

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.061>



长江经济带页岩气勘探开发进展及建议

庞 飞¹, 张作衡¹, 张君峰², 陈 科², 石砥石², 包书景², 李世臻², 郭天旭²

1. 中国地质调查局, 北京 100037
2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083

摘 要: 页岩气是一种清洁的非常规天然气资源, 已引起全世界各国的广泛关注. 我国页岩气资源丰富, 70% 的资源分布在长江经济带沿线各省市. 在长江上游的重庆涪陵、四川长宁—威远等地区实现了商业开发, 长江中游鄂西地区实现突破, 长江下游安徽宣城取得了积极进展. 页岩气勘查理论和技术标准体系初步形成, 开采装备基本实现国产化. 加快长江经济带页岩气勘查开发对优化能源消费结构、实现绿色发展、保障国家能源安全具有重要意义. 然而, 目前页岩气勘探和开发存在一些问题. 主要体现在: 页岩气资源探明率低, 复杂构造区页岩气富集成藏理论尚需深入研究. 页岩气开发成本高, 一些关键技术装备尚待研发. 市场驱动机制方面, 多元主体共同参与的市场化格局尚未完全形成. 本文从长江经济带页岩气资源状况、勘探开发进展、勘查理论、技术与装备等方面, 分析了中国页岩气发展形势, 梳理了制约我国页岩气勘查开发快速发展的主要问题. 建议加大勘查开发力度, 加强科技创新, 坚持绿色勘查开发, 加大政策扶持力度, 多措并举加快构建长江经济带页岩气勘查开发新格局.

关键词: 页岩气; 长江经济带; 研究和勘探现状; 发展建议; 石油地质.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2020)06-2152-08

收稿日期: 2019-10-14

Progress and Prospect on Exploration and Development of Shale Gas in the Yangtze River Economic Belt

Pang Fei¹, Zhang Zuoheng¹, Zhang Junfeng², Chen Ke², Shi Dishu², Bao Shujing², Li Shizhen², Guo Tianxu²

1. China Geological Survey, Beijing 100037, China
2. Oil and Gas Survey Center of China Geological Survey, Beijing 100083, China

Abstract: Shale gas is a clean and unconventional natural resource and it has attracted widespread attention from all over the world. China's shale gas resources are abundant, and about 70% of the resources are distributed in the regions along the Yangtze River economic belt. In addition, commercial development has been realized in the Fuling area of Chongqing city in the upper Yangtze River, and in the Changning-Weiyuan areas of Sichuan Province. The Middle Yangtze River region (i.e., West Hubei region) has achieved breakthroughs, and the Lower Yangtze River region has made some progress. The corresponding exploration theory and technical system are initially formed, and the mining equipment can be made in China. The development of shale gas can accelerate development of the Yangtze River economic belt and is of great significance for optimizing energy consumption makeup, achieving green development, and ensuring national energy supply. However, there are still some problems with shale gas exploration and development. For instances, the ratio of shale gas resource exploration is low, and the enrichment and accumulation of shale gas in complex geological conditions needs further study. The cost of shale gas exploration and development is high, and key technical equipment has yet to be developed. In terms of the market-driven mechanism, the market-oriented pattern in which multiple entities participate together has not yet fully formed. In this study, it analyzes the development of shale gas in terms of shale gas

基金项目: 公益性地质调查项目(No.1211302108025-3).

作者简介: 庞飞(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事非常规油气调查评价与有利区优选等方面的研究工作. ORCID: 0000-0002-4572-9896.
E-mail: upcpang@sina.com

引用格式: 庞飞, 张作衡, 张君峰, 等, 2020. 长江经济带页岩气勘探开发进展及建议. 地球科学, 45(6): 2152-2159.

resources, exploration and development, theoretical technology, standard systematic technology and equipment of the Yangtze River economic belt. Finally, it points out the main problems that restrict the rapid development of shale gas exploration and development in China, and propose the related suggestions to solve these problems. To build a new pattern of shale gas exploration and development in the Yangtze, it is necessary to increase exploration and development efforts, to strengthen scientific and technological innovation, to underline the green exploration and development, to strengthen policy support and take coordinated measures.

Key words: shale gas; Yangtze River economic belt; research and exploration progress; development proposals; petroleum geology.

页岩气勘探开发始于美国,1821年在阿巴拉契亚盆地实施了第一口页岩气井,1914年获得日产2.83万立方米的高产页岩气流,发现了世界上第一个页岩气田——大桑迪页岩气田(张金川等,2006)。2000年以来,随着水平井钻井及多级分段压裂等技术的创新和应用,美国页岩气产量快速增长,2018年产量达到7 560亿立方米,占全国天然气总产量的六成以上,并有效带动页岩油的勘探开发,有力支撑美国“能源独立”战略的实施(童晓光等,2018)。美国页岩气勘探开发的巨大成功引起了世界各国的高度关注,在世界范围内掀起了页岩气研究、勘探的热潮。2004年,我国开始研究页岩气资源条件和资源潜力评价。2013年1月,重庆涪陵焦页1HF井正式投产,是中国第一口实现商业开发的页岩气井。2014年3月,中国石化正式宣布涪陵页岩气田进入商业开发阶段,中国成为北美之外第一个实现页岩气规模开发的国家(王志刚,2019)。至2019年底,全国累计探明页岩气地质储量超1.9万亿立方米,2019年页岩气产量超150亿立方米。页岩气勘探开发理论、工程技术、标准体系基本建立,开采装备基本实现国产化(谢军,2017;邹才能等,2017;马新华和谢军,2018;杜玉昆等,2019;赵群等,2019)。但实现页岩气快速发展,缓解我国天然气对外依存度快速攀升的局面,必须在勘查开发力度、理论科技装备创新、管理体制机制等方面有所突破。本文在对长江经济带页岩气勘探开发实地调研、分析研究基础上,梳理了我国页岩气勘探开发形势和制约页岩气勘查开发快速发展的主要问题,提出了针对性建议。

1 长江经济带页岩气资源潜力及勘探开发进展

1.1 资源潜力

据原国土资源部2015年评价结果,我国页岩气

地质资源量122万亿立方米、技术可采资源量22万亿立方米。其中,长江经济带沿线省市页岩气地质资源量92万亿立方米、技术可采资源量17万亿立方米(不含上海市),分别占全国75%、77%。位于中上游的四川盆地及周缘为主要页岩气富集区,页岩气地质资源量66.62万亿方,可采资源量12.31万亿方,分别占长江经济带的72.56%、72.97%(图1)。

1.2 勘查开发进展

截止2019年底,全国共设置页岩气探矿权45个,面积10万平方千米。累计投资约900亿元,完成钻井1 500余口,其中水平井1 200口,完成二维地震2.5万千米,三维地震9 500平方千米。

1.2.1 长江上游四川盆地及周缘已实现商业开发

2009年以来,分别在重庆涪陵、四川长宁—威远、云南昭通等地区实现页岩气勘探重大突破(Wu *et al.*, 2016; Yi *et al.*, 2019; Zou *et al.*, 2019)。至2019年底,长江经济带累计探明页岩气地质储量19 112亿立方米,技术可采储量4 333.8亿立方米。2019年生产页岩气超153.75亿立方米,同比增长41.3%。其中,重庆涪陵页岩气田累计探明地质储量6 008亿立方米,已建成100亿立方米的年生产能力,成为北美之外最大的页岩气田(马新华和谢军,2018;王琳等,2018),四川威荣区块累计探明地质储量1 247亿立方米。据中国石油(中国石油新闻中心,2019)最新勘探成果,2019年在四川长宁—威远和太阳区块新发现2个页岩气田,新增探明地质储量7 409亿立方米,中国石油页岩气开发区累计探明地质储量10 610亿立方米,已建成95亿立方米的年生产能力。此外,四川盆地外围页岩气调查取得重大突破,贵州遵义安场向斜安页1井获得高产气流,有力带动盆地外围复杂构造区页岩气的勘查开发(聂海宽等,2012;韩双彪等,2013;翟刚毅等,2016,2017),并首次通过公开拍卖的方式将区块出让进入商业勘探开发阶段,为长江上游页岩气勘查开发提供了接替新区。据贵州省页岩气产业发展规划,到2022

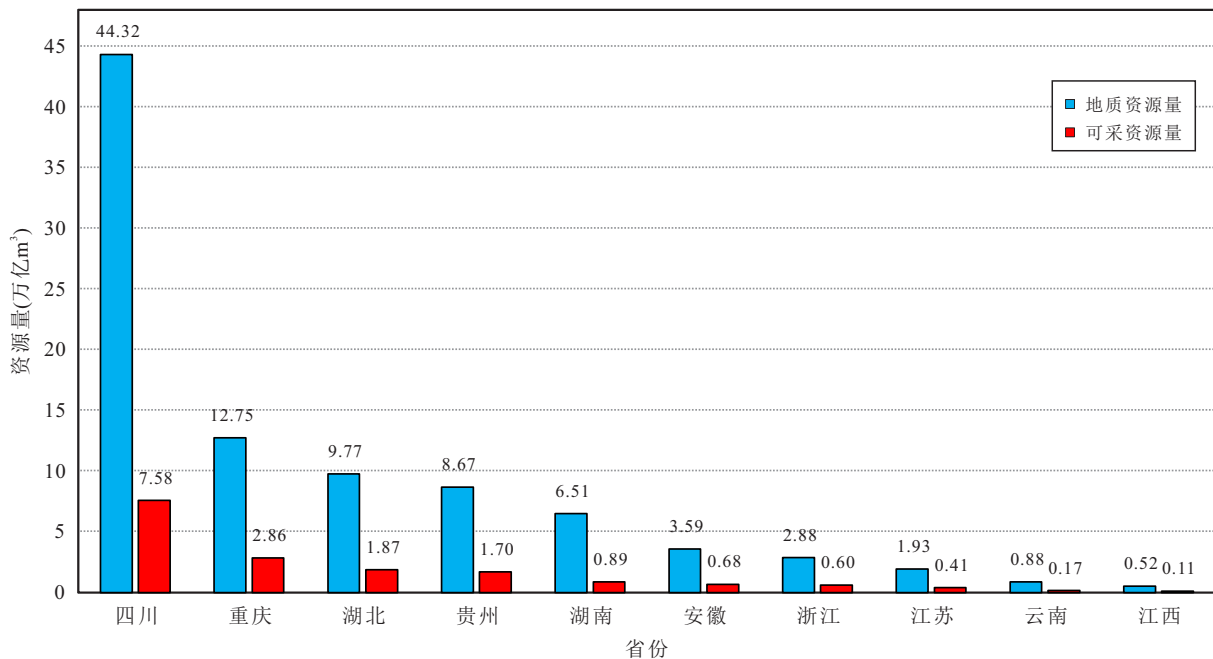


图1 长江经济带各省市页岩气资源潜力分布(不含上海市)

Fig.1 Distribution of shale gas resources potential in various provinces and cities in the Yangtze River economic belt

年遵义正安—习水地区页岩气探明储量力争达100亿立方米,到2025年达500亿立方米。

1.2.2 长江中游鄂西地区实现突破,有望建成新的页岩气资源基地 鄂西地区在震旦系、寒武系、志留系三个地质层系均获高产页岩气流。其中,在震旦系陡山沱组获产量5.53万立方米/日气流,是迄今全球最古老页岩气藏,为中国页岩气勘查向深部进军提供了一套新的层系(李浩涵等,2019)。寒武系牛蹄塘组获产量7.83万立方米/日气流,是四川盆地以外首次在该层系获得工业气流;咸丰地区XD1井也有较好的含气显示(董敏等,2019)。志留系龙马溪组获产量3.15万立方米/日气流,实现了当前中国页岩气主力开发层系由长江上游向中游的拓展。页岩气资源潜力评价显示,鄂西地区页岩气地质资源量达11.68万亿立方米,显示出良好的勘探前景(陈孝红等,2017,2018a,2018b; Bao *et al.*, 2018)。目前,自然资源部、国家能源局等部门和湖北省正在积极推进鄂西地区页岩气勘查开发试验区建设,有望建设成为新的页岩气资源开发基地。

1.2.3 长江下游取得积极进展 长江下游地区富有机质页岩主要为海相和海陆交互相,包括二叠系、志留系—奥陶系和寒武系等多套含气层系(庞飞等,2014;赵文智等,2016)。安徽宣城港地1井获得页岩气、致密气、天然气和页岩油“三气一油”的重要发

现,江西萍乐坳陷曲页1井、宜新地区YXZ01井等获得页岩气良好显示,为长江经济带页岩气上中下游梯次开发奠定了基础。长江下游受多期构造运动、火山活动等影响,页岩气保存条件差,页岩气勘探尚未获得工业气流。

1.2.4 勘查理论和技术标准体系初步形成,开采装备基本实现国产化 与美国稳定的海相沉积地层和相对简单的地质构造相比,我国地质条件较为复杂。面对含气页岩时代老、埋藏深、热演化程度高、构造破坏严重等不利条件,我国科学家从实际出发,创新提出了“三位一体”页岩气成藏理论,建立了简单背斜控藏型、逆断背斜控藏型等5种不同地质条件下页岩气成藏模式,对涪陵等成熟开发区块页岩气的赋存特征和主控因素进行了系统总结,为长江经济带页岩气开发提供了有力指导(翟刚毅等,2017;包书景等,2019;王进等,2019)。科学家们坚持引进消化吸收再创新,系统掌握了页岩气地球物理、钻完井、压裂改造等技术,逐步形成了3500 m以浅(部分地区已超4000 m)水平井钻井及分段压裂能力,自主研发整体移动自走式钻机、世界首台3000型压裂泵车等关键装备,实现了“井工厂”钻井、压裂关键装备和配套工具的国产化,我国成为继美国、加拿大之后第三个系统掌握页岩气勘探开发成套技术的国家(Wang *et al.*, 2018; Wang and Zhan,

2019). 平均单井钻井周期由最初的120天缩短至70天左右,最短46天,水平井单井成本从1亿元下降到5 000万元至7 000万元。

1.2.5 坚持绿色勘查开发,较好实现了保护与开发的辩证统一 采用“井工厂”施工模式,同一钻井平台部署2~8口井批量化钻井作业,单井土地征用面积较常规油气节约30%,施工结束后,及时跟进植被恢复、水土保持和土地复耕等措施,永久土地占用仅占地下资源动用面积的1.5%。勘探开发过程中,加强钻井、压裂施工液体等废弃物的管理,钻井废水经过处理后100%重新利用;含油岩屑无害化处理后含油率低于0.5%,大大优于北美地区含油率2%的标准。建立了政府、社会、企业和第三方机构相结合的“四位一体”监管机制,对气田内大气、地表水、地下水、噪声、土壤等要素环境质量进行全方位监测。

1.3 存在的主要问题

1.3.1 页岩气资源探明率低,仅在四川盆地及周缘一个层系实现商业开发 截止2018年底,长江经济带页岩气探明率仅1.27%,且全部集中在长江上游四川盆地及周缘地区。目前,仅在上游地区上古生界龙马溪组一个层系实现商业开发;中游湖北宜昌在震旦系、寒武系、志留系获页岩气重大突破,尚未形成产能建设;下游获得二叠系页岩油气重要发现,还未取得突破。全面构建长江经济带勘查开发新格局亟需在盆外复杂构造区的多地区、多层系实现页岩油气重大突破。

1.3.2 地质条件复杂,页岩气富集成藏理论有待进一步深化 长江经济带页岩气类型多样,不同类型页岩气生成、赋存条件和富集规律迥异(Jiang *et al.*, 2019)。海相富有机质页岩发育层系老,热演化程度高,构造运动和岩浆活动期次多、改造强,保存条件差异大(Gao *et al.*, 2019)。海陆交互富有机质页岩分布广泛,地层岩相变化快,沉积相类型多,有机质类型复杂,泥页岩常与煤、致密砂岩、灰岩互层,赋存机理复杂(Chen *et al.*, 2019)。中—新生界陆相页岩类型多,演化程度差异大,赋存相态复杂(林腊梅等, 2013; 杨超等, 2013)。这些问题制约了我国页岩气实现新的突破,迫切需要加强不同类型页岩气赋存和富集理论研究。

1.3.3 开发成本高是页岩气发展的主要瓶颈,关键技术装备必须亟待攻关 虽然勘探开采成本在逐年下降,但复杂的地质和地表条件均较复杂(曹明,

2017; Xu *et al.*, 2019),导致勘探难度大、开发成本高等问题,仍高于美国单井4000万元的平均综合成本。当前我国已经掌握3 500 m以浅勘探开发技术,但针对资源较为丰富的深层页岩气(我国3 500 m以深资源量占65%)勘探开发的核心技术和装备仍须抓紧攻关(Zhai *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2019),旋转导向和传感器等卡脖子技术还未取得实质性突破。

1.3.4 多元主体共同参与的市场化格局尚未完全形成 页岩气勘查区块的竞争性出让,使非油气企业参与到页岩气的勘查开发,但目前仍以中石油和中石化为主,两家企业累计投入约280亿元。2012—2013年,原国土资源部进行了两轮共19个区块探矿权的出让,中标企业累计投入约50亿元,除中石化南川区块进入开发阶段,其他区块主要还是单井的气流,尚未实现规模性开发。

2 长江经济带页岩气勘探开发的重要意义

2.1 服务国家能源保障

2018年中国的石油对外依存度突破70%,天然气对外依存度超过40%。2019年原油进口量50 572万吨,天然气进口量1 333亿立方米,同比分别增长9.9%、4.6%,对外依存度仍呈持续上升态势。长江经济带页岩气资源具备规模勘查开发利用的有利条件。经过几年努力,若实现年产量500亿立方米将一定程度上遏制天然气对外依存度的快速攀升的局面。若到2030年页岩气年产量达到1 000亿立方米目标,就有望实现页岩气产量占全国天然气总产量三分之一左右,有效提高我国能源保障水平。

2.2 支撑长江经济带能源消费结构优化

长江经济带“缺煤、少油、乏气”,煤炭在能源一次消耗中占比为45.76%,且近一半靠外运补给。而天然气消费约760亿立方米,占比仅4.07%,低于6.4%的全国平均值,远低于24%的世界平均水平(美国31.5%、俄罗斯52.2%),与我国规划提出的2020年达到10%的目标也有较大差距。按照规划目标,“十三五”末长江上游页岩气年产量将达到300亿立方米,随着研究的不断深入、技术的不断进步,页岩气产量有望快速增长,届时长江经济带能源消费结构将得到有效改善。

2.3 助力长江经济带绿色发展

页岩气本身作为低碳清洁能源,甲烷含量超过

98%，一般不含硫化氢、一氧化碳等有毒物。2019年150亿立方米页岩气的供应消费，相当于替代原煤约2000万吨，减少二氧化碳排放1500余万吨。同时，页岩气的勘查开发还会带动相关产业链条的发展，形成页岩气装备制造、管网建设、运输储备、油气田服务、高端化工等产业集群，促进产业转型升级，推动绿色发展。

3 建议

我国页岩气勘查开发在短时间内实现重大突破并实现商业开发，在理论、技术、装备等方面已跻身世界前列，但与满足国内需求相比还有很大差距。

3.1 加大勘查开发力度，加快构建长江经济带页岩气勘查开发新格局

按照积极拓展上游，加快突破中游，集中攻坚下游的思路，统筹规划推进形成一批页岩气勘查开发示范基地，全面构建长江经济带页岩气勘查开发新格局。上游地区在志留系龙马溪组加快勘查开发和产能建设；加大寒武系、石炭—泥盆系等层系勘探和攻关力度，力争早日形成产能。加强4000 m以深页岩气富集成藏理论攻关。中游地区在已经取得勘查突破的湖北宜昌，可借鉴上游重庆涪陵、川南页岩气勘探开发试验区经验，由自然资源部、发展改革委等国家相关部委和湖北省、油气企业联合建设勘查示范基地，积极推进商业开发进程，推动长江中游页岩气勘探开发和综合利用。下游地区加强基础地质调查，力争在新区新层系取得页岩气调查突破，优选有利勘查区块，为页岩气增储建产提供接替阵地。

3.2 加强科技创新，攻克“卡脖子”的理论、技术和装备难题

长江经济带不同地区、不同深度、不同类型页岩气地质特点和成藏规律不同，对勘查技术、开发对策和设备的要求不同，美国的成熟经验可借鉴但不能完全照搬。针对古生界海相地层构造复杂、有机质热演化程度高，陆相、海陆过渡相地层相变快、粘土含量高等不同特点，急需开展多类型页岩气成藏理论和适应工艺技术研究，集中力量加快研发关键装备，尤其要针对钻井旋转导向、测井设备、钻头等相关装备工具，需集中力量开展技术攻关。

3.3 深化油气体制改革，着力培育多元化市场主体

中央油气企业拥有国内最优质勘查区块，建议尽快制定完善加快页岩气勘探开发中长期规划，加

大投入力度，实现增储上产。同时，建议进一步加快页岩气区块竞争性出让，完善退出机制和盘活区块的有效措施，引入多类投资主体，构建页岩气行业有效竞争的市场结构和市场体系，充分发挥市场对资源的配置作用，尽早形成多元主体全面“开花”的繁荣局面。

3.4 加强政策扶持，激发各类市场主体页岩气勘探开发积极性

加大国家基础性、公益性、战略性调查工作投入，优选优质勘查区块，降低企业风险，在基础理论、技术方法等方面指导非油气企业，提高勘探开发积极性。出台长期稳定的财政补贴政策，改变当前的单一标准，加大深层、常压、新层系等尚未实现突破领域的补贴力度，并根据气价水平、勘探开采成本等影响因素制定一套动态补贴标准体系。为更好调动地方积极性，鼓励支持页岩气勘查开发企业优先满足区域内城乡居民生活用气需求，并在当地注册公司，税收更多留给地方。同时鼓励地方政府出台相关政策，在土地征用、城乡规划、环评安评等方面给予企业支持。

3.5 坚持绿色勘查开发，制定高要求的标准规范

长江经济带页岩气开发要坚决贯彻落实生态优先，绿色发展要求，高度重视页岩气开采可能产生的环境风险。在区块划定、地表地下水监测、微地震监测等方面制定和完善相关的技术标准 and 法律规范。探索建立统一协调的环境监测监管和协调机制，做好企业生产和各分级监管机构之间的协调工作，加强页岩气开发的环境影响监测，确保页岩气勘探开发绿色安全有序发展。

致谢：本文撰写过程中，得到了全国政协、自然资源部、中国地质调查局、中国石油、中国石化等单位领导专家的大力支持和悉心指导。调研过程中，得到了安徽省、湖北省、重庆市、贵州省、四川省等省市自然资源主管部门的大力支持，在此一并致以诚挚的感谢。

References

- Bao, S. J., Li, S. Z., Xu, X. Y., et al., 2019. Progresses and Achievements of the National Oil and Gas Resource Strategic Constituency Survey Project. *Geological Survey of China*, 6(2): 1–17(in Chinese with English abstract).
- Bao, S. J., Zhai, G. Y., Zhou, Z., et al., 2018. The Evolution of the Huangling Uplift and Its Control on the Accumula-

- tion and Preservation of Shale Gas. *China Geology*, 1(3): 345–353. <https://doi.org/10.31035/cg2018052>
- Cao, M., 2017. The Development of Fracturing and Gas Testing Technology in Shale Gas Resources. *China Mining Magazine*, 26(Suppl. 2): 359–362 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L., Jiang, Z. X., Liu, Q. X., et al., 2019. Mechanism of Shale Gas Occurrence: Insights from Comparative Study on Pore Structures of Marine and Lacustrine Shales. *Marine and Petroleum Geology*, 104: 200–216.
- Chen, X. H., Wang, C. S., Liu, A., et al., 2017. The Discovery of the Shale Gas in the Cambrian Shuijingtuo Formation of Yichang Area, Hubei Province. *Geology in China*, 44(1): 188–189 (in Chinese).
- Chen, X. H., Wei, K., Zhang, B. M., et al., 2018a. Main Geological Factors Controlling Shale Gas Reservoir in the Cambrian Shuijingtuo Formation in Yichang of Hubei Province as Well as Its and Enrichment Patterns. *Geology in China*, 45(2): 207–226 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. H., Zhang, B. M., Zhang, G. T., et al., 2018b. High Shale Gas Industry Flow Obtained from the Ordovician Wufeng Formation and the Silurian Longmaxi Formation of Yichang Area, Hubei Province. *Geology in China*, 45(1): 199–200 (in Chinese).
- China Petroleum News Center, 2019. PetroChina Wins Two Major Oil and Gas Exploration Results. <http://news.cnpc.com.cn/system/2019/09/30/001746771.shtml>. 2019-09-30 (in Chinese).
- Dong, M., Zhang, L. Y., Wang, Z. X., et al., 2019. Accumulation Characteristics and Preservation Conditions of Niutitang Formation of Lower Cambrian Series Shale Gas in West Hubei: A Case Study of Well XD1. *Earth Science*, 44(11): 3616–3627 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y. K., Pang, F., Chen, K., et al., 2019. Experiment of Breaking Shale Using Supercritical Carbon Dioxide Jet. *Earth Science*, 44(11): 3749–3756 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J., Zhang, J. K., He, S., et al., 2019. Overpressure Generation and Evolution in Lower Paleozoic Gas Shales of the Jiaoshiba Region, China: Implications for Shale Gas Accumulation. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 844–859. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.032>
- Han, S. B., Zhang, J. C., Li, Y. X., et al., 2013. The Optimum Selecting of Shale Gas Well Location for Geological Investigation in Niutitang Formation in Lower Cambrian, Northern Guizhou Area. *Natural Gas Geoscience*, 24(1): 182–187 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, T., Jin, Z. J., Liu, G. X., et al., 2019. Source Analysis of Siliceous Minerals and Uranium in Early Cambrian Shales, South China: Significance for Shale Gas Exploration. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.11.002>
- Li, H. H., Chen, K., Bao, S. J., et al., 2019. Evaluation of Shale Gas Resources of the Sinian Doushantuo Formation in the Southern Huangling Anticline, Western Hubei Province. *Petroleum Geology and Experiment*, 41(1): 31–37 (in Chinese with English abstract).
- Lin, L. M., Zhang, J. C., Tang, X., et al., 2013. Conditions of Continental Shale Gas Accumulation in China. *Natural Gas Industry*, 33(1): 35–40 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. H., Xie, J., 2018. The Progress and Prospects of Shale Gas Exploration and Exploitation in Southern Sichuan Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 161–169 (in Chinese with English abstract).
- Nie, H. K., Bao, S. J., Gao, B., et al., 2012. A Study of Shale Gas Preservation Conditions for the Lower Paleozoic in Sichuan Basin and Its Periphery. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 280–294 (in Chinese with English abstract).
- Pang, F., Bao, S. J., Ren, S. M., et al., 2014. Shale Gas Accumulation Conditions and Favorable Areas of the Lower Cambrian in Xiuwu Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 38(5): 23–30 (in Chinese with English abstract).
- Tong, X. G., Zhang, G. Y., Wang, Z. M., et al., 2018. Distribution and Potential of Global Oil and Gas Resources. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 727–736 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Bao, H. Y., Lu, Y. Q., et al., 2019. Quantitative Characterization and Main Controlling Factors of Shale Gas Occurrence in Jiaoshiba Area, Fuling. *Earth Science*, 44(3): 1001–1011 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. L., Liu, M. M., Bentley, Y., et al., 2018. Water Use for Shale Gas Extraction in the Sichuan Basin, China. *Journal of Environmental Management*, 226: 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.031>
- Wang, L., Liu, C., Zhang, J. C., et al., 2018. Exploration Situation and Outlook of Shale Gas in Southeast Chongqing. *Resources & Industries*, 20(5): 46–52 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhan, L. N., 2019. Assessing the Sustainability of the Shale Gas Industry By Combining DPSIRM Model and RAGA-PP Techniques: An Empirical Analysis of Sichuan and Chongqing, China. *Energy*, 176: 353–364.
- Wang, Z. G., 2019. Reservoir Formation Conditions and Key Efficient Exploration and Development Technologies for

- Marine Shale Gasfields in Fuling Area, South China. *Acta Petrolei Sinica*, 40(3):370—382(in Chinese with English abstract).
- Wei, D., Liu, H. Y., Shi, K., 2019. What are the Key Barriers for the Further Development of Shale Gas in China? A Grey-DEMATEL Approach. *Energy Reports*, 5: 298—304. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.02.010>
- Wu, L. Y., Hu, D. F., Lu, Y. C., et al., 2016. Advantageous Shale Lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling Gas Field of Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43:208—217.
- Xie, J., 2017. Rapid Shale Gas Development Accelerated by the Progress in Key Technologies: A Case Study of the Changning-Weiyuan National Shale Gas Demonstration Zone. *Natural Gas Industry*, 37(12): 1—10(in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Zhou, W., Zhang, R., et al., 2019. Characterizations of Pore, Mineral and Petrographic Properties of Marine Shale Using Multiple Techniques and Their Implications on Gas Storage Capability for Sichuan Longmaxi Gas Shale Field in China. *Fuel*, 241:360—371.
- Yang, C., Zhang, J. C., Tang, X., 2013. Microscopic Pore Types and Its Impact on the Storage and Permeability of Continental Shale Gas, Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 20(4):240—250(in Chinese with English abstract).
- Yi, J. Z., Bao, H. Y., Zheng, A. W., et al., 2019. Main Factors Controlling Marine Shale Gas Enrichment and High-yield Wells in South China: A Case Study of the Fuling Shale Gas Field. *Marine and Petroleum Geology*, 103: 114—125. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.024>
- Zhai, G. Y., Bao, S. J., Pang, F., et al., 2016. Breakthrough of the Natural Gas of Paleozoic Marine Strata in Wuling Mountain Complex Tectonic Zone. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(6):657—662(in Chinese with English abstract).
- Zhai, G. Y., Bao, S. J., Pang, F., et al., 2017. Reservoir-Forming Pattern of “Four-Storey” Hydrocarbon Accumulation in Anchang Syncline of Northern Guizhou Province. *Geology in China*, 44(1): 1—12(in Chinese with English abstract).
- Zhai, G. Y., Wang, Y. F., Zhou, Z., et al., 2018. Exploration and Research Progress of Shale Gas in China. *China Geology*, 1(2): 257—272. <https://doi.org/10.31035/cg2018024>
- Zhang, J. C., Xue, H., Bian, C. R., et al., 2006. Remarks on Unconventional Gas Exploration in China. *Natural Gas Industry*, 26(12):53—56(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Q., Jiang, X. C., Yang, S., et al., 2019. Impact of Fiscal and Taxation Support Policy on Chinese Shale Gas Industrial Development. *Sino-Global Energy*, 24(3):27—33 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. Z., Li, J. Z., Yang, T., et al., 2016. Geological Difference and Its Significance of Marine Shale Gases in South China. *Petroleum Exploration and Development*, 43 (4): 499—510(in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhao, Q., Dong, D. Z., et al., 2017. Geological Characteristics, Main Challenges and Future Prospect of Shale Gas. *Natural Gas Geoscience*, 28(12): 1781—1796 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhu, R. K., Chen, Z. Q., et al., 2019. Organic-Matter-Rich Shales of China. *Earth-Science Reviews*, 189:51—78.

附中文参考文献

- 包书景,李世臻,徐兴友,等,2019.全国油气资源战略选区调查工程进展与成果.中国地质调查,6(2):1—17.
- 曹明,2017.页岩气压裂试气工程技术进展.中国矿业,26(增刊2):359—362.
- 陈孝红,王传尚,刘安,等,2017.湖北宜昌地区寒武系水井沱组探获页岩气.中国地质,44(1):188—189.
- 陈孝红,危凯,张保民,等,2018a.湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式.中国地质,45(2): 207—226.
- 陈孝红,张保民,张国涛,等,2018b.湖北宜昌地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组获页岩气高产工业气流.中国地质,45(1):199—200.
- 董敏,张林炎,王宗秀,等,2019.鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏及保存条件分析:以XD1井为例.地球科学,44(11):3616—3627.
- 杜玉昆,庞飞,陈科,等,2019.超临界二氧化碳喷射破碎页岩试验.地球科学,44(11):3749—3756.
- 韩双彪,张金川,李玉喜,等,2013.黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩气地质调查井位优选.天然气地球科学,24(1): 182—187.
- 李浩涵,陈科,包书景,等,2019.鄂西黄陵背斜南翼震旦系陡山沱组有利目标区页岩气资源潜力评价.石油实验地质,41(1):31—37.
- 林腊梅,张金川,唐玄,等,2013.中国陆相页岩气的形成条件.天然气工业,33(1):35—40.
- 马新华,谢军,2018.川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景.石油勘探与开发,45(1):161—169.
- 聂海宽,包书景,高波,等,2012.四川盆地及其周缘上古生界页岩气保存条件研究.地学前缘,19(3):280—294.
- 庞飞,包书景,任收麦,等,2014.修武盆地下寒武统页岩气富集条件及有利区预测.东北石油大学学报,38(5): 23—30.

- 童晓光,张光亚,王兆明,等,2018.全球油气资源潜力与分布.石油勘探与开发,45(4):727-736.
- 王进,包汉勇,陆亚秋,等,2019.涪陵焦石坝地区页岩气赋存特征定量表征及其主控因素.地球科学,44(3):1001-1011.
- 王琳,刘冲,张金川,等,2018.渝东南地区页岩气勘探开发现状及下一步勘探方向思考.资源与产业,20(5):46-52.
- 王志刚,2019.涪陵大型海相页岩气田成藏条件及高效勘探开发关键技术.石油学报,40(3):370-382.
- 谢军,2017.关键技术进步促进页岩气产业快速发展——以长宁-威远国家级页岩气示范区为例.天然气工业,37(12):1-10.
- 杨超,张金川,唐玄,2013.鄂尔多斯盆地陆相页岩微观孔隙类型及对页岩气储渗的影响.地学前缘,20(4):240-250.
- 翟刚毅,包书景,庞飞,等,2016.武陵山复杂构造区古生界海相油气实现重大突破.地球学报,37(6):657-662.
- 翟刚毅,包书景,庞飞,等,2017.贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究.中国地质,44(1):1-12.
- 张金川,薛会,卞昌蓉,等,2006.中国非常规天然气勘探建议.天然气工业,26(12):53-56.
- 赵群,姜馨淳,杨慎,等,2019.中国页岩气资源财税扶持政策对产业发展的影响.中外能源,24(3):27-33.
- 赵文智,李建忠,杨涛,等,2016.中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义.石油勘探与开发,43(4):499-510.
- 中国石油新闻中心,2019.中国石油喜获两项重大油气勘探成果. <http://news.cnpc.com.cn/system/2019/09/30/001746771.shtml>.2019-09-30.
- 邹才能,赵群,董大忠,等,2017.页岩气基本特征、主要挑战与未来前景.天然气地球科学,28(12):1781-1796.