's first shale gas exploration well was drilled in Pengshui, Chongqing[N]. China Land and Resources News, 2009-12-09(05).

[62]《天然气工业》编辑部 . 我国研究人员发现页岩气的直接存在 [J]. 天然气工业 , 2009, 29(9): 109.
NGI Journal Editorial Office. Chinese researchers have discovered the direct existence of shale gas[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(9): 109.

[63] 张大伟 , 李玉喜 , 张金川 , 等 . 全国页岩气资源潜力调查评价 [M]. 北京 : 地质出版社 , 2012: 70-102.
ZHANG Dawei, LI Yuxi, ZHANG Jinchuan, et al. Investigation and evaluation of shale gas resource potential in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 70-102.

[64] 张大伟 . 页岩气 : 打开中国能源勘探开发新局面 [J]. 资源导刊 , 2012(5): 8-9.
ZHANG Dawei. Shale gas: Opening up a new situation in China's energy exploration and development[J]. Resources Guide, 2012(5): 8-9.

[65] 叶军 , 曾华盛 . 川西须家河组泥页岩气成藏条件与勘探潜力 [J]. 天然气工业 , 2008, 28(12): 18-25.
YE Jun, ZENG Huasheng. Pooling conditions and exploration prospect of shale gas in Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 18-25.

[66] 郭彤楼 , 李宇平 , 魏志红 . 四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件 [J]. 天然气地球科学 , 2011, 22(1): 1-7.
GUO Tonglou, LI Yuping, WEI Zhihong. Reservoir-forming conditions of shale gas in Ziliujing Formation of Yuanba area in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 1-7.

[67] 徐士林 , 包书景 . 鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩气形成条件及有利发育区预测 [J]. 天然气地球科学 , 2009, 20(3): 460-465.
XU Shilin, BAO Shujing. Preliminary analysis of shale gas resource potential and favorable areas in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 460-465.

[68] 张林晔 , 李政 , 朱日房 , 等 . 济阳坳陷古近系存在页岩气资源的可能性 [J]. 天然气工业 , 2008, 28(12): 26-29.
ZHANG Linye, LI Zheng, ZHU Rifang, et al. Resource potential of shale gas in Paleogene in Jiyang Depression[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 26-29.

[69] 杨振恒 , 李志明 , 沈宝剑 , 等 . 页岩气成藏条件及我国黔南坳陷页岩气勘探前景浅析 [J]. 中国石油勘探 , 2009, 14(3): 24-28.
YANG Zhenheng, LI Zhiming, SHEN Baojian, et al. Shale gas accumulation conditions and exploration prospect in southern Guizhou Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3): 24-28.

[70] 王广源 , 张金川 , 李晓光 , 等 . 辽河东部凹陷古近系页岩气聚集条件分析 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2010, 25(2): 1-5.
WANG Guangyuan, ZHANG Jinchuan, LI Xiaoguang, et al. Accumulation conditions of the Paleogene shale gas in the eastern sag of Liaohe Depression[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2010, 25(2): 1-5.

[71] 潘继平 , 乔德武 , 李世臻 , 等 . 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景 [J]. 地质通报 , 2011, 30(2): 337-343.
PAN Jiping, QIAO Dewu, LI Shizhen, et al. Shale-gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in Lower Yangtze area, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 337-343.

[72] 张大伟 . 加强中国页岩气资源管理的思路框架 [J]. 天然气工业 , 2011, 31(12): 115-118.
ZHANG Dawei. A framework of ideas on strengthening the resource management of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 115-118.

[73] 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.

[74] OCH L M, SHIELDS-ZHOU G A. The Neoproterozoic oxygenation event: Environmental perturbations and biogeochemical cycling[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 110(1/4): 26-57.

[75] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, BAUDIN F, et al. Analysis of marine environmental conditions based onmolybdenum–uranium covariation—Applications to Mesozoic paleoceanography[J]. Chemical Geology, 2012, 324/325: 46-58.

[76] 邱振 , 邹才能 . 非常规油气沉积学 : 内涵与展望 [J]. 沉积学报 , 2020, 38(1): 1-29.
QIU Zhen, ZOU Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29.

[77] 丁江辉 , 张金川 , 石刚 , 等 . 皖南地区上二叠统大隆组页岩沉积环境与有机质富集机理 [J]. 石油与天然气地质 , 2021, 42(1): 158-172.
DING Jianghui, ZHANG Jinchuan, SHI Gang, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanisms of the Upper Permian Dalong Formation shale, southern Anhui Province, China[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 158-172.

[78] 王晓梅 , 张水昌 , 何坤 , 等 . 最小含氧带和硫化环境控制 14 亿年前有机质生烃能力 [J]. 科学通报 , 2021, 66(23): 3005-3017.

WANG Xiaomei, ZHANG Shuichang, HE Kun, et al. OMZ and euxinic sulfidic environments dominating hydrocarbon generation poential of organic matter 1.4 billion years ago[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(23): 3005-3017.

[79] 刘全有 , 李鹏 , 金之钧 , 等 . 湖相泥页岩层系富有机质形成与烃类富集——以长 7 为例 [J]. 中国科学 : 地球科学 , 2022, 52(2): 270-290.
LIU Quanyou, LI Peng, JIN Zhijun, et al. Organic-rich formation and hydrocarbon enrichment of lacustrine shale strata: A case study of Chang 7 member[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2022, 52(2): 270-290.

[80] 张水昌 , 张宝民 , 边立曾 , 等 . 中国海相烃源岩发育控制因素 [J]. 地学前缘 , 2005, 12(3): 39-48.
ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, BIAN Lizeng, et al. Development constraints of marine source rocks in China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 39-48.

[81] 黎茂稳 , 金之钧 , 董明哲 , 等 . 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展 [J]. 石油实验地质 , 2020, 42(4): 489-505.
LI Maowen, JIN Zhijun, DONG Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4): 489-505.

[82] 梁狄刚 , 郭彤楼 , 边立曾 , 等 . 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展 (三) 南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素 [J]. 海相油气地质 , 2009, 14(2): 1-19.
LIANG Digang, GUO Tonglou, BIAN Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 3): Controlling factors on the sedimentary facies and development of Palaeozoic marine source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(2): 1-19.

[83] 张水昌 , 张斌 , 王晓梅 , 等 . 松辽盆地古龙页岩油富集机制与常规—非常规油有序分布 [J]. 石油勘探与开发 , 2023, 50(5): 911-923.
ZHANG Shuichang, ZHANG Bin, WANG Xiaomei, et al. Gulong shale oil enrichment mechanism and orderly distribution of conventional-unconventional oils in the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 911-923.

[84] LIU Quanyou, LI Peng, JIN Zhijun, et al. Preservation of organic matter in shale linked to bacterial sulfate reduction (BSR) and volcanic activity under marine and lacustrine depositional environments[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 127: 104950.

[85] 李守军 , 郑德顺 , 耿福兰 . 定量再造湖泊古生产力的尝试 [J]. 高校地质学报 , 2002, 8(2): 215-219.
LI Shoujun, ZHENG Deshun, GENG Fulan. An attempt on quantitative calculation of lake palaeoproductivity[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(2): 215-219.

[86] 罗情勇 , 钟宁宁 , 朱雷 , 等 . 华北北部中元古界洪水庄组埋藏有机碳与古生产力的相关性 [J]. 科学通报 , 2013, 58(11): 1036-1047.
LUO Qingyong, ZHONG Ningning, ZHU Lei, et al. Correlation of burial organic carbon and paleoproductivity in the Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation, northern North China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(11): 1036-1047.

[87] KUYPERS M M M, PANCOST R D, NIJENHUIS I A, et al. Enhanced productivity led to increased organic carbon burial in the euxinic North Atlantic Basin during the Late Cenomanian oceanic anoxic event[J]. Paleoceanography, 2002, 17(4): 3-1-3-13.

[88] 刘文汇 , 胡广 , 腾格尔 , 等 . 早古生代烃源形成的生物组合及其意义 [J]. 石油与天然气地质 , 2016, 37(5): 617-626.
LIU Wenhui, HU Guang, BORJIGIN Tenger, et al. Organism assemblages in the Paleozoic source rocks and their implications[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 617-626.

[89] CAO Jian, YANG Ruofei, YIN Wei, et al. Mechanism of organic matter accumulation in residual bay environments: The Early Cretaceous Qiangtang Basin, Tibet[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(2): 1024-1037.

[90] 邱振 , 卢斌 , 陈振宏 , 等 . 火山灰沉积与页岩有机质富集关系探讨——以五峰组—龙马溪组含气页岩为例 [J]. 沉积学报 , 2019, 37(6): 1296-1308.
QIU Zhen, LU Bin, CHEN Zhenhong, et al. Discussion of the relationship between volcanic ash layers and organic enrichment of black shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi gas shales in the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(6): 1296-1308.

[91] HAECKEL M, VAN BEUSEKOM J, WIESNER G M, et al. The impact of the 1991 Mount Pinatubo tephra fallout on the geochemical environment of the deep-sea sediments in the South China Sea[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 193(1/2): 151-166.

[92] 刘全有 , 李鹏 , 金之钧 , 等 . 火山活动对海相和淡水湖相页岩形成的影响 [J]. 地球化学 , 2022, 51(5): 556-569.
LIU Quanyou, LI Peng, JIN Zhijun, et al. Effect of volcanic activity on the formation of marine shale and freshwater lacustrine shale[J]. Geochimica, 2022, 51(5): 556-569.

[93] 吴蓝宇 , 陆永潮 , 蒋恕 , 等 . 上扬子区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组沉积期火山活动对页岩有机质富集程度的影响 [J]. 石油勘探与开发 , 2018, 45(5): 806-816.
WU Lanyu, LU Yongchao, JIANG Shu, et al. Effects of volcanic activities in Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi period on organic-rich shale in the Upper Yangtze area, South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 806-816.

[94] WIGNALL P B. Large igneous provinces and mass extinctions[J]. Earth-Science Reviews, 2001, 53(1/2): 1-33.

[95] HEMBURY D J, PALMER M R, FONES G R, et al. Uptake of dissolved oxygen during marine diagenesis of fresh volcanic material[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 84: 353-368.

[96] 陈旭 , 樊隽轩 , 王文卉 , 等 . 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式 [J]. 中国科学 : 地球科学 , 2017, 47(6): 720-732.
CHEN Xu, FAN Juanxuan, WANG Wenhui, et al. Stage-progressive distribution pattern of the Lungmachi black graptolitic shales from Guizhou to Chongqing, Central China[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2017, 47(6): 720-732.

[97] 陈旭 , 陈清 , 甄勇毅 , 等 . 志留纪初宜昌上升及其周缘龙马溪组黑色笔石页岩的圈层展布模式 [J]. 中国科学 : 地球科学 , 2018, 48(9): 1198-1206.
CHEN Xu, CHEN Qing, ZHEN Yongyi, et al. Circumjacent distribution pattern of the Lungmachian graptolitic black shale (Early Silurian) on the Yichang uplift and its peripheral region[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2018, 48(9): 1198-1206.

[98] 王红岩 , 郭伟 , 梁峰 , 等 . 四川盆地威远页岩气田五峰组和龙马溪组黑色页岩生物地层特征与意义 [J]. 地层学杂志 , 2015, 39(3): 289-293.
WANG Hongyan, GUO Wei, LIANG Feng, et al. Biostratigraphy characteristics and scientific meaning of the Wufeng and Longmaxi Formation black shales at Well Wei 202 of the Weiyuan shale gas field, Sichuan Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(3): 289-293.

[99] 梁峰 , 王红岩 , 拜文华 , 等 . 川南地区五峰组—龙马溪组页岩笔石带对比及沉积特征 [J]. 天然气工业 , 2017, 37(7): 20-26.
LIANG Feng, WANG Hongyan, BAI Wenhua, et al. Graptolite correlation and sedimentary characteristics of Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(7): 20-26.

[100] 罗超 , 王兰生 , 石学文 , 等 . 长宁页岩气田宁 211 井五峰组—龙马溪组生物地层 [J]. 地层学杂志 , 2017, 41(2): 142-152.
LUO Chao, WANG Lansheng, SHI Xuewen, et al. Biostratigraphy of the Wufeng to Longmaxi Formation at Well Ning 211 of Changning shale gas field[J]. Journal of Stratigraphy, 2017, 41(2): 142-152.

[101] 周志 , 姜振学 , 李世臻 , 等 . 鄂西建始地区五峰 - 龙马溪组黑色页岩生物地层特征 [J]. 地球科学 , 2021, 46(2): 432-443.
ZHOU Zhi, JIANG Zhenxue, LI Shizhen, et al. Biostratigraphic characteristics of black graptolite shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Jianshi area of West Hubei[J]. Earth Science, 2021, 46(2): 432-443.

[102] NIE Haikuan, LI Pei, CHEN Qing, et al. A world-class source rock in southern China formed during the periods from Katian to Rhuddanian: Biostratigraphic distribution, depositional model and shale gas potential[J]. Gondwana Research, 2024, 126: 267-288.

[103] 邹才能 , 龚剑明 , 王红岩 , 等 . 笔石生物演化与地层年代标定在页岩气勘探开发中的重大意义 [J]. 中国石油勘探 , 2019, 24(1): 1-6.
ZOU Caineng, GONG Jianming, WANG Hongyan, et al. Importance of graptolite evolution and biostratigraphic calibration on shale gas exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 1-6.

[104] 操应长 , 梁超 , 韩豫 , 等 . 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨 [J]. 古地理学报 , 2023, 25(4): 729-741.
CAO Yingchang, LIANG Chao, HAN Yu, et al. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis[J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(4): 729-741.

[105] 王民 , 杨金路 , 王鑫 , 等 . 基于随机森林算法的泥页岩岩相测井识别 [J]. 地球科学 , 2023, 48(1): 130-142.
WANG Min, YANG Jinlu, WANG Xin, et al. Identification of shale lithofacies by well logs based on random forest algorithm[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 130-142.

[106] 刘忠宝 , 刘光祥 , 胡宗全 , 等 . 陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义——以四川盆地中下侏罗统为例 [J]. 天然气工业 , 2019, 39(12): 10-21.
LIU Zhongbao, LIU Guangxiang, HU Zongquan, et al. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their significance for shale gas exploration: A case study of the Middle and Lower Jurassic strata in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 10-21.

[107] 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.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan. Types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(3): 219-225.

[108] 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 nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.

[109] 杨峰 , 宁正福 , 胡昌蓬 , 等 . 页岩储层微观孔隙结构特征 [J]. 石油学报 , 2013, 34(2): 301-311.
YANG Feng, NING Zhengfu, HU Changpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 301-311.

[110] 聂海宽 , 边瑞康 , 张培先 , 等 . 川东南地区下古生界页岩储层微观类型与特征及其对含气量的影响 [J]. 地学前缘 , 2014, 21(4): 331-343.
NIE Haikuan, BIAN Ruikang, ZHANG Peixian, et al. Micro-types and characteristics of shale reservoir of the Lower Paleozoic in Southeast Sichuan Basin, and their effects on the gas content[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 331-343.

[111] 郭旭升 , 李宇平 , 刘若冰 , 等 . 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素 [J]. 天然气工业 , 2014, 34(6): 9-16.
GUO Xusheng, LI Yuping, LIU Ruobing, et al. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 9-16.

[112] 张同伟 , 张亚军 , 贾敏 , 等 . 中国南方寒武系海相页岩含气性主控因素的科学问题 [J]. 矿物岩石地球化学通报 , 2018, 37(4): 572-579.
ZHANG Tongwei, ZHANG Yajun, JIA Min, et al. Key scientific issues on controlling the variation of gas contents of Cambrian marine shales in southern China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(4): 572-579.

[113] 周文 , 陈文玲 , 邓昆 , 等 . 陆相页岩油气地层油气相态的确定方法初探——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 段为例 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2013, 40(6): 640-647.
ZHOU Wen, CHEN Wenling, DENG Kun, et al. Determination of oil/gas phase in continental shale: Taking Member Chang 7

shale of Yanchang Formation in Ordos Basin for example[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(6): 640-647.

[114] 谭静强 , 张煜麟 , 罗文彬 , 等 . 富有机质泥页岩微纳米孔隙结构研究进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报 , 2019, 38(1): 18-29.
TAN Jingqiang, ZHANG Yulin, LUO Wenbin, et al. Research progress on microscale and nanoscale pore structures of organic-rich muddy shales[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(1): 18-29.

[115] 刘树根 , 马文辛 , LUBA J, 等 . 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征 [J]. 岩石学报 , 2011, 27(8): 2239-2252.
LIU Shugen, MA Wenxin, LUBA J, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan Basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2239-2252.

[116] 王红岩 , 施振生 , 孙莎莎 , 等 . 四川盆地及周缘志留系龙马溪组一段深层页岩储层特征及其成因 [J]. 石油与天然气地质 , 2021, 42(1): 66-75.
WANG Hongyan, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al. Characterization and genesis of deep shale reservoirs in the first member of the Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 66-75.

[117] 杨威 , 蔡剑锋 , 王乾右 , 等 . 五峰—龙马溪组海相页岩生—储耦合演化及对页岩气富集的控制效应 [J]. 石油科学通报 , 2020, 5(2): 148-160.
YANG Wei, CAI Jianfeng, WANG Qianyou, et al. The controlling effect of organic matter coupling with organic matter porosity on shale gas enrichment of the Wufeng–Longmaxi marine shale[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(2): 148-160.

[118] 赵建华 , 金之钧 , 金振奎 , 等 . 四川盆地五峰组—龙马溪组含气页岩中石英成因研究 [J]. 天然气地球科学 , 2016, 27(2): 377-386.
ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. The genesis of quartz in Wufeng–Longmaxi gas shales, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 377-386.

[119] 孙川翔 , 聂海宽 , 刘光祥 , 等 . 石英矿物类型及其对页岩气富集开采的控制 : 以四川盆地及其周缘五峰组 - 龙马溪组为例 [J]. 地球科学 , 2019, 44(11): 3692-3704.
SUN Chuanxiang, NIE Haikuan, LIU Guangxiang, et al. Quartz type and its control on shale gas enrichment and production: A case study of the Wufeng–Longmaxi formations in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. Earth Science, 2019, 44(11): 3690-3704.

[120] QIU Zhen, LIU Bei, DONG Dazhong, et al. Silica diagenesis in the Lower Paleozoic Wufeng and Longmaxi formations in the Sichuan Basin, South China: Implications for reservoir properties and paleoproductivity[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 121: 104594.

[121] ZHAO Jianhua, JIN Zhenkui, JIN Zhijun, et al. Origin of authigenic quartz in organic-rich shales of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Sichuan Basin, South China: Implications for pore evolution[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 38: 21-38.

[122] 管全中 , 董大忠 , 张华玲 , 等 . 富有机质页岩生物成因石英的类型及其耦合成储机制——以四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为例 [J]. 石油勘探与开发 , 2021, 48(4): 700-709.
GUAN Quanzhong, DONG Dazhong, ZHANG Hualing, et al. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: A case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4): 700-709.

[123] 张光荣 , 聂海宽 , 唐玄 , 等 . 基于有机孔和生物成因硅优选页岩气富集高产层段的方法及应用——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组页岩为例 [J]. 天然气地球科学 , 2021, 32(6): 888-898.
ZHANG Guangrong, NIE Haikuan, TANG Xuan, et al. Optimization method and application of shale gas enrichment layer based on biogenic silica and organic matter pore: Case study of Wufeng–Longmaxi formations shale in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(6): 888-898.

[124] 郭彤楼 , 熊亮 , 叶素娟 , 等 . 输导层 (体) 非常规天然气勘探理论与实践——四川盆地新类型页岩气与致密砂岩气突破的启示 [J]. 石油勘探与开发 , 2023, 50(1): 24-37.
GUO Tonglou, XIONG Liang, YE Sujuan, et al. Theory and practice of unconventional gas exploration in carrier beds: Insight from the breakthrough of new type of shale gas and tight gas in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 24-37.

[125] 曾联波 , 马诗杰 , 田鹤 , 等 . 富有机质页岩天然裂缝研究进展 [J]. 地球科学 , 2023, 48(7): 2427-2442.
ZENG Lianbo, MA Shijie, TIAN He, et al. Research progress of natural fractures in organic rich shale[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2427-2442.

[126] 李世臻 , 姜文利 , 王倩 , 等 . 中国页岩气地质调查评价研究现状与存在问题 [J]. 地质通报 , 2013, 32(9): 1440-1446.
LI Shizhen, JIANG Wenli, WANG Qian, et al. Research status and currently existent problems of shale gas geological survey and evaluation in China[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(9): 1440-1446.

[127] 邱楠生 , 冯乾乾 , 腾格尔 , 等 . 川东南丁山地区燕山期—喜马拉雅期差异构造 - 热演化与页岩气保存 [J]. 石油学报 , 2020, 41(12): 1610-1622.
QIU Nansheng, FENG Qianqian, BORJIGIN Tenger, et al. Yanshanian–Himalayan differential tectono–thermal evolution and shale gas preservation in Dingshan area, southeastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1610-1622.

[128] NIE Haikuan, HE Zhiliang, WANG Ruyue, et al. Temperature and origin of fluid inclusions in shale veins of Wufeng–Longmaxi formations, Sichuan Basin, South China: Implications for shale gas preservation and enrichment[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 193: 107329.

[129] 刘冬冬 , 郭靖 , 潘占昆 , 等 . 页岩气藏超压演化过程 : 来自四川盆地南部五峰组—龙马溪组裂缝流体包裹体的证据 [J].

天然气工业 , 2021, 41(9): 12-22.
LIU Dongdong, GUO Jing, PAN Zhankun, et al. Overpressure evolution process in shale gas reservoir: Evidence from the fluid inclusions in the fractures of Wufeng Formation–Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(9): 12-22.

[130] 琚宜文 , 戚宇 , 房立志 , 等 . 中国页岩气的储层类型及其制约因素 [J]. 地球科学进展 , 2016, 31(8): 782-799.
JU Yiwen, QI Yu, FANG Lizhi, et al. China shale gas reservoir types and its controlling factors[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(8): 782-799.

[131] 杨跃明 , 文龙 , 王兴志 , 等 . 四川盆地下侏罗统大安寨段页岩油气地质特征及勘探有利区优选 [J]. 天然气工业 , 2023, 43(4): 32-42.
YANG Yueming, WEN Long, WANG Xingzhi, et al. Geological characteristics and favorable exploration area selection of shale oil and gas of the Lower Jurassic Da'anzhai Member in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 32-42.

[132] 聂海宽 , 马鑫 , 余川 , 等 . 川东下侏罗统自流井组页岩储层特征及勘探潜力评价 [J]. 石油与天然气地质 , 2017, 38(3): 438-447.
NIE Haikuan, MA Xin, YU Chuan, et al. Shale gas reservoir characteristics and its exploration potential-analysis on the Lower Jurassic shale in the eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 438-447.

[133] 胡钦红 , 刘惠民 , 黎茂稳 , 等 . 东营凹陷沙河街组页岩油储集层润湿性、孔隙连通性和流体—示踪剂运移 [J]. 石油学报 , 2018, 39(3): 278-289.
HU Qinhong, LIU Huimin, LI Maowen, et al. Wettability, pore connectivity and fluid–tracer migration in shale oil reservoirs of Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag of Bohai Bay Basin, East China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(3): 278-289.

[134] 刘忠宝 , 胡宗全 , 刘光祥 , 等 . 高成熟陆相页岩油气源—储特征及富集层段评价方法——以川东复兴地区侏罗系东岳庙段为例 [J]. 天然气工业 , 2022, 42(10): 11-24.
LIU Zhongbao, HU Zongquan, LIU Guangxiang, et al. Source–reservoir features and favorable enrichment interval evaluation methods of high mature continental shale: A case study of the Jurassic Dongyuemiao Member in the Fuxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(10): 11-24.

[135] 张少敏 , 杨跃明 , 洪海涛 , 等 . 陆相页岩层段储集特征及其油气地质意义——以四川盆地中部大安寨段为例 [J]. 中国矿业大学学报 , 2022, 51(4): 718-730.
ZHANG Shaomin, YANG Yueming, HONG Haitao, et al. Reservoir characteristics and its petroleum significance of Jurassic Da'anzhai shale interval in central Sichuan Basin, SW China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(4): 718-730.

[136] 王香增 , 范柏江 , 张丽霞 , 等 . 陆相页岩气的储集空间特征及赋存过程——以鄂尔多斯盆地陕北斜坡构造带延长探区延长组长 7 段为例 [J]. 石油与天然气地质 , 2015, 36(4): 651-658.
WANG Xiangzeng, FAN Bojiang, ZHANG Lixia, et al. Reservoir space characteristics and charging process of Lacustrine shale gas—a case study of the Chang 7 member in Yanchang Block in Shanbei slope of Erdos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 651-658.

[137] 于炳松 . 页岩气储层孔隙分类与表征 [J]. 地学前缘 , 2013, 20(4): 211-220.
YU Bingsong. Classification and characterization of gas shale pore system[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 211-220.

[138] 孙川翔 , 聂海宽 , 苏海琨 , 等 . 温压耦合作用下四川盆地深层龙马溪组页岩孔渗和岩石力学特征 [J]. 石油勘探与开发 , 2023, 50(1): 77-88.
SUN Chuanxiang, NIE Haikuan, SU Haikun, et al. Porosity, permeability and rock mechanics of Lower Silurian Longmaxi Formation deep shale under temperature–pressure coupling in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 77-88.

[139] 聂海宽 , 张金川 . 页岩气聚集条件及含气量计算——以四川盆地及其周缘下古生界为例 [J]. 地质学报 , 2012, 86(2): 349-361.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan. Shale gas accumulation conditions and gas content calculation: A case study of Sichuan Basin and its periphery in the Lower Paleozoic[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 349-361.

[140] 聂海宽 , 张金川 , 马晓彬 , 等 . 页岩等温吸附气含量负吸附现象初探 [J]. 地学前缘 , 2013, 20(6): 282-288.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan, MA Xiaobin, et al. A preliminary study of negative adsorption phenomena of shale adsorption gas content by isothermal adsorption[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(6): 282-288.

[141] 琚宜文 , 卜红玲 , 王国昌 . 页岩气储层主要特征及其对储层改造的影响 [J]. 地球科学进展 , 2014, 29(4): 492-506.
JU Yiwen, BU Hongling, WANG Guochang. Main characteristics of shale gas reservoir and its effect on the reservoir reconstruction[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(4): 492-506.

[142] 蒋裕强 , 付永红 , 谢军 , 等 . 海相页岩气储层评价发展趋势与综合评价体系 [J]. 天然气工业 , 2019, 39(10): 1-9.
JIANG Yuqiang, FU Yonghong, XIE Jun, et al. Development trend of marine shale gas reservoir evaluation and a suitable comprehensive evaluation system[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(10): 1-9.

[143] NIE Haikuan, JIN Zhijun, SUN Chuanxiang, et al. Organic matter types of the Wufeng and Longmaxi formations in the Sichuan Basin, South China: Implications for the formation of organic matter pores[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(9): 8076-8100.

[144] 卢双舫 , 李俊乾 , 张鹏飞 , 等 . 页岩油储集层微观孔喉分类与分级评价 [J]. 石油勘探与开发 , 2018, 45(3): 436-444.
LU Shuangfang, LI Junqian, ZHANG Pengfei, et al. Classification of microscopic pore-throats and the grading evaluation on shale oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 436-444.

[145] 熊亮 , 魏力民 , 史洪亮 . 川南龙马溪组储层分级综合评价技术及应用——以四川盆地威荣页岩气田为例 [J]. 天然气工业 , 2019, 39(增刊 1): 60-65.
XIONG Liang, WEI Limin, SHI Hongliang. Reservoir classification and comprehensive evaluation technology and application of Longmaxi Formation in southern Sichuan: A case

study of Weirong shale gas field in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 60-65.

[146] JIN Zhijun, NIE Haikuan, LIU Quanyou, et al. Coevolutionary dynamics of organic-inorganic interactions, hydrocarbon generation, and shale gas reservoir preservation: A case study from the Upper Ordovician Wufeng and Lower Silurian Longmaxi formations, Fuling shale gas field, eastern Sichuan Basin[J]. Geofluids, 2020, 2020: 6672386.

[147] SEEWALD J S. Organic–inorganic interactions in petroleum-producing sedimentary basins[J]. Nature, 2003, 426(6964): 327-333.

[148] FROST A. The role of clays in the formation of petroleum[J]. Uspekhi Khim, 1945, 14: 501.

[149] ESPITALIÉ J, MADEC M, TISSOT B. Role of mineral matrix in kerogen pyrolysis: Influence on petroleum generation and migration[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(1): 59-66.

[150] TANNENBAUM E, KAPLAN I R. Role of minerals in the thermal alteration of organic matter—I: Generation of gases and condensates under dry condition[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49: 2589-2604.

[151] HILL R J, ZHANG Etuan, KATZ B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501-521.

[152] YANG Shengyu, HORSFIELD B. Some predicted effects of minerals on the generation of petroleum in nature[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(8): 6677-6687.

[153] RAHMAN H M, KENNEDY M, LÖHR S, et al. The influence of shale depositional fabric on the kinetics of hydrocarbon generation through control of mineral surface contact area on clay catalysis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 220: 429-448.

[154] LEWAN M D, DOLAN M P, CURTIS J B. Effects of smectite on the oil-expulsion efficiency of the Kreyenhagen Shale, San Joaquin Basin, California, based on hydrous-pyrolysis experiments[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(6): 1091-1109.

[155] 任战利 , 于强 , 崔军平 , 等 . 鄂尔多斯盆地热演化史及其对油气的控制作用 [J]. 地学前缘 , 2017, 24(3): 137-148.
REN Zhanli, YU Qiang, CUI Junping, et al. Thermal history and its controls on oil and gas of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 137-148.

[156] 赵文智 , 朱如凯 , 胡素云 , 等 . 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义 [J]. 石油勘探与开发 , 2020, 47(6): 1079-1089.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1079-1089.

[157] 卢红选 , 孟自芳 , 李斌 , 等 . 含铀物质对泥岩有机质热模拟生烃产物的影响 [J]. 沉积学报 , 2008, 26(2): 324-329.
LU Hongxuan, MENG Zifang, LI Bin, et al. Effect of Uranium substance on hydrocarbon generation from mudstone by hydrous pyrolysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 324-329.

[158] 毛光周 , 刘池洋 , 张东东 , 等 . 铀对 (Ⅱ型) 低熟烃源岩生烃演化的影响 [J]. 地质学报 , 2012, 86(11): 1833-1840.
MAO Guangzhou, LIU Chiyang, ZHANG Dongdong, et al. Effects of uranium (type II) on evolution of hydrocarbon generation of source rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1833-1840.

[159] YANG Shengyu, SCHULZ H M, HORSFIELD B, et al. On the changing petroleum generation properties of Alum Shale over geological time caused by uranium irradiation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 229: 20-35.

[160] GREENWOOD P F, SHAN Chao, HOLMAN A I, et al. The composition and radiolysis impact on aromatic hydrocarbons in sedimentary organic matter from the Mulga Rock (Australia) uranium deposit[J]. Organic Geochemistry, 2018, 123: 103-112.

[161] YANG Shengyu, SCHULZ H M, HORSFIELD B, et al. Geological alteration of organic macromolecules by irradiation: Implication for organic matter occurrence on Mars[J]. Geology, 2020, 48(7): 713-717.

[162] SILVA R C, SNOWDON L R, HUANG Haiping, et al. Radiolysis as a source of 13C depleted natural gases in the geosphere[J]. Organic Geochemistry, 2019, 138: 103911.

[163] 刘全有 , 朱东亚 , 孟庆强 , 等 . 深部流体及有机 - 无机相互作用下油气形成的基本内涵 [J]. 中国科学 : 地球科学 , 2019, 49(3): 499-520.
LIU Quanyou, ZHU Dongya, MENG Qingqiang, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2019, 49(3): 499-520.

[164] 刘全有 , 吴小奇 , 朱东亚 , 等 . 含油气盆地有机无机作用下非生物烷烃气形成与资源潜力 [J]. 天然气地球科学 , 2021, 32(2): 155-163.
LIU Quanyou, WU Xiaoqi, ZHU Dongya, et al. Generation and resource potential of abiogenic alkane gas under organic-inorganic interactions in petroliferous basins[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(2): 155-163.

[165] MICHELS R, LANDAIS P, TORKELSON B E, et al. Effects of effluents and water pressure on oil generation during confined pyrolysis and high-pressure hydrous pyrolysis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(8): 1589-1604.

[166] TANG Xuan, ZHANG Jinchuan, JIANG Zaixing, et al. Characteristics of solid residue, expelled and retained hydrocarbons of lacustrine marlstone based on semi-closed system hydrous pyrolysis: Implications for tight oil exploration[J]. Fuel, 2015, 162: 186-193.

[167] BURNHAM A K. A simple kinetic model of oil generation, vaporization, coking, and cracking[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(11): 7156-7167.

[168] MANGO F D, HIGHTOWER J W, JAMES A T. Role of transition-metal catalysis in the formation of natural gas[J]. Nature, 1994, 368(6471): 536-538.

[169] MANGO F D, JARVIE D M. Metathesis in the generation of low-temperature gas in marine shales[J]. Geochemical Transactions, 2010, 11(1): 1.

[170] LEWAN M D, KOTARBA M J, WIĘCŁAW D, et al. Evaluating transition-metal catalysis in gas generation from the Permian Kupferschiefer by hydrous pyrolysis[J]. Geochimica et

Cosmochimica Acta, 2008, 72(16): 4069-4093.

[171] 蔡进功 , 李颖莉 , 陈泽文 , 等 . 泥岩中粘土矿物 - 有机质协同作用及其意义 [C]//2016 中国地球科学联合学术年会论文集 . 北京 : 中国地球物理学会 , 2016: 2011-2012.
CAI Jingong, LI Yingli, CHEN Zewen, et al. Synergistic interaction between clay minerals and organic matter in mudstone and its significance[C]//Proceedings of the 2016 China Earth Science Joint Academic Annual Conference. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2016: 2011-2012.

[172] 胡文瑄 , 姚素平 , 陆现彩 , 等 . 典型陆相页岩油层系成岩过程中有机质演化对储集性的影响 [J]. 石油与天然气地质 , 2019, 40(5): 947-956.
HU Wenxuan, YAO Suping, LU Xiancai, et al. Effects of organic matter evolution on oil reservoir property during diagenesis of typical continental shale sequences[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 947-956.

[173] ARNING E T, VAN BERK W, SCHULZ H M. Fate and behaviour of marine organic matter during burial of anoxic sediments: Testing CH_2O as generalized input parameter in reaction transport models[J]. Marine Chemistry, 2016, 178: 8-21.

[174] HELGESON H C, KNOX A M, OWENS C E, et al. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(14): 3295-3339.

[175] PROCHNOW E A, REMUS M V D, KETZER J M, et al. Organic−inorganic interactions in oilfield sandstones: Examples from turbidite reservoirs in the Campos Basin, offshore eastern Brazil[J]. Journal of Petroleum Geology, 2006, 29(4): 361-380.

[176] BURDIGE D J. Temperature dependence of organic matter remineralization in deeply-buried marine sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 311(3/4): 396-410.

[177] BERNER R A. A new geochemical classification of sedimentary environments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51(2): 359-365.

[178] RAISWELL R, CANFIELD D E. Sources of iron for pyrite formation in marine sediments[J]. American Journal of Science, 1998, 298(3): 219-245.

[179] CHOW N, MORAD S, AL-AASM I S. Origin of authigenic Mn−Fe carbonates and pore-water evolution in marine sediments: Evidence from Cenozoic strata of the arctic ocean and Norwegian−Greenland Sea (ODP Leg 151)[J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(3): 682-699.

[180] ARNING E T, VAN BERK W, SCHULZ H M. Quantitative geochemical modeling along a transect off Peru: Carbon cycling in time and space, and the triggering factors for carbon loss and storage[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(4): GB4012.

[181] SCHULZ H M, WIRTH R, SCHREIBER A. Nano-crystal formation of TiO_2 polymorphs brookite and anatase due to organic–inorganic rock–fluid interactions[J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86(2): 59-72.

[182] MORSE J W. Formation and diagenesis of carbonate sediments[M]//HOLLAND H D, TUREKIAN K K. Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier Science, 2003: 67-85.

[183] WORDEN R H, BURLEY S D. Sandstone diagenesis: The evolution of sand to stone[M]//BURLEY B D, WORDEN R H. Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient. Chichester: Wiley−Blackwell, 2003: 1-44.

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

[185] 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.

[186] 党伟 , 张金川 , 黄潇 , 等 . 陆相页岩含气性主控地质因素——以辽河西部凹陷沙河街组三段为例 [J]. 石油学报 , 2015, 36(12): 1516-1530.
DANG Wei, ZHANG Jinchuan, HUANG Xiao, et al. Main-controlling geological factors of gas-bearing property of continental shale gas: A case study of Member 3rd of Shahejie Formation in western Liaohe Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1516-1530.

[187] HARTMAN R C, AMBROSE R J, AKKUTLU I Y, et al. Shale gas-in-place calculations part II—Multi-component gas adsorption effects[C]//North American unconventional gas conference and exhibition. Houston: SPE, 2011: SPE-144097-MS.

[188] AMBROSE R J, HARTMAN R C, DIAZ-CAMPOS M, et al. Shale gas-in-place calculations Part I: New pore-scale considerations[J]. SPE Journal, 2012, 17(1): 219-229.

[189] HU Qinhong, EWING R P, ROWE H D. Low nanopore connectivity limits gas production in Barnett Formation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(12): 8073-8087.

[190] TIAN Hui, LI Tengfei, ZHANG Tongwei, et al. Characterization of methane adsorption on overmature Lower Silurian–Upper Ordovician shales in Sichuan Basin, Southwest China: Experimental results and geological implications[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 156: 36-49.

[191] 卢双舫 , 沈博健 , 许晨曦 , 等 . 利用 GCMC 分子模拟技术研究页岩气的吸附行为和机理 [J]. 地球科学 , 2018, 43(5): 1783-1791.
LU Shuangfang, SHEN Bojian, XU Chenxi, et al. Study on adsorption behavior and mechanism of shale gas by using GCMC molecular simulation[J]. Earth Science, 2018, 43(5): 1783-1791.

[192] ROSS D J K, BUSTIN R M. Impact of mass balance calculations on adsorption capacities in microporous shale gas reservoirs[J]. Fuel, 2007, 86(17/18): 2696-2706.

[193] REXER T F T, BENHAM M J, APLIN A C, et al. Methane adsorption on shale under simulated geological temperature and pressure conditions[J]. Energy & Fuels, 2013, 27(6): 3099-3109.

[194] JI Wenming, SONG Yan, JIANG Zhenxue, et al. Geological controls and estimation algorithms of lacustrine shale gas adsorption capacity: A case study of the Triassic strata in the southeastern Ordos Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 134/135: 61-73.

[195] LI Jijun, YAN Xintong, WANG Weiming, et al. Key factors

controlling the gas adsorption capacity of shale: A study based on parallel experiments[J]. Applied Geochemistry, 2015, 58: 88-96.

[196] TIAN Hui, LI Tengfei, ZHANG Tongwei, et al. Characterization of methane adsorption on overmature Lower Silurian–Upper Ordovician shales in Sichuan Basin, southwest China: Experimental results and geological implications[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 156: 36-49.

[197] DANG Wei, ZHANG Jinchuan, WEI Xiaoliang, et al. Geological controls on methane adsorption capacity of Lower Permian transitional black shales in the Southern North China Basin, Central China: Experimental results and geological implications[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 152: 456-470.

[198] XING Yijie, XIAO Xianming, ZHOU Qin, et al. Influence of water on the methane adsorption capacity of organic-rich shales and its controlling factors: A review[J]. Energies, 2023, 16(8): 3305.

[199] 王飞宇 , 贺志勇 , 孟晓辉 , 等 . 页岩气赋存形式和初始原地气量 (OGIP) 预测技术 [J]. 天然气地球科学 , 2011, 22(3): 501-510.
WANG Feiyu, HE Zhiyong, MENG Xiaohui, et al. Occurrence of shale gas and prediction of original gas in-place (OGIP)[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 501-510.

[200] 雷裕红 , 王晖 , 罗晓容 , 等 . 鄂尔多斯盆地张家滩页岩液态烃特征及对页岩气量估算的影响 [J]. 石油学报 , 2016, 37(8): 952-961.
LEI Yuhong, WANG Hui, LUO Xiaorong, et al. The characteristics of liquid hydrocarbon in Zhangjiatan shale, Ordos Basin and its effects on the estimation of shale gas amount[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(8): 952-961.

[201] 吴颖 . 鄂尔多斯盆地东南部长 7 页岩储层特征及含气性控制因素 [D]. 西安 : 西北大学 , 2018.
WU Ying. The shale reservoir characteristics of Chang 7 member in the Yanchang Formation and its controlling factors on gas-bearing, the southeastern part, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.

[202] 邓长生 , 张毅 , 谢小飞 , 等 . 延长石油探区延长组页岩总含气量综合预测模型 [J]. 新疆石油地质 , 2020, 41(3): 269-277.
DENG Changsheng, ZHANG Yi, XIE Xiaofei, et al. Comprehensive prediction model of total gas content in the shale of Yanchang Formation in Yanchang petroleum exploration area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(3): 269-277.

[203] 何家欢 . 页岩含气量现场自动测试技术 [J]. 天然气工业 , 2022, 42(2): 10.
HE Jiahuan. Technology of in-situ automatic measurement of shale gas content[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 10.

[204] 张金川 , 王香增 , 李中明 , 等 . 页岩含气量现场测试技术进展与发展趋势 [J/OL]. 地学前缘 , (2023-10-18)[2023-11-10]. https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.9.30.
ZHANG Jinchuan, WANG Xiangzeng, LI Zhongming, et al. The progress and trend of on-site testing technology for shale gas contents[J/OL]. Earth Science Frontiers, (2023-10-18) [2023-11-10]. https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.9.30.

[205] DANG Wei, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan, et al. Investigation of gas content of organic-rich shale: A case study from Lower Permian shale in southern North China Basin, central China[J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(2): 559-575.

[206] MAVOR M. Barnett shale gas-in-place volume including sorbed and free gas volume[C]//AAPG Southwest Section Meeting. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists, 2003: 90010.

[207] LI Wenbiao, LI Xiao, ZHAO Shengxian, et al. Evaluation on carbon isotope fractionation and gas-in-place content based on pressure-holding coring technique[J]. Fuel, 2022, 315: 123243.

[208] 周尚文 , 张介辉 , 邹辰 , 等 . 基于保压取心的页岩含气量测试新方法 [J]. 煤炭学报 , 2022, 47(4): 1637-1646.
ZHOU Shangwen, ZHANG Jiehui, ZOU Chen, et al. A new method for testing shale gas content based on pressure-holding coring technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1637-1646.

[209] LI Zhen, ZHANG Jinchuan, GONG Dajian, et al. Gas-bearing property of the Lower Cambrian Niutitang Formation shale and its influencing factors: A case study from the Cengong block, northern Guizhou Province, South China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 120: 104556.

[210] 杨立文 , 苏洋 , 罗军 , 等 . GW-CP194-80A 型保压取心工具的研制 [J]. 天然气工业 , 2020, 40(4): 91-96.
YANG Liwen, SU Yang, LUO Jun, et al. Development and application of GW-CP194-80A pressure-maintaining coring tool[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 91-96.

[211] LU Xiaochun, LI Fanchang, WATSON A T. Adsorption measurements in Devonian shales[J]. Fuel, 1995, 74(4): 599-603.

[212] PAN Zhejun, CONNELL L D. Reservoir simulation of free and adsorbed gas production from shale[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 359-370.

[213] HAWKINS J M, SCHRAUFNAGEL R A, OLSZEWSKI A J. Estimating coalbed gas content and sorption isotherm using well log data[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineers, 1992: SPE-24905-MS.

[214] FU Xuehai, QIN Yong, WANG G G X, et al. Evaluation of gas content of coalbed methane reservoirs with the aid of geophysical logging technology[J]. Fuel, 2009, 88(11): 2269-2277.

[215] JI Kun, GUO Shaobin, HOU Binchi. A logging calculation method for shale adsorbed gas content and its application[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 150: 250-256.

[216] HAKAMI A, ELLIS L, AL-RAMADAN K, et al. Mud gas isotope logging application for sweet spot identification in an unconventional shale gas play: A case study from Jurassic carbonate source rocks in Jafurah Basin, Saudi Arabia[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 76: 133-147.

[217] ZHAO Luanxiao, QIN Xuan, ZHANG Jinqiang, et al. An effective reservoir parameter for seismic characterization of organic shale reservoir[J]. Surveys in Geophysics, 2018, 39(3): 509-541.

[218] CHEN Sheng, ZHAO Wenzhi, GE Xinmin, et al. Predicting gas content in high-maturity marine shales using artificial intelligence based seismic multiple-attributes analysis: A case study from the Lower Silurian Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101: 180-194.

[219] 李东晖 , 聂海宽 . 一种考虑气藏特征的页岩含气量计算方法——以四川盆地及其周缘焦页 1 井和彭页 1 井为例 [J]. 石油与天然气地质 , 2019, 40(6): 1324-1332.
LI Donghui, NIE Haikuan. A new method to calculate shale gas content based on gas reservoir characterization—A case study of Wells JY 1 and PY 1 in Sichuan Basin and its surrounding areas[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1324-1332.

[220] LIU Ziyi, CHEN Dongxia, ZHANG Jinchuan, et al. Combining isotopic geochemical data and logging data to predict the range of the total gas content in shale: A case study from the Wufeng and Longmaxi shales in the Middle Yangtze area, South China[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(11): 10487-10498.

[221] CHEN Zhipeng, CHEN Lei, WANG Gaocheng, et al. Applying isotopic geochemical proxy for gas content prediction of Longmaxi shale in the Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 116: 104329.

[222] LI Wenbiao, LI Junqian, LU Shuangfang, et al. Evaluation of gas-in-place content and gas-adsorbed ratio using carbon isotope fractionation model: A case study from Longmaxi shales in Sichuan Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2022, 249: 103881.

[223] AMBROSE R J, HARTMAN R C, DIAZ-CAMPOS M, et al. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations[C]//SPE Unconventional Gas Conference. Houston: SPE, 2010: SPE-131772-MS.

[224] 陈尚斌 , 张楚 , 刘宇 . 页岩气赋存状态及其分子模拟研究进展与展望 [J]. 煤炭科学技术 , 2018, 46(1): 36-44.
CHEN Shangbin, ZHANG Chu, LIU Yu. Research progress and prospect of shale gas occurrence and its molecular simulation[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 36-44.

[225] BUSTIN R M, BUSTIN A, ROSS D, et al. Shale gas opportunities and challenges[J]. Search and Discovery Articles, 2009, 40382: 20-23.

[226] NIE Haikuan, YANG Zhengheng, DANG Wei, et al. Study of shale gas release from freshly drilled core samples using a real-time canister monitoring technique: Release kinetics, influencing factors, and upscaling[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(3): 2916-2924.

[227] KISSELL F N, MCCULLOCH C M, ELDER C H, et al. The direct method of determining methane content of coalbeds for ventilation design: Report of investigations 7767[R]. Washington, D C: United States Department of the Interior, 1973.

[228] SHTEPANI E, NOLL L A A, ELROD L W W, et al. A new regression-based method for accurate measurement of coal and shale gas content[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2010, 13(2): 359-364.

[229] YEE D, SEIDLE J P, HANSON W B. Gas sorption on coal and measurement of gas content[M]//LAW B E, RICE D D. Hydrocarbons from Coal. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1993: 203-218.

[230] HOSSEINI S A, JAVADPOUR F, MICHAEL G E. Novel analytical core-sample analysis indicates higher gas content in shale-gas reservoirs[J]. SPE Journal, 2015, 20(6): 1397-1408.

[231] LU Meng, PAN Zhejun, CONNELL L D, et al. A coupled, non-isothermal gas shale flow model: Application to evaluation of gas-in-place in shale with core samples[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 158: 361-379.

[232] SU Jiao, SHEN Yinchu, HAO Jin, et al. Shale gas content calculation of the Triassic Yanchang Formation in the southeastern Ordos Basin, China[J]. Energies, 2017, 10(12): 1949.

[233] LI Junqian, LU Shuangfang, ZHANG Pengfei, et al. Estimation of gas-in-place content in coal and shale reservoirs: A process analysis method and its preliminary application[J]. Fuel, 2020, 259: 116266.

[234] XIONG Fengyang, Hwang Bohyun, JIANG Zhenxue, et al. Kinetic emission of shale gas in saline water: Insights from experimental observation of gas shale in canister desorption testing[J]. Fuel, 2021, 300: 121006.

[235] 曾克成 , 解海鹏 , 姜培学 , 等 . 基于变边界分段模型的页岩损失气量和解吸气量评价方法 [J]. 力学学报 , 2021, 53(8): 2168-2178.
ZENG Kecheng, XIE Haipeng, JIANG Peixue, et al. A novel method for evaluating shale lost gas amount and desorption gas amount based on segmented variable boundary model[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(8): 2168-2178.

[236] YU Lingjie, TAN Yuling, FAN Ming, et al. Estimating lost gas content for shales considering real boundary conditions during the core recovery process[J]. ACS Omega, 2022, 7(24): 21246-21254.

[237] 姜福杰 , 庞雄奇 , 姜振学 , 等 . 烃源岩滞留油气作用及其对泥页岩含油气率的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2013, 44(6): 2439-2448.
JIANG Fujie, PANG Xiongqi, JIANG Zhenxue, et al. Residual oil and gas in source rocks and its influence on oil and gas rate in shale[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6): 2439-2448.

[238] 解习农 , 郝芳 , 陆永潮 , 等 . 南方复杂地区页岩气差异富集机理及其关键技术 [J]. 地球科学 , 2017, 42(7): 1045-1056.
XIE Xinong, HAO Fang, LU Yongchao, et al. Differential enrichment mechanism and key technology of shale gas in complex areas of South China[J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1045-1056.

[239] 腾格尔 , 陶成 , 胡广 , 等 . 排烃效率对页岩气形成与富集的影响 [J]. 石油实验地质 , 2020, 42(3): 325-334.
BORJIGIN Tenger, TAO Cheng, HU Guang, et al. Effect of hydrocarbon expulsion efficiency on shale gas formation and enrichment[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(3): 325-334.

[240] XIAO Xianming, WEI Qiang, GAI Haifeng, et al. Main controlling factors and enrichment area evaluation of shale gas of the Lower Paleozoic marine strata in South China[J].

Petroleum Science, 2015, 12(4): 573-586.

[241] NIE Haikuan, JIN Zhijun. Source rock and cap rock controls on the Upper Ordovician Wufeng Formation–Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas accumulation in the Sichuan basin and its peripheral areas[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2016, 90(3): 1059-1060.

[242] JIN Zhijun, NIE Haikuan, LIU Quanyou, et al. Source and seal coupling mechanism for shale gas enrichment in upper Ordovician Wufeng Formation–Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 97: 78-93.

[243] 何治亮 , 胡宗全 , 聂海宽 , 等 . 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气富集特征与“建造—改造”评价思路 [J]. 天然气地球科学 , 2017, 28(5): 724-733.
HE Zhiliang, HU Zongquan, NIE Haikuan, et al. Characterization of shale gas enrichment in the Wufeng–Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its evaluation of geological construction–transformation evolution sequence[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 724-733.

[244] 腾格尔 , 申宝剑 , 俞凌杰 , 等 . 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气形成与聚集机理 [J]. 石油勘探与开发 , 2017, 44(1): 69-78.
BORJIGIN Tenger, SHEN Baojian, YU Lingjie, et al. Mechanisms of shale gas generation and accumulation in the Ordovician Wufeng–Longmaxi Formation, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 69-78.

[245] 姜振学 , 宋岩 , 唐相路 , 等 . 中国南方海相页岩气差异富集的控制因素 [J]. 石油勘探与开发 , 2020, 47(3): 617-628.
JIANG Zhenxue, SONG Yan, TANG Xianglu, et al. Controlling factors of marine shale gas differential enrichment in southern China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 617-628.

[246] 贾承造 , 庞雄奇 , 宋岩 . 论非常规油气成藏机理 : 油气自封闭作用与分子间作用力 [J]. 石油勘探与开发 , 2021, 48(3): 437-452.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 437-452.

[247] 聂海宽 , 包书景 , 高波 , 等 . 四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究 [J]. 地学前缘 , 2012, 19(3): 280-294.
NIE Haikuan, BAO Shujing, GAO Bo, et al. A study of shale gas preservation conditions for the Lower Paleozoic in Sichuan Basin and its periphery[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 280-294.

[248] 魏祥峰 , 李宇平 , 魏志红 , 等 . 保存条件对四川盆地及周缘海相页岩气富集高产的影响机制 [J]. 石油实验地质 , 2017, 39(2): 147-153.
WEI Xiangfeng, LI Yuping, WEI Zhihong, et al. Effects of preservation conditions on enrichment and high yield of shale gas in Sichuan Basin and its periphery[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(2): 147-153.

[249] 张光荣 , 聂海宽 , 唐玄 , 等 . 基于地层水指标的页岩气保存条件评价——以渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩气藏为例 [J]. 油气藏评价与开发 , 2021, 11(1): 47-55.
ZHANG Guangrong, NIE Haikuan, TANG Xuan, et al. Evaluation of shale gas preservation conditions based on formation water index: A case study of Wufeng–Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 47-55.

[250] 马中良 , 申宝剑 , 潘安阳 , 等 . 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气成因与碳同位素倒转机制——来自热模拟实验的认识 [J]. 石油实验地质 , 2020, 42(3): 428-433.
MA Zhongliang, SHEN Baojian, PAN Anyang, et al. Origin and carbon isotope reversal of shale gas in Wufeng–Longmaxi formations, Sichuan Basin: Implication from pyrolysis experiments[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(3): 428-433.

[251] 王红岩 , 刘玉章 , 董大忠 , 等 . 中国南方海相页岩气高效开发的科学问题 [J]. 石油勘探与开发 , 2013, 40(5): 574-579.
WANG Hongyan, LIU Yuzhang, DONG Dazhong, et al. Scientific issues on effective development of marine shale gas in southern China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 574-579.

[252] 聂海宽 , 金之钧 , 马鑫 , 等 . 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征 [J]. 石油学报 , 2017, 38(2): 160-174.
NIE Haikuan, JIN Zhijun, MA Xin, et al. Graptolites zone and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation–Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 160-174.

[253] NIE Haikuan, JIN Zhijun, LI Pei, et al. Deep shale gas in the Ordovician–Silurian Wufeng–Longmaxi formations of the Sichuan Basin, SW China: Insights from reservoir characteristics, preservation conditions and development strategies[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2023, 244: 105521.

[254] 朱华 , 姜文利 , 边瑞康 , 等 . 页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西坳陷为例 [J]. 天然气工业 , 2009, 29(12): 130-134.
ZHU Hua, JIANG Wenli, BIAN Ruikang, et al. Shale gas assessment methodology and its application: A case study of the western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 130-134.

[255] 张金川 , 林腊梅 , 李玉喜 , 等 . 页岩气资源评价方法与技术 : 概率体积法 [J]. 地学前缘 , 2012, 19(2): 184-191.
ZHANG Jinchuan, LIN Lamei, LI Yuxi, et al. The method of shale gas assessment: Probability volume method[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 184-191.

[256] 宋振响 , 邱岐 , 赵琳洁 , 等 . 基于存滞系数的页岩气资源评价方法 [J]. 天然气工业 , 2020, 40(10): 12-19.
SONG Zhenxiang, QIU Qi, ZHAO Linjie, et al. A shale gas resource evaluation method based on retention coefficient[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(10): 12-19.

[257] 庞雄奇 , 贾承造 , 郭秋麟 , 等 . 全油气系统理论用于常规和非常规油气资源评价的盆地模拟技术原理及应用 [J]. 石油学报 , 2023, 44(9): 1417-1433.

PANG Xiongqi, JIA Chengzao, GUO Qiulin, et al. Principle and application of basin modeling technology for evaluation of conventional and unconventional oil-gas resource based on whole petroleum system theory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1417-1433.

[258] 赵群 , 周天琪 , 王红岩 , 等 . 页岩气资源 / 储量计算中吸附参数确定的新方法——以四川盆地五峰组—龙马溪组页岩为例 [J]. 天然气工业 , 2023, 43(1): 47-54.
ZHAO Qun, ZHOU Tianqi, WANG Hongyan, et al. A novel method for determining adsorption parameters in shale gas resources/reserves calculation: A case study of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(1): 47-54.

[259] 刘喜武 , 刘宇巍 , 霍志周 , 等 . 页岩油气层地震岩石物理计算方法研究 [J]. 石油物探 , 2016, 55(1): 10-17.
LIU Xiwu, LIU Yuwei, HUO Zhizhou, et al. Study on seismic rock physics computational method for shale reservoir[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(1): 10-17.

[260] 刘喜武 , 刘宇巍 , 刘志远 , 等 . 页岩层系天然裂缝地震预测技术研究 [J]. 石油物探 , 2018, 57(4): 611-617.
LIU Xiwu, LIU Yuwei, LIU Zhiyuan, et al. Seismic prediction of natural fractures in series of shale oil reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(4): 611-617.

[261] 刘致水 , 孙赞东 . 新型脆性因子及其在泥页岩储集层预测中的应用 [J]. 石油勘探与开发 , 2015, 42(1): 117-124.
LIU Zhishui, SUN Zandong. New brittleness indexes and their application in shale/clay gas reservoir prediction[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 117-124.

[262] 胡华锋 , 胡起 , 林正良 . 页岩气储层地层压力预测方法及其在四川盆地的应用 [J]. 石油物探 , 2018, 57(3): 362-368.
HU Huafeng, HU Qi, LIN Zhengliang. Pore pressure prediction for shale gas reservoirs and its application in the Sichuan Basin, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3): 362-368.

[263] 刘昊娟 . 地应力地震预测及其在南川页岩气开发中的应用 [J]. 物探与化探 , 2021, 45(3): 560-568.
LIU Haojuan. The application of in-situ stress prediction based on seismic data to shale gas development: A case study of Nanchuan (South Sichuan) area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3): 560-568.

[264] 李军 , 路菁 , 李争 , 等 . 页岩气储层“四孔隙”模型建立及测井定量表征方法 [J]. 石油与天然气地质 , 2014, 35(2): 266-271.
LI Jun, LU Jing, LI Zheng, et al. "Four-pore" modeling and its quantitative logging description of shale gas reservoir[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 266-271.

[265] 李军 , 武清钊 , 路菁 , 等 . 页岩气储层总孔隙度与有效孔隙度测量及测井评价——以四川盆地龙马溪组页岩气储层为例 [J]. 石油与天然气地质 , 2017, 38(3): 602-609.
LI Jun, WU Qingzhao, LU Jing, et al. Measurement and logging evaluation of total porosity and effective porosity of shale gas reservoirs: A case from the Silurian Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 602-609.

[266] LIU Kun, LU Jing, HU Song, et al. Evaluation model of shale-adsorbed gas considering clay and water saturation[J]. Interpretation, 2023, 11(2): T303-T312.

[267] LI Jun, WU Qingzhao, JIN Wujun, et al. Logging evaluation of free-gas saturation and volume content in Wufeng-Longmaxi organic-rich shales in the Upper Yangtze Platform, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 100: 530-539.

[268] 胡松 , 王敏 , 刘伟男 , 等 . 页岩水平井声波时差各向异性校正方法及其应用 [J]. 石油学报 , 2022, 43(1): 58-66.
HU Song, WANG Min, LIU Weinan, et al. Anisotropy correction method for acoustic time difference in horizontal shale wells and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 58-66.

[269] 路菁 , 刘坤 , 李军 . 页岩气储层压力测井评价模型研究——以涪陵地区龙马溪组页岩为例 [J]. 地球物理学进展 , 2022, 37(1): 213-219.
LU Jing, LIU Kun, LI Jun. Model study on logging evaluation of shale gas pore pressure: A case study in Fuling Longmaxi Formation[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(1): 213-219.

[270] 夏宏泉 , 刘畅 , 李高仁 , 等 . 基于测井资料的 TIV 地层水平地应力计算方法 [J]. 石油钻探技术 , 2019, 47(6): 67-72.
XIA Hongquan, LIU Chang, LI Gaoren, et al. A logging data-based calculation method for the horizontal TIV formation in-situ stress[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(6): 67-72.

[271] 邹才能 , 丁云宏 , 卢拥军 , 等 .“人工油气藏”理论、技术及实践 [J]. 石油勘探与开发 , 2017, 44(1): 144-154.
ZOU Caineng, DING Yunhong, LU Yongjun, et al. Concept, technology and practice of "man-made reservoirs" development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 144-154.

[272] 郭建春 , 路千里 , 何佑伟 . 页岩气压裂的几个关键问题与探索 [J]. 天然气工业 , 2022, 42(8): 148-161.
GUO Jianchun, LU Qianli, HE Youwei. Key issues and explorations in shale gas fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 148-161.

[273] 蒋廷学 , 卞晓冰 , 孙川翔 , 等 . 深层页岩气地质工程一体化体积压裂关键技术及应用 [J]. 地球科学 , 2023, 48(1): 1-13.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, SUN Chuanxiang, et al. Key technologies in geology-engineering integration volumetric fracturing for deep shale gas wells[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 1-13.

[274] 蒋廷学 , 周健 , 张旭 , 等 . 深层页岩气井裂缝扩展及导流特性研究及展望 [J]. 中国科学 : 物理学 力学 天文学 , 2017, 47(11): 33-40.
JIANG Tingxue, ZHOU Jian, ZHANG Xu, et al. Overview and prospect of fracture propagation and conductivity characteristics in deep shale gas wells[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2017, 47(11): 33-40.

[275] 陈铭 , 张士诚 , 胥云 , 等 . 水平井分段压裂平面三维多裂缝扩展模型求解算法 [J]. 石油勘探与开发 , 2020, 47(1): 163-174.
CHEN Ming, ZHANG Shicheng, XU Yun, et al. A numerical method for simulating planar 3D multi-fracture propagation in multi-stage fracturing of horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 163-174.

[276] 郭建春 , 赵志红 , 路千里 , 等 . 深层页岩缝网压裂关键力学

理论研究进展 [J]. 天然气工业 , 2021, 41(1): 102-117.
GUO Jianchun, ZHAO Zhihong, LU Qianli, et al. Research progress in key mechanical theories of deep shale network fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 102-117.

[277] 陈作 , 曾义金 . 深层页岩气分段压裂技术现状及发展建议 [J]. 石油钻探技术 , 2016, 44(1): 6-11.
CHEN Zuo, ZENG Yijin. Present situations and prospects of multi-stage fracturing technology for deep shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(1): 6-11.

[278] 张增年 , 李华川 , 郑家伟 , 等 . 压裂设备应用评价及技术发展展望 [J]. 钻采工艺 , 2020, 43(2): 41-44.
ZHANG Zengnian, LI Huachuan, ZHENG Jiawei, et al. Application evaluation and technology development prospect of fracturing equipment[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 41-44.

[279] LI Leiting, TAN Jingqiang, WOOD D A, et al. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs[J]. Fuel, 2019, 242: 195-210.

[280] 胥云 , 雷群 , 陈铭 , 等 . 体积改造技术理论研究进展与发展方向 [J]. 石油勘探与开发 , 2018, 45(5): 874-887.
XU Yun, LEI Qun, CHEN Ming, et al. Progress and development of volume stimulation techniques[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 874-887.

[281] 何治亮 , 聂海宽 , 蒋廷学 . 四川盆地深层页岩气规模有效开发面临的挑战与对策 [J]. 油气藏评价与开发 , 2021, 11(2): 135-145.
HE Zhiliang, NIE Haikuan, JIANG Tingxue. Challenges and countermeasures of effective development with large scale of deep shale gas in Sichuan Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 135-145.

[282] 韩玲玲 , 李熙喆 , 刘照义 , 等 . 川南泸州深层页岩气井套变主控因素与防控对策 [J]. 石油勘探与开发 , 2023, 50(4): 853-861.
HAN Lingling, LI Xizhe, LIU Zhaoyi, et al. Influencing factors and prevention measures of casing deformation in deep shale gas wells in Luzhou block, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 853-861.

[283] 王光付 , 李凤霞 , 王海波 , 等 . 四川盆地不同类型页岩气压裂难点和对策 [J]. 石油与天然气地质 , 2023, 44(6): 1378-1392.
WANG Guangfu, LI Fengxia, WANG Haibo, et al. Difficulties and countermeasures for fracturing of various shale gas reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1378-1392.

[284] 杨永华 , 宋燕高 , 王兴文 , 等 . 威荣页岩气田压裂实践与认识 [J]. 石油实验地质 , 2023, 45(6): 1143-1150.
YANG Yonghua, SONG Yangao, WANG Xingwen, et al. Practice and understanding of fracturing in Weirong shale gas field[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(6): 1143-1150.

[285] 鲜成钢 . 页岩气地质工程一体化建模及数值模拟 : 现状、挑战和机遇 [J]. 石油科技论坛 , 2018, 37(5): 24-34.
XIAN Chenggang. Shale gas geological engineering integrated modeling and numerical simulation: Present conditions, challenges and opportunities[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2018, 37(5): 24-34.

[286] 廖东良 , 路保平 , 陈延军 . 页岩气地质甜点评价方法——以四川盆地焦石坝页岩气田为例 [J]. 石油学报 , 2019, 40(2): 144-151.
LIAO Dongliang, LU Baoping, CHEN Yanjun. An evaluation method of geological sweet spots of shale gas reservoir: A case study of the Jiaoshiba Gas Field, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2): 144-151.

[287] 包汉勇 , 梁榜 , 郑爱维 , 等 . 地质工程一体化在涪陵页岩气示范区立体勘探开发中的应用 [J]. 中国石油勘探 , 2022, 27(1): 88-98.
BAO Hanyong, LIANG Bang, ZHENG Aiwei, et al. Application of geology and engineering integration in stereoscopic exploration and development of Fuling shale gas demonstration area[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 88-98.

[288] 商绍芬 , 严鸿 , 吴建 , 等 . 四川盆地长宁页岩气井生产特征及开采方式 [J]. 天然气勘探与开发 , 2018, 41(4): 69-75.
SHANG Shaofen, YAN Hong, WU Jian, et al. Production characteristics and development modes of shale-gas wells, Changning gasfield, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018, 41(4): 69-75.

[289] 胡浩 , 汪敏 , 隆辉 , 等 . 一种页岩气井全生命周期合理配产新方法——以泸州地区页岩气为例 [J]. 复杂油气藏 , 2023, 16(2): 137-143.
HU Hao, WANG Min, LONG Hui, et al. A new method of rational production allocation in the whole life cycle of shale gas wells: A case from shale gas in Luzhou[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 137-143.

[290] 姜振学 , 梁志凯 , 申颖浩 , 等 . 川南泸州地区页岩气甜点地质工程一体化关键要素耦合关系及攻关方向 [J]. 地球科学 , 2023, 48(1): 110-129.
JIANG Zhenxue, LIANG Zhikai, SHEN Yinghao, et al. Coupling key factors of shale gas sweet spot and research direction of geology-engineering integration in southern Sichuan[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 110-129.

[291] 乔辉 , 贾爱林 , 位云生 . 页岩气水平井地质信息解析与三维构造建模 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2018, 40(1): 78-88.
QIAO Hui, JIA Ailin, WEI Yunsheng. Geological information analysis of horizontal wells and 3D modeling of shale gas reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2018, 40(1): 78-88.

[292] 贾爱林 , 郭智 , 郭建林 , 等 . 中国储层地质模型 30 年 [J]. 石油学报 , 2021, 42(11): 1506-1515.
JIA Ailin, GUO Zhi, GUO Jianlin, et al. Research achievements on reservoir geological modeling of China in the past three decades[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1506-1515.

[293] DUONG A N. Rate-decline analysis for fracture-dominated shale reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2011, 14(3): 377-387.

[294] 于荣泽 , 姜巍 , 张晓伟 , 等 . 页岩气藏经验产量递减分析方法研究现状 [J]. 中国石油勘探 , 2018, 23(1): 109-116.
YU Rongze, JIANG Wei, ZHANG Xiaowei, et al. A review of

empirical production decline analysis methods for shale gas reservoir[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 109-116.

[295] 舒志国 , 刘莉 , 梁榜 , 等 . 基于物质平衡原理的页岩气井产能评价方法 [J]. 天然气地球科学 , 2021, 32(2): 262-267.
SHU Zhiguo, LIU Li, LIANG Bang, et al. Study on productivity evaluation method of shale gas well based on material balance principle[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(2): 262-267.

[296] 戴金星 . 油气地质学的若干问题 [J]. 地球科学进展 , 2001, 16(5): 710-718.
DAI Jinxing. Some problems in the study of petroleum geology[J]. Advances in Earth Science, 2001, 16(5): 710-718.

[297] 邹才能 , 杨智 , 王红岩 , 等 .“进源找油”：论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田 [J]. 地质学报 , 2019, 93(7): 1551-1562.
ZOU Caineng, YANG Zhi, WANG Hongyan, et al. "Exploring petroleum inside source kitchen": Jurassic unconventional continental giant shale oil & gas field in Sichuan Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(7): 1551-1562.

[298] 聂海宽 , 张金川 , 金之钧 , 等 . 论海相页岩气富集机理——以四川盆地五峰组—龙马溪组为例 [J/OL]. 地质学报 (2023-12-08)[2023-12-10]. https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023278.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, et al. Enrichment mechanism of marine shale gas: A case study of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China[J/OL]. Acta Geologica Sinica (2023-12-08)[2023-12-10]. https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023278.

[299] 刘可禹 , 刘建良 . 盆地沉积充填演化与含油气系统耦合模拟方法在超深层油气成藏模拟中的应用——以四川盆地中部震旦系灯影组为例 [J]. 石油学报 , 2023, 44(9): 1445-1458.
LIU Keyu, LIU Jianliang. Application of basin modeling method coupling sedimentary filling evolution with petroleum system in simulating ultra-deep oil-gas accumulations: A case study of Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1445-1458.

[300] 聂海宽 , 汪虎 , 何治亮 , 等 . 常压页岩气形成机制、分布规律及勘探前景——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例 [J]. 石油学报 , 2019, 40(2): 131-143.
NIE Haikuan, WANG Hu, HE Zhiliang, et al. Formation mechanism, distribution and exploration prospect of normal pressure shale gas reservoir: A case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2): 131-143.

[301] 蒋恕 , 张天宇 , 郭彤楼 , 等 . 川东南下志留统与 Appalachian 泥盆系典型常压页岩气藏富集特征对比 [J]. 地球科学 , 2023, 48(1): 77-91.
JIANG Shu, ZHANG Tianyu, GUO Tonglou, et al. Comparison of enrichment characteristics of typical normally-pressured shale gas reservoirs in Lower Silurian shale in southeastern Sichuan Basin and Devonian shales in Appalachian Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 77-91.

[302] 何希鹏 , 何贵松 , 高玉巧 , 等 . 常压页岩气勘探开发关键技术进展及攻关方向 [J]. 天然气工业 , 2023, 43(6): 1-14.
HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuqiao, et al. Progress in and research direction of key technologies for normal-pressure shale gas exploration and development[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(6): 1-14.

[303] 梁兴 , 单长安 , 张磊 , 等 . 中国南方复杂构造区多类型源内成储成藏非常规气勘探开发进展及资源潜力 [J]. 石油学报 , 2023, 44(12): 2179-2199.
LIANG Xing, SHAN Chang'an, ZHANG Lei, et al. Exploration and development progresses and resource potentials of multi-type unconventional gas reservoirs characterized by in-source reservoir and accumulation in complex tectonic areas of southern China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2179-2199.

[304] 卢义玉 , 周军平 , 鲜学福 , 等 . 超临界 CO_2 强化页岩气开采及地质封存一体化研究进展与展望 [J]. 天然气工业 , 2021, 41(6): 60-73.
LU Yiyu, ZHOU Junping, XIAN Xuefu, et al. Research progress and prospect of the integrated supercritical CO_2 enhanced shale gas recovery and geological sequestration[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 60-73.

[305] 赵圣贤 , 夏自强 , 郑马嘉 , 等 . 页岩气剩余储量评价及提高储量动用对策——以川南长宁页岩气田五峰组—龙马溪组为例 [J]. 天然气地球科学 , 2023, 34(8): 1401-1411.
ZHAO Shengxian, XIA Ziqiang, ZHENG Majia, et al. Evaluation of the remaining reserves of shale gas and countermeasures to increase the utilization of reserves: Case study of the Wufeng-Longmaxi formations in Changning area, southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(8): 1401-1411.

[306] 李东晖 , 刘光祥 , 聂海宽 , 等 . 焦石坝背斜上部气层开发特征及影响因素 [J]. 地球科学 , 2019, 44(11): 3653-3661.
LI Donghui, LIU Guangxiang, NIE Haikuan, et al. Development characteristics and influencing factors of upper gas reservoir in Jiaoshiba anticline[J]. Earth Science, 2019, 44(11): 3653-3661.

[307] 崔静 . 涪陵气田中部气层井压裂工艺适应性评价 [J]. 中国石油大学胜利学院学报 , 2022, 36(3): 60-65.
CUI Jing. Evaluation of the adaptability of fracturing process in the middle of the gas reservoir in Fuling gas field[J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2022, 36(3): 60-65.

[308] 金之钧 , 张金川 , 唐玄 . 非常规天然气成藏体系 [J]. 天然气工业 , 2021, 41(8): 58-68.
JIN Zhijun, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan. Unconventional natural gas accumulation system[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 58-68.

[309] 张培先 , 聂海宽 , 何希鹏 , 等 . 渝东南地区古生界天然气成藏体系及立体勘探 [J]. 地球科学 , 2023, 48(1): 206-222.
ZHANG Peixian, NIE Haikuan, HE Xipeng, et al. Paleozoic gas accumulation system and stereoscopic exploration in southeastern Chongqing[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 206-222.

[310] 高芸 , 王蓓 , 胡迤丹 , 等 . 2023 年中国天然气发展述评及 2024 年展望 [J]. 天然气工业 , 2024, 44(2): 166-177.
GAO Yun, WANG Bei, HU Yidan, et al. Development of China's natural gas: Review 2023 and outlook 2024[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 166-177.

（修改回稿日期 2024-02-04 编辑 **居维清**）

本文互动