

引用本文: 张嘉琪, 刘曾勤, 申宝剑, 等. 国内外深层煤层气勘探开发进展与启示[J]. 石油实验地质, 2025, 47(1): 1–8. DOI: 10.11781/sysydz2025010001.

ZHANG Jiaqi, LIU Zengqin, SHEN Baojian, et al. Progress and insights from worldwide deep coalbed methane exploration and development[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2025, 47(1): 1–8. DOI: 10.11781/sysydz2025010001.

国内外深层煤层气勘探开发进展与启示

张嘉琪^{1,2,3,4}, 刘曾勤^{1,2,3,4}, 申宝剑^{1,2,3,4}, 赵石虎^{1,2,3,4}, 陈新军^{1,2,3,4}, 叶金诚^{1,2,3,4}

1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206;

2. 中国石化 页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206;

4. 中国石化 深层煤层气勘探开发重点实验室, 北京 102206

摘要: 2021 年以来, 我国深层煤层气勘探开发接连取得重大突破, 成为天然气增储上产战略接替资源。为进一步支撑我国深层煤层气高质量发展, 亟需对国内外主要含煤盆地煤层气资源禀赋与勘探开发现状进行研究。美国、澳大利亚、加拿大煤层气勘探开发起步早, 目前以中低阶浅层煤层气开发为主, 煤层埋深浅、渗透率高, 主要采用直井开采, 单井日产超万立方米; 伴随油气战略调整, 美国和加拿大不再将煤层气作为勘探重点, 澳大利亚则通过探索试验煤系地层合采, 煤层气产量跃居全球首位。我国以中高阶深层煤层气开发为主, 煤层具有埋深差异大、渗透率低的特征。目前鄂尔多斯盆地成为最大深层煤层气生产基地, 大宁—吉县、大牛地等气田多口水平井日产气量超十万方; 四川盆地深层煤层气勘探取得了积极进展, 准噶尔盆地也具备深层煤层气勘探的潜力。国内外煤层气勘探开发经验表明, 富集规律认识的突破、工程技术的进步、一体化管理模式的运行及产业扶持政策的出台是煤层气产业快速发展的重要因素; 加大不同类型深层煤层气勘探力度、加强理论技术攻关、加快标准体系建设、加大产业扶持政策支持力度, 有助于我国深层煤层气高质量勘探和高效开发。

关键词: 勘探开发; 富集规律; 产业政策; 深层煤层气; 中国; 美国; 澳大利亚; 加拿大

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz2025010001

Progress and insights from worldwide deep coalbed methane exploration and development

ZHANG Jiaqi^{1,2,3,4}, LIU Zengqin^{1,2,3,4}, SHEN Baojian^{1,2,3,4}, ZHAO Shihu^{1,2,3,4}, CHEN Xinjun^{1,2,3,4}, YE Jincheng^{1,2,3,4}

1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China;

2. SINOPEC Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, Beijing 102206, China;

3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China;

4. SINOPEC Key Laboratory of Deep CBM Exploration and Production Technology, Beijing 102206, China

Abstract: Since 2021, China has achieved significant breakthroughs in deep coalbed methane (CBM) exploration and development, making it a strategic resource for increasing natural gas reserves and production. To further support the high-quality development of deep CBM in China, it is urgent to study the CBM resource endowments and exploration and development status in worldwide major coal-bearing basins. The exploration and development of CBM in the United States, Australia, and Canada started early, currently mainly focusing on the development of medium- to low-rank shallow CBM, characterized by shallow coal seams and high permeability, with production exceeding 10 000 m³/d using vertical wells. However, due to adjustments in oil and gas strategies, the United States and Canada no longer prioritize CBM exploration. Australia, on the other hand, experiments with combined production of coal measures, propelling it to the top of global CBM production. In China, deep CBM exploration mainly focuses on medium- to high-rank deep CBM. The coal seams are characterized by significant depth variation and low permeability. The Ordos Basin has become the largest deep CBM production base. Multiple horizontal wells in the Daning-Jixian and Daniudi gas fields produce more than 100 000 m³ of gas per day. Deep CBM

收稿日期 (Received): 2024-12-02; 修订日期 (Revised): 2025-01-03; 出版日期 (Published): 2025-01-28.

作者简介: 张嘉琪 (1996—), 女, 硕士, 研究实习员, 从事深层煤层气储层表征与富集机理研究。E-mail: zjq.syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技部项目 (P23206, P23230) 和中国石化石油勘探开发研究院院控项目 (KTYZL2024090601) 联合资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

exploration in the Sichuan Basin has made positive progress, and the Junggar Basin shows potential for deep CBM exploration. Experiences from CBM exploration and development shows that breakthroughs in understanding enrichment patterns, advancements in engineering technologies, integrated management models, and industry-supportive policies are important factors for the rapid development of the CBM industry. Increasing exploration efforts for different types of deep CBM, strengthening theoretical and technological research, accelerating the construction of standard systems, and enhancing industry support policies will help foster high-quality exploration and efficient development of deep CBM in China.

Key words: exploration and development; enrichment pattern; industrial policy; deep coalbed methane; China; United States; Australia; Canada

煤层气(煤层瓦斯)是一种赋存于煤层中的非常规天然气,煤层气燃烧几乎不产生任何废气,是洁净优质的能源和化工原料。煤层气的有序、有效开采,既可为煤炭安全生产提供保障,也是推动能源清洁低碳化、实现“碳达峰、碳中和”宏伟目标的有效途径^[1-2]。我国《“十四五”现代能源体系规划》在“增强能源供应链稳定性和安全性”工作中明确指出,要积极扩大非常规资源勘探开发,加快页岩油、页岩气、煤层气开发力度。根据 BP 能源公司分析,2035 年我国天然气对外依存度将高达 55%,严重威胁国家天然气战略安全。因此,高效开发利用煤层气资源是保障国家能源战略安全的可靠途径之一。

目前行业内对深层煤层气的煤层埋深范围的标准描述尚不一致^[3-5]。值得注意的是,深层煤层气所指的“深”不仅代表了煤层埋深,更代表了受温压耦合作用控制下深层煤层气赋存状态发生转换的“临界深度”,且在不同地质条件下具有一定差异,一般分布在 1 400~1 800 m 范围内^[6-8]。目前在自然资源部牵头组织的我国“十四五”煤层气资源评价工作中,根据煤层埋深 1 500 m 为界限分为浅层和深层煤层气,因此本文将深层煤层气定义为赋存于埋深超 1 500 m 的煤层中的天然气。

与浅层煤层气相比,深层煤储层在构造、埋深、压力、温度、地应力、物性、含气性等方面均有显著差异。随着埋藏深度的增加,受温压耦合影响,深层煤层气中吸附气逐渐减少;而随着保存条件变好,游离气逐渐增多,因此深层煤层气具有游离气和吸附气共存、含气量高的特点。利用水平井体积压裂进行开发,成本较高,产量差异大。目前在鄂尔多斯盆地涌现多口日产超 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产井,进一步展现深层煤层气资源极具勘探开发潜力,并且前景广阔。

由于我国深层煤层气产业发展时间短,技术经验尚不成熟,亟需借鉴国外煤层气勘探开发技术经

验与政府产业扶持政策。因此,本文全面梳理了国内外深层煤层气勘探开发进展成果,对比总结了深层煤层气地质条件与工程技术差异,总结了案例成功经验与启示,以期为我国深层煤层气产业高质量发展提供借鉴。

1 国外深层煤层气勘探开发进展

全球煤层气资源量为 $256.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[9],是常规天然气资源量的 50%,主要分布在亚太和北美地区,90%的煤层气资源分布在 12 个主要国家,资源最丰富的国家依次为俄罗斯、中国、加拿大、美国、澳大利亚等。目前,国内外开展煤层气开发的盆地主要包括美国的皮申思、圣胡安、粉河盆地,澳大利亚的苏拉特、库玻盆地,加拿大的阿尔伯塔盆地以及我国的鄂尔多斯、四川、准噶尔盆地等^[10]。

1.1 美国尚未聚焦深层煤层气开发

美国有丰富的煤层气资源,位居世界第四位,资源量为 $22.19 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量为 $3.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明储量超 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。早在 20 世纪 60 年代,美国在圣胡安和黑勇士盆地进行大规模煤层气开采,积累了一定技术经验,但钻完井方式仅限于常规直井^[11];1980 年起,美国出台补贴政策,刺激煤层气企业加大勘探投入;1988 年以来建立了中低阶煤成藏理论,先后应用裸眼洞穴完井、空气钻井、定向羽状水平井等技术^[12-13],加快煤层气开发。2008 年美国煤层气产量达到峰值($573 \times 10^8 \text{ m}^3$),占当年全美天然气总产量的 9.8%;随后由于美国“页岩革命”的突破,能源战略逐步转向页岩油气领域,煤层气投资和工作量锐减,年产量稳定下降至目前的 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 水平(图 1)。

目前,美国煤层气开发以浅层为主,仅在皮申思盆地白河凸起进行深层煤层气开发,该盆地主要发育 Williams Fork 组海陆过渡相中低阶煤层,单层厚度大,平均为 6~12 m,平均含气量超 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ ^[14],埋深最大可达 3 340 m;构造发育简单,保存条件较

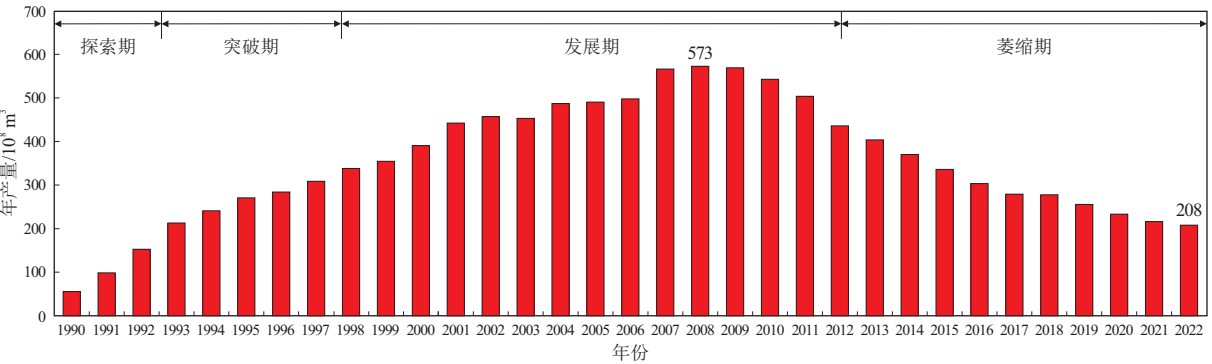


图 1 美国煤层气历年产量

Fig.1 Annual production of coalbed methane in United States

好,开发方式以直井为主,65 口单井平均产气量在 $1.09\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ^[15]。总体上看,伴随油气战略调整,煤层气不再成为美国勘探热点,因而美国尚未开展深层煤层气大规模商业开发。

1.2 澳大利亚探索试验煤系地层合采

澳大利亚煤层气资源量为 $14\times 10^{12}\text{ m}^3$,主要分布在东部悉尼、博文和苏拉特 3 个含煤盆地。澳大利亚煤层气勘探工作始于 1976 年,产业发展早期主要借鉴美国浅层煤层气开发经验,探索期内年产量始终低于 $50\times 10^8\text{ m}^3$ ^[16]。

苏拉特盆地目标层系为侏罗系 Walloon 组,主要发育海陆过渡相中低阶煤层,煤层连续性较差,单层厚度小于 0.3 m,平均含气量为 $2\sim 8\text{ m}^3/\text{t}$,因此早期在勘探上不受重视。2013 年后,澳大利亚针对盆内煤系地层发育特征,积极探索煤系非常规气共采技术,大规模开发苏拉特和博文盆地的浅层中低阶煤层气^[17]。截至 2019 年,苏拉特盆地生产井共计 5 818 口,以直井裸眼合采为主,井均产气 $1.48\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。2023 年,澳大利亚煤层气产量达 $400\times 10^8\text{ m}^3$ 水平,跃居世界第一(图 2)。

目前,受资源禀赋条件限制,澳大利亚主要聚

焦中浅层低阶煤层气开发,仅在库玻盆地开展深层煤层气试验。库玻盆地二叠系的 Patchawarra 组煤岩最大埋深超 3 000 m,2007—2012 年,主要采用“滑溜水+低加砂量”压裂技术,生产效果较差;2013 年后采用更大规模的“交联剂+大加砂量”新压裂技术,单井日产量高达 $2.8\times 10^4\text{ m}^3$ ^[16];2018 年尝试钻探短水平段井 Jaws-1 井,因工程问题未能在煤层中完井,最后侧钻在下部地层^[18],采用间接法压裂,产量未达到商业气流。总体来看,澳大利亚深层煤层气尚未能取得商业突破。

1.3 加拿大未能实现深层煤层气商业化开发

加拿大主要含煤盆地煤层气资源量为 $76\times 10^{12}\text{ m}^3$,阿尔伯塔盆地是最主要产区,盆地内发育的海陆过渡相煤层具有低煤阶、低含气量、煤岩致密、渗透率低、含水饱和度低的特点。加拿大煤层气勘探开发起步较晚,2000 年以前单井日产量在 $0.3\times 10^4\text{ m}^3$ 水平;2003 年后优化钻完井方式,在 Fort Assiniboine 地区完钻 280 多口井,以多分支水平井为主,最高日产达到 $19.4\times 10^4\text{ m}^3$ ^[19];2010 年产量达到峰值($92\times 10^8\text{ m}^3$),后受北美非常规天然气发展影响,投资逐年降低,2022 年产量递减至 $44\times 10^8\text{ m}^3$ 。

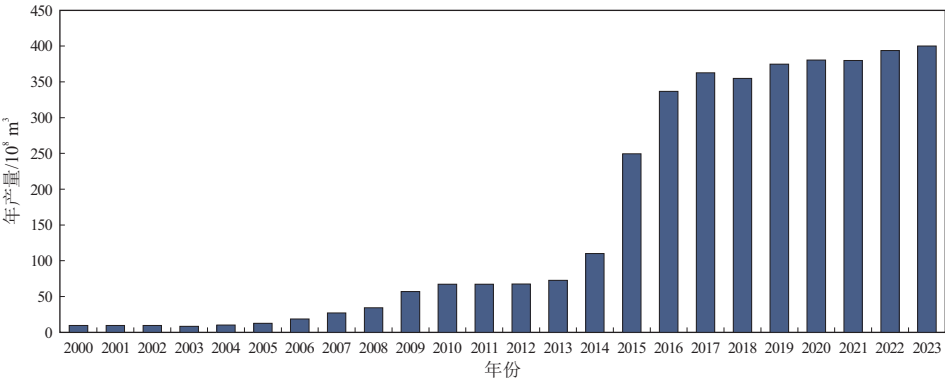


图 2 澳大利亚煤层气历年产量

Fig.2 Annual production of coalbed methane in Australia

2 我国深层煤层气勘探开发进展

我国煤层气资源量位居世界第三位,根据自然资源部新一轮全国油气资源评价成果^[10],我国埋深 2 000 m 以浅的煤层气地质资源量约为 $30.05 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中 1 500~2 000 m 深层煤层气资源量占全国煤层气资源量的 31.5%,埋深大于 2 000 m 的深层煤层气地质资源量为 $40.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。可见,我国煤层气资源大量赋存在中深部和深部煤层中,开发潜力巨大。2021 年以来,随着地质理论的突破和工程技术进步,借鉴水平井体积压裂经验,我国突破煤层气 1 500 m 深度禁区,在鄂尔多斯盆地大宁—吉县、大牛地、临兴—神府区块接连取得深层煤层气重大勘探成果。截至 2023 年底,我国煤层气累计探明储量超 $5\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,煤层气产量达 $117.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 3),暂居世界第三位,其中深层煤层气产量占比超 10%,我国煤层气产业已经实现跨越式发展。

2.1 鄂尔多斯盆地成为我国深层煤层气生产基地

鄂尔多斯盆地二叠系—石炭系及侏罗系中发育海陆过渡相和陆相深层煤层气,深层煤层气资源最为丰富,约为 $28 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[20],资源占比 56%,先后发现大吉、大牛地、神府 3 个储量超 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大气田,新增探明储量超 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为我国第一大深层煤层气生产基地。

鄂尔多斯盆地太原组 8 号煤率先实现深层煤层气突破^[21]。中石油在大吉区块部署的水平井 J6-7 平 01 井实现自喷生产,最高日产气 $10.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,累计提交探明储量 $2\,213 \times 10^8 \text{ m}^3$;2024 年大吉气田深层煤层气日产气量突破 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$,成为我国首个具备 $150 \times 10^4 \text{ t}$ 油气当量年生产能力的煤层气田。中石化在大牛地地区部署的 YM1HF 井试获峰值日产 $10.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,18 个月累产

超 $3\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$,展现了良好的勘探开发前景,提交预测储量 $1\,227 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。中海油提出致密气与煤层气“互补式”“立体式”勘探理念,在临兴—神府区块部署深煤 1 号,埋深 1 998 m,日产量为 $(6 \sim 8) \times 10^4 \text{ m}^3$,发现神府深层煤层气田,探明地质储量 $1\,100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2 四川盆地深层煤层气勘探取得积极进展

四川盆地深层煤层气勘探主要集中在川东南地区龙潭组,多为薄煤层,目前深层煤层气勘探研究尚处于攻关阶段。2023 年,中石化在南川区块部署了直井 Y2 井,埋深 1 976 m,试获峰值日产 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,实现了深层煤层气直井勘探突破,初步落实南川煤层气资源量 $504 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[22]。中石油在川东南部署实施了 2 口效果较好的典型井,其中 JT-1 井垂深 3 141 m,水平段 719 m,测试日产 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3$; NT-1H 井垂深 4 075 m,煤层厚度 3.2 m,水平段长 1 000 m,测试日产 $8.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[23],进一步证实川南薄煤层具有一定开发潜力。

2.3 准噶尔、塔里木盆地具备深层煤层气勘探潜力

准噶尔盆地深层煤层气勘探研究工作主要集中在淮南、准东和淮北地区,发育侏罗系西山窑组、八道湾组两套有利煤层。深层煤层气勘探研究尚处于初期。2020 年,中石油在白家海凸起断背斜构造以西山窑组为目的层部署风险探井 CT-1H 井,测试最高日产气量为 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,稳定日产气量为 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,实现了五彩湾地区深层煤层气勘探突破^[24]。中国地质调查局在塔里木盆地北缘侏罗系部署的 BC-1 井,钻遇煤层累厚 57 m,平均解吸含气量 $6.33 \text{ m}^3/\text{t}$,表明中低阶深层煤层气资源潜力较大、勘探开发前景良好。

3 国内外深层煤层气产业发展的启示

3.1 厘清资源富集规律是攻关突破的基础

深层煤层气赋存状态多样,除水中极少量的溶解态以外,大部分以吸附状态赋存于微孔表面,或以游离状态赋存于宏孔及裂缝中,其中吸附态甲烷以充填吸附方式存在于 1.5 nm 以下微孔中,以单层吸附方式存在于 1.5 nm 以上孔隙表面;游离态甲烷主要赋存于宏孔及裂缝中。

深层煤层含气性、可压性等实验结果表明,在地应力与温压耦合作用下,煤储层含气性及力学特性等随深度的变化规律,存在一临界深度带^[25],当煤层吸附气量超过极大值所对应的临界深度带后,温度的负效应导致部分气体分子处于活跃状态而不被煤岩基质吸附,游离气含量逐渐增加并赋存于

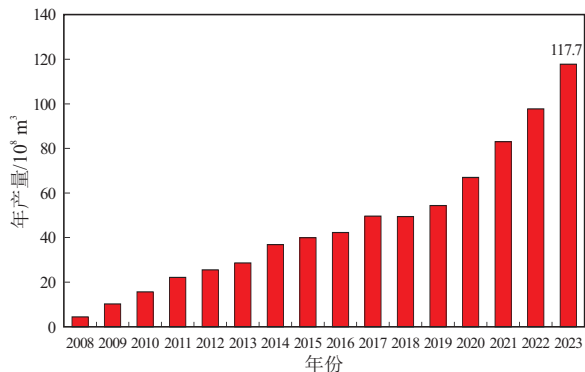


图 3 我国煤层气历年产量

Fig.3 Annual production of coalbed methane in China

割理裂隙或微裂缝中,煤层总含气量增高。游离气的新认识为深层煤层气高产稳产提供了理论基础,大牛地、大宁一吉县等地区深层煤层气井表现出见气快、自喷生产、产量高等特征。持续加强基础研究,开展鄂尔多斯、四川、准噶尔等盆地不同煤阶富集高产机理研究攻关,重点解析含煤盆地成煤、生烃、储集、赋存、可压特征,揭示深层煤层气富集高产主控因素,建立不同区块深层煤层气富集高产模式。

3.2 工程技术进步是规模建产的核心

以往深层煤层气一般采用直井“排水采气”开发方式,见气周期长、气量衰减快、单井产量低等问题长期制约着深层煤层气开发。利用长水平井体积压裂技术构建人造缝网,形成长期稳产的有效渗流通道,产气效果显著提升。中石油在大宁一吉县区块不同微构造单元采用不同压裂方案,微幅褶皱单元采用大排量(大于 15 m³/min)+大砂量(每段加砂量大于 450 m³)模式;微幅单斜单元采用适度规模压裂(排量 10~15 m³/min,砂量 300~350 m³)模式^[26]。中石化目前基于“控液增砂”储层改造技术思路,通过优化支撑剂粒径组合和提高加砂规模以增大有效改造体积,形成深部煤层大规模体积压裂技术。中海油临兴—神府气田形成“密切割+大排量(15~20 m³/min)+大砂量(200~500 m³)+组合支撑剂+变黏滑溜水(1~30 mPa·s 自由切换)”的极限体积压裂技术体系^[26]。工程技术进步为深层煤层气规模建产提供了有力支撑,目前深层煤层气开发呈现初产高(多口井日试获 15×10⁴ m³)、稳产周期长(YM1HF 井稳产超 550 d,见图 4)、单井 EUR 高[(5 000~6 000)×10⁴ m³]]的特征。

3.3 一体化运行是效益开发的关键

探索实施生产管理一体化运行模式对深层煤层气效益建产具有重要意义。开展钻井压裂工厂化施工,构建“勘探开发、地质工程、钻井压裂、地面地下”一体化管理机制,实现各类资源共享,设备材料重复利用,有效提高钻井压裂效率,合理控制单井建井成本,实现降本增效。同时,参照页岩气合

作开发管理新模式,推广以甲方为主导的钻井“日费制”,将投资与单井 EUR 挂钩,构建甲乙双方利益共同体,目前已在页岩气开发中实践且效果显著,钻井周期平均缩短 32.92%,单井成本平均下降 31%,拓展了提质增效的新途径,具有一定借鉴意义。

3.4 产业扶持政策是激发动能的保障

美国、澳大利亚及我国均通过出台财税政策、市场开放、科研资助等多方面产业扶持政策,降低油气企业开发成本,拓宽市场空间,推动技术创新。总的来看,产业扶持政策可以有效激励煤层气企业加大勘探开发投资和工作量,促进本国煤层气产业健康发展。

3.4.1 财税支持政策

美国于 1980 年出台《能源意外获利法》,对非常规天然气实施税收豁免,煤层气税收政策优惠期长达 23 年,美国煤层气生产企业每生产 1 m³煤层气能获得 2.82 美分的政府补贴^[27]。2005 年美国出台《能源政策法案》,进一步加大煤层气财税补贴力度,2007 年全美非常规油气生产补贴达 45 亿美元。我国财政部自 2008 年起,给予煤层气开采利用补贴 0.3 元/m³,支持煤层气等非常规天然气开发利用,同时持续实施增值税先征后返、所得税优惠税率等优惠政策^[28];财政补贴政策极大地激励了煤层气开发企业的积极性,促进了煤层气储产量快速增长。

3.4.2 矿权保护政策

澳大利亚于 1997 年出台《石油法》,授权油气企业在石油煤炭矿权区进行煤层气开发,并通过垂向划分矿权以避免矿权冲突,明确煤层气的开采权和所有权受到法律保护。同时,澳大利亚政府规定了煤炭开采时的强制性瓦斯含量标准,促使企业通过先采气、后采煤的方式降低煤矿瓦斯风险。部分煤层气资源丰富的地方政府,如昆士兰州政府还规定天然气发电量必须占到本州总发电量的 13%,进而推动煤层气勘探开发投资大规模增加^[29]。我国自然资源部于 2023 年出台《关于深化矿产资源管理改革若干事项的意见》,完善煤层气矿权管理,支持煤层气与其他矿产资源兼探兼采,进一步实现了煤层气资源的有效动用(图 5)。

4 促进产业高质量发展的建议

4.1 加大我国不同类型深层煤层气勘探力度

我国深层煤层气资源禀赋差异大,目前主要围绕鄂尔多斯盆地厚层中高阶深层煤层气取得阶段性突破,四川盆地多薄煤层、准噶尔盆地中低阶深层煤层气勘探尚处于早期,亟需系统研究资源规

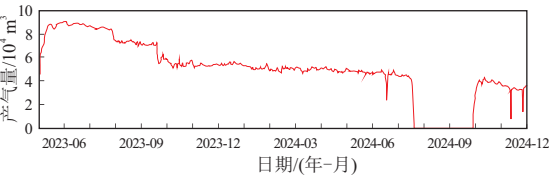


图 4 鄂尔多斯盆地大牛地区块 YM1HF 井生产曲线
Fig.4 Production curve of well YM1HF in Daniudi block, Ordos Basin

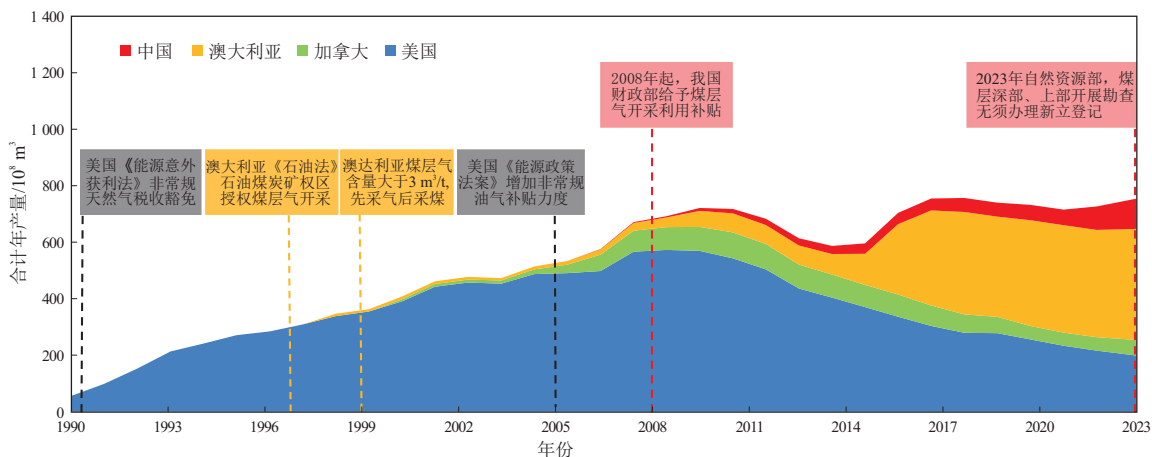


图 5 世界主要煤层气生产国扶持政策出台情况

Fig.5 Implementation of support policies in major coalbed methane-producing countries

模、有利区带、储产量增长潜力等关键问题。因此,建议在全国“十四五”资源评价工作基础上,聚焦鄂尔多斯盆地、四川盆地、准噶尔盆地和渤海湾盆地重点潜力区域,加大深层煤层气勘探力度,进一步评价不同类型深层煤层气资源潜力,结合地质条件分析厘清深层煤层气资源分布规律,落实一批重点区带与层系,力争实现不同类型深层煤层气勘探新突破,推动我国深层煤层气增储上产迈上新台阶。

4.2 加强勘探开发理论技术关键问题攻关

理论技术创新是煤层气快速发展的关键,建议聚焦深层煤层气富集高产机理和“卡脖子”问题开展技术攻关。加强基础地质理论研究,厘清不同地质条件下深层煤层气富集规律认识,完善深层煤层气分类分级选区评价技术,特别是针对川东南地区多薄煤层攻关形成基于地震测井的甜点预测技术,支撑战略选区和目标优选。持续攻关优化钻完井技术,由于煤层厚度薄、易碎、易垮、泥质夹矸广泛发育,目前水平井钻井普遍具有钻遇率低、稳定性差、周期长的问题,建议攻关煤层长裸眼水平井钻井技术,升级钻井液体系配方,优化钻具组合及导向工具,实现优快钻井。加快推进压裂技术降本增效,针对煤岩塑性强、割理裂隙发育、地应力复杂的特征,迭代升级段簇设计、支撑剂粒径组合、压裂液体系,形成差异化压裂工艺,提升储层改造效果,积极探索返排液有效利用、CO₂压裂等降本增效技术。

4.3 加快我国煤层气标准化体系建设

标准化工作是实现产业规范、健康、可持续发展的重要基础和保障,当前我国煤层气行业发布国家标准与各类行业标准共 107 项^[30],主要围绕浅层煤层气开采编制,而针对深层煤层气勘探开发领域的技术标准基本空白,一定程度上制约了深层煤

层气商业化发展进程。建议充分发挥标准化工作对煤层气产业发展的基础性、战略性和引领性作用,建立健全具有深层煤层气特色的标准体系,加快制订一批地质实验、选区评价、甜点解释、经济评价、工程工艺、安全环保等方面的技术标准规范,为深层煤层气高质量勘探与效益开发提供依据。

4.4 加大产业扶持政策支持力度

提高深层煤层气中央财政补贴力度。非常规天然气补贴政策实行以来,油气企业累计获补贴金额超百亿元,极大缓解了油气企业开发过程中的现金流压力,促进了效益边际资源的有效动用。近年来煤层气补贴单价由初期的 0.3 元/m³下降至 0.1 元/m³水平(图 6),建议适当提高深层煤层气补贴标准,由现行的超额梯级奖补办法调整为按照“难采多补”的差异化补贴方式,给予深层煤层气更高补贴系数。

加强煤层气矿权政策保障。目前深层煤层气优质后备阵地不足的问题逐渐突出,油气企业现有煤层气勘查矿权面积仅占油气矿权总面积的3%,

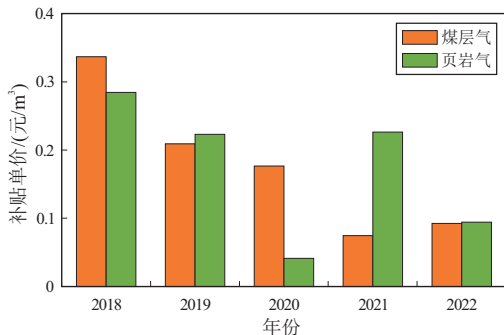


图 6 2018—2022 年我国页岩气、煤层气中央财政补贴单价

Fig.6 Central government subsidy unit price for shale gas and coalbed methane in China from 2018 to 2022

大多数深层煤层气有利区与已有矿权叠置,按照当前矿权退减政策,至 2025 年油气企业矿权退减面积超过 20%。建议自然资源部制定科学合理的探矿权出让发展规划,加大整装区块供给力度,优化矿权出让流程,在“招拍挂”环节增加“技术标”权重,鼓励具有技术资质保障的企业获取矿权,保障煤层气增储上产的资源空间。

5 结论

(1)对标国内外深层煤层气资源禀赋与勘探开发现状,明确国外主要以中低阶浅层煤层气开发为主,国内聚焦中高阶深层煤层气勘探开发,并在鄂尔多斯盆地、四川盆地、准噶尔盆地取得积极进展,累计探明储量超过 $3\,000\times10^8\text{ m}^3$,率先实现深层煤层气商业化开发,产量位居世界第三。

(2)对比总结国内外煤层气产业发展历程与勘探开发经验认为,富集规律认识的突破、工程技术的进步、一体化管理模式的运行及产业扶持政策的出台是煤层气产业快速发展的重要因素。

(3)为推动我国深层煤层气产业高质量发展,建议加大我国不同类型深层煤层气勘探力度,进一步加强勘探开发理论技术关键问题攻关,加快完善我国煤层气标准化体系建设,持续加大财税补贴、矿权保障等产业扶持政策的支持力度。

利益冲突声明/Conflict of Interests

作者申宝剑是本刊编委会成员,未参与本文的同行评审或决策。
Author SHEN Baojian is an Editorial Board Member of this journal, and he did not take part in peer review or decision making of this article.

作者贡献/Authors' Contributions

张嘉琪、刘曾勤完成国内外勘探开发现状总结,并梳理对我国产业发展的启示;申宝剑指导煤层气产业意见的研究和稿件整体完善;赵石虎、陈新军、叶金诚完成国内外文献及数据调研。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

ZHANG Jiaqi and LIU Zengqin summarized the current status of CBM exploration and development worldwide, and provided insights into China's industry development. SHEN Baojian guided the research on suggestions for coalbed methane industry and refined the manuscript. ZHAO Shihu, CHEN Xinjun, and YE Jincheng conducted literature research and collected data. All authors have read the final version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

[1] 徐凤银,聂志宏,孙伟,等.鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气高效开发理论技术体系[J].煤炭学报,2024,49(1):528-544.
XU Fengyin,NIE Zhihong,SUN Wei,et al.Theoretical and technological system for highly efficient development of deep coalbed methane in the eastern edge of Erdos Basin[J].Journal of China Coal Society,2024,49(1):528-544.

[2] 张群,降文萍,姜在炳,等.我国煤矿区煤层气地面开发现状及技术研究进展[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):139-158.
ZHANG Qun,JIANG Wenping,JIANG Zaibing,et al.Present situation and technical research progress of coalbed methane surface development in coal mining areas of China[J].Coal Geology & Exploration,2023,51(1):139-158.

[3] 郭旭升,胡周全,李双建,等.深层—超深层天然气勘探研究进展与展望[J].石油科学通报,2023,8(4):461-474.
GUO Xusheng,HU Zongquan,LI Shuangjian,et al.Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra-deep strata[J].Petroleum Science Bulletin,2023,8(4):461-474.

[4] 刘洪林,王红岩,李景明.利用碳封存技术开发我国深层煤层气资源的思考[J].特种油气藏,2006,13(4):6-9.
LIU Honglin,WANG Hongyan,LI Jingming.Technology of CO₂ sequestration for developing deep coal bed methane in China[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2006,13(4):6-9.

[5] 李国欣,张水昌,何海清,等.煤岩气:概念、内涵与分类标准[J].石油勘探与开发,2024,51(4):783-795.
LI Guoxin,ZHANG Shuichang,HE Haiqing,et al.Coal-rock gas:concept,connotation and classification criteria[J].Petroleum Exploration and Development,2024,51(4):783-795.

[6] 周德华,陈刚,陈贞龙,等.中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望[J].天然气工业,2022,42(6):43-51.
ZHOU Dehua,CHEN Gang,CHEN Zhenlong,et al.Exploration and development progress,key evaluation parameters and prospect of deep CBM in China[J].Natural Gas Industry,2022,42(6):43-51.

[7] 秦勇,申建,王宝文,等.深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J].石油学报,2012,33(1):48-54.
QIN Yong,SHEN Jian,WANG Baowen,et al.Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane[J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(1):48-54.

[8] 申建.论深部煤层气成藏效应[J].煤炭学报,2011,36(9):1599-1600.
SHEN Jian.CBM-reservoiring effect in deep strata[J].Journal of China Coal Society,2011,36(9):1599-1600.

[9] 邹才能,翟光明,张光亚,等.全球常规—非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J].石油勘探与开发,2015,42(1):13-25.
ZOU Caineng,ZHAI Guangming,ZHANG Guangya,et al.Formation,distribution,potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources[J].Petroleum Exploration and Development,2015,42(1):13-25.

[10] 秦勇,申建,史锐.中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J].煤炭学报,2022,47(1):371-387.
QIN Yong,SHEN Jian,SHI Rui.Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J].Journal of China Coal Society,2022,47(1):371-387.

[11] 龙胜祥,李辛子,叶丽琴,等.国内外煤层气地质对比及其启示[J].石油与天然气地质,2014,35(5):696-703.
LONG Shengxiang,LI Xinzi,YE Liqin,et al.Comparison and enlightenment of coalbed methane geology at home and abroad[J].Oil & Gas Geology,2014,35(5):696-703.

[12] 徐凤银,侯伟,熊先钺,等.中国煤层气产业现状与发展战略[J].

- 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 669-682.
- XU Fengyin, HOU Wei, XIONG Xianye, et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 669-682.
- [13] 孙钦平, 赵群, 姜馨淳, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 65-76.
- SUN Qinqing, ZHAO Qun, JIANG Xinchun, et al. Prospects and strategies of CBM exploration and development in China under the new situation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 65-76.
- [14] AYERS JR W B. Coalbed methane in the Fruitland Formation, San Juan Basin, western United States: a giant unconventional gas play[C]//HALBOUTHY M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999. Tulsa: AAPG Memoir, 2003: 159-188.
- [15] 郭广山, 柳迎红, 吕玉民. 中国深部煤层气勘探开发前景初探[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(1): 125-128.
- GUO Guangshan, LIU Yinghong, LYU Yumin. Preliminary exploration and development prospects on deep coalbed methane in China[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1): 125-128.
- [16] CAMAC B A, BENSON J, CHAN V, et al. Cooper Basin deep coal—the new unconventional paradigm; deepest producing coals in Australia[J]. ASEG Extended Abstracts, 2018, 2018(1): 1-7.
- [17] LUKE H, BRUECKNER M, EMMANOUIL N. Unconventional gas development in Australia: a critical review of its social license[J]. The Extractive Industries and Society, 2018, 5(4): 648-662.
- [18] 冯宁, 彭小龙, 王祎婷, 等. 澳大利亚煤层气开发现状综述[J]. 中国煤层气, 2019, 16(1): 44-47.
- FENG Ning, PENG Xiaolong, WANG Yiting, et al. Review on CBM exploration and production in Australia[J]. China Coalbed Methane, 2019, 16(1): 44-47.
- [19] LANGENBERG C W, BEATON A, BERHANE H. Regional evaluation of the coalbed-methane potential of the Foothills/ Mountains of Alberta, Canada[J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 65(1/2): 114-128.
- [20] 门相勇, 娄钰, 王一兵, 等. 中国煤层气产业“十三五”以来发展成效与建议[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 173-178.
- MEN Xiangyong, LOU Yu, WANG Yibing, et al. Development achievements of China's CBM industry since the 13th Five-Year Plan and suggestions[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 173-178.
- [21] 何发岐, 董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力: 以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 277-285.
- HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: a case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277-285.
- [22] 姚红生, 陈贞龙, 何希鹏, 等. 深部煤层气“有效支撑”理念及创新实践: 以鄂尔多斯盆地延川南煤层气田为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 97-106.
- YAO Hongsheng, CHEN Zhenlong, HE Xipeng, et al. “Effective support” concept and innovative practice of deep CBM in South Yanchuan Gas Field of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 97-106.
- [23] 郭涛, 金晓波, 武迪迪, 等. 川东南南川区块龙潭组深部煤层气成藏特征及勘探前景[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 60-67.
- GUO Tao, JIN Xiaobo, WU Didi, et al. Accumulation characteristics and exploration prospects of deep coalbed methane in the Longtan Formation of the Nanchuan block on the southeastern margin of the Sichuan Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 60-67.
- [24] 郭绪杰, 支东明, 毛新军, 等. 准噶尔盆地煤岩气的勘探发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 38-49.
- GUO Xujie, ZHI Dongming, MAO Xinjun, et al. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 38-49.
- [25] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1791-1811.
- QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1791-1811.
- [26] 李勇, 徐凤银, 唐书恒, 等. 鄂尔多斯盆地煤层(岩)气勘探开发进展及发展方向[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 63-79.
- LI Yong, XU Fengyin, TANG Shuheng, et al. Progress and development direction of coalbed methane (coal-rock gas) exploration and development in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 63-79.
- [27] 李登华, 高媛, 刘卓亚, 等. 中美煤层气资源分布特征和开发现状对比及启示[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 252-261.
- LI Denghua, GAO Xuan, LIU Zhuoya, et al. Comparison and revelation of coalbed methane resources distribution characteristics and development status between China and America[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 252-261.
- [28] 吴裕根, 门相勇, 娄钰. 我国“十四五”煤层气勘探开发新进展与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(1): 1-13.
- WU Yugen, MEN Xiangyong, LOU Yu. New progress and prospect of coalbed methane exploration and development in China during the 14th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(1): 1-13.
- [29] 张彦钰. 国外煤层气开发利用经验对我国煤层气产业发展的启示[J]. 科技情报开发与经济, 2013, 23(17): 150-152.
- ZHANG Yanyu. The enlightenment of foreign countries' experiences in the development and utilization of CBM (coal-bed methane) on the development of China's CBM industries[J]. SCI-TECH Information Development & Economy, 2013, 23(17): 150-152.
- [30] 降文萍, 张培河, 刘娜娜, 等. 我国煤层气标准体系构建[J]. 煤炭工程, 2021, 53(8): 1-6.
- JIANG Wenping, ZAHNG Peihe, LIU Nana, et al. Construction of CBM standard system in China[J]. Coal Engineering, 2021, 53(8): 1-6.