

引文：周立宏，熊先钺，李勇，等. 深层煤层(岩)气革命性突破及关键理论与技术[J]. 天然气工业, 2025, 45(5): 17-30.
ZHOU Lihong, XIONG Xianyue, LI Yong, et al. Revolutionary breakthroughs and key theories and technologies in deep coalbed methane development[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(5): 17-30.

深层煤层(岩)气革命性突破及关键理论与技术

周立宏^{1,2} 熊先钺^{1,2} 李勇³ 刘洪涛^{1,2} 丁蓉^{1,2}
张雷² 王峰^{1,2} 王玉斌² 李昀³ 许卫凯³

1. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司 2. 中石油煤层气有限责任公司
3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院

摘要：中国能源具有“相对富煤、贫油、少气”的禀赋特征，发展深层煤岩气产业是立足能源禀赋、保障国家能源安全的重要战略举措。为此，基于鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深层煤岩气的战略突破和勘探开发实践，系统梳理了浅层煤层气—深层煤岩气产业发展历程，总结了深层煤岩气的成藏理论与关键技术，展望了深层煤岩气的资源潜力和突破的革命意义。研究结果表明：①中国煤层气—煤岩气发展经历了前期探索、技术引进与开发尝试、先导试验与重点攻关、浅层煤层气建产与规模开发、深层煤岩气勘探突破与效益开发5个阶段；②深层煤岩气指以煤作为储集岩且处于煤炭开采经济技术极限深度以下煤层中的天然气，理论认识上突破了浅层煤层气以吸附气为主、含气量存在峰值深度、深部孔缝系统几乎不发育、可压性差、长期缓慢排水降压生产等传统观点，创新构建了深层煤岩气富集成藏理论；③关键技术突破包括地质工程一体化选区评价、“五位一体”井网优化设计、水平井优快钻井、缝网体积改造和全生命周期采气工艺，形成了深层煤岩气勘探开发技术序列，使单井平均最终可采气量(EUR)由 $5\,594 \times 10^4 \text{ m}^3$ 提升至 $6\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ；④中国深层煤岩气在多个盆地广泛发育，形成大面积连续富集区，具备规模化开发潜力。结论认为，深层煤岩气革命的本质是科技革命，突破传统煤层气的认知，通过创新理论和关键技术，实现了煤层气产业由投资拉动向创新驱动转变，并进一步由科技创新向产业创新转变，同时促进了煤向多元化清洁能源转型，引领和推动了全球煤岩气理论突破、技术革新和产业发展。

关键词：深层煤岩气；煤层气；成藏机理；关键技术；开发技术；科技创新；煤岩气革命

中图分类号：TE122.1 **文献标识码：**A **DOI：**10.3787/j.issn.1000-0976.2025.05.002

Revolutionary breakthroughs and key theories and technologies in deep coalbed methane development

ZHOU Lihong^{1,2}, XIONG Xianyue^{1,2}, LI Yong³, LIU Hongtao^{1,2}, DING Rong^{1,2},
ZHANG Lei², WANG Feng^{1,2}, WANG Yubin², LI Yun³, XU Weikai³

(1. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100095, China; 2. PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100028, China; 3. College of Geosciences & Surveying Engineering, China University of Mining and Technology - Beijing, Beijing 100083, China)

Natural Gas Industry, Vol.45, No.5, p.17-30, 5/25/2025. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: China's energy resource endowment is characterized by relatively abundant coal, limited oil, and scarce natural gas. Developing the deep coal rock gas industry is a strategic initiative to ensure the national energy security under the current resource context. Based on the strategic breakthroughs and exploration and development practices of deep coal rock gas in the Daning-Jixian block of the Ordos Basin, this paper systematically reviews the evolution of the shallow coalbed methane and deep coal rock gas industry, presents the accumulation theories and key technologies in deep coal rock gas development, and proposes the resource potential and revolutionary implications of deep coal rock gas. The following results are obtained. First, China's coalbed methane and coal rock gas industry has experienced five stages: preliminary exploration; technology introduction and trial development; pilot testing and critical technological advancement; commercial production and large-scale development of shallow coalbed methane; and exploration breakthrough and beneficial development of deep coal rock gas. Second, deep coal rock gas refers to natural gas occurring in coal that serves as reservoir rock, below the depth limits of coal mining economically and technically. The theories of deep coal rock gas accumulation have been innovatively established beyond the traditional insights on shallow coalbed methane which is believed to be with adsorbed gas in dominance, peak gas content at a specific depth, poor development of pore-fracture system in deep strata, low reservoir fracturability, and prolonged production by slow water drainage for pressure reduction. Third, breakthroughs in key technologies include an integrated geology-engineering approach to target selection, a "five-in-one" optimized well pattern design, optimal and fast horizontal well drilling, fracture network (volumetric) stimulation, and full-lifecycle gas production techniques. These advancements create a series of exploration and development technologies for deep coal rock gas, which have increased the average estimated ultimate recovery (EUR) per well from $5\,594 \times 10^4 \text{ m}^3$ to $6\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$. Fourth, deep coal rock gas is widely distributed across multiple basins within China, forming extensive continuous accumulation zones with a significant potential of large-scale development. In conclusion, the deep coal rock gas revolution is fundamentally a technological revolution. It is far beyond traditional insights on coalbed methane, and achieved the transformation of the coalbed methane industry from investment-driven growth to innovation-driven development through innovative theories and key technologies, and from technological innovation to industrial innovation. Moreover, it has promoted the transformation of coal into diversified clean energy, leading and driving the breakthroughs in deep coal rock gas theories, technological innovations and industrial development.

Keywords: Deep coalbed methane; Coalbed methane; Accumulation mechanism; Key technology; Development technology; Technological innovation; Coal rock gas revolution

基金项目：中国石油天然气集团有限公司科技项目“全国陆上煤层气资源评价”(编号：2023YQX20117)。

作者简介：周立宏，1968年生，正高级工程师，博士，本刊编委；现任中石油煤层气有限责任公司执行董事、党委书记，主要从事页岩油、煤层(岩)气等油气勘探开发理论与技术研究、生产管理工作。地址：(100028)北京市朝阳区太阳宫南街23号。ORCID: 0000-0001-9323-4479. E-mail: zhoulh@petrochina.com.cn

通信作者：李勇，1988年生，教授，博士研究生导师，本刊青年编委；主要从事煤层气和非常规油气方面的教学和科研工作。地址：(100083)北京市海淀区学院路丁11号。ORCID: 0000-0001-8859-156X. E-mail: liyong@cumb.edu.cn; cugbliyong@gmail.com

0 引言

在全球能源结构转型背景下,非常规天然气作为传统化石能源向新能源过渡的战略支点,催生了新一轮能源技术革命^[1]。煤层气是与煤炭共生的非常规天然气,兼具保障煤矿安全、提供清洁能源和增强环境保护三重属性^[2-3]。20世纪70年代,美国能源部启动了非常规天然气开采项目,并在圣胡安盆地、粉河盆地和黑勇士盆地率先实现了1 500 m以浅的中低煤阶煤层气开发^[4-6]。中国煤层气勘探开发和探索始于20世纪70年代,1990年之后独立或联合外资进行了钻探尝试^[7],2015年前后建成了位于沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘2个千亿立方米级煤层气田,初步实现了浅层煤层气的规模开发,但“储层禀赋”与“技术适配”间的矛盾仍制约中国煤层气开发效率,导致产业发展相对缓慢。2015年和2020年地面煤层气年产量分别为 $44 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $67 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[8-9],随着深层煤层气勘探突破,2023年和2024年分别达到 $117 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $138 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2019年以来,随着鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深层煤岩气效益开发,突破了1 500 m以深煤岩气的思想观念、理论认识和开发技术禁区,煤层气产业迎来革命性变化^[7,10]。

美国通过水平井钻井和压裂技术突破实现了页岩油气革命^[11-12]。2009年,《Nature》发表社评提到了页岩革命(The Shale Revolution)一词^[13],页岩气开发极大地缓解了美国天然气供应不足;同年,美国年产气量达 $6 240 \times 10^8 \text{ m}^3$,超过俄罗斯成为全球第一大天然气生产国,并且扭转了原油总产量下降的趋势^[14]。2019年,美国油气总产量 $22.6 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量,首次超过国内油气总消费量 $22.2 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量,实现能源独立,深刻改变了全球能源格局^[14-16]。北美页岩油气革命本质是科技革命,突破了页岩不能作为油气储层的传统油气理论束缚,通过技术创新实现水平井多段压裂技术突破,进而实现产能突破^[16-18]。

北美页岩油气开发的成功范例为深层煤岩气开发提供了重要启示——技术创新对资源禀赋劣势的资源开发具有决定性作用。2019年以来,中国石油经过探索发现、深化攻关、技术突破、规模建产4个阶段,历时5年形成了以“大吉3-7向2井首口深层煤岩气发现井”“吉深6-7平01井首口深层煤岩气规模效益产量突破井”“世界首个埋深超2 000 m、超千亿立方米深层煤岩气储量”和“世界首个 $200 \times 10^4 \text{ t}$ 油当量深层煤岩气田”为代表的战略突破,在全球范围内率先实现了深层煤岩气的规模开发,标志着中

国进入深层煤岩气勘探开发新阶段^[4]。从目前产气量规模来看,深层煤岩气尚未达到对中国天然气工业的革命性改变,但是从资源禀赋、开发技术和发展前景来看,已具备引领革命性变化的条件。为了进一步推动深层煤岩气产业的高效开发与规模化应用,笔者基于鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深层煤岩气的战略突破和勘探开发实践,系统梳理了浅层煤层气—深层煤岩气产业的发展历程,提出深层煤岩气成藏理论与关键技术,展望深层煤岩气资源潜力和发展方向,以期推动深层煤岩气革命性飞跃。

1 中国从煤层气到深层煤岩气产业发展历程

煤层(岩)气作为重要的非常规天然气资源,其产业化进程深刻反映着中国能源结构调整与技术创新的时代轨迹。中国从煤层气到深层煤岩气产业历经30余年的发展,呈现出矿井治理—资源评价—试验突破—产业发展的阶段性演进历程^[19]。1989年以前以煤矿井下瓦斯抽采为主,地面开发仅处于零星探索阶段^[20]。1989—2002年,开展了煤层气资源初步评价,并引进国外技术进行了开发尝试,为后续发展奠定基础^[19-21]。2003—2008年,煤层气勘探开发进入先导性试验阶段,国家设立煤层气开发示范工程专项,推动重点技术攻关和试验开发^[22]。2009—2019年步入产业化初级阶段,勘探开发规模逐步扩大,技术装备体系持续完善,政策支持和市场化进程加快,形成了沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘两大产业基地^[7,19]。2019年至今,进入深层煤岩气效益开发阶段^[23-24],实现了以“二元富集”和大规模体积压裂为代表的勘探开发理论技术突破,为产业革命性发展奠定了坚实基础(图1)。

1.1 前期探索(1989年之前)

中国煤层气地面开发探索始于1966年,抚顺矿务局老虎台煤矿钻探了第一口地面煤层气井,以失败告终^[19]。1976年,丰城矿务局实施2口地面煤层气井,日产气量超过 $1 000 \text{ m}^3$,是中国最早勘探成功的煤层气井^[20]。20世纪80年代以前,抚顺、阳泉、焦作、丰城、白沙等地区开展了地面开发试验,累计钻探41口地面井,并在部分井口进行了压裂试验^[19]。然而由于技术限制,均未取得生产效果。20世纪80年代末,中国首次将煤层气勘探开发研究纳入“八五”科技攻关项目,为后续研究奠定了基础^[19]。



图1 中国煤层（岩）气产业发展关键节点及典型区块开发历程图

1.2 技术引进与开发尝试（1989—2002年）

1989年12月，原能源部在沈阳召开首次“煤层气开发研讨会”，标志着中国煤层气地面勘探开发正式启动^[19-20]。李明潮等^[25]划分了煤层气赋存类型，提出水压圈闭和气压圈闭2种类型。张新民等^[26]对中国煤层气赋存区和潜力区进行了评价，初步总结了我国煤层气控气规律，并预测全国煤层气资源量为 $30 \times 10^{12} \sim 35 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。1991年，在联合国开发计划署资金支持下，在鄂尔多斯盆地柳林地区实施中国首个煤层气试验井组（7口井），其中煤柳5井最高日产气量 $7\,050 \text{ m}^3$ ，标志着鄂尔多斯盆地煤层气初步探索成功^[27-28]。1992年，晋城矿务局与中美能源公司在沁水盆地潘庄地区合作开展煤层气生产试验，开创了高变质无烟煤生产煤层气先例^[29]。其中潘2井日产气量峰值超 $1.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，是沁水盆地第一口具有工业价值的煤层气井^[24]。

1996年，国务院正式批准成立中联煤层气有限责任公司，联合外资企业在鄂尔多斯盆地东缘优选了保德、三交、大宁—吉县和韩城等煤层气勘探开发有利区块^[19]。1995—2001年，中国煤田地质总局、中联煤层气有限责任公司、中国石油勘探开发研究院廊坊分院煤层气事业部等在陕西省韩城，辽宁省铁法、阜新，山西省阳泉、寿阳、晋城等累计实施32口试验井，获得气井12口，单井日产气量为 $600 \sim 8\,000 \text{ m}^3$ ^[19-20,30-31]。2001—2002年，受资金投入缩减等影响，勘探进入调整期，对外合作停滞，未能形成规模化开发^[19-20]。

1.3 先导试验与重点攻关（2003—2008年）

2003年，沁水盆地枣园井组和辽宁省阜新刘家

井组开始供气，标志着煤层气产业开始小规模商业开发^[32-33]。其中，枣园井组日产气量 $2.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，并建成日发电量为400 kW煤层气发电站，刘家井组向阜新市日供气量 $1.60 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2004年12月，国家发改委批准立项“国家沁南高技术产业化示范工程”，同步制定煤层气开发利用规划，推动煤层气产业化。2005年底，沁南潘河区块压裂投产40口井，日产气量 $5.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，并建成加气站、集输站和地面管网等，成为全球首个高煤阶煤层气商业化生产示范区基地^[7,24]。同期，晋城煤业集团在沁南潘庄区块实施150口生产井，至2005年底约100口生产井的日产气量达 $20.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[21]。

2005年，原国土资源部组织开展了全国煤层气资源评价，42个主要含煤层气盆地（群）埋深2 000 m以浅的地质资源量 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，1 500 m以浅的可采资源量 $10.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[27]。2007年，财政部出台《关于煤层气（瓦斯）开发利用补贴的实施意见》，进一步推动煤层气产业发展。2008年9月，中国石油成立煤层气公司，在沁水盆地、鄂尔多斯盆地和华北地区多个重点区块进行煤层气勘探开发。

1.4 浅层煤层气建产与规模开发（2009—2019年）

“十一五”规划中期之后（2008年以后），中国实施《大型油气田及煤层气开发》国家科技重大专项，标志着煤层气产业进入中浅层煤层气规模开发阶段，并形成了具有中国特色的煤层气勘探开发技术系列：①发展了适用于高煤阶储层特点的勘探开发技术^[34]；②形成了适用低压、多井、复杂地形条件的地面集输技术^[35-36]；③提出了以“稳定、连续、长期”为核心

理念的排采工艺体系^[4]。该阶段成功建成了位于沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘 2 个千亿立方米级煤层气田,形成了覆盖不同煤阶储层的开发格局^[7,24]。高煤阶煤开发规模持续扩大,沁水盆地南部潘庄、樊庄、郑庄及鄂尔多斯盆地东缘延川南、韩城等气田稳定生产,并且在四川盆地南部筠连建成了南方首个具有商业开发价值的煤层气田^[35];中煤阶煤也取得了规模化开发,保德、柳林、三交等气田实现产能突破;低煤阶煤在准噶尔盆地南缘阜康气田实现小型商业化开发,并在二连盆地吉尔嘎朗图实现了勘探突破。

1.5 深层煤岩气勘探突破与效益开发(2019 年至今)

2019 年后,鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块多口水平井产气突破,标志着深层煤岩气开发由探索性开发向规模化生产转型(图 1)。首口 2 000 m 以深煤层试验井大吉 3-7 向 2 井“投产即见气、上产速度快”,日产气量迅速升至 5 791 m³^[30]。2021 年前后,采用超大规模体积压裂技术,试验 12 口井,每段加砂量由 200 m³ 增至 400 m³,11 口丛式井最高日产气量超 2.00×10⁴ m³^[37-38]。吉深 6-7 平 01 并于 2021 年 4 月投产,初期日产气量 10.10×10⁴ m³,累计产气量已超 2 500×10⁴ m³,实现深层煤岩气开发重大突破^[38-39]。准噶尔盆地白家海地区的彩探 1H 井也取得了煤岩气突破^[40-41]。截至 2024 年底,鄂尔多斯盆地探明大宁—吉县、神府和纳林河—米脂北等 3 个千亿立方米级深层煤岩气田新增探明储量 3 179×10⁸ m³,累计探明储量突破 5 000×10⁸ m³,占盆地煤层气探明总量的 70%^[32,42-43]。2024 年底,大宁—吉县气田日产气量破 700×10⁴ m³,106 口井的单井累产气量超千万立方米,单井最高累计产气量达 6 500×10⁴ m³,建成了中国首个百万吨油气当量深层煤岩气田^[27,30]。

2 煤岩气成藏理论及关键技术突破

中国国家能源局发布《2024 年全国油气勘探开发十大标志性成果》指出,“深层煤岩气产量仅用 3 年时间快速提升至 25×10⁸ m³,成为天然气增产新亮点”^[44]。2019 年以来,中石油煤层气有限责任公司针对深层煤岩气“实际含气量不清楚、顶底板含水性不明朗、深层煤储层没有成熟的改造办法”等困难,逐步探索明确深层煤岩气可采性,系统开展地质评价与工程技术试验,成功构建深层煤岩气富集成藏理论,形成了效益开发关键技术系列,具备了深层煤岩气革命的条件。深层煤岩气革命是传统煤层气勘探开发理念、理论和技术的系统性变革,在国际上

首次实现了 2 000 m 以深的深层煤岩气的规模开发。

2.1 理论认识突破

煤岩气是以煤作为储集岩且处于煤炭开采经济技术极限深度以深煤层中的天然气^[30]。相比浅层煤层气,深层煤岩气埋藏深度大,垂向压实程度高,游离气含量高,割理/裂隙中地层水少,开发前期以自喷生产为主(图 2)。浅层煤层气一般以吸附气为主,割理/裂隙中常含地层水,生产中需要排水降压。深层煤岩气勘探突破了传统理念上的勘探禁区,推翻了深煤层不具备经济开发价值的传统观点和理论认识,包括:①揭示了深层游离气与吸附气共存的普遍特征,突破了煤层以吸附气为主的传统赋存理论^[45],发现了广泛分布的富含游离气的深层煤岩气藏;②发现深层煤岩含气量与埋深(已有数据至 3 000 m)总体正相关的特征^[38],突破了含气量存在峰值深度的传统观念^[46],为煤岩气往深层拓展提供了理论支持;③揭示了深层煤岩割理/裂缝同样发育的特征,突破了传统深层强压实作用下孔缝系统几乎不发育的认识^[47],明确了深层煤岩仍发育优质储层;④发现深层煤体结构良好、脆性指数高,突破了深煤层可压性差的传统认知,为深层煤岩有效压裂提供理论支持^[48];⑤揭示深层煤层束缚水饱和度高、压裂开井快速产气的特征^[49],突破了浅层煤层气长期排水降压的生产模式,为深层煤岩气高效排采提供新的理论依据。上述理论认识突破为煤岩气高效开发提供了理论依据和技术支撑。

2.2 关键技术突破

深层煤岩气产业初步形成了涵盖富集成藏理论、有利区优选技术、开发优化技术、钻井工程技术、压裂工程技术与排采集输技术 6 个方面的理论技术系列,覆盖煤岩气选区评价、压裂改造和生产优化全过程(图 3)。

2.2.1 地质工程一体化有利区优选技术

为实现储量高效动用,大宁—吉县区块建立了涵盖 3 类 11 项指标的深层煤岩气地质工程一体化有利区优选技术体系(表 1),为先导试验及 10×10⁸ m³/a 产能建设方案提供指导。在储层资源条件方面,一类 A 区煤层结构为一分型和二分型,煤层厚度大于 6 m,含气量大于 22 m³/t,煤体以原生结构煤为主;一类 B 区煤层结构也为一分型和二分型,煤层厚度为 4~6 m,含气量为 19~22 m³/t,煤体为原生结构煤;二类区煤层结构为三分型,煤层厚度小于 4 m,含气量小于 19 m³/t,煤体为碎裂煤与碎粒煤。在构造保存条件方

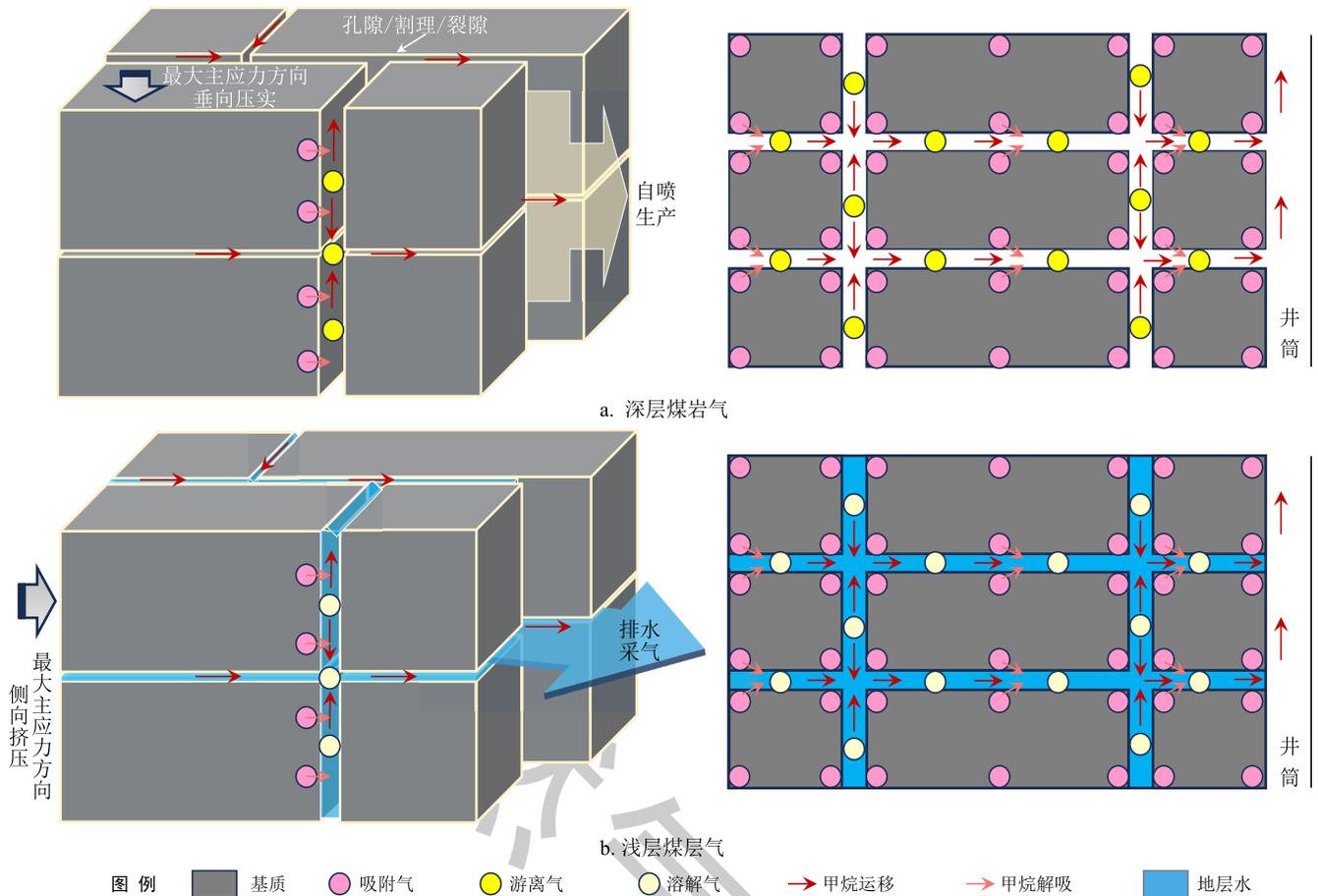


图 2 深层煤层气和浅层煤层气赋存—产出模式图

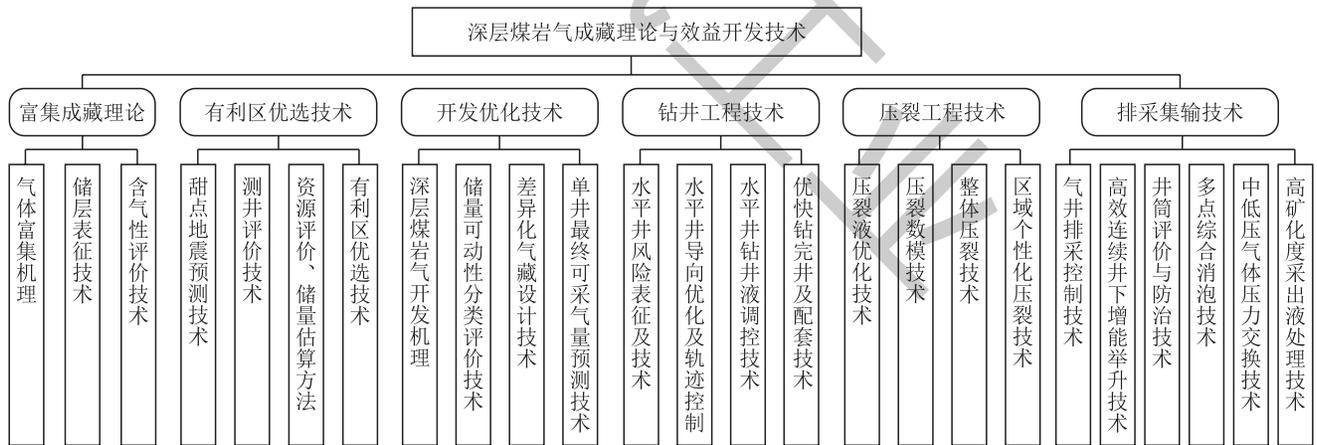


图 3 深层煤层气勘探开发理论与配套技术框图

面，一类 A 区位于构造平缓区，煤层埋深大于 1 900 m，顶板石灰岩厚度大于 10 m，底板泥岩厚度大于 8 m；一类 B 区位于低凸区、低凹区，埋深及盖层厚度与一类 A 区相同；二类区主要位于斜坡区，煤层埋深小于 1 900 m，顶板石灰岩厚度小于 10 m，底板泥岩厚度小于 8 m。在工程改造条件方面，一类 A、B 区煤层裂缝较发育，煤层与顶底板应力差大于 6 MPa，水平两向主应力差大于 4 MPa；二类区煤层裂缝不发

育，煤层与顶底板应力差小于 6 MPa，水平两向主应力差小于 4 MPa^[50]。

2.2.2 “五位一体”井网优化设计技术

综合考虑地应力场、天然裂缝场、人工裂缝场、井型方位及井网井距，形成了深层煤层气“五位一体”井网优化设计技术，并提出了“井距、排距、井台距、缝网间距”四距井位部署方法，构建了“区域大缝网场体系”，将井网缝网弥合程度由 75% 提升

表 1 深层煤岩气有利区评价参数及标准体系表

评价参数	一类 A 区	一类 B 区	二类区	
储层资源条件	煤层结构	一分型、二分型	三分型	
	煤层厚度 /m	> 6	4 ~ 6	< 4
	含气量 /($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	> 22	19 ~ 22	< 19
	煤体结构	原生结构煤		碎裂煤、碎粒煤
构造保存条件	构造	平缓区	低凸区、低凹区	斜坡区
	埋深 /m	> 1 900	> 1 900	< 1 900
	顶板石灰岩厚度 /m	> 10	> 10	< 10
	底板泥岩厚度 /m	> 8	> 8	< 8
工程改造条件	裂缝发育情况	裂缝较发育	裂缝相对发育	裂缝不发育
	煤层与顶底板应力差 /MPa	> 6	> 6	< 6
	水平两向主应力差 /MPa	> 4	> 4	< 4

至 95%^[39,51]。地应力场研究明确煤层主应力方向和大小, 预测裂缝扩展规律; 天然裂缝场研究揭示原生裂缝的走向、密度及分布信息; 通过压裂形成人工裂缝场增强裂缝导流能力; 井型方位优化确保最佳钻井方位与布局; 合理井网井距设计避免井间干扰, 提高采收率^[52-53]。通过“区域大缝网场体系”构建, 打破局部缝网孤岛, 形成互连裂缝网络, 显著提升了开采效果。在合理井间距设计中, 考虑压裂压力干扰, 综合压裂裂缝监测、示踪剂监测、生产动态分析和经济分析结果, 在天然裂缝发育区考虑 350 ~ 400 m, 以 350 m 为主, 在天然裂缝不发育区考虑 300 ~ 350 m, 以 300 m 为主 (表 2)。

表 2 深层煤岩气井网优化设计参数表

评价方法	合理井间距 /m	
	天然裂缝发育区	天然裂缝不发育区
类比页岩气	300	400
压裂压力干扰	350	300
压裂裂缝监测	330 ~ 450	330 ~ 450
示踪剂监测法	350	350
生产动态分析法	372	307
经济判断法	≥ 300	≥ 300
综合判断法	350 ~ 400 m、 350 m 为主	300 ~ 350 m、 300 m 为主

2.2.3 水平井优快钻井技术

针对深层煤岩气开发中的地层漏失、煤层垮塌及气侵严重等技术难题, 攻关形成了井身结构设计、钻井工具配套、钻井除气配套和钻井液优化配套 4 大

技术体系, 提高了井身稳定性, 降低了煤层垮塌与漏失风险, 优化了钻井效率, 使水平段复合钻进比例超 90%, 机械钻速提高 22%, 固井质量合格率达 100% (表 3)。依托地质工程一体化精准导向技术, 入靶前通过精细地质对比、逐层优化, 结合实时数据动态调整, 实现 100% 中靶率; 入靶后形成“钻头定位、倾角预测、井斜匹配、预判预警”4 大技术, 确保轨迹光滑、钻头钻速提升。构建了“一建模、两阶段、三结合、四分析、五调整”的“12345”工作法指导施工, 使 157 口水平井煤层钻遇率达 98%, 其中 90 口井钻遇率 100%。创新了深煤水平井组钻井优化设计, 通过大平台 / 工厂化集约建井、深表层二开井身结构、“六段制双二维 + 小三维”井眼轨道优化等技术, 降低钻扭矩 10% 以上, 提升井眼稳定性。攻关形成了钻井除气与钻井液优化技术, 建立深层煤岩气钻井提速模板, 将钻井周期由 51.5 d 缩至 30.1 d, 降幅 41.6%, 水平段机械钻速提升 40.9%, 显著提高钻井效率。

表 3 深层煤岩气水平井钻井技术列表

技术系列	功能与效果
井身结构设计技术	优化二开井身结构, 封固上部漏失层, 为下部地层快钻提供条件, 井下复杂度减少 11%
钻井工具配套技术	优化 PDC 钻头, 提高定向能力; 合理使用水力振荡器, 降低托压影响; 优选双扶钻具组合, 优化钻压和转速, 实现水平段轨迹控制复合钻进比例超过 90%
钻井除气配套技术	优化钻井液脱气性能, 提高地面井控设备及除气设备配置, 煤层段机械钻速提高 22%
钻井液优化配套技术	开展井眼清洁优化、改进双凝双密度水泥浆体系, 水平段固井质量合格率 100%

2.2.4 缝网体积改造技术

深层煤岩气早期开发中尝试了酸压和常规压裂改造，并取得了一定的产量突破，但由于改造规模和压裂效果的局限，产量未达到预期，且性价比低，未能充分挖掘资源潜力^[52-54]。2021 年，为了实现更充分的储层改造，压裂技术经历了 3 大转变：①从基质酸压转为体积压裂，强调对储层的整体性改造和扩

大改造体积；②从“压得开”到“压得碎”，注重改造煤层裂缝，提高裂缝的复杂性和导流能力；③从“多造缝”到“多造有效缝”，更加注重裂缝的有效性和均匀分布，优化裂缝网络的导流性能（图 4）。在此基础上，探索形成大规模体积压裂工艺，通过增加压裂液排量、加砂量及支撑剂的使用比例，形成了超大规模的支撑裂缝，显著提升了压裂效果^[48,55]。

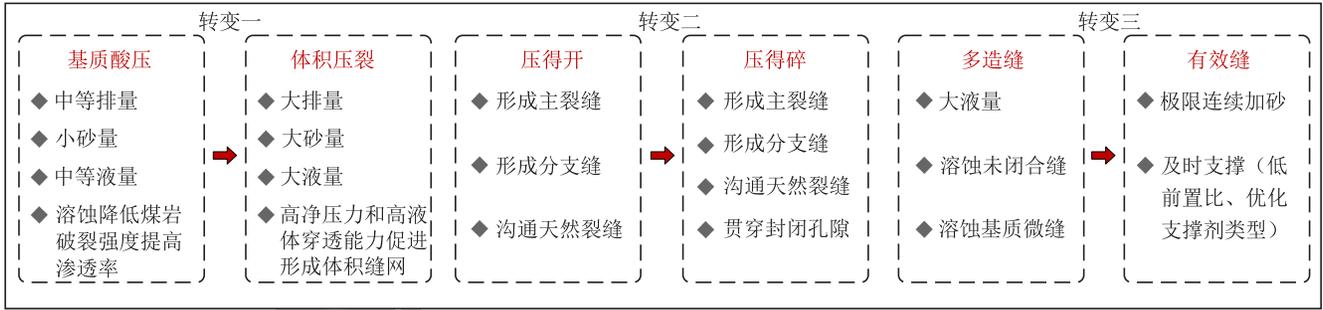


图 4 深层煤岩气压裂技术转变模式图

为了满足深层煤岩吸附气对裂缝高导流能力的需求，以构建均匀扩展、有效弥合的改造体积（SRV）系统为目标，深层煤岩压裂技术经历了 3 个阶段的优化，形成了“缝网弥合、缝网复杂、缝网有效”的工艺和技术参数，从“大规模体积压裂工艺”和“超大规模缝网压裂工艺 1.0”向“精益充分弥合缝网 2.0”转变（表 4）。工艺方法也从“大规模、强支撑”转向“停泵转向+黑金靶体压裂”，通过增加施工排量，保持适中加砂强度，提高段长、簇数和砂比，总体实现了更大规模和更有效的储层改造。

表 4 深层煤岩气缝网体积改造技术发展阶段统计表

技术参数	川南页岩气体积压裂（对标）	大规模体积压裂工艺（2021 年）	超大规模缝网压裂工艺 1.0（2022 年）	精益充分弥合缝网 2.0（2023 年至今）
工艺方法	大砂量、大液量	大规模、强支撑	超大规模、更强支撑	停泵转向+黑金靶体压裂
施工排量 / (m ³ ·min ⁻¹)	12 ~ 18	18	18 ~ 20	18 ~ 23
加砂强度 / (t·m ⁻³)	1.9 ~ 3.9	6.3	8.3	6.5 ~ 7.5
平均段长 /m	60 ~ 90	88	95	80 ~ 100
单段簇数/簇	6 ~ 13	3	3 ~ 5	4 ~ 6
平均砂比	10.0%	16.0%	16.0%	18.0%

2.2.5 全生命周期采气工艺技术

基于深层煤岩气产出机理认识，考虑煤岩气产

出相关工艺参数，构建了全流程采气工艺框架^[56-57]（图 5）。依据各阶段工况参数分析，确定“延长自喷期”是实现效益开发的关键，通过配套采气工艺保持气井自喷，以实现地质工程一体化、延长稳产期、提高单井最终可采气量（EUR）。针对气液比变化导致的流态复杂及矿化度上升引发的结垢问题，通过实验研究流态和结垢机理，实现从机理分析到单工艺优化的技术体系，形成高效且适配性强的全生命周期复合采气工艺^[56-57]。在自喷和辅助排液阶段保持气井最优流态，减少积液程度；在人工举升阶段减缓结垢腐蚀速率，延长检泵周期。综合地质工程一体化、采气地面一体化和安全效益一体化，形成了深层煤岩气全生命周期采气工艺技术，实现了气井全生命周期连续稳定生产^[56-58]。

2.3 理论技术发展趋势

2.3.1 技术成熟度与未来发展

深层煤岩气已形成技术 1.0 版本，并正向 2.0 版本推进（表 5）。开发指标中，通过技术进步使首年气井产量递减率从 38.0% 降至 33.0%，单井 EUR 由 5 594 × 10⁴ m³，增至 6 000 × 10⁴ m³。关键工程指标中，平均水平段长由 1 204 m 增至 1 500 m，单趟钻井进尺由 641 m 增至 1 200 m，钻井周期由 32 d 下降至 30 d。

技术创新是一个不确定的发展过程，技术从雏形到成熟的时间周期和发展程度都难以预测^[59-62]。中国深层煤岩气发展正处于首次商业化示范阶段，总体技术逐渐成熟，市场需求逐渐稳定，初步具有一定

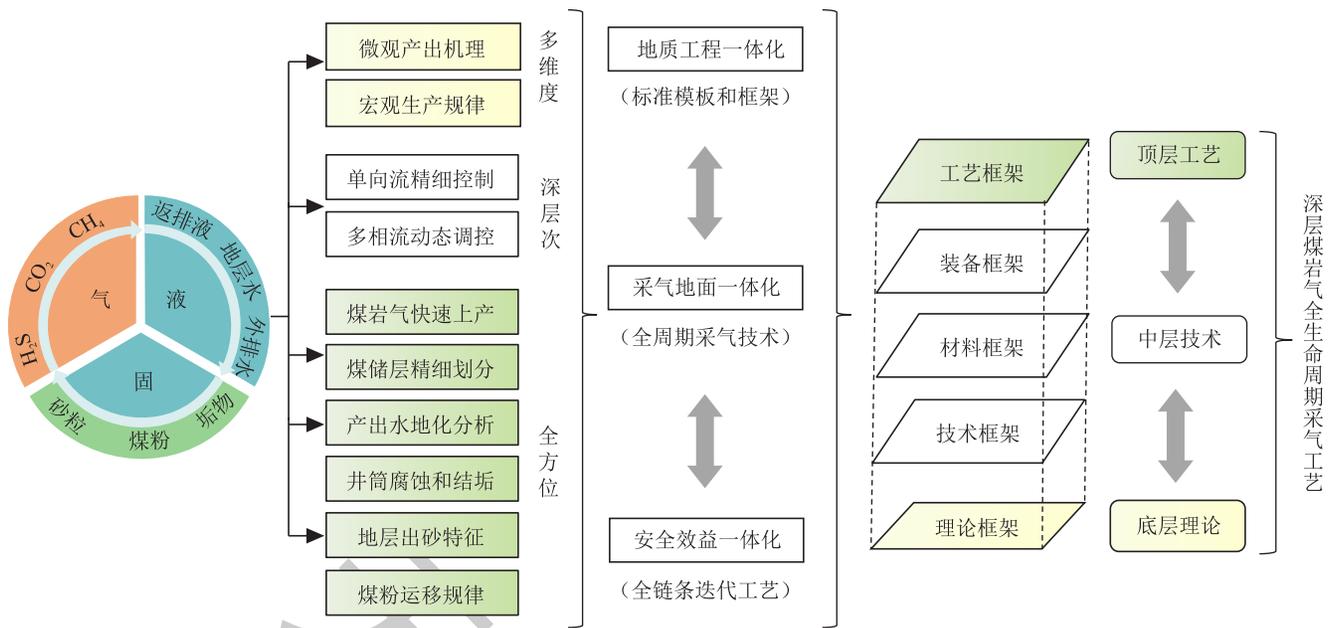


图 5 深层煤岩气全生命周期采气工艺技术体系图

表 5 深层煤岩气开发技术体系 1.0 版与 2.0 版关键指标统计表

类别	指标参数	技术 1.0	技术 2.0
开发指标	井型	水平井	水平井
	首年日产气量平均递减率	38.0%	33.0%
	单井 EUR/10 ⁴ m ³	5 594	6 000
	水平段长/m	1 204	1 500
	水平段一趟钻进尺/m	641	1 200
	水平段一趟钻比例	40.6%	80.0%
工程指标	钻井周期/d	32	30
	日压裂段数/段	2.3	6.0
	压裂周期/d	7.5	6.0
	连续供水能力/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	3.0	4.5
	电驱钻井比例	35.7%	60.0%
	电驱压裂比例	28.5%	60.0%
	中小型站场无人值守率	50.0%	80.0%
	气井自喷生产时间/d	187	240

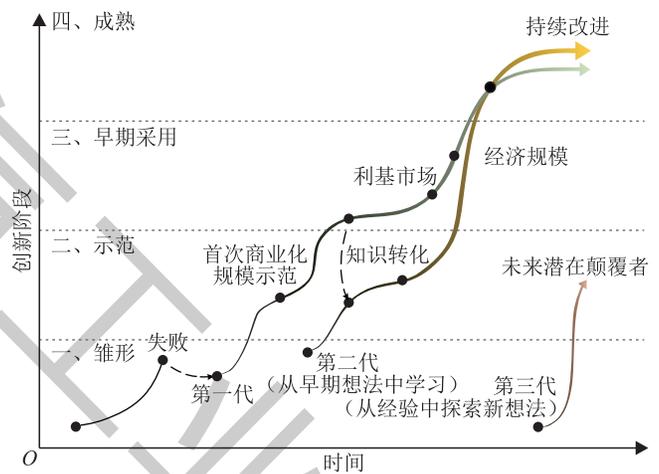


图 6 中国深层煤岩气技术发展阶段划分图

(资料来源: 据本文参考文献 [59,62], 有修改)

的经济规模(图 6)。未来需要进一步聚焦“增储上产、效益开发、节能环保”3 大方向, 提升探明储量、甜点钻遇率、水平井千米平均 EUR 和采收率等关键指标, 提高压裂液重复利用率, 优化地面集输单位能耗, 降低单位完全成本, 提升开发效益, 保障国家能源安全。

2.3.2 关键理论技术发展方向

2.3.2.1 深层煤岩气产业发展方向

深层煤岩气勘探开发推动了煤层气产业的跨越

式发展, 未来需要在以下 5 个方面重点推进: ①强化战略布局, 制定长远规划, 优化深层煤岩气资源勘探开发部署, 深化不同类型资源的协同开发, 确保产业可持续发展; ②推动全链条技术创新, 聚焦勘探、开采、储运等关键环节, 突破核心技术瓶颈, 推动技术集成创新与规模化应用, 提高开发效率; ③加强全生命周期管理, 强化气井长期监测, 优化开发模式, 提高采收率, 实现资源高效利用; ④促进全要素资源协同, 优化深层煤岩气产业链, 探索多方合作与市场化运营模式, 提升产业整体效益; ⑤推进全流程绿色智能发展, 深化环保技术应用, 优化污染控制, 实现深层煤岩气开发绿色高效与智能化发展。

2.3.2.2 深层煤岩气关键核心技术发展

深层煤岩气规模开发需要系统明确深层煤岩气成藏机理，优选有利区，优化开发设计，降低钻井成本，提升改造效益，优化排采技术，以期实现深层煤岩气高效开发（图 7）。在成藏机理方面，研究深层煤岩储层表征和含气性评价技术，深化深层煤岩气成藏理论，为勘探提供科学依据^[30,37,63-65]。在有利区优选方面，开展“甜点”地震预测与测井评价，形成精准的储量估算方法，优选有利区^[65]。在开发设计方面，研究开发机理与主控因素，形成开发单元划分方法，提出差异化气藏开发技术和 EUR 预测技

术，提高资源动用效率并降低成本。在优快钻井方面，开展水平井井筒风险评价，优化导向设计及轨迹控制，形成防漏、防塌、快脱气的综合低成本、高效率钻完井工艺。在增产改造方面，优化压裂技术及压裂液体系，满足成本控制与环保要求。在高效生产方面，研究科学排采控制方法和管控技术，研发高效、连续且可进行井底温压数据监测的举升工艺，注重井筒完整性评价与治理，配套多点综合消泡和分布式中低压气体压力交换技术，并针对高矿化度采出水进行处理，研究防腐防垢技术，确保长期稳定生产。

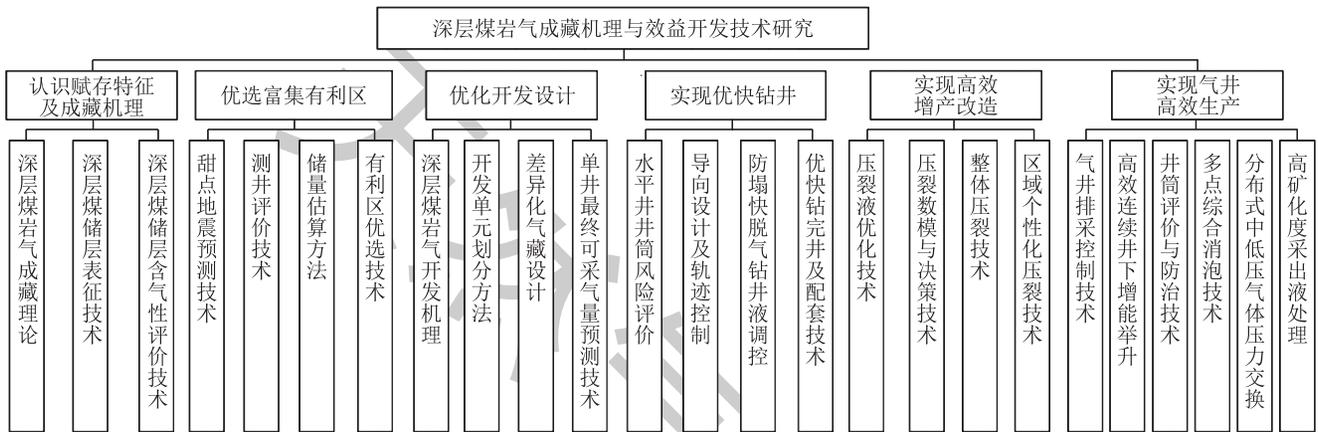


图 7 深层煤岩气关键理论技术体系攻关方向图

3 煤岩气资源潜力及革命意义

3.1 资源潜力

自 2019 年深层煤岩气勘探突破以来，鄂尔多斯盆地深层煤岩气勘探开发进展加速^[64-66]。2021 年，大吉 3-7 向 2 井区通过探明储量审查，成为中国首个大型煤岩气田^[3]。截至 2024 年 4 月，大宁一吉县区块探明储量达 $2.112 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，居全国首位^[67]。2023 年，山西组 5 号煤层勘探也取得战略突破，吉平 2H 井稳定日产气量 $5.20 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，已累计产气量 $1.624 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[68]。初步估算 5 号煤层资源量达 $6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。截至 2024 年，鄂尔多斯盆地新增三级储量 $2.00 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，探明储量达到 $5.967 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，深层煤岩气资源潜力可观。

除鄂尔多斯盆地，其他地区勘探亦取得突破^[66,69]。新疆彩探 1H 井日产气量 $5.70 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，吐哈油田柯新 1H 井测试含气量为 $17 \sim 25 \text{ m}^3/\text{t}$ ^[70]。四川盆地遂宁—綦江地区宁探 1H 井垂深 4 300 m，煤层厚度 2.2 m，地层压力系数为 2.2，最高日产气量 $8.30 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，

稳产日产气量 $3.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，已累计产气量超过 $400.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[71]；同时该盆地大安区块嘉探 1H 井突破 3 000 m 埋深，日产气量超 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，标志着深层煤岩气勘探在中国华北、西北和华南均获突破^[25]。

中国含煤盆地众多，成煤时代涵盖石炭纪—二叠纪、晚三叠世、早中侏罗世、早白垩世和古近纪、新近纪，深层煤岩气资源丰富^[60]。初步估算，全国 5 000 m 以浅煤岩气资源量超 $50 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，主要分布在 3 大克拉通盆地，其中，鄂尔多斯盆地为 $20 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，四川盆地为 $12 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，塔里木盆地近 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，其他盆地如吐哈盆地、准噶尔盆地、松辽盆地和渤海湾盆地为 $1.80 \times 10^{12} \sim 2.60 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 不等。预计 2030 年中国煤层（岩）气年产量有望超过 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。随着深层煤岩气的增储上产，中国煤层（岩）气产业有望超越美国和澳大利亚，成为世界上最大的煤层（岩）气生产国。

3.2 革命意义

《2050 年世界与中国能源展望（2019 版）》^[72] 预测，“2035 年中国天然气需求达 $6.100 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，届时国内

产气量约为 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 将有超过一半依赖进口”。英国石油公司预测在未来 15 年中国天然气对外依存度仍将持续增长, 2035 年左右达到 55%^[73]。深层煤岩气资源量丰富、稳产期长、效益优良, 其规模化开发可降低中国天然气对外依存度, 提升国内天然气自主供给能力。

中国共产党二十大报告提出“深入推进能源革命”“立足我国能源资源禀赋, 坚持先立后破”。深层煤岩气革命的本质是科技革命, 突破了传统煤层气理论认知, 通过理论创新和技术进步推动产业变革^[60,74-76]。深层煤岩气的技术变革也将推动长水平井、大型体积改造等技术在浅层煤层气开发中的应用, 提高单井产气量和采收率。此外, 其关键技术可与煤基能源开发结合, 助力煤炭地下气化、煤基气、煤基油、煤基氢等衍生能源发展, 促进煤岩从单一燃料向多元化清洁能源载体转型^[77-78]。深层煤岩气革命引领中国煤层气产业由投资拉动向创新驱动转变, 并进一步由科技创新向产业创新转变, 同时促进煤向多元化清洁能源转型, 推动全球煤岩气理论突破、技术革新和产业发展。

4 结论

1) 中国煤层(岩)气产业发展经历了前期探索、技术引进与开发尝试、先导试验与重点攻关、浅层煤层气建产与规模开发和深层煤岩气勘探突破与效益开发 5 个阶段。2019 年, 中国突破了 1 500 m 以深的深层煤岩气的理论和技术禁区, 推动深层煤岩气进入效益开发阶段。鄂尔多斯盆地大宁一吉县实现中国首个百万吨油气当量深层煤岩气田的战略突破, 标志着深层煤岩气产业开发由探索性开发向规模化生产转型, 迈入商业化示范阶段。

2) 深层煤岩气在煤岩气富集成藏理论、勘探开发关键技术方面均实现革命性突破, 推动传统煤层气产业科技革命。地质工程一体化有利区优选、“五位一体”井网优化设计、水平井优快钻井、缝网体积改造及全生命周期采气工艺等关键技术的突破, 为深层煤岩气革命奠定了技术基础。

3) 随着科学技术不断进步, 中国深层煤岩气开发效率和经济效益将持续提升, 煤岩气这一新型非常规天然气领域有望实现全球“领跑”。深层煤岩气革命有助于优化中国天然气产业结构, 推动煤岩向多元化清洁能源载体转型, 为绿色低碳能源发展提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 邹才能, 李士祥, 熊波, 等. 新质生产力下“能源绿色转型”革命及意义——兼论“能源三角”理论认识[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(6): 1395-1408.
ZOU Caineng, LI Shixiang, XIONG Bo, et al. Revolution and significance of "Green Energy Transition" in the context of new quality productive forces: A discussion on theoretical understanding of "Energy Triangle"[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(6): 1395-1408.
- [2] 李勇. 煤结构演化及燃料、原料和材料属性开发[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 3936-3951.
LI Yong. Coal structure evolution and its fuel, raw material and functional material properties development[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 3936-3951.
- [3] 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 115-130.
XU Fengyin, YAN Xia, LI Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 115-130.
- [4] 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 Xianyue, et al. The status and development strategy of coalbed methane industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 669-682.
- [5] WISE R L. Unconventional gas recovery program: METC/SP-79/8[R]. Morgantown: U.S. Department of Energy Morgantown Energy Technology Center, 1979.
- [6] 罗平亚, 朱苏阳. 中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1755-1763.
LUO Pingya, ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1755-1763.
- [7] 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 等. 复杂断陷盆地深层煤岩气地质特征、有利成藏因素及发育模式——以渤海湾盆地大港探区为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1665-1677.
ZHOU Lihong, CHEN Changwei, HAN Guomeng, et al. Geological characteristics, favorable accumulation factors, and developmental models of deep coal-rock gas in complex fault-bounded basins: A case study of the Dagang exploration area in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1665-1677.
- [8] 中华人民共和国国家能源局. 天然气发展“十三五”规划[EB/OL]. (2017-06-07)[2025-01-26]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201706/t20170607_1196794.html.
National Energy Administration. The 13th Five-Year Plan (2016-2020) of natural gas development[EB/OL]. (2017-06-07)[2025-01-26]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201706/t20170607_1196794.html.

- [9] 李玲. 煤层气成我国天然气增产重要补充 [N]. 中国能源报, 2024-02-05(03).
LI Ling. Coalbed methane becomes an important supplement to China's natural gas production increase[N]. China Energy News, 2024-02-05(03).
- [10] 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.
- [11] 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 oil and gas revolution and fundamental geological theories of shale oil and gas, as well as tight oil and gas[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(6): 695-706.
- [12] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响 [J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [13] NATURE. The shale revolution[J]. Nature, 2009, 460(7255): 551-552.
- [14] 孙龙德, 刘合, 朱如凯, 等. 中国页岩油革命值得关注的十个问题 [J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2007-2019.
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2007-2019.
- [15] 张岩峰, 周志, 宋腾, 等. 中美页岩气勘探开发历程、地质特征和开发利用条件对比及启示 [J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1687-1701.
ZHANG Junfeng, ZHOU Zhi, SONG Teng, et al. Comparison of exploration and development history, geological characteristics and exploitation conditions of shale gas in China and the United States and its enlightenment[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1687-1701.
- [16] 张福祥, 李国欣, 郑新权, 等. 北美页岩革命时代带来的启示 [J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 26-39.
ZHANG Fuxiang, LI Guoxin, ZHENG Xinquan, et al. Enlightenment from the post shale revolution era in North America[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 26-39.
- [17] Energy Information Administration. Short-term energy outlook[R]. Washington: US Energy Information Administration, 2023.
- [18] US Energy Information Administration. US crude oil and natural gas proved reserves, year-end 2016[R]. Washington DC: Energy Information Administration, 2018.
- [19] 孙茂远. 坚定不移依靠科技进步发展煤层气——论我国煤层气产业发展之一 [N]. 中国能源报, 2013-12-23(14).
SUN Maoyuan. Unswervingly relying on scientific and technological progress to develop coalbed methane: On the development of coalbed methane industry in China[N]. China Energy News, 2013-12-23(14).
- [20] 孙茂远. 扎根煤层气——心系煤炭人 [N]. 中国能源报, 2012-10-08(16).
SUN Maoyuan. Rooted in coalbed methane and caring for coal people[N]. China Energy News, 2012-10-08(16).
- [21] 叶建平. 中国煤层气勘探开发进展综述 [J]. 地质通报, 2006, 25(9): 1074-1078.
YE Jianping. Advances in exploration and development of coalbed methane in China: A review[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9): 1074-1078.
- [22] 叶建平. 中国煤层气勘探开发及其科技进步历程回顾与思考 [J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(1): 114-127.
YE Jianping. China's CBM exploration and production and associated technological advancements: A review and reflections[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1): 114-127.
- [23] 杨帆, 李斌, 王昆剑, 等. 深部煤层气水平井大规模极限体积压裂技术——以鄂尔多斯盆地东缘临兴区块为例 [J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 389-398.
YANG Fan, LI Bin, WANG Kunjian, et al. Extreme massive hydraulic fracturing in deep coalbed methane horizontal wells: A case study of the Linxing block, eastern Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 389-398.
- [24] 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.
- [25] 李明潮, 王绳祖, 雷崇利, 等. 阜新盆地王营水动力圈闭裂隙型气藏的形成机制 [J]. 天然气工业, 1999, 19(5): 17-21.
LI Mingchao, WANG Shengzu, LEI Chongli, et al. Formation mechanism of the fractured gas reservoir in Wangying hydrodynamic trap in Fuxin Basin[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(5): 17-21.
- [26] 张新民, 张遂安, 钟玲文, 等. 中国的煤层甲烷及资源开发前景 [J]. 陕西煤炭技术, 1992(3): 60-61.
ZHANG Xinmin, ZHANG Sui'an, ZHONG Lingwen, et al. Coalbed methane and its resource development prospects in China[J]. Shaanxi Coal Technology, 1992(3): 60-61.
- [27] 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.
- [28] 王红岩, 李贵中, 李景明, 等. 中国煤层气储层的特点和富集 [C]// 第五届国际煤层气论坛暨第一届中日煤炭技术研讨会. 廊坊: 中石油廊坊分公司, 2005: 84-90.
WANG Hongyan, LI Guizhong, LI Jingming, et al. Characteristics and enrichment of coalbed methane reservoirs in China[C]//In Proceedings of the 5th International Symposium on CBM/CMM

- in China & The First Sino-Japan Workshop on Coal Technology. Langfang: PetroChina Langfang Branch, 2005: 84-90.
- [29] 贺天才, 王保玉, 田永东. 晋城矿区煤与煤层气共采研究进展及急需研究的基本问题[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1779-1785. HE Tiancai, WANG Baoyu, TIAN Yongdong. Development and issues with coal and coal-bed methane simultaneous exploitation in Jincheng mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1779-1785.
- [30] 周立宏, 熊先钺, 丁蓉, 等. 煤层气内涵、富集机理及实践意义[J]. 天然气工业, 2025, 45(3): 1-15. ZHOU Lihong, XIONG Xianyue, DING Rong, et al. Connotation, enrichment mechanism and practical significance of coal-rock gas[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(3): 1-15.
- [31] 王红岩. 煤层气富集成藏规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005. WANG Hongyan. The law of coalbed methane enrichment and accumulation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [32] 刘亚姣, 张晶, 颜敏. 阜新市刘家区煤层气开发利用现状[J]. 中国煤层气, 2013, 10(3): 23-25. LIU Yajiao, ZHANG Jing, YAN Min. Current status of coalbed methane development and utilization in Liujia district of Fuxin City[J]. China Coalbed Methane, 2013, 10(3): 23-25.
- [33] 高风, 惠小勇, 吴锦瑜. 我国陆采煤层气首次实现商品化[N]. 中国矿业报, 2003-11-27. GAO Feng, HUI Xiaoyong, WU Jinyu. China's onshore coal seam gas achieves commercialization for the first time[N]. China Mining News, 2003-11-27.
- [34] 梁兴, 单长安, 李兆丰, 等. 山地煤层气勘探创新实践及有效开采关键技术——以四川盆地南部筠连煤层气田为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 107-129. LIANG Xing, SHAN Chang'an, LI Zhaofeng, et al. Exploration innovation practice and effective exploitation key technology of mountain coalbed methane: Taking the Junlian coalbed methane field in southern Sichuan Basin as an example[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 107-129.
- [35] 朱庆忠. 沁水盆地高煤阶煤层气高效开发关键技术与实践[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 87-96. ZHU Qingzhong. Key technologies and practices for efficient development of high-rank CBM in the Qinshui Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 87-96.
- [36] 孟凡华, 马文峰, 刘红霞, 等. 沁水盆地煤层气田地面集输技术现状与展望[J]. 天然气工业, 2018, 38(5): 118-124. MENG Fanhua, MA Wenfeng, LIU Hongxia, et al. CBM ground gathering and transportation technologies in the Qinshui Basin: Status and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(5): 118-124.
- [37] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 深部(层)煤层气成藏模式与关键技术对策——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 30-42. XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Deep (layer) coalbed methane reservoir forming modes and key technical countermeasures: Taking the eastern margin of Ordos Basin as an example[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 30-42.
- [38] 陈世达, 汤达祯, 侯伟, 等. 煤储层流体特征、聚气主控因素及富气模式——以鄂尔多斯盆地中东部上古生界为例[J/OL]. 石油勘探与开发. (2025-01-25)[2025-01-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2360.TE.20250120.1346.002.html>. CHEN Shida, TANG Dazhen, HOU Wei, et al. Fluid characteristics, main controlling factors of gas accumulation, and gas enrichment patterns in coal reservoirs: A case study of the Upper Paleozoic in the central and eastern Ordos Basin[J/OL]. Petroleum Exploration and Development. (2025-01-25)[2025-01-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2360.TE.20250120.1346.002.html>.
- [39] 江同文, 熊先钺, 金亦秋. 深部煤层气地质特征与开发对策[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1918-1930. JIANG Tongwen, XIONG Xianyue, JIN Yiqiu. Geological characteristics and development countermeasures of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1918-1930.
- [40] 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.
- [41] 兰浩, 杨兆彪, 仇鹏, 等. 新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气勘探开发进展及启示[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 13-22. LAN Hao, YANG Zhaobiao, QIU Peng, et al. Exploration and exploitation of deep coalbed methane in the Baijiahai uplift, Junggar Basin: Progress and its implications[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 13-22.
- [42] 李勇, 徐立富, 张守仁, 等. 深煤层含气系统差异及开发对策[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 900-917. LI Yong, XU Lifu, ZHANG Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 900-917.
- [43] 吴奇, 胥云, 张守良, 等. 非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 706-714. WU Qi, XU Yun, ZHANG Shouliang, et al. The core theories and key optimization designs of volume stimulation technology for unconventional reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 706-714.
- [44] 国家能源局. 2024 年全国油气勘探开发十大标志性成果[EB/OL]. (2025-01-20)[2025-01-26]. <https://www.nea.gov.cn/20250120/f16a9ad91ce8459d9fc03d1d2869a588/c.html>. National Energy Administration. 10 landmark achievements in national oil and gas exploration and development in 2024[EB/OL]. (2025-01-20)[2025-01-26]. <https://www.nea.gov.cn/20250120/f16a9ad91ce8459d9fc03d1d2869a588/c.html>.
- [45] 刘大锰, 刘正帅, 蔡益栋. 煤层气成藏机理及形成地质条件研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 1-16. LIU Dameng, LIU Zhengshuai, CAI Yidong. Research progress on accumulation mechanism and formation geological conditions of coalbed methane[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 1-16.

- [46] 陈刚, 秦勇, 胡宗全, 等. 不同煤阶深煤层含气量差异及其变化规律 [J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 274-279.
CHEN Gang, QIN Yong, HU Zongquan, et al. Variations of gas content in deep coalbeds of different coal ranks[J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 274-279.
- [47] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践 [J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1764-1780.
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1764-1780.
- [48] 安琦, 杨帆, 杨睿月, 等. 鄂尔多斯盆地神府区块深部煤层气体积压裂实践与认识 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2376-2393.
AN Qi, YANG Fan, YANG Ruiyue, et al. Practice and understanding of deep coalbed methane massive hydraulic fracturing in Shenfu block, Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2376-2393.
- [49] 张义, 鲜保安, 孙粉锦, 等. 煤层气低产井低产原因及增产改造技术 [J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 55-59.
ZHANG Yi, XIAN Baoan, SUN Fenjin, et al. Reason analysis and stimulation measures of low coalbed methane gas production wells[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 55-59.
- [50] 李勇, 朱治同, 吴鹏, 等. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界致密储层含气系统压力演化 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1568-1581.
LI Yong, ZHU Zhitong, WU Peng, et al. Evolution of pressure in tight gas reservoirs in the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1568-1581.
- [51] 朱庆忠, 杨延辉, 王玉婷, 等. 高阶煤层气高效开发工程技术优选模式及其应用 [J]. 天然气工业, 2017, 37(10): 27-34.
ZHU Qingzhong, YANG Yanhui, WANG Yuting, et al. Optimal geological-engineering models for highly efficient CBM gas development and their application[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(10): 27-34.
- [52] 李勇, 胡海涛, 王延斌, 等. 煤层气井低产原因及二次改造技术应用分析 [J]. 矿业科学学报, 2022, 7(1): 55-70.
LI Yong, HU Haitao, WANG Yanbin, et al. Analysis of low production coalbed methane wells and application of secondary reconstruction technologies[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(1): 55-70.
- [53] 闫欣璐, 唐书恒, 张松航, 等. 沁水盆地柿庄南区块煤层气低效井二次改造研究 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 119-125.
YAN Xinlu, TANG Shuheng, ZHANG Songhang, et al. Study on reconstruction of inefficient well of coalbed methane in southern Shizhuang block of Qingshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 119-125.
- [54] 雷群, 杨战伟, 翁定为, 等. 超深裂缝性致密储集层提高缝控改造体积技术——以库车山前碎屑岩储集层为例 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 1012-1024.
LEI Qun, YANG Zhanwei, WENG Dingwei, et al. Enhancing fracture-controlled transformation volume in ultra-deep fractured tight reservoirs: A case study of the Kuche Foreland Basin, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 1012-1024.
- [55] 彭鹏, 杨兆中, 梅永贵, 等. 煤层气体压裂施工参数优化 [J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(6): 68-72.
PENG Peng, YANG Zhaozhong, MEI Yonggui, et al. Construction parameter optimization of coalbed methane volume fracturing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(6): 68-72.
- [56] 曾雯婷, 葛腾泽, 王倩, 等. 深层煤层气全生命周期一体化排采工艺探索——以大宁—吉县区块为例 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 78-85.
ZENG Wenting, GE Tengze, WANG Qian, et al. Exploration of integrated full-life-cycle drainage technology for deep coalbed methane: A case study of the Daning-Jixian block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 78-85.
- [57] 李贵红, 吴信波, 刘钰辉, 等. 沁水潘庄煤层气井全生命周期产气规律与效果 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 894-903.
LI Guihong, WU Xinbo, LIU Yuhui, et al. Full life-circle production and effect evaluation of Panzhuang coalbed methane wells in Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 894-903.
- [58] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 30-41.
YANG Xiuchun, XU Fengyin, WANG Hongya, et al. Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 30-41.
- [59] IEA. Energy technology perspectives 2020[EB/OL]. (2020-09-10)[2021-09-29]. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
- [60] 王佟, 邵龙义, 夏玉成, 等. 中国煤炭地质研究取得的重大进展与今后的主要研究方向 [J]. 中国地质, 2017, 44(2): 242-262.
WANG Tong, SHAO Longyi, XIA Yucheng, et al. Major achievements and future research directions of the coal geology in China[J]. Geology in China, 2017, 44(2): 242-262.
- [61] 邹才能, 赵群, 张国生, 等. 能源革命: 从化石能源到新能源 [J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 1-10.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, ZHANG Guosheng, et al. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 1-10.
- [62] 侯梅芳, 潘松圻, 刘翰林. 世界能源转型大势与中国油气可持续发展战略 [J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 9-16.
HOU Meifang, PAN Songqi, LIU Hanlin. World energy trend and China's oil and gas sustainable development strategies[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(12): 9-16.
- [63] 李勇, 许卫凯, 高计县, 等. “源—储—输导系统” 联控煤系气富集成藏机制——以鄂尔多斯盆地东缘为例 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2440-2453.
LI Yong, XU Weikai, GAO Jixian, et al. Mechanism of coal measure gas accumulation under integrated control of "source-reservoir-transport system": A case study from east margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2440-2453.

- [64] HOU Xiaowei, LIU Shimin, ZHU Yanming, et al. Evaluation of gas contents for a multi-seam deep coalbed methane reservoir and their geological controls: In situ direct method versus indirect method[J]. *Fuel*, 2020, 265: 116917.
- [65] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向 [J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 1-14.
XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 1-14.
- [66] 徐凤银, 王勃, 赵欣, 等. “双碳”目标下推进中国煤层气业务高质量发展的思考与建议 [J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(3): 9-18.
XU Fengyin, WANG Bo, ZHAO Xin, et al. Thoughts and suggestions on promoting high quality development of China's CBM business under the goal of "double carbon"[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(3): 9-18.
- [67] 梁沛然. 我国深部煤层气规模效益开发前景广阔 [N]. *中国能源报*, 2024-11-04(8).
LIANG Peiran. Prospects for scale-effective development of China's deep coalbed methane are broad[N]. *China Energy News*, 2024-11-04(8).
- [68] 中石油煤层气公司. 中石油煤层气公司大吉气田我国生产规模最大的深层煤层气田 [N]. *国际煤炭网* (2023-10-27)[2025-01-26]. China National Petroleum Corporation. PetroChina Coalbed Methane Company Daji Gas Field China's largest producing deep coalbed methane field[N]. *Coal. IN-EN.com* (2023-10-27)[2025-01-26].
- [69] 陈河青, 杨兆彪, 李道清, 等. 新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气孔渗系统特征 [J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(6): 33-43.
CHEN Heqing, YANG Zhaobiao, LI Daoqing, et al. Characteristics of the pore and seepage system of deep coalbed methane in the Baijiahai uplift, Junggar Basin, Xinjiang[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(6): 33-43.
- [70] 支东明, 李建忠, 杨帆, 等. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系煤系全油气系统特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(3): 453-466.
ZHI Dongming, LI Jianzhong, YANG Fan, et al. Whole petroleum system in Jurassic coal measures of Taibei sag in Tuha Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(3): 453-466.
- [71] 金晓波. 渝东南地区深部煤层气成藏特征及有利区评价 [J]. *非常规油气*, 2024, 11(6): 25-33.
JIN Xiaobo. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in southeastern Chongqing[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024, 11(6): 25-33.
- [72] 中国石油技术经济研究院. 2050 年世界与中国能源展望(2019 版) [R]. 北京: 中国石油技术经济研究院, 2019.
China's Institute of Petroleum Technology and Economics. *Energy outlook for the world and China in 2050 (2019)* [R]. Beijing: China's Institute of Petroleum Technology and Economic, 2019.
- [73] BP. BP statistical review of world energy 2021[EB/OL]. (2021-01-08)[2025-01-26]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2021-a-dramatic-impact-on-energy-markets.html>.
- [74] 张映红. 关于能源结构转型若干问题的思考及建议 [J]. *国际石油经济*, 2021, 29(2): 1-15.
ZHANG Yinghong. Thinking and suggestions for China's energy structure transformation[J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(2): 1-15.
- [75] 孙士昌, 岳小文, 杜国敏, 等. 能源转型发展历程与趋势 [J]. *石油规划设计*, 2020, 31(4): 5-9.
SUN Shichang, YUE Xiaowen, DU Guomin, et al. Development process and trend of energy transformation[J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 2020, 31(4): 5-9.
- [76] 潘松圻, 邹才能, 李勇, 等. 重大生物事件与化石能源形成演化——兼论地球系统框架下能源学发展 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 498-509.
PAN Songqi, ZOU Caineng, LI Yong, et al. Major biological events and fossil energy formation: On the development of energy science under the earth system framework[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 498-509.
- [77] 葛世荣, 刘淑琴, 樊静丽, 等. 低碳化现代煤基能源开发关键技术体系 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(7): 2949-2972.
GE Shirong, LIU Shuqin, FAN Jingli, et al. Key technologies for low-carbon modern coal-based energy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(7): 2949-2972.
- [78] 葛世荣, 樊静丽, 刘淑琴, 等. 低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 203-223.
GE Shirong, FAN Jingli, LIU Shuqin, et al. Low carbon modern coal-based energy technology system and development strategy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 203-223.

(修改回稿日期 2025-03-28 编辑 陈古明)



本
文
互
动