

中国页岩气勘探开发现状、潜力与发展建议

包书景^{1,2},葛明娜^{1,3},赵培荣⁴,郭天旭¹,高波⁴,李世臻¹,张嘉琪⁴,林拓¹,苑坤¹,李飞¹

[1. 中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100083;2. 中国石油大学(北京),北京 102249;3. 中国地质大学(北京),北京 100083;4. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083]

摘要:中国页岩气主要分布于四川盆地及其周缘地区、中扬子地块、塔里木盆地、桂中坳陷和鄂尔多斯盆地等区域,地质理论创新和工程技术突破推进中国页岩气产业快速发展。不断拓展页岩气勘探开发领域,实现页岩气产业的跨越式发展,对于有效缓解中国油气供需矛盾具有重要作用。研究表明:①截至2023年底,页岩气累计探明地质储量 $2.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$,约占中国天然气总探明地质储量的15%,年产量约 $250 \times 10^8 \text{ m}^3$,占中国天然气产量的13%,全部来自四川盆地及其周缘的五峰组-龙马溪组。②四川盆地及其周缘中、浅层海相页岩气是稳产、增产的主力军,目前页岩气勘探开发集中在四川盆地深层-超深层新领域、四川盆地外复杂构造区常压海相新区、寒武系和二叠系等新层系以及陆相和海-陆过渡相等新类型。③预测2035年页岩气年产量将达到 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占中国天然气产量的1/3。④建议加大国内页岩气勘探开发力度,丰富和发展多类型页岩气成藏地质理论并持续攻关配套关键技术,大力促进页岩气增储上产。⑤中国页岩气地质资源量为 $118.67 \times 10^{12} \text{ m}^3$,具有巨大的勘探和开发潜力。

关键词:产量;地质储量;地质资源量;地质特征;理论和技术;发展前景;页岩气

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Status-quo, potential, and recommendations on shale gas exploration and exploitation in China

BAO Shujing^{1,2}, GE Mingna^{1,3}, ZHAO Peirong⁴, GUO Tianxu¹, GAO Bo⁴, LI Shizhen¹, ZHANG Jiaqi⁴, LIN Tuo¹, YUAN Kun¹, LI Fei¹

[1. Oil and Gas Resources Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China]

Abstract: China's shale gas resources are mainly distributed in the Sichuan Basin and its periphery, middle Yangtze Block, Tarim Basin, Guizhong Depression, and the Ordos Basin. Innovations in geological theories and breakthroughs in engineering technologies have propelled the rapid development of China's shale gas industry. To effectively alleviate the supply-demand imbalance of oil and gas in China, it is crucial to keep expanding the shale gas exploration and exploitation fields to achieve a leap forward in the shale gas industry. The results of this study indicate that by the end of 2023, China had achieved cumulative proven geological reserves of shale gas of $2.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$ and an annual shale gas output of around $250 \times 10^8 \text{ m}^3$, which, all originating from the Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin and its periphery, account for about 15 % and 13 % of the country's total proven geological reserves and annual output of natural gas, respectively. The shallow to moderately deep marine strata in the Sichuan Basin and its periphery are recognized as the major contributor to the stable production and further reserve growth of shale gas. Currently, China is expanding shale gas exploration and exploitation into new areas, including deep to ultradeep strata in the Sichuan Basin, normal-pressure marine facies in structurally complex regions outside the basin, the Cambrian and Permian sequences, and new-type reservoirs like those of the continental and marine-continental transitional facies. It is predicted that by 2035, the annual shale gas output will reach up to $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, representing about one-third of China's total annual

收稿日期:2024-12-02;修回日期:2025-02-16。

第一作者简介:包书景(1964—),男,教授,油气地质。E-mail:415530248@qq.com。

通信作者简介:葛明娜(1988—),女,高级工程师,非常规油气地质。E-mail:610144368@qq.com。

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20221852);国家自然科学基金项目(42130803)。

production of natural gas. It is recommended to intensify domestic shale gas exploration and exploitation, and enrich the development of multi-type shale gas reservoir geological theories and supporting key technologies, which are expected to significantly drive the additions to reserves from reserve growth of shale gas. China's geological resources of shale gas are estimated at $118.67 \times 10^{12} \text{ m}^3$, holding enormous potential for further exploration and exploitation.

Key words: production, geological reserves, geological resources, geological characteristics, theory and technology, development prospect, shale gas

引用格式:包书景,葛明娜,赵培荣,等. 中国页岩气勘探开发现状、潜力与发展建议[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 348–364. DOI: 10. 11743/ogg20250202.

BAO Shujing, GE Mingna, ZHAO Peirong, et al. Status-quo, potential, and recommendations on shale gas exploration and exploitation in China [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 348–364. DOI: 10. 11743/ogg20250202.

页岩气是指主要以吸附态和游离态赋存在富有机质页岩层系中的天然气,属于非常规油气资源^[1]。全球页岩气地质资源量 $1\ 014 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[2],主要分布在美国、中国、阿根廷和南非。自20世纪70年代以来,美国通过创新页岩气富集理论、攻关水平井与分段压裂技术,并出台相关激励扶持政策,掀起了一场“页岩气革命”^[3–5],一跃成为全球最大天然气生产国,实现了能源独立。中国页岩气资源丰富,类型多样^[6–8],页岩气产业起步较晚但发展较快^[9],具有中国地质特征的南海相页岩气地质理论和中、浅层页岩气勘探开发技术体系已形成,2023年页岩气年产量达 $250 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在百年未有之大变局复杂演变和能源绿色低碳转型的背景下^[10],加大中国页岩气勘探开发力度,丰富和发展多类型页岩气勘探开发理论和关键技术,不断拓展页岩气勘探新领域,实现页岩气产业的跨越式发展,对于保障国家能源安全、优化能源结构具有重要意义。

1 中国页岩气产业发展历程与现状

中国页岩气的发展经历了学习借鉴与研究探索阶段(2003—2008年)、选区评价与勘探验证阶段(2009—2012年)和产能建设及规模开发阶段(2013年至今)(图1)。

1.1 学习借鉴与研究探索阶段

该阶段主要是调研学习北美页岩气勘探开发经验^[11–12],开启了中国页岩气地质理论研究。2003年,中国地质大学(北京)开展中美页岩气地质对比分析,明确了中国页岩气富集特点和分布规律,初步估算了页岩气资源潜力^[13–17];2006年,中国石化完成了中国页岩气早期资源潜力分析报告,初步展示了中国页岩气资源的发展前景^[18];2008年,中国石油在川南地区实施了首口页岩气地质资料井——长芯1井,获得了下志

留统龙马溪组页岩一手地质资料和参数^[19]。

1.2 选区评价与勘探验证阶段

2008年,开展南方地区页岩气地质条件研究和选区评价,在贵州黄平部署实施黄页1井,在寒武系九门冲组钻获页岩气流。2009年,开展中国重点地区页岩气资源潜力及有利区带优选研究^[20],设置了川渝黔鄂页岩气资源战略调查先导试验区;2010年,四川威远威201井在五峰组—龙马溪组直井压裂测试最高日产气 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[21–23];2011年,将页岩气设立为新矿种,先后进行了两轮页岩气探矿权招标;2012年,发布《页岩气发展规划(2011—2015)》,并出台了页岩气开发补贴政策,启动了“延长石油延安国家级陆相页岩气示范区”建设;川南页岩气获得重大突破^[24],宁201-H1井压裂测试获得日产 $15.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产气流,成为中国首口具有商业价值的页岩气井^[25];同年,重庆涪陵焦页1HF井在五峰组—龙马溪组压裂测试获日产 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产页岩气流,取得海相页岩油气勘探重大突破^[26],发现了中国首个页岩气田。涪陵地区陆相页岩气取得重大进展,兴隆101井和福石1井等在侏罗系自流井组获得日产超 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的工业气流^[27–28]。

1.3 产能建设及规模开发阶段

涪陵、威远—长宁和昭通3个国家级海相页岩气示范区先后获批成立,发现并探明了重庆涪陵、四川威远、四川长宁和云南昭通页岩气田,2014年在涪陵页岩气田首次提交页岩气地质储量 $1\ 067.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[29];随之加大五峰组—龙马溪组深层—超深层、盆外常压页岩气勘探开发力度^[30–31],陆续发现了威荣、泸州、太阳、綦江和正安等页岩气田^[32–35];与此同时,通过加强新区、新层系和新类型页岩气探索,在鄂西及川中寒武系—震旦系^[36–37]、黔西南坳陷石炭系^[38–39]、川东北二叠系和侏罗系(陆相)^[40–42]、鄂尔多斯盆地三叠系(陆相)^[43–44]和石

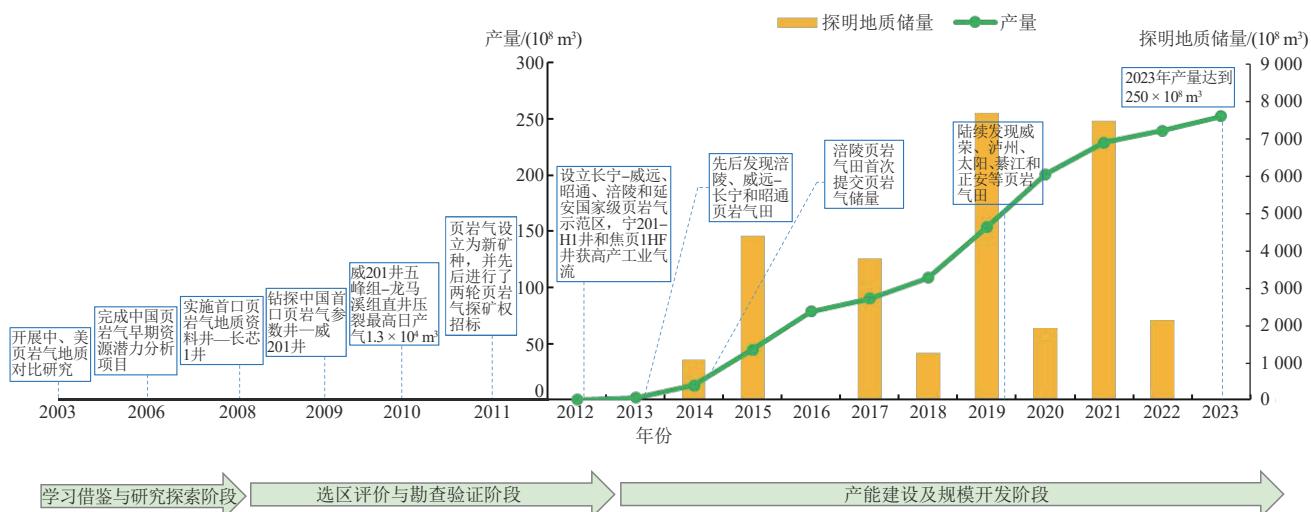


图1 中国页岩气勘探开发历程

Fig. 1 History of shale gas exploration and exploitation in China

炭系—二叠系(海—陆过渡相)^[45]以及松辽盆地白垩系(陆相)^[46]取得发现突破,页岩气勘探领域不断拓展。

2 中国页岩气勘探开发现状

2.1 页岩气储量

截止2023年底,中国累计探明页岩气地质储量为 $2.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$,累计探明技术可采储量为 $6\,765 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要来自四川盆地及其周缘的涪陵、长宁、威远、泸州、太阳、綦江和威荣页岩气田。近10年,页岩气探明储量增长幅度波动较大。其中,2018年中国页岩气累计探明地质储量首次超过 10^{12} m^3 ^[47],2019年和2021年新增储量较多,2019年新增探明地质储量 $7\,644 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[48],增量主要来自四川盆地长宁、威远和太阳气田;2021年新增探明地质储量 $7\,454 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[49],增量主要来自四川盆地泸州、太阳和涪陵气田;2022年新增探明地质储量 $2\,131 \times 10^8 \text{ m}^3$,增量主要来自川东南新发现的綦江页岩气田,新增探明地质储量 $1\,459 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图2)。

2.2 页岩气产量

中国页岩气的开发始于四川盆地涪陵页岩气田。2012年11月焦页1HF井在五峰组—龙马溪组压裂测试获得 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流^[26],随后启动了一期 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 页岩气产能建设。近10年来,全国产量呈持续增长趋势。2013年,全国页岩气产量为 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,较2012年增长超7倍^[50];此后,页岩气开发进入快车道,2014年年产量达到 $13 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要产自涪陵、长宁—威远、昭通、富顺—永川和彭水等地区,其中

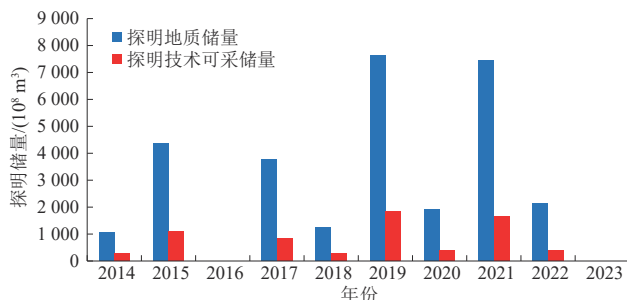


图2 中国页岩气新增探明储量统计

Fig. 2 Annual incremental proven reserves of shale gas in China

涪陵地区占比86%,彭水区块首次提交产量;2018年页岩气产量首次突破 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$,增量主要来自长宁—威远和南川页岩气田,威荣深层页岩气田首次提交产量 $0.53 \times 10^8 \text{ m}^3$;2019—2021年,页岩气产量实现高速增长^[48,51],其中2020年产量突破 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[52],年增长率达30%~41%,增量主要来自长宁—威远页岩气田、昭通黄金坝—紫金坝页岩气田、太阳浅层页岩气田以及威荣和永川深层页岩气田;自2022年产量增长变缓^[53],年增长率在4.30%~4.67%,增量主要来自泸州、涪陵和威荣页岩气田(图3)。

2.3 页岩气勘探开发概况

勘探开发投资的多少与页岩气增储上产关系密切。2022年,中国页岩气勘探开发投资为361.97亿元,其中勘探投资54.94亿元、开发投资307.03亿元。完成了二维地震263 km、三维地震2 140 km²;完钻探井72口、开发井714口。

从历史曲线看,勘探投资整体呈“V”型特点,2013—

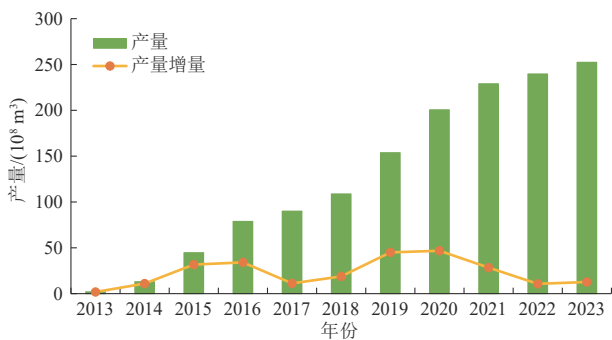


图3 中国页岩气年产量统计

Fig. 3 Annual shale gas output in China

2018年勘探投资保持稳定,2019—2022年呈上升趋势,2022年比2018年增长388%,平均年增长52.59%;随着勘探走向深层和高精度三维地震的应用,2020年以来二维地震工作量快速递减,三维地震快速增长,增幅245%,年实施工作量超2000 km²(图4)。

开发井数是反映页岩气开发状态的重要指标,与开发投资和产量呈正相关关系。2014年涪陵、长宁、昭通及威远页岩气田加大页岩气开发力度,开发井数达345口,2015年页岩气开发主要集中在涪陵和昭通页岩气田,开发井187口,开发投资115亿元,2016—2017年页岩气开发活动有所放缓,产量持续增长。自2018年再次加大页岩气开发力度以来,页岩气年完钻开发井数超280口,尤其是2022年,页岩气完钻开发井数高达714口,进尺321×10⁴ m,年产气量239.7×10⁸ m³,较2017年开发井数增长近6倍(图5)。

2.4 公益性调查评价进展

自2013年以来,中国地质调查局针对南方复杂构造区新区、新层系、新类型和新领域展开调查评价工作,公益性页岩气调查取得了多处发现和突破。

在四川盆地外复杂构造区贵州正安、水城、云南大关实现页岩气调查突破。其中,位于武陵山褶皱带西

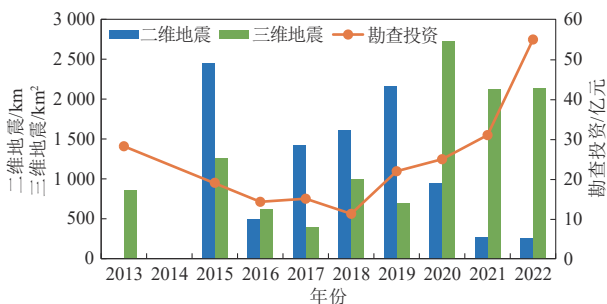


图4 中国页岩气勘探工作量与投资统计

Fig. 4 Annual shale gas exploration activities and investment in China

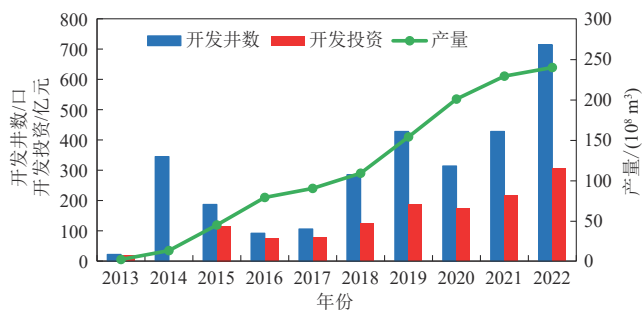


图5 中国页岩气开发工作量与投资统计

Fig. 5 Annual shale gas exploitation activities and investment in China

南端安场向斜安页1井,获得了二叠系栖霞组油气、志留系牛石栏组致密气、五峰组-龙马溪组页岩气和奥陶系宝塔组天然气的“四层楼”式油气发现突破^[54];位于滇东北褶皱带木杆向斜内的云大页1井,在志留系龙马溪组直井压裂测试获得5280 m³/d工业气流,开辟了滇东北页岩气勘探新区,拓展了五峰组-龙马溪组勘探新领域^[55];位于汉南古隆起周缘的镇地1井和陕南页1井,在寒武系牛蹄塘组获得较好的页岩气发现^[56];近期,位于湘鄂西褶皱带利川复向斜东北部的渝巫地1井在二叠系大隆组钻获工业气流,拓展了页岩气勘探新区、新层系^[57]。

鄂西地区震旦系、寒武系和志留系相继实现突破,二叠系页岩气取得重要进展,有望建设100×10⁸ m³产能资源基地^[58-60]。“古隆起控藏”模式指导了黄陵背斜西南缘的鄂阳页1HF井和鄂阳页2HF井在震旦系陡山沱组和寒武系获得页岩工业气流,实现古老地层页岩气发现。黄陵背斜东缘的鄂宜页2HF井,地层压力系数1.39,首次发现四川盆地外志留系超压页岩气藏。近期,位于鄂西建始地区花果坪复向斜鄂建页2井在二叠系大隆组钻遇优质页岩储层,获得了二叠系页岩气重要发现。

在黔南—桂中六盘水地区和柳州地区取得页岩气调查重要进展^[39,61-62]。其中,位于黔西南坳陷北部黔水地1井,在石炭系打屋坝组直井压裂试气获得1.1×10⁴ m³/d页岩气工业气流。位于桂中坳陷柳城斜坡桂融页1井,拓展了页岩气调查新区(垭紫罗裂陷槽)、新层系(上古生界海相)、新类型(钙质页岩与炭质页岩互层型)范围。雪峰山西南缘贵丹地1井、贵都地1井和黄地1井开辟了雪峰隆起西南缘震旦系-寒武系多层系页岩勘探新局面;湘中地区湘新页1井在泥盆系余田桥组、湘新地4井在石炭系陡岭坳组和天鹅坪组以及湘邵地1井在二叠系大隆组和龙潭组获得页岩气强烈显示^[63-65]。

除南方海相页岩气外,中国地质调查局在北方陆

相和海-陆过渡相页岩气调查中也取得了系列进展。其中,松辽盆地南部梨树断陷白垩系和准噶尔盆地南部博格达山前带周缘二叠系均已获得页岩气工业气流^[66]。位于柴达木盆地东部的柴页2井、青德参1井和青德地1井等多口井在石炭系克鲁克组及柴页1井在侏罗系大煤沟组获得页岩气流和显示^[67-68](图6)。

3 中国页岩气地质特征与资源潜力

3.1 含有机质页岩发育类型与层系

根据沉积环境,可将中国富有机质页岩沉积类型

划分为3类:海相、海-陆过渡相和陆相。其中,海相富有机质页岩主要分布在四川盆地及周缘、滇黔桂地区、武陵山地区、中扬子和下扬子地区等南方地区,以及塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和华北地台等北方地区;海-陆过渡相富有机质页岩主要分布在四川盆地、滇东-黔西地区、中扬子地区和下扬子地区等南方地区,以及鄂尔多斯盆地、沁水盆地、南华北盆地和柴达木盆地等北方地区;陆相富有机质页岩主要分布在塔里木盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地和渤海湾盆地等北方地区,以及四川盆地、江汉盆地和苏北盆地等南方地区(图7)。

中国富有机质页岩发育层系多、分布广。自下而上

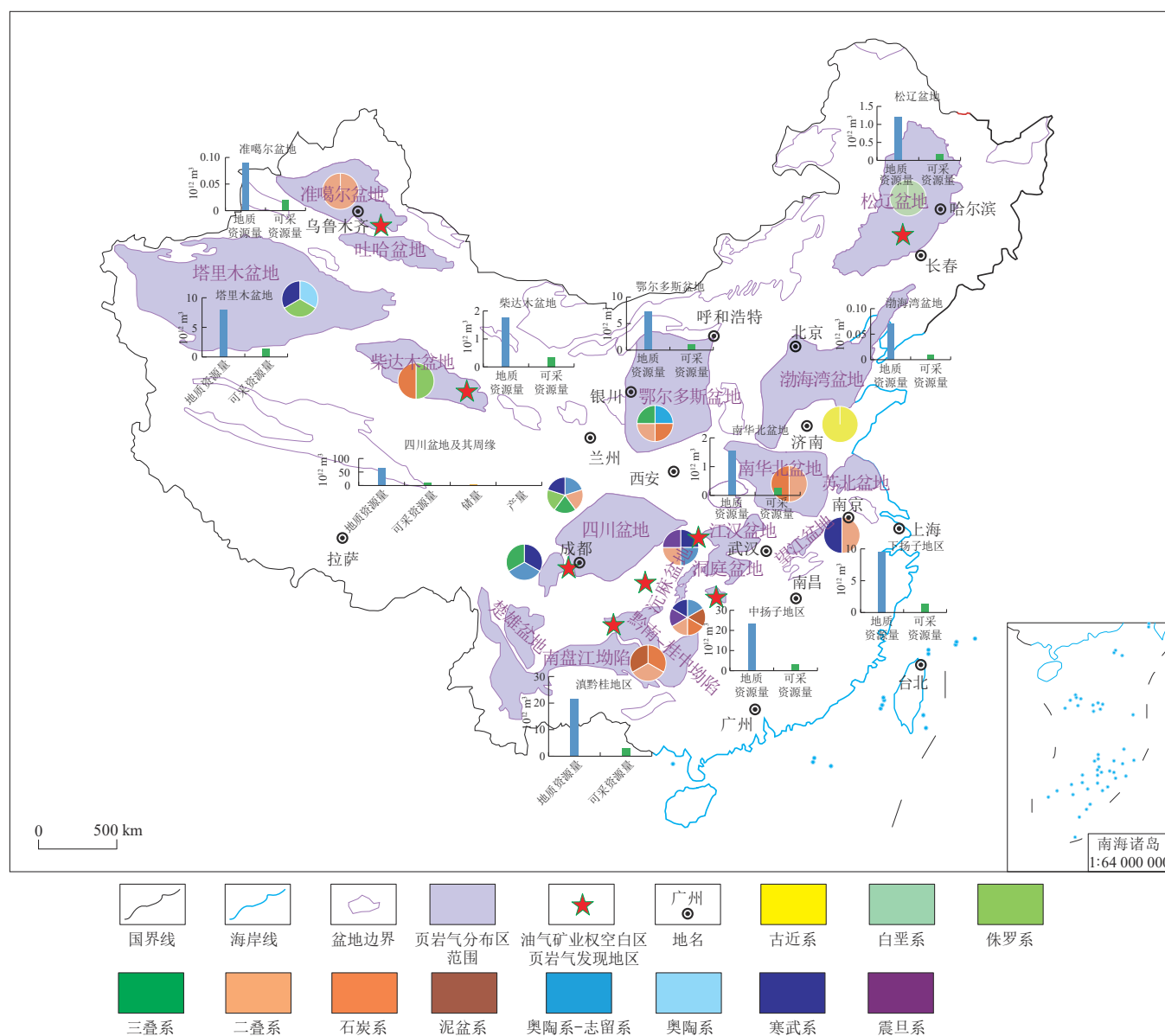


图6 中国主要沉积盆地页岩气层系分布与公益性调查进展

Fig. 6 Distribution map of shale gas-bearing sequences in major sedimentary basins of China and progress in government-funded geological surveys of these sequences

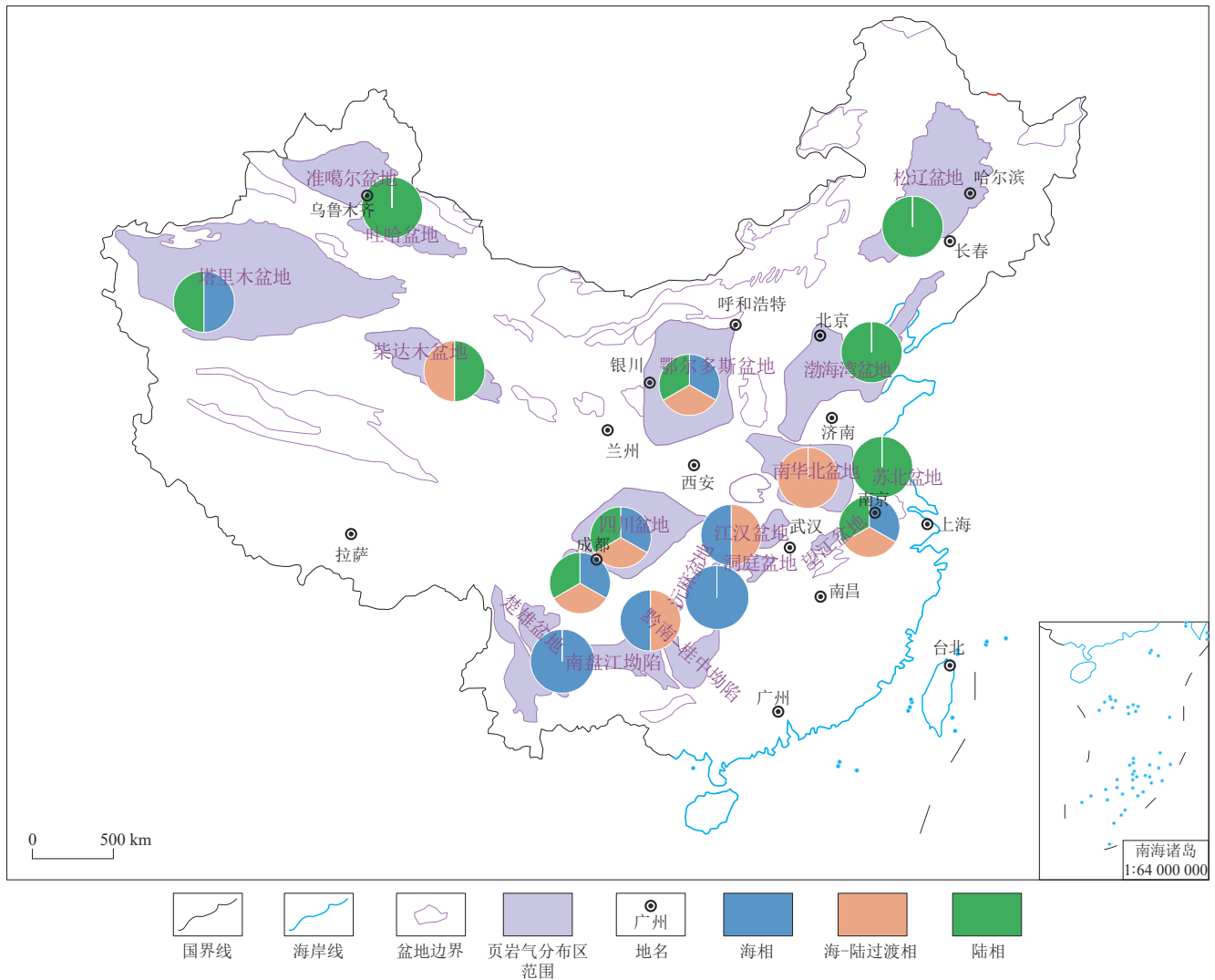


图7 中国主要页岩分布盆地沉积相分布

Fig. 7 Distribution map of sedimentary facies in major shale basins in China

主要发育蓟县系(洪水庄组和下马岭组)、震旦系(陡山沱组)、寒武系(牛蹄塘组、筇竹寺组、水井沱组和玉尔吐斯组)、奥陶系(五峰组和乌拉力克组)、志留系(龙马溪组和高家边组)、泥盆系(塘丁组、罗富组、榴江组和余田桥组)、石炭系(天鹅坪组、鹿寨组、打屋坝组、测水组、本溪组和克鲁克组)、二叠系(大隆组、龙潭组、吴家坪组、孤峰组、梁山组、山西组和太原组)、三叠系(须家河组和延长组)和侏罗系(自流井组和千佛崖组)、白垩系(沙河子组和青山口组)和古近系(沙河街组和核桃园组)等11套层系、36个层组(表1)。其中南方地区发育8套层系、22个层组,北方地区发育9套层系、14个层组(图6)。

3.2 含有机质页岩发育特征

中国页岩厚度分布范围较大,从几十米到几百米均有分布。有机质类型包含Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型。

从沉积类型来看,海相页岩有机质类型主要以Ⅰ型和Ⅱ型为主,海-陆过渡相和陆相页岩有机质类型以Ⅱ型和Ⅲ型为主;从沉积层系来看,元古宇和下古生界页岩有机质类型主要以Ⅰ型和Ⅱ型为主,上古生界页岩有机质类型包含Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型,中生界页岩有机质类型为Ⅱ型和Ⅲ型,新生界有机质类型包含Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型。总有机碳含量(TOC)、热演化程度(镜质体反射率 R_o)、脆性矿物含量和含气量分布范围广,其中 TOC 为1.00%~18.48%, R_o 为0.50%~4.21%,脆性矿物含量为10.20%~91.50%,含气量为0.01~9.60 m³/t,整体上海相页岩数值高于海-陆过渡相和陆相页岩(表1)。

南方地区是中国优质页岩发育的主要地区,下古生界是页岩气富集的主要层位。其中,南方地区震旦系、寒武系、奥陶系-志留系、泥盆系和石炭系主要发育海相页岩,在上扬子地区及滇黔桂地区分布面积大,

表1 中国富有机质页岩发育类型与有利层位

Table 1 Types and favorable intervals of organic-rich shales in China

区域	有利层段		页岩厚度/m	有机质类型	TOC/%	R_o %	脆性矿物含量/%	含气量/(m ³ /t)	沉积环境	主要分布区域
	界	系								
北方地区	新生界	古近系	沙河街组	三段	1.10~5.11	0.50~2.50(1.20)	(49.30)	1.17~4.00(2.47)		渤海湾盆地 ^[69-71]
			核桃园组	三段	2.00~2.98(2.52)	1.00~1.70(1.35)	69.38~73.47	1.55~4.61		南襄盆地 ^[69-71]
	中生界	白垩系	沙河子组	二段(下亚段)	1.00~6.00(2.50)	1.10~1.30	(51.00)	(1.52)	陆相	松辽盆地 ^[46,72-73]
			青山口组	一段、二段	1.00~4.63(2.70)	0.75~1.70	19.86~67.87	1.79~2.57		鄂尔多斯盆地 ^[74]
		三叠系	延长组	7段、9段	(7.90)	0.50~1.20	(57.20)	1.11~2.54(1.81)		准噶尔盆地、吐哈盆地 ^[75]
	古生界	二叠系	芦草沟组	下段	1.00~10.85(3.47)	0.52~1.24(0.69)	44.00~62.00(51.5)	1.11~1.64(1.34)	海-陆过渡相	鄂尔多斯盆地、南华北盆地 ^[73,76-77]
			山西组	2段	1.49~2.58(1.96)	2.63~2.68(2.66)	34.00~68.00(51.00)	0.59~4.05		鄂尔多斯盆地、南华北盆地 ^[78]
		二叠系	太原组	本溪组	1.00~10.75(2.18)	2.60~3.40(3.02)	17.00~53.00(38.00)	(1.32)		柴达木盆地 ^[79]
					1.00~8.50(2.70)	0.50~2.20(1.52)	(14.20)	0.65~2.39(0.98)		塔里木盆地 ^[80]
		石炭系	克鲁克组	1段	1.12~3.08	1.00~2.50(1.50)	47.00~78.00(60.50)	0.01~1.23		华北地台 ^[81]
南方地区	元古宇	奥陶系	乌拉力克组	I, II ₁	1.00~1.52	0.80~3.50	70.00~75.00	0.93~2.21	海相	鄂尔多斯盆地 ^[8]
			玉尔吐斯组	I, II	2.43~18.48(10.10)	1.50~1.80	61.50~91.50	—		塔里木盆地 ^[80]
	中生界	寒武系	洪庄子组、下马岭组	I, II	1.00~3.90(1.80)	1.09~1.14	(66.80)	0.87~6.83(2.52)	陆相	四川盆地 ^[8,82-83]
					II ₁ , II ₂	1.01~2.39(1.42)	1.95~2.09(2.06)	36.50~74.00(51.30)		
		侏罗系	东岳庙段	II ₁ , II ₂ , III	1.00~5.52(0.78)	1.56~2.02(1.79)	(40.50)	0.46~4.82(2.27)		
	元古宇	三叠系	自流井组	II ₂ , III	1.00~1.47(0.89)	1.44~1.83(1.73)	(40.00)	0.78~5.80(4.31)	海-陆过渡相	四川盆地 ^[84] 、滇东—黔西地区 ^[85] 、中扬子地区、下扬子地区
					III	>1.10	>40.00	0.25~7.96(1.09)		
		震旦系	须家河组	III	1.00~5.00	1.92~2.27(2.07)	61.00~77.00(71.00)	(1.28)		
	上古生界	二叠系	龙潭组	II, III	(4.38)	2.60~3.80	(51.70)	3.91~7.27(5.73)	海相	中扬子地区、下扬子地区 ^[86-90]
					(50.60)	(2.29)	55.70~60.40	2.00~3.73		
		二叠系	吴家坪组	II, III	1.48~4.51(2.14)	2.90~3.40	(48.00)	1.75~3.25	海-陆过渡相	湘中坳陷 ^[91]
					1.75~6.39(4.48)	1.23~1.72(1.58)	25.00~65.00(42.40)	1.64~4.29(2.69)		湘中坳陷 ^[92]
		石炭系	梁山组	II, III	1.00~1.90	0.95~4.17(2.22)	>50.00	0.66~3.79(1.46)	海相	黔西南坳陷 ^[93]
下古生界	奥陶系—志留系	志留系	打屋坝组	一段、二段、三段	1.00~2.84	1.48~2.09	65.40~67.80	0.74~5.32	海相	桂中坳陷 ^[94]
					1.00~2.45	1.75~2.57(2.12)	(56.26)	0.66~3.79(1.46)		湘中坳陷 ^[95]
	泥盆系	泥盆系	鹿寨组	II ₁	1.00~10.80(2.39)	1.42~4.57(2.54)	50.50~73.90	0.74~5.32	海相	桂中坳陷 ^[96]
					1.00~2.50	2.00~3.00	>70.00	1.50~3.00		
		泥盆系	余田桥组	I, II ₁	1.00~3.96(1.44)	2.18~2.83(2.56)	>40.00	(0.03)		
	震旦系	震旦系	塘丁组	II	(1.30)	(2.40)	(46.00)	0.08~0.12	海相	扬子板块及其周缘 ^[8,56,58-60]
					1.00~10.63(3.64)	2.23~2.77(2.48)	22.00~89.00(55.91)	0.26~0.38		
		震旦系	榴江组	II	1.80~6.80	1.90~3.30	39.70~72.80	2.00~9.60		
	元古宇	奥陶系—志留系	五峰组—高家边组	I, II	1.40~3.20	1.50~3.06	(47.20)	0.01~0.03	海相	
					1.69~3.57(2.51)	>3.20(4.21)	48.87~88.56(71.58)	0.42~1.93		
		震旦系	陡山沱组	I, II ₁	1.00~6.79(2.25)	2.38~2.87(2.56)	28.50~56.00	0.10~0.60		

注:表中括号内数据为平均值;总有机碳含量(TOC)仅统计大于1.0%范围;“—”代表无数据。

厚度稳定,有机碳含量高,热演化程度高,页岩气显示广泛。二叠系主要发育海-陆交互相富有机质页岩,在四川盆地、滇黔桂、下扬子和南华北等地区最为发育,页岩单层厚度较小,累计厚度大,有机质含量高,热演化程度较高,页岩气显示丰富。中生界陆相富有机质页岩主要发育在四川盆地中,分布广、厚度大、有机碳含量适中、热演化程度适中。

北方地区寒武系和奥陶系海相页岩主要分布在塔里木盆地和鄂尔多斯盆地,其中寒武系主要分布在塔里木盆地东部满加尔凹陷、孔雀河斜坡及古城墟隆起,奥陶系泥页岩主要分布在塔里木盆地东部地区、塔里木盆地西部柯坪—阿瓦提地区以及鄂尔多斯西缘,泥页岩厚度和有机碳含量中等,处于高成熟-过成熟热演化阶段。石炭系和二叠系海-陆过渡相泥页岩主要分布在鄂尔多斯和柴达木盆地,其中鄂尔多斯盆地二叠系泥页岩分布广泛,厚度大,处于成熟-过成熟演化阶段;柴达木盆地泥页岩厚度较大,有机碳含量中等,处于低成熟-成熟演化阶段。二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系及古近系陆相泥页岩主要分布在西北地区准噶尔盆地、吐哈盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、松辽盆地以及渤海湾盆地,分布面积广,有机碳含量高,热演化程度偏低,含气性差异较大(表2)。

总体来说,中国页岩气地质地貌条件复杂,勘探开发难度大。与构造稳定的北美地台相比,中国的扬子板块、华北板块、塔里木板块及众多小板块经历多期强烈的离散作用和拼合作用,地层剥蚀严重,页岩气藏连续性差;褶皱和断裂发育,地层埋深变化大,地质结构复杂,页岩气保存条件相对较差。与美国以克拉通盆地稳定沉积的海相页岩相比,中国海相页岩时代老、热演化程度高;陆相页岩横向变化快、热成熟度低;海-陆过渡相页岩岩性复杂、非均质性强。中国南方山峦叠嶂、沟壑纵横,碳酸盐岩溶发育,地表地貌复杂,给页岩气勘探开发带来困难。

3.3 资源潜力与分布特征

中国页岩气资源潜力大,分布广,类型多。目前,中国页岩气勘探开发主要集中在南方地区,北方地区由于页岩气资源禀赋相对差一些,整体勘探程度较低。“十三五”期间,中国地质调查局依托“南方地区页岩气资源评价”项目,采用概率体积法和类比法对南方地区震旦系—侏罗系8套层系开展了资源计算,划分页岩气评价单元142个,评价面积为 $51.63 \times 10^4 \text{ km}^2$,地质资源量为 $118.67 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是陆域常规天然气的近2倍,技术可采资源量为 $18.00 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

从平面分布来看,页岩气资源主要分布于四川盆地及周缘,地质资源量为 $64.43 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占总资源量的54.29%;其次是中扬子地区,地质资源量为 $23.19 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占总资源量19.54%;滇黔桂地区地质资源量为 $21.53 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占总资源量18.14%,下扬子地区地质资源量为 $9.52 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占总资源量8.02%(图8)。从层系分布来看,自元古宇至中生界发育了8套富有机质页岩层系,其中志留系、二叠系和寒武系页岩气资源占比较高,地质资源量为 $80.17 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $12.76 \times 10^{12} \text{ m}^3$,分别占全部层系的67%和71%,其次依次为侏罗系、三叠系、泥盆系、石炭系和震旦系(图9)。从沉积环境来看,海相页岩气地质资源量为 $76.97 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $12.70 \times 10^{12} \text{ m}^3$,分别占总资源量的65%和71%。海-陆交互相页岩气地质资源量为 $23.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $2.94 \times 10^{12} \text{ m}^3$,分别占总资源量的20%和16%。陆相页岩气地质资源量为 $18.24 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $2.39 \times 10^{12} \text{ m}^3$,分别占总资源量的15%和13%。

北方地区页岩气资源主要分布在塔里木盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、松辽盆地和南襄盆地等盆地,地质资源量约为 $18 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

表2 中国南、北方地区富有机质页岩发育特征对比

Table 2 Comparison of developmental characteristics of organic-rich shales in northern and southern China

分布地区	南方地区	北方地区
主要沉积类型	海相	陆相、海-陆过渡相
主要分布地区	四川盆地及其周缘、滇黔桂地区、中扬子地区、下扬子地区	鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地、松辽盆地、南华北盆地
主要分布层系	奥陶系-志留系、寒武系、二叠系、震旦系、侏罗系、石炭系、泥盆系	三叠系、二叠系、白垩系、石炭系、侏罗系、奥陶系、寒武系
主要地质特点	海相分布面积大,厚度稳定,有机碳含量高,热演化程度高,含气性较好	陆相和海-陆过渡相页岩分布面积广,厚度大,岩性相对复杂,有机碳含量偏低,热演化程度差异较大,含气差异性较大
主要有利区带	四川盆地及其周缘发育富有机质页岩、热演化程度适中、保存条件好的四川盆地外部复杂构造区	有机质丰度高、热演化程度适中、保存条件好的区域

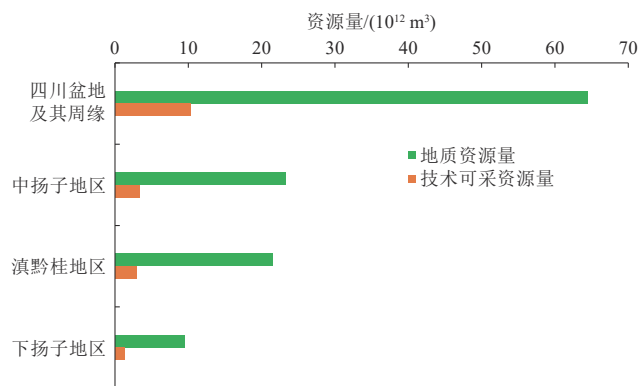


图8 南方地区页岩气远景区不同地区资源分布

Fig. 8 Resource distribution across varying regions with shale gas potential in southern China

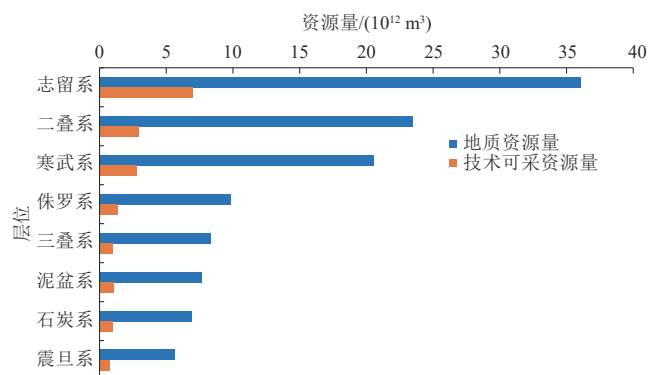


图9 南方地区页岩气远景区不同层系资源分布

Fig. 9 Resource distribution across varying sequences with shale gas potential in southern China

4 页岩气理论与关键技术

通过页岩气地质研究和实践探索,中国在引进、消化和吸收的基础上,创新形成了具有中国地质特点的页岩气富集成藏理论认识,实现了页岩气勘探开发关键技术国产化,建立了复杂地形地貌的页岩气“井工厂”平台开发模式,推动了页岩气产业的快速发展,中国成为北美以外第一个实现页岩气大规模商业化开采的国家,涪陵页岩气田的发现被授予“页岩气国际先锋奖”。

4.1 地质理论

创新形成了海相页岩气“二元”富集成藏理论和选区评价方法,指导实现页岩气发现突破^[97]。针对中国海相页岩形成时代老、热演化程度高、构造活动强烈的地质特点,创新形成“富有机质页岩是物质基础,保存条件是富集关键”的页岩气“二元”成藏富集理论认识,

建立了挤压断背斜型、残余向斜型和古隆起型等成藏模式;开展了复杂构造区页岩气资源评价和选区评价研究,建立了地质-物探-工程一体化评价参数体系和评价方法,评价结果表明南方海相领域页岩气资源潜力大,四川盆地及周缘是页岩气勘探开发有利区。在创新地质理论和评价方法的指导下,发现并探明了涪陵、长宁、威远、太阳、威荣和正安等11个页岩气田,累计探明储量 $2.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

4.2 关键技术

勘探开发工程技术持续迭代升级,促进页岩气提质增效。①页岩气“甜点”识别和预测评价技术不断进步和优化,实现“甜点”纵向连续性定量评价,评价精度提高到90%以上,有效指导了页岩气开发选区选层及产能建设^[98]。②页岩气建模数模一体化和储层精刻画技术攻关取得突破^[99],实现了复杂地质体“量化、可视化”表征以及多尺度天然裂缝准确识别^[100],含气页岩储层和大-中型断裂识别率达89%。③优化形成“三开”井身结构和相应空气钻、清水钻井液和油基钻井液体系^[101],在降低钻井成本的同时,避免了对地下水的污染。④建立水平井组三维立体开发模式,有效提高页岩气田储量动用程度,涪陵页岩气田三层立体开发区采收率提高到44.6%,单井最终可采储量(EUR)提升15%以上^[102]。⑤推进了电网、水网和气网“三网”模式建设和电驱压裂的应用,实现页岩气测试不排空、压裂液回收利用和油驱压裂向电驱压裂的转变,不但降低噪音、减少污染、保护环境,而且减少了用地用水量、缩短了工期、降低了成本,实现了页岩气绿色可持续开发。

关键工程装备研发能力不断增强,自主化水平大幅提升。①旋转导向系统、高性能钻头、全可溶桥塞、趾端滑套等钻井设备工具全面实现国产化,形成CG-STEER、经纬领航及“璇玑”3种旋转导向代表性产品^[103],页岩气“甜点”层段钻遇率达90%以上,水平段“一趟钻”最大进尺达4 225 m。②创新形成了智能钻井专家系统和钻机整体轨道平移装备,实现流程自动化、操控一键化和平移整体化,7 000 m高空同升式钻机可远程起升和整体平移,钻井施工效率极大提升^[104]。③研制生产5 600马力(4 119 kW)油驱压裂车,特别是超大功率全电动数智压裂成套设备的研制成功,以及多井交互式方式的采用,满足了开发井组大规模快速压裂施工需求,占地面积减少30%以上,单日压裂段数达到9段,单井分段压裂段数突破50段。

5 页岩气发展前景与建议

5.1 问题与挑战

中国页岩气勘探开发处于增储上产的关键期,实现跨越式发展仍然面临诸多问题与挑战。①四川盆地志留系中、浅层页岩气已进入开发中、后期,页岩气产量递减快,稳产难度较大。②深层-超深层页岩气是增储上产重点领域,但构造与地应力条件复杂,勘探风险和压裂改造难度大,同时地层温度、压力高,制约页岩气效益开发。③盆外常压页岩气资源分布面积广,但保存条件差、地层压力低、单井产量低,低成本工程技术和产量提高是效益开发关键。④新区、新层系页岩气实现了调查勘探突破,但页岩气富集机理与分布规律研究薄弱,富有机质页岩类型复杂,需要加强地质特征研究和配套技术攻关。⑤海-陆过渡相页岩气总体处于勘探评价阶段,鄂尔多斯盆地、南华北盆地、沁水盆地及南方地区的石炭系和二叠系页岩气获得新发现突破,但含气层段互层频繁、非均质性强、单产量较低,“甜点”层段厘定和适应性工程技术仍需攻关。⑥陆相页岩气仅在四川盆地侏罗系、鄂尔多斯盆地三叠系和松辽盆地白垩系钻获工业气流,在现有经济技术条件下实现效益开发具有一定难度。

5.2 发展前景

不断拓展页岩气勘探开发新领域,推动页岩气产业快速发展。随着勘探开发力度不断加大,页岩气将成为中国天然气产量增长的重要力量。美国通过“页岩气革命”,实现了能源独立,保证了国家的能源安全。按照页岩气早期快速增长、中期缓慢增长和后期跨跃增长的模式,中国经历了早期快速增长阶段(2010—2020年),2020年页岩气产量突破 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$;目前处于中期缓慢增长阶段(2020—2030年),预测2025年页岩气产量 $(280 \sim 300) \times 10^8 \text{ m}^3$ 、2030年页岩气产量 $(500 \sim 600) \times 10^8 \text{ m}^3$;2030年开始进入跨跃增长阶段,预测2035年页岩气产量 $(1\,000 \sim 1\,200) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。页岩气单井生产具有初期产量高、前期递减快、后期低产稳定特征,实现页岩气的稳产增产,需要不断拓展页岩气勘探开发领域并持续实施大量新钻井,以实现页岩气产业持续快速发展。①四川盆地及其周缘中、浅层海相是页岩气稳产增产的主力军。四川盆地五峰组-龙马溪组中、浅层(埋深 $< 3\,500 \text{ m}$)已建成 $200 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 产气规模,资源评价结果表明中、浅层还可再探明页岩

气地质储量 $(10\,000 \sim 15\,000) \times 10^8 \text{ m}^3$ 、技术可采资源量 $(2\,500 \sim 3\,750) \times 10^8 \text{ m}^3$,可支撑页岩气稳产并增产到 $300 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。②四川盆地深层-超深层海相页岩气是未来增储上产的生力军。初步评价四川盆地埋深 $3\,500 \sim 4\,500 \text{ m}$ 的五峰组-龙马溪组页岩气有利区面积达 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,页岩气地质资源量为 $9.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。目前埋深 $3\,500 \sim 4\,000 \text{ m}$ 的海相页岩气开发技术基本成熟,具备建成年产页岩气 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的资源基础;埋深 $4\,000 \sim 4\,500 \text{ m}$ 的海相页岩气有效开发技术突破后,具备再上产 $200 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的开发潜力。③盆外复杂区常压海相页岩气有望实现规模性商业开发。四川盆地周缘五峰组-龙马溪组常压海相页岩气开发已经获得重要突破,在南川和正安等地区探明页岩气地质储量达 $2\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,彭水、武隆、道真、宜昌和大关等地区多口钻井获工业气流,具备形成年产页岩气 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的资源和技术条件。④新区、新层系有望实现页岩气勘探开发的全面拓展。四川盆地及其周缘寒武系和二叠系页岩气取得多点重大突破,有望形成页岩气增储上产新阵地。页岩气调查勘探在四川盆地寒武系和二叠系,鄂西-渝东地区震旦系、寒武系和二叠系及湘中坳陷石炭系和二叠系、黔西南-桂中坳陷石炭系获得了新突破,其中,鄂西渝东红星二叠系和四川盆地威远寒武系正在实施重点勘探,准备提交探明储量,初步评价页岩气地质资源量在 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上,具备建设年产页岩气 $(200 \sim 300) \times 10^8 \text{ m}^3$ 的资源规模;⑤陆相和海-陆过渡相页岩气可成为页岩气产量持续增长的重要补充。鄂尔多斯盆地、四川盆地、松辽盆地、南华北盆地和滇东-黔西盆地等含油气盆地发育海-陆过渡相和陆相富有机质页岩,页岩气地质资源量分别为 $22.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $7.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$,鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系、四川盆地三叠系和侏罗系以及松辽盆地白垩系等领域多口钻井获得工业页岩气流,具有良好的页岩气开发前景,加强海-陆过渡相和陆相勘探开发技术攻关并取得突破,可以建设年产页岩气 $(100 \sim 200) \times 10^8 \text{ m}^3$ 的生产能力。随着新区、新层系、多类型以及深层-超深层页岩气勘探开发的不断突破和拓展,页岩气产业将迎来跨越式发展,有望支撑中国实现2035年页岩气产量目标。

5.3 勘探开发建议

5.3.1 加大页岩气勘探开发力度,保障国家能源安全

随着国民经济快速发展,国家对清洁能源的需要日益增长。中国页岩气资源丰富,但目前探明率低、储

量动用率低和采收率低,尚处于早期发展阶段。未来,页岩气有望成为中国天然气产量增长的主体。建议积极发挥公益性油气调查的引领作用,推进页岩气资源接续基地建设,持续加大勘探开发投入,推动页岩气储量、产量快速增长,不断提升中国油气保障能力。

5.3.2 加快形成不同类型页岩气地质理论体系和勘探开发核心技术,实现新区、新层系和新类型页岩气的商业开发

中国页岩气类型多样、地质条件复杂,且勘探开发起步晚,基础理论与关键技术研究仍较为薄弱。建议加快启动实施新一轮国家油气科技重大专项,聚焦深层-超深层和复杂构造区常压海相、陆相及海-陆过渡相页岩气,开展富集成藏机理、勘探开发技术和工程装备攻关,重点突破复杂类型页岩气高效开发及高温、高压旋转导向等技术难题,发展完善具有中国地质特色的页岩气地质理论体系和关键勘探开发技术系列,实现页岩气商业开发领域的持续拓展。

5.3.3 制定、完善页岩气扶持政策,促进页岩气产业高质量发展

产业扶持政策是美国页岩气产业成功的因素之一。美国政府通过立法落实补贴政策和税收减免,引入市场竞争机制,促成了上千家不同规模企业参与页岩气勘探开发。中国深层-超深层领域及新区、新层系、新类型页岩气研究程度低,适应性工程技术和装备工具尚未成熟,勘探开发效益较差。建议对深层-超深层及“三新”领域页岩气资源采取差异化补贴政策,提高补贴系数。同时,优化完善矿权出让政策,对四川盆地等国家级油气资源战略保障基地实行矿权不退减或少退减,夯实页岩气增储上产的资源基础。对承担国家能源保障主责的企业,通过招标或协议出让等方式优先获取区块资源。考虑到页岩气行业技术门槛较高,应在招拍挂环节设置技术指标。

5.3.4 积极探索构建企、地双方协作保障机制,为页岩气增储上产保驾护航

川渝地区是中国页岩气主产区,2023年页岩气产量占川渝地区天然气总产量的36%。近年来,资源地政府“留利、留价、留气”等诉求日益增长,为加快推动川渝千亿方天然气生产基地建设,保障页岩气增储上产目标实现,建议积极探索构建企、地合作共赢的要素保障机制,对用地、用林、用水和用电等审批手续办理给予大力支持。

6 结论

1) 截至2023年底,中国累计探明页岩气地质储量为 $2.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$,累计探明技术可采储量为 $6\,765 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要来自四川盆地及其周缘的涪陵、长宁、威远、泸州、太阳、綦江和威荣页岩气田。近10年来,页岩气产量持续增长,主要来自涪陵、长宁—威远、威容等页岩气田。

2) 近10年来,页岩气公益性调查重要进展主要集中于四川盆地外复杂构造区的志留系、寒武系和二叠系,鄂西地区的震旦系、寒武系、志留系和二叠系,黔南—桂中地区的石炭系,雪峰地区周缘的寒武系、泥盆系、石炭系和二叠系,松辽盆地南部的白垩系,准噶尔盆地南部的二叠系,以及柴达木盆地东部的石炭系。

3) 中国发育海相、陆相和海-陆过渡相3种页岩沉积类型,震旦系—古近系共发育11套层系、36个层组。南方地区是中国优质页岩发育的主要地区,下古生界是页岩气富集的主要层位。除志留系外,南方寒武系和二叠系是页岩气增储上产的接续领域,北方陆相白垩系、二叠系和海-陆过渡相石炭系是页岩气发现的潜力领域。

4) 中国页岩气勘探开发处于增储上产的关键期,预计2025年产量可达 $(280 \sim 300) \times 10^8 \text{ m}^3$,2035年可达 $(1\,000 \sim 1\,200) \times 10^8 \text{ m}^3$,但面临四川盆地志留系产量递减快、稳产难度大、深层-超深层勘探风险和压裂改造难度大、盆外复杂构造区保存条件差及北方新区、新层系现有经济技术条件下实现效益开发难度大等问题。

5) 建议加大页岩气勘探开发力度,加快形成不同类型页岩气地质理论体系和勘探开发核心技术,制定完善页岩气扶持政策,积极探索构建企地双方协作保障机制,促进页岩气产业高质量发展。

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] U. S. Energy Information Administration. Assumptions to the annual energy outlook 2017 [R]. Washington, D. C.: U. S. Department of Energy, 2017.
- [3] 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.
- [4] 贾承造, 姜林, 赵文. 页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题[J]. *石油科学通报*, 2023, 8(6): 695–706.
- JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2023, 8(6): 695–706.
- [5] 郭彤楼. 以创新驱动引领更高水平的“东方页岩革命”[J]. *中国石化*, 2023(9): 58–60.
- GUO Tonglou. Leading the “eastern shale revolution” to a higher level driven by innovation [J]. *Sinopec Monthly*, 2023 (9): 58–60.
- [6] 张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. *天然气工业*, 2009, 29(12): 109–114.
- ZHANG Jinchuan, JIANG Shengling, TANG Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(12): 109–114.
- [7] 张金川, 史森, 王东升, 等. 中国页岩气勘探领域和发展方向[J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 69–80.
- ZHANG Jinchuan, SHI Miao, WANG Dongsheng, et al. Fields and directions for shale gas exploration in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 69–80.
- [8] 邹才能, 董大忠, 熊伟, 等. 中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 309–326.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, XIONG Wei, et al. Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 309–326.
- [9] 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.
- [10] 张立锬. 欧盟绿色能源转型政策成效及对中国的启示[J]. *国际石油经济*, 2024, 32(2): 50–57.
- ZHANG Likun. Effects of European Union’s green energy transition policies and its implications for China [J]. *International Petroleum Economics*, 2024, 32(2): 50–57.
- [11] 张金川, 薛会, 卞昌蓉, 等. 中国非常规天然气勘探综述[J]. *天然气工业*, 2006, 26(12): 53–56.
- ZHANG Jinchuan, XUE Hui, BIAN Changrong, et al. Remarks on unconventional gas exploration in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(12): 53–56.
- [12] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 392–400.
- LI Xinjing, HU Suyun, CHENG Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(4): 392–400.
- [13] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. *现代地质*, 2003, (4): 466.
- ZHANG Jinchuan, XUE Hui, ZHANG Deming, et al. Accumulation and mechanism of shale gas [J]. *Geoscience*, 2003, (4): 466.
- [14] 张金川, 汪宗余, 聂海宽, 等. 页岩气及其勘探研究意义[J]. *现代地质*, 2008, 22(4): 640–646.
- ZHANG Jinchuan, WANG Zongyu, NIE Haikuan, et al. Shale gas and its significance for exploration [J]. *Geoscience*, 2008, 22(4): 640–646.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 杨振恒, 李志明, 王果寿, 等. 北美典型页岩气藏岩石学特征、沉积环境和沉积模式及启示[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(6): 59–65.
- YANG Zhenheng, LI Zhiming, WANG Guoshou, et al. Enlightenment from petrology character, depositional environment and depositional model of typical shale gas reservoirs in north America [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2010, 29(6): 59–65.
- [18] 包书景. 非常规油气资源展示良好开发前景[J]. *中国石化*, 2008(10): 29–30.
- BAO Shujing. Unconventional oil and gas resources show promising development prospects [J]. *Sinopec Monthly*, 2008 (10): 29–30.
- [19] 王巧然. 我国首口页岩气取心浅井顺利完钻[N]. *中国石油报*, 2008–12–02(01).
- WANG Qiaoran. China’s first shale gas coring shallow well successfully completed drilling [N]. *China Petroleum Daily*, 2008–12–02(01).
- [20] 李玉喜, 聂海宽, 龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. *天然气工业*, 2009, 29(12): 115–118+152–153.
- LI Yuxi, NIE Haikuan, LONG Pengyu, et al. Development characteristics of organic-rich shale and strategic selection of shale gas exploration area in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(12): 115–118+152–153.
- [21] 中石油第一口页岩气井——威201井完成加砂压裂施工[J]. *天然气工业*, 2010, 30(8): 54.
- PetroChina’s first shale gas well, Wei 201 Well, has completed sand fracturing construction [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(8): 54.
- [22] 中国第一口页岩气井[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(9): 147.
- China’s first shale gas well [J]. *Strategic Study of CAE*, 2015, 17(9): 147.
- [23] 李立. 国内第一口页岩气井“吐气”[J]. *石油钻采工艺*, 2010, 32(5): 89.
- LI Li. The first shale gas well in China to vent gas [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2010, 32(5): 89.
- [24] 李辉. 西南油气田3口页岩气井产气260万立方米[J]. *石油钻*

- 采工艺, 2012, 34(1): 99.
- LI Hui. Three shale gas wells in southwest oil and gas field produce 2.6 million cubic meters of gas [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2012, 34(1): 99.
- [25] 宜宾新闻网. 珙县上罗镇宁201-H1井2013年页岩气开发利用757万立方米[EB/OL]. (网络发布日期缺失)[2014-06-06]. <http://www.ybxw.com/news/html/201406/109923.shtml>.
Yibin News Network. In 2013, the shale gas development and utilization of Ning 201-H1 Well in Shangluo Town, Gong County amounted to 7.57 million cubic meters[EB/OL]. (网络发布日期缺失)[2014-06-06]. <http://www.ybxw.com/news/html/201406/109923.shtml>.
- [26] 北极星火力发电网. 中石化海相页岩气勘探取得重大突破[EB/OL]. (2013-06-21)[2013-06-21]. <https://news.bjx.com.cn/html/20130621/441320.shtml>.
The North Star Thermal Power Grid. Sinopec has made significant breakthroughs in marine shale gas exploration[EB/OL]. (2013-06-21)[2013-06-21]. <https://news.bjx.com.cn/html/20130621/441320.shtml>.
- [27] 王世谦, 胡素云, 董大忠. 川东侏罗系——四川盆地亟待重视的一个致密油气新领域[J]. *天然气工业*, 2012, 32(12): 22-29, 125-126.
WANG Shiqian, HU Suyun, DONG Dazhong. Jurassic tight oil & gas resources in East Sichuan Basin: A new exploration target[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(12): 22-29, 125-126.
- [28] 国际石油网. 中石化福石1井试获高产页岩油气[EB/OL]. (2012-08-21)[2012-08-21]. <https://oil.in-en.com/html/oil-1524646.shtml>.
International Oil Network. Sinopec Fushi 1 well successfully obtained high-yield shale oil and gas [EB/OL]. (2012-08-21)[2012-08-21]. <https://oil.in-en.com/html/oil-1524646.shtml>.
- [29] 人民网. 国土资源部评审通过涪陵页岩气田探明储量[EB/OL]. (2014-07-17)[2015-10-12]. <http://energy.people.com.cn/n/2014/0717/c71661-25295496.html>.
People's Daily Online. In 2014, China's shale gas first discovered geological reserves of 106.8 billion cubic meters [EB/OL]. (2014-07-17)[2015-10-12]. <http://energy.people.com.cn/n/2014/0717/c71661-25295496.html>.
- [30] 李文锦, 雷鸣, 代俊清, 等. 丁山地区深层页岩气改造测试技术研究与应用[Z]. 四川省, 中国石油化工股份有限公司勘探分公司, 2016-05-16.
LI Wenjin, LEI Ming, DAI Junqing, et al. Research and application of deep shale gas transformation testing technology in Dingshan area [Z]. Sichuan Province, Exploration Branch of China Petroleum & Chemical Corporation, 2016-05-16.
- [31] 曾义金, 陈作, 卞晓冰. 川东南深层页岩气分段压裂技术的突破与认识[J]. *天然气工业*, 2016, 36(1): 61-67.
ZENG Yijin, CHEN Zuo, BIAN Xiaobing. Breakthrough in staged fracturing technology for deep shale gas reservoirs in SE Sichuan Basin and its implications [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(1): 61-67.
- [32] 中石化在川获千亿方级大气田 今年将建成10亿方产能[J]. *辽宁化工*, 2019, 48(3): 212.
Sinopec has acquired a billion cubic meter gas field in Sichuan and will build a production capacity of 1 billion cubic meters this year [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2019, 48(3): 212.
- [33] 梁兴, 徐政语, 张朝, 等. 昭通太阳背斜区浅层页岩气勘探突破及其资源开发意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(1): 11-28.
LIANG Xing, XU Zhengyu, ZHANG Zhao, et al. Breakthrough of shallow shale gas exploration in Taiyang anticline area and its significance for resource development in Zhaotong, Yunnan Province, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 11-28.
- [34] 李欣忆. 四川盆地新探明超千亿立方页岩气田[N]. *四川日报*, 2022-11-25(01).
LI Xinyi. Newly discovered shale gas fields exceeding 100 billion cubic meters in the Sichuan Basin [N]. *Sichuan Daily*, 2022-11-25(01).
- [35] 许邵庭, 邱胜, 潘德玉. 一“气”呵成看正安[N]. *贵州日报*, 2024-03-31(001).
XU Shaoting, QIU Sheng, PAN Deyu. The prospect of “shale gas” depends on Zheng'an [N]. *Guizhou Daily*, 2024-03-31(01).
- [36] 王玉芳, 翟刚毅, 包书景, 等. 鄂阳页1井陡山沱组页岩储层含气性及可压性评价[J]. *中国矿业*, 2017, 26(6): 166-172.
WANG Yufang, ZHAI Gangyi, BAO Shujing, et al. Evaluation of Sinian Doushantuo Formation shale gas content and fracturing property of Eyangye1 Well in Hubei Province [J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(6): 166-172.
- [37] 魏国齐, 谢增业, 宋家荣, 等. 四川盆地川中古隆起震旦系—寒武系天然气特征及成因[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6): 702-711.
WEI Guoqi, XIE Zengye, SONG Jiarong, et al. Features and origin of natural gas in the Sinian-Cambrian of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 702-711.
- [38] 易同生, 陈捷. 黔西石炭系页岩气赋存特征与勘探潜力[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(1): 82-94.
YI Tongsheng, CHEN Jie. Occurrence characteristics and exploration potential of Carboniferous shale gas in western Guizhou [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(1): 82-94.
- [39] 陈相霖, 苑坤, 林拓, 等. 四川岷紫罗裂陷槽西北缘(黔水地1井)发现上古生界海相页岩气[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 661-662.
CHEN Xianglin, YUAN Kun, LIN Tuo, et al. Discovery of shale gas within Upper Paleozoic marine facies by Qian Shuidi-1 well in the northwest of Yaziluo rift trough, Sichuan Province [J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 661-662.
- [40] 胡东风, 魏志红, 王威, 等. 四川盆地东北部雷页1井上二叠统大隆组页岩气勘探突破及其启示[J]. *天然气工业*, 2023, 43(11): 28-39.
HU Dongfeng, WEI Zhihong, WANG Wei, et al. Breakthrough of shale gas exploration in Dalong Formation of Upper Permian by Well Leiye 1 in the northeastern Sichuan Basin and its implications [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(11): 28-39.
- [41] 王濡岳, 胡宗全, 赖富强, 等. 川东北地区下侏罗统自流井组

- 大安寨段陆相页岩脆性特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 366-378.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, LAI Fuqiang, et al. Brittleness features and controlling factors of continental shale from Da'anzhai Member of the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 366-378.
- [42] 何陈诚, 赵永强, 俞凌杰, 等. 川东北地区二叠系大隆组深层页岩气储层孔隙结构及其分形特征[J]. 石油实验地质, 2024, 46(2): 263-277.
- HE Chencheng, ZHAO Yongqiang, YU Lingjie, et al. Pore structure and fractal characteristics of deep shale gas reservoirs in the Permian Dalong Formation, northeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(2): 263-277.
- [43] 赵文智, 卞从胜, 李永新, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长73亚段页岩有机质转化率、排烃效率与页岩油主富集类型[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 12-23.
- ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, LI Yongxin, et al. Organic matter transformation ratio, hydrocarbon expulsion efficiency and shale oil enrichment type in Chang 73 shale of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 12-23.
- [44] 师良, 范柏江, 李忠厚, 等. 鄂尔多斯盆地中部三叠系延长组7段烃组分的运移分异作用[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 157-168.
- SHI Liang, FAN Bojiang, LI Zhonghou, et al. Migration differentiation of hydrocarbon components in the 7th member of the Triassic Yanchang Formation, central Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 157-168.
- [45] 蒋裕强, 温声明, 蔡光银, 等. 鄂尔多斯盆地海陆过渡相页岩岩性组合特征及页岩气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2023, 43(4): 62-75.
- JIANG Yuqiang, WEN Shengming, CAI Guangyin, et al. Lithologic assemblage characteristics and shale gas exploration potential of transitional shale in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 62-75.
- [46] 张君峰, 徐兴友, 白静, 等. 松辽盆地梨树断陷白垩系沙河子组陆相页岩气形成条件与勘探突破[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 440-452.
- ZHANG Junfeng, XU Xingyou, BAI Jing, et al. Accumulation and exploration of continental shale gas resources of Cretaceous Shahezi Formation in Lishu fault depression, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 440-452.
- [47] 中华人民共和国自然资源部. 我国页岩气探明储量超万亿立方米[EB/OL]. (2018-07-11)[2018-07-11]. http://vod.mnr.gov.cn/spxw/201807/t20180711_2081901.htm.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China's proven shale gas reserves exceed trillion cubic meters [EB/OL]. (2018-07-11)[2018-07-11]. http://vod.mnr.gov.cn/spxw/201807/t20180711_2081901.htm.
- [48] 成品油石油平台史晏铭. 自然资源部: 2019年我国油气勘查开采投资大幅增长 勘查投资达到历史最高[EB/OL]. (2020-07-29)[2020-07-29]. https://www.sohu.com/a/410374416_120146929.
- Refined Oil Platform Shi Yanming. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China: in 2019, China's oil and gas exploration and production investment increased significantly and exploration investment reached the highest level in history [EB/OL]. (2020-07-29)[2020-07-29]. https://www.sohu.com/a/410374416_120146929.
- [49] 中化地质矿山总局地质研究院. 重磅! 页岩气新增探明地质储量7454亿立方米! [EB/OL]. (2022-09-08)[2022-09-08]. <http://www.hgdyy.com.cn/xyxw/3488.html>.
- Geological Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau. Blockbuster! Shale gas proved reserves of 745.4 billion cubic meters! [EB/OL]. (2022-09-08)[2022-09-08]. <http://www.hgdyy.com.cn/xyxw/3488.html>.
- [50] 北极星火力发电网. 国土部: 2013年页岩气和煤层气产量分别为2亿和30亿立方米[EB/OL]. (2014-01-08)[2014-01-08]. <https://news.bjx.com.cn/html/20140108/485390.shtml>.
- Polaris Fire Power Grid. Ministry of Land and Infrastructure: The production of shale gas and coal bed gas in 2013 was 200 million and 3 billion cubic meters respectively [EB/OL]. (2014-01-08)[2014-01-08]. <https://news.bjx.com.cn/html/20140108/485390.shtml>.
- [51] 个人图书馆. 2019年中国页岩气市场现状与发展趋势[EB/OL]. (2019-12-05)[2019-12-05]. http://www.360doc.com/content/19/1205/12/3046928_877592334.shtml.
- Personal Library. China's shale gas market status and development trend in 2019! [EB/OL]. (2019-12-05)[2019-12-05]. http://www.360doc.com/content/19/1205/12/3046928_877592334.shtml.
- [52] 吕红桥. 2020年中国页岩气产量增长超过3成 成为天然气增产主力军[EB/OL]. (2021-02-09)[2021-02-09]. <https://news.ifeng.com/c/83kSNsLvUqQ>.
- LYU Hongqiao. In 2020, China's shale gas production increased by more than 30%, becoming the main force of natural gas production increase [EB/OL]. (2021-02-09)[2021-02-09]. <https://news.ifeng.com/c/83kSNsLvUqQ>.
- [53] 澎湃北京. 我国最大页岩气田——涪陵页岩气田累产突破600亿方[EB/OL]. (2023-09-25)[2023-09-25]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_24741089.
- Surging Beijing. The cumulative production of Fuling shale gas field, the largest shale gas field of our country, has exceeded 60 billion square meters [EB/OL]. (2023-09-25)[2023-09-25]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_24741089.
- [54] 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 等. 贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J]. 中国地质, 2017, 44(1): 1-12.
- ZHAI Gangyi, BAO Shujing, PANG Fei, et al. Reservoir-forming pattern of “four-storey” hydrocarbon accumulation in Anchang syncline of northern Guizhou Province [J]. Geology in China, 2017, 44(1): 1-12.
- [55] 熊小辉, 刘家洪, 邓奇, 等. 云南大关地区(云大页1井)龙马溪组获页岩气调查重大发现[J]. 中国地质, 2019, 46(6): 1576-1577.
- XIONG Xiaohui, LIU Jiahong, DENG Qi, et al. The breakthrough of shale gas survey from Longmaxi Formation of Well

- Yundaye-1 in Daguan area, Yunnan Province [J]. *Geology in China*, 2019, 46(6): 1576–1577.
- [56] 李娟, 王玉芳, 翟刚毅, 等. 陕西南郑地区第一口参数井钻获牛蹄塘组页岩气[J]. *中国地质*, 2021, 48(1): 337–338.
LI Juan, WANG Yufang, ZHAI Gangyi, et al. First drilling of shale gas within the Niutitang Formation in the Nanzheng area, Shaanxi Province [J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 337–338.
- [57] 李世臻, 周志, 李飞, 等. 鄂西—渝东地区上二叠统大隆组页岩气富集条件与勘探有利区[J]. *天然气工业*, 2024, 44(5): 1–15.
LI Shizhen, ZHOU Zhi, LI Fei, et al. Shale gas enrichment conditions and favorable exploration areas of Upper Permian Dalong Formation in the western Hubei and eastern Chongqing region [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(5): 1–15.
- [58] 刘俞佐, 翟刚毅, 徐笑丰, 等. 鄂西地区牛蹄塘组和陡山沱组优质页岩测井识别[J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1791–1804.
LIU Yuzuo, ZHAI Gangyi, XU Xiaofeng, et al. Logging identification of high quality shale of Niutitang Formation and Doushantuo Formation in western Hubei [J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1791–1804.
- [59] 李海, 陈孝红, 彭中勤, 等. 湘鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩气储层特征[J]. *地质学报*, 2022, 96(4): 1421–1433.
LI Hai, CHEN Xiaohong, PENG Zhongqin, et al. Shale gas reservoir characteristics of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the western Hunan and Hubei areas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(4): 1421–1433.
- [60] 刘早学, 许露露, 温雅茹, 等. 湖北寒武系牛蹄塘组页岩气成藏条件与综合评价[J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1586–1603.
LIU Zaoxue, XU Lulu, WEN Yaru, et al. Accumulation characteristics and comprehensive evaluation of shale gas in Cambrian Niutitang Formation, Hubei [J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1586–1603.
- [61] 林拓, 苑坤, 陈相霖, 等. 贵州黔水地1井探获中国南方石炭系页岩气工业气流[J]. *中国地质*, 2022, 49(3): 995–996.
LIN Tuo, YUAN Kun, CHEN Xianglin, et al. Industrial gas flow of Carboniferous shales in southern China was obtained in Well Qianshuidi 1 in Guizhou Province [J]. *Geology in China*, 2022, 49(3): 995–996.
- [62] 覃英伦, 张家政, 王玉芳, 等. 广西桂中坳陷(桂融页1井)石炭系鹿寨组页岩气重要发现[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 667–668.
QIN Yinglun, ZHANG Jiazheng, WANG Yufang, et al. Discovery of shale gas by Guirongye-1 well within Carboniferous Luzhai Formation in Guizhong Depression, Guangxi [J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 667–668.
- [63] 李小盼, 聂国权, 张庆玉, 等. 黔南坳陷东部震旦—寒武系富有机质页岩发育特征与页岩气勘探前景: 以贵丹地1井及邻区为例[J/OL]. *中国地质*: 1–18[2024-08-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20240129.2032.010.html>.
LI Xiaopan, NIE Guoquan, ZHANG Qingyu, et al. Development characteristics and shale gas exploration prospect of Sinian-Cambrian organic-rich shale in the eastern part of the southern Guizhou Depression, China: A case study of the Well Guidandi 1 and its adjacent areas [J/OL]. *Geology in China*: 1–18[2024-08-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20240129.2032.010.html>.
- [64] GE Mingna, KE Chen, XIANG Xianglin, et al. The influence factors of gas-bearing and geological characteristics of Niutitang Formation shale in the southern margin of Xuefeng Mountain ancient uplift: A case of Well Huangdi 1 [J]. *China Geology*, 2020, 3(4): 533–544.
- [65] 张保民, 田巍, 张国涛, 等. 湘中邵阳凹陷湘邵地1井钻获二叠系非常规气[J]. *中国地质*, 2023, 50(5): 1590–1591.
ZHANG Baomin, TIAN Wei, ZHANG Guotao, et al. Discovery of Permian unconventional gas by drilling in the Well Xiangshaodi 1, Shaoyang Sag, central Hunan Province [J]. *Geology in China*, 2023, 50(5): 1590–1591.
- [66] 张林, 张敏, 高永进, 等. 准噶尔盆地南缘博格达山前带二叠系芦草沟组油气源分析和勘探潜力[J]. *中国矿业*, 2021, 30(11): 178–188.
ZHANG Lin, ZHANG Min, GAO Yongjin, et al. Oil and gas source analysis and exploration potential of Permian Lucaogou Formation in Bogda piedmont belt in the southern margin of Junggar Basin [J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(11): 178–188.
- [67] 曹军, 刘成林, 马寅生, 等. 柴达木盆地东部石炭系海陆过渡相煤系页岩气地球化学特征及成因[J]. *地学前缘*, 2016, 23(5): 158–166.
CAO Jun, LIU Chenglin, MA Yinsheng, et al. Geochemical characteristics and genesis of shale gas for Carboniferous marine-continental transitional facies coal measure strata in Eastern Qaidam Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(5): 158–166.
- [68] 郭天旭, 周志, 任收麦. 柴达木盆地北缘侏罗系(柴页1井)发现陆相页岩气[J]. *中国地质*, 2017, 44(2): 401–402.
GUO Tianxu, ZHOU Zhi, REN Shoumai. Jurassic shale gas discovered at Chaiye-1 well on the northern margin of Qaidam Basin [J]. *Geology in China*, 2017, 44(2): 401–402.
- [69] 张春池, 彭文泉, 胡小辉, 等. 沾化凹陷沙河街组页岩气成藏条件研究[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(3): 12–17.
ZHANG Chunchi, PENG Wenquan, HU Xiaohui, et al. Shale gas accumulation conditions of Shahejie Formation in Zhanhua Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 12–17.
- [70] 李志军, 肖阳, 田建章, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷新领域、新类型油气勘探潜力及有利方向[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 69–98.
LI Zhijun, XIAO Yang, TIAN Jianzhang, et al. Potentials and favorable directions for new fields, new types of oil-gas exploration in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 69–98.
- [71] 陈祥, 严永新, 章新文, 等. 南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩气形成条件研究[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(2): 137–141, 147.
CHEN Xiang, YAN Yongxin, ZHANG Xinwen, et al. Generation conditions of continental shale gas in Biyang Sag, Nanxiang Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2011, 33(2): 137–141, 147.
- [72] 白雪峰, 陆加敏, 李军辉, 等. 松辽盆地北部全油气系统成藏

- 模式与勘探潜力[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(3): 49-61.
- BAI Xuefeng, LU Jiamin, LI Junhui, et al. Hydrocarbon accumulation patterns and exploration potential of whole petroleum systems in northern Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(3): 49-61.
- [73] 郭少斌, 王子龙, 马啸. 中国重点地区二叠系海陆过渡相页岩气勘探前景[J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 377-385, 414.
- GUO Shaobin, WANG Zilong, MA Xiao. Exploration prospect of shale gas with Permian transitional facies of some key areas in China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(3): 377-385, 414.
- [74] 张洪洁, 王凤琴, 刘航, 等. 鄂尔多斯盆地东南部长7段页岩气含气量及影响因素[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(6): 666-672.
- ZHANG Hongjie, WANG Fengqin, LIU Hang, et al. Shale gas content and its influencing factors in Chang 7 member of southeastern Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(6): 666-672.
- [75] 梁斌, 雷国明, 党犇, 等. 准噶尔盆地南缘山前冲断带芦草沟组储层含气性及主控因素分析——以米参2井为例[J]. 新疆地质, 2021, 39(1): 129-133.
- LIANG Bin, LEI Guoming, DANG Ben, et al. Analysis of gas-bearing properties and main controlling factors of the Lucaogou Formation reservoir in the piedmont thrust belt, South margin of Junggar Basin-Take MC02 well as an example [J]. Xinjiang Geology, 2021, 39(1): 129-133.
- [76] 郭少斌, 付娟娟, 高丹, 等. 中国海陆交互相页岩气研究现状与展望[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 535-540.
- GUO Shaobin, FU Juanjuan, GAO Dan, et al. Research status and prospects for marine-continental shale gases in China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(5): 535-540.
- [77] 冯辉, 邱庆伦, 汪超, 等. 南华北盆地中牟凹陷太原组-山西组页岩气成藏特征——以河南中牟区块ZDY2井为例[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(2): 213-218.
- FENG Hui, QIU Qinglun, WANG Chao, et al. The shale gas accumulation characteristics of Taiyuan and Shanxi formations in Zhongmu Sag in basins in south of the north China: In case of ZDY2 well of Zhongmu Block, Henan Province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2019, 34(2): 213-218.
- [78] 郭少斌, 王义刚. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组页岩气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 445-452.
- GUO Shaobin, WANG Yigang. Shale gas accumulation conditions and exploration potential of Carboniferous Benxi Formation in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 445-452.
- [79] 施辉, 李宗星, 彭博, 等. 柴达木盆地欧南凹陷上石炭统克鲁克组海陆过渡型烃源岩有机质组成及生烃特征[J]. 地质学报, 2023, 97(1): 179-196.
- SHI Hui, LI Zongxing, PENG Bo, et al. The organic matter composition and hydrocarbon generation characteristics of the source rocks in the Upper Carboniferous Keluke Formation, Ounan Depression, Qaidam Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(1): 179-196.
- [80] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 8-21.
- ZHU Guangyou, CHEN Feiran, CHEN Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 8-21.
- [81] 封宇博, 刘友南, 邓春涛, 等. 河北省北部富有机质页岩的页岩气潜力研究[J]. 石油化工应用, 2024, 43(1): 92-97.
- FENG Yubo, LIU Younan, DENG Chuntao, et al. Study on the shale gas potential of organic-rich shale in the northern part of Hebei Province [J]. Petrochemical Industry Application, 2024, 43(1): 92-97.
- [82] 刘苗苗, 付小平. 元坝地区陆相页岩气勘探潜力再评价[J]. 四川地质学报, 2020, 40(3): 416-421.
- LIU Miaomiao, FU Xiaoping. Reevaluation of exploration potential of continental shale gas in the Yuanba area [J]. Acta Geologica Sichuan, 2020, 40(3): 416-421.
- [83] 黄金亮, 董大忠, 李建忠, 等. 陆相页岩储层特征及其影响因素: 以四川盆地上三叠统须家河组页岩为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 158-166.
- HUANG Jinliang, DONG Dazhong, LI Jianzhong, et al. Reservoir characteristics and its influence on continental shale: An example from Triassic Xujiache Formation shale, Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 158-166.
- [84] 冯动军. 川东南二叠系龙潭组海-陆过渡相页岩气甜点评价及意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 778-788.
- FENG Dongjun. Sweet spot assessment and its significance for the marine-continental transitional shale gas of Permian Longtan Fm. in southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 778-788.
- [85] 胡琳, 薛晓辉, 张郁云, 等. 滇东宣威地区上二叠统龙潭组页岩气成藏条件分析[J]. 非常规油气, 2018, 5(6): 29-33.
- HU Lin, XUE Xiaohui, ZHANG Yuyun, et al. Accumulation conditions analysis of shale gas of Upper Permian Longtan Formation of Xuanwei area in eastern Yunnan [J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(6): 29-33.
- [86] 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.
- [87] 许露露, 刘早学, 张焱林, 等. 鄂西鹤峰区块大隆组含页岩气地层潜力评价[J]. 特种油气藏, 2018, 25(2): 13-18.
- XU Lulu, LIU Zaoxue, ZHANG Yanlin, et al. Shale gas reservoir potential evaluation of Dalong Formation in Hefeng of western Hubei Province [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(2): 13-18.
- [88] 余江浩, 王登, 王亿, 等. 湖北西部上二叠统大隆组页岩气资源潜力评价[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(4): 84-90.
- YU Jianghao, WANG Deng, WANG Yi, et al. Evaluation of shale gas resource potential of Late Permian Dalong Formation in western Hubei Province [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(4): 84-90.

- 84-90.
- [89] 陈阳, 朱正杰, 张瑞刚, 等. 渝东南地区梁山组层位与时代[J]. 矿物学报, 2018, 38(4): 380-386.
- CHEN Yang, ZHU Zhengjie, ZHANG Ruigang, et al. Position and timing of the Liangshan Formation in the southeastern Chongqing, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2018, 38(4): 380-386.
- [90] 徐卿. 黔西南地区二叠系梁山组页岩气勘探潜力研究[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(5): 20-26.
- XU Qing. Study on Permian Liangshan Formation shale gas exploration potential in southwestern Guizhou area [J]. Coal Geology of China, 2017, 29(5): 20-26.
- [91] 田巍, 彭中勤, 白云山, 等. 湘中涟源凹陷石炭系测水组页岩气成藏特征及勘探潜力[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 939-952.
- TIAN Wei, PENG Zhongqin, BAI Yunshan, et al. Reservoir characteristics and exploration potential of Lower Carboniferous shale gas in Lianyuan Sag, central Hunan [J]. Earth Science, 2019, 44(3): 939-952.
- [92] 田巍, 陈孝红, 李旭兵, 等. 湘中涟源凹陷下石炭统天鹅坪组页岩气成藏条件及主控因素[J]. 地质科技通报, 2021, 40(5): 54-63.
- TIAN Wei, CHEN Xiaohong, LI Xubing, et al. Accumulation conditions and main factors of the Lower Carboniferous Tianeping Formation in Lianyuan Sag in the middle of Hunan Province [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(5): 54-63.
- [93] 苑坤, 方欣欣, 王婷, 等. 黔南坳陷下石炭统打屋坝组页岩气地质条件及勘探前景[J]. 地质论评, 2020, 66(增刊1): 115-116.
- YUAN Kun, FANG Xinxin, WANG Ting, et al. Accumulation conditions and exploration potential of shale gas of Dawuba Formation, southern Guizhou Depression [J]. Geological Review, 2020, 66(S1): 115-116.
- [94] 罗胜元, 王传尚, 彭中勤. 桂中坳陷下石炭统鹿寨组页岩气研究[J]. 华南地质与矿产, 2016, 32(2): 180-190.
- LUO Shengyuan, WANG Chuanshang, PENG Zhongqin. Shale gas research of Luzhai Formation, Low Carboniferous in Guizhong Depression [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2016, 32(2): 180-190.
- [95] 苗凤彬, 张保民, 张国涛, 等. 湘中涟源凹陷泥盆系余田桥组页岩气差异性富集控制因素[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(9): 1482-1499.
- MIAO Fengbin, ZHANG Baomin, ZHANG Guotao, et al. Controlling factors for the differential enrichment of Devonian Shetianqiao Formation shale gas in Lianyuan Sag, central Hunan [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(9): 1482-1499.
- [96] 王鹏万, 陈子料, 贺训云, 等. 桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件与有利区带评价[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 353-363.
- WANG Pengwan, CHEN Ziliao, HE Xunyun, et al. Shale gas accumulation conditions and play evaluation of the Devonian in Guizhong Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 353-363.
- [97] 郭旭升. 南海相页岩气“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.
- [98] 钟光海, 张静, 邱小雪, 等. 基于测录井信息的页岩气“铂金靶体”快速识别技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(4): 176.
- ZHONG Guanghai, ZHANG Jing, QIU Xiaoxue, et al. Rapid identification technology for shale gas “Platinum target” based on logging information [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 176.
- [99] 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.
- [100] 乔辉, 张永贵, 聂海宽, 等. 页岩储层多尺度天然裂缝表征与三维地质建模: 以四川盆地平桥构造带五峰组-龙马溪组页岩为例[J]. 地学前缘, 2024, 31(5): 89-102.
- QIAO Hui, ZHANG Yonggui, NIE Haikuan, et al. Characterization and 3D modeling of multiscale natural fractures in shale gas reservoir: A case study in the Pingqiao structural belt, Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(5): 89-102.
- [101] 孙金声, 杨景斌, 白英睿, 等. 深层超深层钻井液技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 889-898.
- SUN Jinsheng, YANG Jingbin, BAI Yingrui, et al. Research progress and development of deep and ultra-deep drilling fluid technology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 889-898.
- [102] 路智勇, 刘莉, 姜宇玲, 等. 涪陵气田立体开发地质工程一体化实践[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(3): 10-20.
- LU Zhiyong, LIU Li, JIANG Yuling, et al. Practice of geology and engineering integration in the stereoscopic development of Fuling Gas Field [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(3): 10-20.
- [103] 余朝毅. 四川盆地深层页岩气钻井关键技术新进展及发展展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 1-9.
- SHE Zhaoyi. New progress and development prospect of key technologies for drilling of deep shale gas wells in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 1-9.
- [104] 刘清友. 若干智能钻井装备发展现状及应用前景分析——以四川盆地页岩气开发为例[J]. 钻采工艺, 2022, 45(1): 1-10.
- LIU Qingyou. Development status and application prospect for several intelligent drilling equipment: A case study of shale gas development in Sichuan Basin [J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(1): 1-10.