

doi: 10.12029/gc20221122001

孙杰,程爱国,刘亢,严晓云,张莉,赵欣. 2023. 中国煤炭与煤层气协同勘查开发现状与发展趋势[J]. 中国地质, 50(3): 730–742.

Sun Jie, Cheng Aiguo, Liu Kang, Yan Xiaoyun, Zhang Li, Zhao Xin. 2023. The current situation and development trend of coordinated exploration and development of coal and coalbed methane in China[J]. *Geology in China*, 50(3): 730–742(in Chinese with English abstract).

# 中国煤炭与煤层气协同勘查开发现状与发展趋势

孙杰<sup>1,2</sup>, 程爱国<sup>2</sup>, 刘亢<sup>2</sup>, 严晓云<sup>2</sup>, 张莉<sup>2</sup>, 赵欣<sup>3</sup>

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039; 3. 中国煤炭地质总局碳中和研究院, 北京 100039)

**摘要:**【研究目的】煤炭是中国的主体能源,煤层气(煤矿瓦斯)是煤矿生产过程中的重要危险源,同时也是一种重要的清洁能源。煤层气主要成分是甲烷,甲烷的温室效应是等体积二氧化碳的80~120倍,大量排入空气中会对大气环境产生严重影响。本文通过分析中国煤与煤层气勘查开发模式和技术现状,论证了煤与煤层气协同勘查开发的必要性和可行性,进而提出中国新的煤与煤层气协同勘查的技术途径。【研究方法】本文通过梳理大量前人资料和研究成果,分析了中国的能源供需、煤炭与煤层气协同勘查开发技术现状和发展趋势,讨论煤与煤层气协同勘查开发技术方向和对策。【研究结果】科学论证了实施煤与煤层气协同勘查开发的必要性和可行性,揭示其技术瓶颈,提出了煤与煤层气协同勘查技术体系,构建了煤与煤层气协同开发新模式,提出了未来煤与煤层气协同勘查开发利用关键技术及发展建议。【结论】实施煤与煤层气协同勘查开发非常必要和十分迫切;中国煤层低渗透率、低储层压力、低含气饱和度和复杂的地质和开采技术条件,决定了以煤与煤层气协同勘查开发为主、地面抽采为辅的煤层气开发利用方式;应深化煤与煤层气耦合成矿成藏规律研究,建立煤与煤层气协同勘查开发利用关键技术与CCUS技术相结合的技术体系。

**关键词:**煤炭;煤层气;协同勘查开发;能源勘查工程

**创 新 点:**科学论证了煤炭与煤层气勘查开发利用前景;建立了煤与煤层气协同勘查技术体系;构建了煤与煤层气协同开发利用新模式。

中图分类号:P618.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2023)03-0730-13

## The current situation and development trend of coordinated exploration and development of coal and coalbed methane in China

SUN Jie<sup>1,2</sup>, CHENG Aiguo<sup>2</sup>, LIU Kang<sup>2</sup>, YAN Xiaoyun<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, ZHAO Xin<sup>3</sup>

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. General Prospecting Institute, China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China; 3. Carbon Neutralization Research Institute, China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China)

收稿日期:2022-11-22; 改回日期:2023-03-01

基金项目:国家自然科学基金(42141012)和中国地质调查项目(DD20221695)联合资助。

作者简介:孙杰,男,1988年生,博士,高级工程师,从事煤炭与煤层气地质勘查研究工作;E-mail:sun8096@qq.com。

**Abstract:** This paper is the result of energy exploration engineering.

**[Objective]** Coal is the primary energy source in China, while coalbed methane serves as an important and hazardous source of coal mine production process and a vital clean energy alternative. Methane, the main component of coalbed methane, exhibits a greenhouse effect 80–120 times stronger than the same volume of carbon dioxide. Excessive methane emissions can significantly impact environmental quality. This paper analyzes the patterns and technologies of coordinated exploration of coal and coalbed methane in China to demonstrate the necessity and flexibility of such an approach. Furthermore, it proposes a new technical approach for cooperative exploration of coal and coalbed methane in China. **[Methods]** The paper also analyzes and discusses energy supply and demand, the current state, and development trends of theories and technologies for co-mining coal and coalbed methane in China. Additionally, it studies and evaluates the development and utilization of coal and coalbed methane. **[Results]** The necessity and feasibility of implementing coordinated exploration and development of coal and coalbed methane are scientifically validated, and the main bottlenecks in China's of coordinated exploration and development of coal and coalbed methane are revealed. Moreover, the paper provides a technique system for coordinated exploration and development of coal and coalbed methane and presents a new development mode, key technologies, and development proposals for this approach. **[Conclusions]** In conclusion, the implementation of coordinated exploration and development of coal and coalbed methane is highly necessary and urgent. The characteristics of coalbed methane reservoirs (low permeability, low reservoir pressure, and low gas saturation) and complex geological conditions determine that cooperative exploration and development of coal and coalbed methane, with surface pumping as supplement, is the dominant mode in China. Considering the goals of carbon peaking and carbon neutrality, it is crucial to deepen research on the reservoir formation law of coal and coalbed methane coupling mineralization and accumulation, and establish a technical system that combines key technologies of cooperative exploration, development, and utilization of coal and coalbed methane with CCUS technology.

**Key words:** coal; coalbed methane; collaborative exploration and development; energy exploration engineering

**Highlights:** The prospects of exploration, development, and utilization of coal and coalbed methane have been scientifically demonstrated; A cooperative exploration technology system for coal and coalbed methane has been established; A new mode for the cooperative development and utilization of coal and coalbed methane has been developed.

**About the first author:** SUN Jie, male, born in 1988, Ph.D., senior engineer, engaged in the coal and coalbed methane geology exploration; E-mail: sun8096@qq.com.

**Fund support:** Supported by the projects of National Natural Science Foundation of China (No.42141012) and China Geological Survey (No. DD20221695).

## 1 引言

煤炭是中国主体能源和重要的工业原料,是国家能源安全的基石,当前错综复杂的国际形势,更加凸显能源安全的极端重要性,如何保障能源安全需要深入思考。煤层气(煤矿瓦斯)是影响煤矿安全生产的主要危险因素,同时也是一种清洁能源和紧缺资源(王家臣,2011;孙杰等,2017;Bi et al.,2022)。煤层气主要成分是甲烷,甲烷的温室效应是等体积二氧化碳的80~120倍(长周期:100a)和28~33倍(短周期:20a)(桑树勋等,2022)。煤矿瓦斯如果被排放到空中,将会产生显著的温室效应,提高煤炭和煤矿瓦斯利用率,减少煤矿瓦斯排放到空气中,无疑是实现碳减排目标的必然选择(毕彩

芹等,2018;Bi et al.,2020;王胜建等,2020;Chen et al.,2022)。中国煤层“三低”(渗透率低、储层压力低、含气饱和度低)特征十分突出,单纯的地面开发受到严重制约,而煤气共探共采技术日益成熟(袁亮,2010;孙杰等,2018)。因而,实施煤炭与煤层气协同勘查开发,是保障能源安全,增加清洁能源供应,确保煤矿安全生产,实现碳减排目标的有效途径。

## 2 煤炭与煤层气协同勘查开发技术现状

### 2.1 煤炭与煤层气协同勘查技术现状

煤矿瓦斯是影响煤矿安全的主要因素,在以往煤炭资源勘查过程中,将瓦斯作为安全地质因素进行评价,可视为煤炭与煤层气协同勘查的初步阶

段。20世纪90年代,随着煤层气的勘查开发的兴起,中国政府和企业高度重视煤炭与煤层气评价工作,国务院、国土资源部等部门相继出台了《关于加快煤层气(煤矿瓦斯)抽采利用的若干意见》(国办发[2006]47号)、《关于加强煤炭和煤层气资源综合勘查开采管理的通知》(国土资发[2007]96号)等。根据文件精神,开展了国家矿产资源储量技术标准体系建设项目子项目《煤炭与煤层气综合勘查技术要求》研究,制定了《煤与煤层气综合勘查技术要求》,制定了《煤与煤层气综合勘查规范》,修订了《煤炭地质勘查报告编制规范》,提出了煤炭与煤层气综合勘查技术要求,分别创建了以煤炭为勘查主矿种和以煤层气为主勘查主矿种的煤与煤层气综合勘查勘查模式(赵欣等,2017;潘海洋等,2019;程爱国,2020)。

但是,煤与煤层气协同勘查工作和技术严重滞后。地勘时期煤层瓦斯含量测定精度低,与煤层气含量测试和井下煤层瓦斯含量测试误差达到30%(傅学海等,2021),测试方法落后,适宜于小口径的煤与煤层气综合测井技术处于研发阶段,煤与煤层气地震综合采集、处理和解释技术不能满足协同勘查开发需求,煤与煤层气耦合成藏规律研究和综合评价技术尚未形成,亟待实施煤与煤层气协同勘查示范工程。

## 2.2 煤炭与煤层气协同开发技术现状

钱鸣高等(2003,2007)最早提出了煤与煤层气共采技术。在此之后,程远平、王家臣、谢和平、袁亮等学者也对煤与煤层气共采理论与技术进行了大量的研究,并取得了一系列成果(程远平等,2004;袁亮,2009;王家臣,2011;袁亮等,2013;谢和平等,2014;Bi et al., 2020)。通过近20年的发展,中国煤与煤层气共采研究理论与技术已经处于世界先进水平,目前普遍认可的煤与煤层气协同开发模式主要有以下2种:

**淮南“煤气共采”模式:**淮南煤业集团针对淮南矿区赋存地质条件,创立了不同距离保护层(解放层)卸压的采煤采气一体化模式及其配套工艺技术,开展了井下钻孔微爆破增渗等新技术实验,相继提出了首采煤层顶板瓦斯抽采技术、大间距上部煤层膨胀卸压开采顶板瓦斯抽采技术、煤层群多层开采底板卸压瓦斯抽采技术、无煤柱煤与瓦斯共采

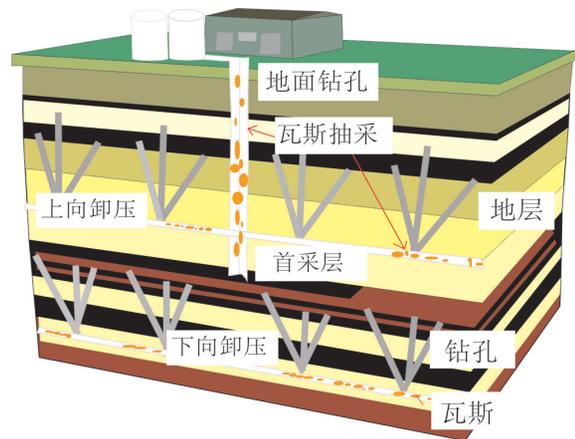


图1 淮南“煤气共采”模式图(据Yuan, 2016)

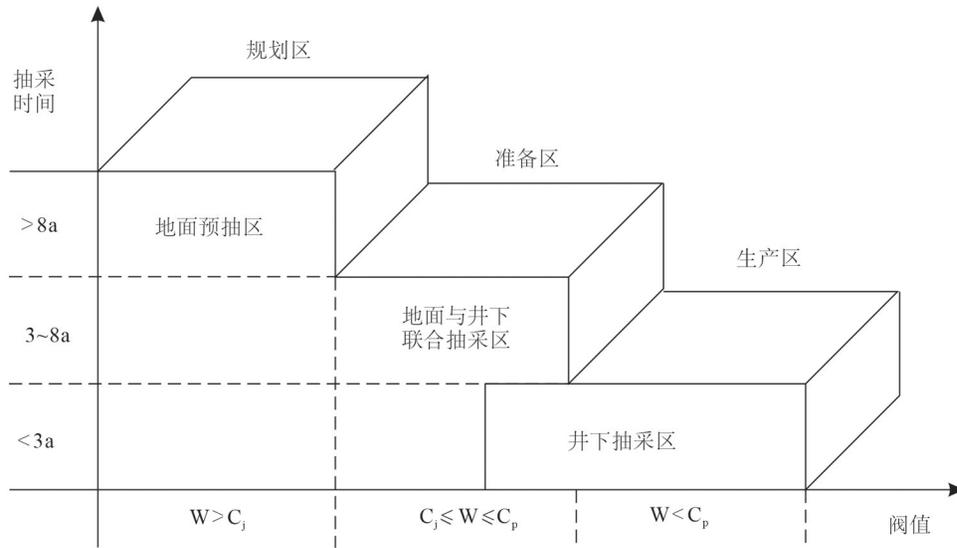
Fig.1 Pattern of "co-mining of coal and coalbed methane" in Huainan (after Yuan, 2016)

技术等(图1),解决了多煤层、构造煤发育地区煤层气矿井抽采的技术难题,为中国煤矿煤层气抽采量大幅度提高及煤矿安全形势显著好转做出了重要贡献(梁丽彤和胡益之,2008;袁亮等,2013;刘见中等,2017a;谢和平等,2018;张千贵等,2022)。

**晋城“先采气后采煤”模式:**基于煤炭开发时空接替规律,将煤矿区划分为煤炭生产规划区、煤炭开拓准备区与煤炭生产区3个区间。在煤矿规划区采用大砂量中砂比煤层高效改造增产技术、智能控压控粉排采工艺技术、低压自然能煤层气集输技术等实现煤矿规划区煤层气地面高效低成本抽采。在准备区采用地面与井下联合抽采工艺、条带式井上下联合抽采技术等,实现准备区煤层气地面与井下联合抽采。在生产区建立了区域抽采达标评价模型,采用中—硬煤层瓦斯抽采钻孔定向控制施工技术、松软煤层钻孔护孔钻进技术等实现煤矿生产区煤层气井下高效抽采。“晋城模式”创立了“三区联动”立体递进抽采模式,显著推进了矿井瓦斯抽采量的大幅度增长(图2)(李国富等,2014;刘彦青等,2020)。

同时,围绕中国煤层渗透率低,构造煤发育等特点,依托井巷工程实施了多项煤层增透技术,如开采保护层卸压增透法、钻孔卸压增透法、水力割缝,水力冲孔卸压增透法、高能液体扰动卸压增透法、CO<sub>2</sub>预裂增透法、爆破卸压增透法、电磁场增透法、声震法、高频振动法、高聚能等方法。

煤矿煤气共采和煤层气井上、井下联合抽采是未来煤层气开发的必由之路,将“淮南模式”和“晋城模



W-煤层瓦斯含量,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $C_j$ -矿井开拓掘进允许的瓦斯含量,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $C_p$ -工作面回采允许的瓦斯含量,  $\text{m}^3/\text{t}$ .  
W- Coalbed methane content,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $C_j$ -Maximum coalbed methane content of mine development,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  
 $C_p$ - Maximum coalbed methane content of mining face,  $\text{m}^3/\text{t}$ .

图2 晋城“先采气后采煤”模式图(据 Yuan, 2016)

Fig.2 Pattern of " coalbed methane mining before coal mining" in Jincheng (after Yuan, 2016)

式”有机结合将是未来中国井下煤层气抽采,乃至整个煤层气开发的主要发展方向(袁亮等,2013;贺天才等,2014;徐凤银等,2021;叶建平等,2022)。

### 2.3 煤层气(煤矿瓦斯)利用现状

目前,中国煤层气的利用效率不高,这主要是因为国内煤层透气性不理想、抽采率和抽采浓度不稳定,且不同浓度的煤层气的利用方式不同,这些都影响了煤层气的利用率。中国煤矿瓦斯利用技术主要包括高浓度煤层气(煤矿瓦斯)净化直接利用技术、低浓度煤层气(煤矿瓦斯)发电技术和浓缩技术、低浓度煤层气(煤矿瓦斯)燃烧技术、通风煤层气(煤矿瓦斯)利用技术等。中高浓度煤层气(甲烷浓度 > 30%)通过净化或提纯后送至天然气管网或液化,直接供民用、发电和制作化工原料;低浓度煤层气(甲烷浓度 1%~30%)可发电,通过浓缩提纯后,可制氢、制氨等;超低浓度煤层气(甲烷浓度 < 1%)可作为辅助燃料,用于燃气轮机、内燃机、燃烧粉煤发电厂发电等。中高浓度煤层气利用技术比较成熟,低浓度、超低浓度煤层气利用还不成熟,存在很多技术难点(胡晓兰等,2021;栗磊等,2021;唐韩英,2022)。

### 2.4 洁净煤技术发展现状

近年来,洁净煤技术取得显著进展,煤炭深加

工工艺日趋完善,已经形成兰炭、水煤浆等多种低污染煤炭产品,碳基新材料研发取得突破。燃煤电厂超低排放和节能改造持续推进,烟气污染排放控制处于国际最好水平,中国自主研发的世界参数最高、容量最大的超临界二氧化碳循环发电试验机组顺利完成试运行,热电转换效率较蒸汽机组提升 3%~5%。现代煤化工向高端化、多元化、低碳化方向发展,产业发展格局初步形成。2021年,煤制油、煤制烯烃、煤制气、煤制乙二醇产能分别达到 931 万 t/a、1672 万 t/a、61.25 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 、675 万 t/a;内蒙古、新疆、贵州等多个煤炭地下气化示范项目点火运行,新一代煤炭地下气化技术研发成功。煤炭消费空间进一步拓宽,加速向单一燃料向燃料与工业原料并重方向转变(孙旭东等,2020)。

CCUS 技术是实现碳中和的关键技术,在中国具有更加紧迫的需求,是中国实现化石能源低碳化利用关键技术,是燃煤电厂、钢铁厂、水泥厂等主要  $\text{CO}_2$  排放源实现大幅度减排的必然可行的选择(Yuan, 2016; 刘见中等, 2017b; 程爱国等, 2020; Wang et al., 2021a, b; 张宇轩等, 2022)。中国燃煤电厂 CCUS 起步较晚,截至目前,国内已开展 12 项燃煤电厂 CCUS 示范项目,而燃煤电厂 CCUS 全流程

示范项目仅2项,即中国石化胜利油田4万 t/a 燃煤电厂CO<sub>2</sub>捕集与驱油封存项目和国家能源集团国华锦界电厂15万 t/a CO<sub>2</sub>捕集与咸水层封存示范项目。涉及煤化工的CCUS示范项目仅3项,分别为国家能源集团鄂尔多斯煤制油10万 t/a CO<sub>2</sub>咸水层封存项目,延长石油陕北煤制气5万 t/a CO<sub>2</sub>-EOR示范项目和长庆油田煤制甲醇5万 t/a CO<sub>2</sub>-EOR示范项目。低能耗、低成本、大规模低浓度CO<sub>2</sub>捕集技术和CCUS集群化部署及封存技术是亟待突破重要方向(Dai et al., 2022; 桑树勋, 2022)。

### 3 煤炭与煤层气协同勘查开发机遇与挑战

实施煤炭与煤层气协同勘查开发是中国经济社会发展和生态环境保护的内在需求,是一条既能解决能源安全供应,又能促进碳减排目标实现的有效途径。

#### 3.1 煤炭与煤层气协同勘查开发的机遇

##### 3.1.1 煤炭需求预测与产业发展机遇

在一定时期内,煤炭仍然是中国主体能源。煤炭在中国一次能源消费构成中的比例一直占60%以上,近年来有所下降,2021年仍达到56%以上,煤炭消费量一直保持在40亿t(原煤)左右(图3)。据《2020中国煤炭行业发展年报》,到2030年,中国国民经济将保持较快的发展速度,综合考虑节能、新能源替代、工业技术和能耗水平,煤炭消费量将保持在40亿t左右,在一次能源消费比例为50%以上,煤炭由主体能源转为基础能源。

在碳减排进程中,新能源所占中国一次能源比重将持续增加,占比预计达到30%~49%,成为替代能源;到2051—2060年,煤炭成为兜底能源,消费量

下降到15~25亿t,新能源在能源消费中的比例达到50%以上(Cheng et al., 2020; 谢和平, 2022)。

目前,可再生能源并网发电尚不稳定(杨朔, 2017; 董玉辉和梁君亮, 2022),需要煤电调峰,新能源替代化石能源成为主体能源短期内难以实现;洁净煤技术发展,可减少二氧化碳排放,煤化工技术创新可实现油气替代,煤化工产品具有固碳属性和材料属性。在碳减排目标下,煤炭产业发展或将经历三个阶段:

第一阶段(2020—2030)为煤炭行业过渡期,煤炭需求还将保持旺盛的势头,这是煤炭产业进一步发展的机遇期,要基于碳减排目标需求和稳产保供客观需要,做好煤炭产业结构调整、转型和升级工作,大力发展洁净煤技术和煤层气开发利用技术,加大CCS和CCUS技术创新力度和工程示范,逐步减少因煤炭应用而产生的二氧化碳和甲烷排放。

第二阶段(2031—2050)为煤与可再生能源的竞争合作阶段。运用成熟的洁净煤技术、CCS和CCUS技术,变高碳能源为低碳能源,充分发挥中国煤炭资源丰富、安全可靠的优势。同时,与风电、光伏等绿色能源结合,利用绿电发展煤基低碳煤化工产业,生产绿色氢气、煤制天然气和其他绿色煤化工产品。

第三阶段(2051—2060)突出煤炭的材料属性和安全属性,起到能源安全的兜底作用,与光伏、风电、生物质能等绿色能源完全融合,形成可中和的煤基新型绿色能源体系和具有固碳作用的重要原材料。

总之,在碳减排目标下,煤炭产业仍有较大发展空间,煤与煤层气协同勘查开发将迎来新的发展机遇。

3.1.2 以煤炭开采为依托的煤层气开发利用迎来新

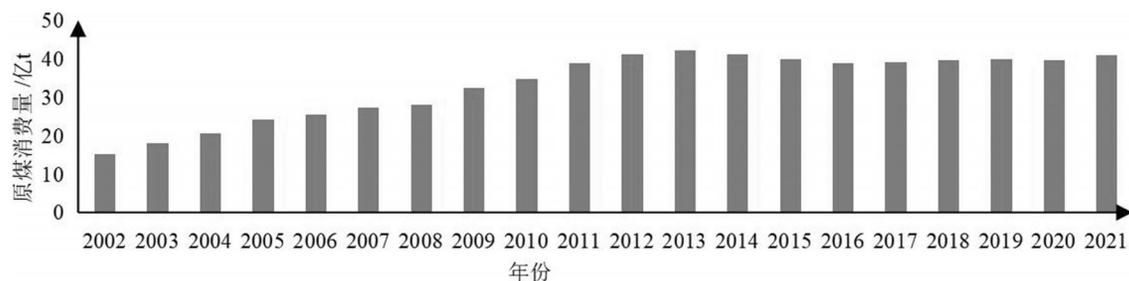


图3 中国历年原煤消费量变化趋势图(数据来源于国家统计局官方网站)

Fig.3 Trend chart of annual raw coal consumption in China  
(Data from the official website of the National Bureau of Statistics)

### 机遇

煤层气(煤矿瓦斯)开采利用,会大幅减少煤矿安全生产的风险,增加天然气供应,降低大气污染和温室效应(胡晓兰等,2021)。中国煤矿瓦斯开采和利用率还较低,在碳减排目标的下,必将倒逼煤矿加大瓦斯抽采和利用力度。

中国煤层气的成藏特点决定了煤层气开发主要走煤气共采之路。中国煤层气赋存条件复杂,渗透率低、储存压力低、含气饱和度低,中国煤层渗透率在  $0.002 \times 10^{-3} \sim 16.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均值  $1.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图4),明显低于美国的圣胡安、黑勇士盆地煤层渗透率( $3 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )。

构造煤发育,不利于煤层气的地面开发。30多年的地面煤层气开发实践表明,适宜煤层气地面规模化开发的地区有限,局限于山西沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘。煤炭开采形成采动空间,对煤层具有卸压增透作用,有利于煤层气的解吸和渗流;采用煤气共采、地面井下煤气一体化开采技术、井下煤层增透技术,能高效采取复杂煤层气藏之煤层气,提高煤层气抽采水平;运用煤矿低瓦斯发电技术、人造可燃冰技术,可提高大幅提高煤矿瓦斯利用率,减少瓦斯等温室气体排放量,达到碳减排目的。

## 3.2 煤与煤层气协同勘查开发的挑战

### 3.2.1 煤层气资源家底不清,成藏条件研究滞后,影响煤与煤层气协同勘查开发部署

中国煤层气基础地质和成藏规律研究较深入,但煤与煤层气耦合成藏机理认识不足,盆地尺度煤与煤层气成矿成藏规律及模式研究深度不够且不系统;煤与煤层气综合评价不全面,煤层含气量数据来源多样,可利用性差,包括煤炭资源勘查过程中的瓦斯测试数据、井下瓦斯测试数据和煤层气地面测试数据,

由于测试条件和执行不同的标准,三者间误差较大(赵欣等,2017;傅学海等,2021),导致煤层气资源量差距很大。盆地煤层气储层特征整体认识不足,开采开发条件评价深度不够,煤层气地面开发和矿井开发区块划分缺位,严重影响到煤层气开发的科学部署,制约煤层气科学勘查开发。

### 3.2.2 瓦斯抽采技术瓶颈制约煤与煤层气协同勘查开发

中国煤矿区煤与煤层气成藏条件迥异,抽采技术可复制性差,不同区域的煤与煤层气协同勘查开发模式尚未建立。传统煤矿瓦斯抽采技术存在瓦斯抽采巷道、钻孔工程量大,成本高、周期长等问题,目前的煤气共采技术和三区联动技术存在很大的提升空间,煤矿采动条件下煤层气运移规律认识不够,采动空间煤层气资源量计算方法需要创新。采动区煤层气抽采钻探和成井技术需要突破,地面与井下联合开采系统尚需完善。

井下煤层增透技术需要提升。随着矿井开采深度的加大,煤层瓦斯压力、含量、地应力和涌出量不断增大,透气性进一步降低,抽采难度加大,面临着低渗透松软煤层改性增透技术、大口径超深抽采钻孔施工、超长距离定向钻井技术、穿采空区钻井、完井、增产改造、排采技术等众多难题(袁亮,2009;秦勇等,2012;赵景辉等,2021)。

### 3.2.3 瓦斯利用技术瓶颈制约煤与煤层气协同开发

中国煤矿瓦斯利用率低,关键在于瓦斯利用技术尚未根本解决,也缺少相应的政策支持。在技术上,还需攻克低浓度、超低浓度瓦斯发电机组连续稳定高效运行、蓄热氧化安全利用、含氧煤层气安全低温液化和分离等技术难题(唐韩英,2022);在经济上,低浓度和超低浓度瓦斯利用还存在成本高、经济效益差、集输困难等方面的问题,需要产业

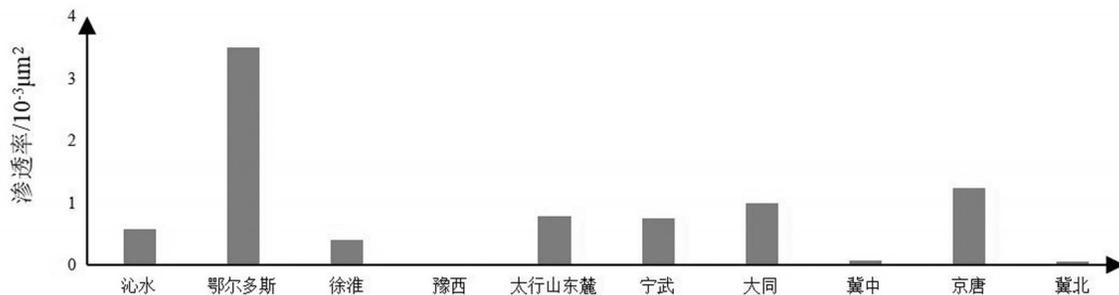


图4 华北聚气区主要聚气带平均渗透率直方图

Fig.4 Average permeability histogram of main gas accumulation zones in North China coal bed methane accumulation area

发展政策的大力扶持。

### 3.2.4 产业政策制约煤与煤层气的协同勘查开发

一方面,煤炭和煤层气矿业权是分置的,还有很多地区是重叠的,造成了采煤不愿采气,采气不能采煤的局面。另一方面,由于效益不高且缺乏相应的政策支持,煤炭开采企业开发利用煤层气意识不强、积极性不高。这是造成煤矿瓦斯利用率低下而大量排放的因素。

### 3.2.5 洁净煤技术发展滞后制约煤与煤层气的协同勘查开发

洁净煤的前沿技术主要包括700℃超临界发电技术、先进的IGCC/IGFC技术、煤制清洁燃料和化学品技术和CCUS技术等(孙旭东,2020),这些技术有的处于研发阶段,有的处于示范工程阶段,有的只处于实验室阶段,关键问题是CCUS技术刚刚起步,低能耗、低成本、大规模低浓度CO<sub>2</sub>捕集技术和CCUS集群化部署及封存技术亟待突破,否则,煤炭开发、利用将受到制约,以煤炭开发为依托的煤层气勘查开发利用,将成为无本之木。

## 4 建立煤炭与煤层气协同勘查开发新模式的思考

煤炭与煤层气协同勘查开发是确保中国能源安全,解决天然气资源短缺,减少温室效应,保障煤矿安全的重要途径,是碳减排进程中的必然选择,可谓“一石四鸟”,具有十分重要的现实意义和长远的战略意义。做好煤炭与煤层气协同勘查开发工作,应从整体上和技术层面上建立煤与煤层气共探共采体系。

### 4.1 建立煤与煤层气协同勘查技术体系

在技术理论上,要重点开展煤与煤层气耦合成矿成藏规律研究。开展煤储层特征和开采技术条件评价,划分煤与煤层气成矿成藏类型;建立多源煤层含气量换算模型,科学估算全国、煤矿区、煤矿不同层级煤层气资源量;总结煤矿区煤层气地面开发和井下抽采经验,结合煤层气开采开发条件评价,科学划分煤层气地面开发适宜区和煤炭煤层气协同开发适宜区,统筹部署煤与煤层气协同勘查开发工作。

在勘查实践上,要重点研发煤与煤层气协同勘查技术。研发基于煤炭资源勘查的煤层含气量测试新方法和新设备,探索煤层含气量原位测试技术;开发

煤层气和煤系非常规天然气小孔径测井技术,精细描述煤储层和煤系砂岩、页岩储层特征;研究煤层气和煤系气地震采集、处理和解释技术;建立煤与煤层气高精度多维地质模型和协同勘查模型(图5)。

### 4.2 建立煤与煤层气协同开发利用新模式

在碳减排目标下,要建立全新的低碳、绿色的煤与煤层气协同勘查开发利用模式(图6,图7)。按照煤炭与煤层气耦合成矿成藏规律和开采开发条件,设计不同的煤与煤层气协同开发模式,进行工程设计、可利用性经济评价以及减碳模式研究。大力实施煤层气地面和井下联合抽采的技术路线,着力发展煤矿瓦斯发电、提纯、液化等产业,充分利用瓦斯资源,防治煤矿瓦斯大量排空;加大煤炭CCUS技术研发,提高CO<sub>2</sub>捕集、地质封存和驱气的应用水平;加强采煤沉陷综合治理,利用采煤沉陷区发展光伏、风电等绿色能源,通过采煤沉陷生态恢复,增加煤矿区碳汇容量;建立新型煤化工产业,促进绿电与洁净煤技术的相互融合。

建立适合中国不同类型煤矿区的煤与煤层气共采模式。要针对中国不同煤矿区煤层气成藏特征,研究煤矿采动条件下煤层气运移、渗透、聚集理论和应力场、裂隙场、瓦斯场多场耦合下的瓦斯流场数学模型,准确预测采动条件下瓦斯集聚区、瓦斯涌出量和抽采产能;研发高应力、高瓦斯压力、松软煤层增透机理和抽采技术,研发采动区大口径抽采孔和穿采空区钻探技术;开发高能空气冲击、注入二氧化碳、超声波激励、可控声震等增透技术;研究微波加热、微生物等新型抽采技术。利用基础理论和关键技术研究成果,在中国典型低渗、松软煤矿区建设改性增透瓦斯抽采示范工程和井上井下联合抽采示范工程,总结一套适合中国不同类型煤矿区的煤与煤层气共采模式。

研发煤矿低瓦斯利用新技术,重点研究低浓度、超低浓度瓦斯发电技术、浓缩技术、燃烧技术、乏风技术、制氢技术、制甲醇和合成氨的技术,探索瓦斯燃料电池技术和蓄热式外燃机发电技术和人造可燃冰技术(韩甲业和应中宝,2012;李中军,2018;邢红,2018)。通过技术研发和示范应用,全面提高中国煤矿瓦斯利用率,大幅度减少煤矿瓦斯排空、排放(范文利和杨伟峰,2022)。

突破关闭矿井瓦斯抽采利用技术瓶颈。关闭

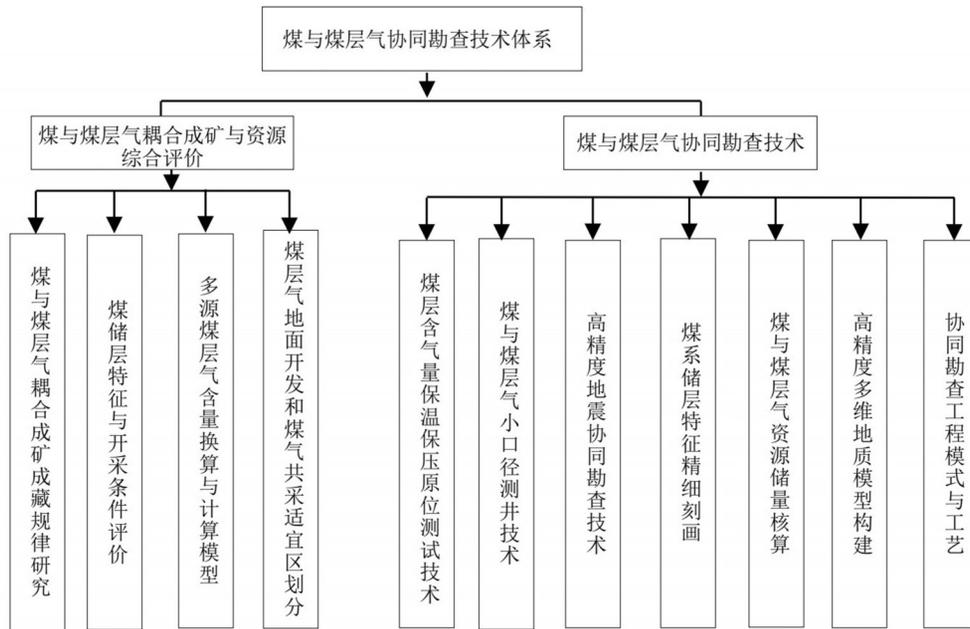


图5 煤与煤层气协同勘查技术体系框图

Fig.5 Block diagram of the technical system for cooperative exploration of coal and coalbed methane

废弃矿井集聚大量瓦斯资源,同时,由于抽采系统停止运行,大量瓦斯通过裂隙和封闭不良的井口溢出、排空,对大气环境产生严重影响,有时还发生严重的火灾和爆炸事故。应加强关闭矿井瓦斯运移规律研究和资源评价,研发关闭矿井瓦斯抽采关键技术,建立关闭煤矿瓦斯抽采系统,进而可达到充分利用瓦

斯资源、减少温室气体效应、保障安全的三重目的。

探索煤炭地下气化与煤层气联合开采技术。近年来,煤炭地下气化技术取得重大进展,煤层加热提高煤层气解吸速率及抽采效率技术已经从理论、实验室研究走向工程试验阶段,可通过合理设计,在地下气化前,实施煤层气地面预抽,利用部分



图6 煤与煤层气协同开发利用技术体系框图

Fig.6 Block diagram of cooperative development and utilization technology system of coal and coal bed methane

煤层气工程实施钻井式煤炭地下气化;同时,利用地下气化形成的高温,提高地下气化前端和邻近备采工作面煤层温度,实施地下气化采中煤层气地面抽采,从而达到提高煤层气解吸速率和抽采效率之目的。煤炭地下气化与煤层气联合开采技术是值得探索的领域(图7)。

探索CCUS技术与煤层气抽采技术融合。在现有技术条件下,单纯靠煤矿瓦斯井上井下联合抽采,煤层中的瓦斯尚难完全被抽尽,部分煤层瓦斯还可能通过采动区和采空区上方裂隙逸散至空中,在碳减排目标下,需要开展逸散瓦斯监测和捕集技术和设备研究,从而达到监测和捕集瓦斯的目的。CCUS技术与煤层气抽采技术的结合,既起到二氧化碳捕集、封存的作用,也能达到驱替煤层气,提高煤层气抽采效率的作用。

通过采煤沉陷区的综合治理,利用大面积的采煤沉陷区发展光伏产业,在采煤沉陷区实施生态恢复增加碳汇,是煤与煤层气协同开发的重要方向。

#### 4.3 建立煤与煤层气协同勘查开发利用的政策体系

要做好煤与煤层气协同勘查开发需要各项政策强有力的支持。建议国家和各级政府出台相应政策,支持煤与煤层气协同勘查开发利用工作。

##### (1) 加大煤与煤层气协同勘查开发科技研发力

度。将煤与煤层气协同勘查开发利用关键技术与设备课题,列入国家重点研发计划或重大专项,系统研究中国煤与煤层气耦合成矿成藏规律、协同勘查开发技术、绿色综合利用技术和绿色低碳技术与装备,突破煤与煤层气协同勘查开发利用关键技术瓶颈。

(2) 建立煤与煤层气协同勘查开发示范基地。根据中国煤与煤层气耦合成矿成藏规律、煤层气地面开发和煤与煤层气协同开发分区,设立山西沁水、安徽淮南、新疆准噶尔、贵州六盘水、四川川南、黑龙江双鸭山等不同类型的煤与煤层气协同勘查开发利用示范基地,贯彻碳减排和绿色发展理念,运用研发的关键技术,结合煤矿区煤炭与煤层气地质条件、成藏条件和资源条件,做好煤与煤层气系统勘查开发利用系统工程设计,实施煤与煤层气协同勘查开发利用和低碳绿色工程,形成一套可复制、可推广的煤与煤层气协同勘查开发利用技术、装备和经验。

(3) 加大煤与煤层气协同勘查开发利用政策支持力度。制定煤矿煤层气(瓦斯)开发利用的财政补贴、税收等优惠政策,激励煤炭企业开发利用煤矿煤层气(瓦斯)资源,将煤炭企业瓦斯抽采和排放列入碳排放管理和碳汇交易的范畴,按照煤层气

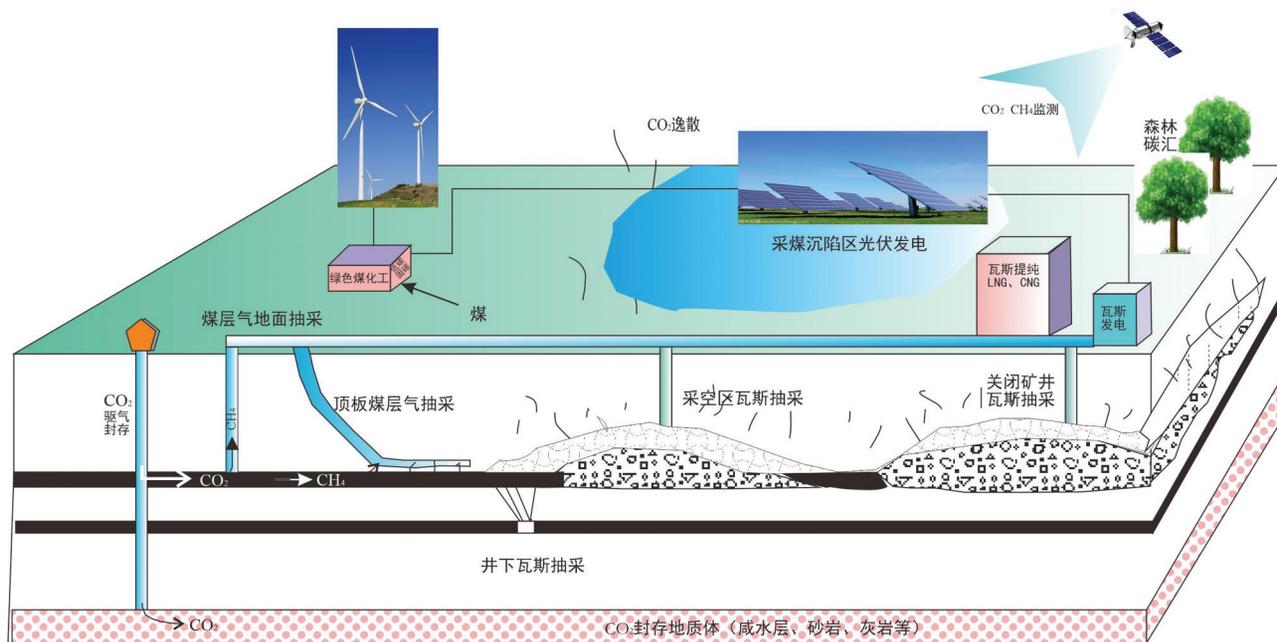


图7 基于碳减排的煤炭与煤层气协同勘查开发利用的概念模型

Fig.7 Conceptual model of cooperative exploration, development and utilization of coal and coalbed methane based on carbon reduction goals

(瓦斯)利用量和温室效应计算碳汇,煤炭、煤层气和其他企业可通过煤层气开发利用量形成碳汇,通过碳汇交易获得碳汇收益,反哺煤矿煤层气(瓦斯)开发利用,鼓励煤炭、煤层气企业开发利用煤矿瓦斯(煤层气)资源。改革中国现行煤炭、煤层气矿业权制度,允许煤炭矿业权人实施煤层气开发,鼓励煤炭企业与油气、电力、化工、新能源开发企业合作,共同实施煤与煤层气协同勘查开发利用煤矿瓦斯(煤层气)资源。

## 5 结 论

(1)中国煤炭煤层气资源丰富,煤与煤层气具有协同开发的资源基础和优势。在碳减排进程中,煤炭仍然是中国支撑能源、兜底能源和重要工业原料;煤层气是重要的非常规天然气,煤与煤层气协同勘查开发利用前景广阔。煤炭与煤层气协同勘查开发具有十分重要的现实意义和战略意义。

(2)通过多年煤矿瓦斯治理和抽采实践,中国已形成了煤与煤层气协同开采模式,即淮南“煤气共采”模式、晋城“先采气后采煤”模式。同时,针对中国构造煤发育、煤储层“三低”(渗透率低、储层压力低、含气饱和度低)特征,广泛使用开采保护层卸压增透法、钻孔卸压增透法、水力割缝等方法,使煤矿瓦斯开发成为可能。煤矿中高浓度瓦斯利用技术比较成熟,低浓度、超低浓度煤矿瓦斯利用技术也取得重要进展。煤炭深加工、燃煤超低排放发电、煤炭转化、煤炭地下气化等洁净煤技术取得突破并大规模产业化;煤炭应用领域的CCUS技术创新和示范工程成功实施,将助力中国碳减排目标早日实现。事实证明,实施煤炭与煤层气协同勘查开发,是保障能源安全,增加清洁能源供应,确保煤矿安全生产,实现碳减排目标的必然选择。

(3)做好煤炭与煤层气协同勘查开发工作,应从整体上和技术层面上建立煤与煤层气共探共采技术体系。一是要重点开展煤与煤层气耦合成矿成藏规律研究,科学估算全国、煤矿区、煤矿不同层级煤层气资源量,科学划分煤层气地面开发适宜区和煤炭煤层气协同开发适宜区,统筹部署煤与煤层气协同勘查开发工作。二是要重点研发煤与煤层气协同勘查技术,包括煤层含气量原位测试新方法和新设备,小孔径测井技术,煤储层精细描述技术,

地震采集、处理和解释技术等,建立煤与煤层气高精度多维地质模型和协同勘查模型。

(4)建立煤与煤层气协同勘查开发利用新模式是当前紧迫而重大任务。主要攻关方向包括三个方面:一是做好煤与煤层气协同开发模式设计,研发高应力、高瓦斯压力、松软煤层增透机理和抽采技术,实施井上井下联合抽采示范工程,总结一套适合中国不同类型煤矿区的煤与煤层气共采新模式。二是研发煤矿低浓度、超低浓度煤矿瓦斯利用技术,加大煤炭地下气化与煤层气联合开采技术和CCUS技术研发,推进采煤沉陷治理和生态恢复,利用采煤沉陷区发展煤矿区光伏、风电等绿色能源,增加煤矿区碳汇容量。三是构建煤、煤层气与新能源协同开发利用新思路。针对中国中西部风、光资源与煤炭资源高度重叠特点,充分利用新旧能源资源复合叠加优势,实现新旧能源互联互通,研发绿电、绿氢、绿色化学材料等关键技术,探索煤炭、煤层气利用绿色新途径。

## References

- Bi Caiqin, Shan Yansheng, Pang Bo, Zhang Jiaqiang, Liu Wei, Zhao Yingkai, Zhou Yang. 2018. High gas coal reservoir drilled in coal resource exhausted mining area of Jixi Basin[J]. *Geology in China*, 45(6): 1306–1307 (in Chinese with English abstract).
- Bi Caiqin, Zhang Jiaqiang, Hu Zhifang, Xie Shi, Zhou Yang, Pang Bo, Shan Yansheng, Chi Huanpeng, Tang Yue, Yuan Yuan. 2022. Industrial production of unconventional gas in coal-measure of Well HJD1 in Jixi Basin, Eastern Heilongjiang Province, China[J]. *China Geology*, 5: 546–548.
- Bi Caiqin, Zhang Jiaqiang, Shan Yansheng, Hu Zhifang, Wang Fuguo, Chi Huanpeng, Tang Yue, Yuan Yuan, Liu Yaran. 2020a. Geological characteristics and co-exploration and co-production methods of Upper Permian Longtan coal measure gas in Yangmeishu Syncline, Western Guizhou Province, China[J]. *China Geology*, 3: 38–51.
- Bi Caiqin, Zhu Hanyou, Zhang Jiaqiang, Shan Yansheng, Chen Yang, Chi Huanpeng, Luo Yong, Zhang Zhijun. 2020b. A major breakthrough in geological survey of coal measure gas in Southern Sichuan, China[J]. *China Geology*, 3: 646–648.
- Chen Xijie, Jia Liqiong, Jia Ting. 2022. China achieved fruitful results in oil-shale gas-coalbed methane exploration and development in 2021[J]. *China Geology*, 5: 355–356.
- Cheng Aiguo, Zhao Xin, Pan Haiyang, Sun Jie, Zhang Shouren, Chen Meiying. 2020. *Coal and CBM Resources Exploration Technology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 168–175 (in Chinese).

- Cheng Aiguo. 2020. Coal resource security level and green exploration, exploitation approaches in China[J]. *Coal Geology of China*, 32(1): 5–10(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yuanping, Yu Qixiang, Yuan Liang, Li Ping, Liu Yongqing, Tong Yunfei. 2004. Experimental research of safe and high-efficient exploitation of coal and pressure relief gas in long distance[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 33(2): 132–136.
- Dai Shixin, Dong Yanjiao, Wang Feng, Xing Zhenhan, Hu Pan, Yang Fu. 2022. A sensitivity analysis of factors affecting in geologic CO<sub>2</sub> storage in the Ordos Basin and its contribution to carbon neutrality[J]. *China Geology*, 5: 359–371.
- Dong Yuhui, Liang Junliang. 2022. Voltage stability and control analysis of wind/photovoltaic power generation connected to power grid[J]. *New Technology & New Products of China*, 459(5): 68–70(in Chinese).
- Fan Wenli, Yang Weifeng. 2022. Innovative utilization and practice of coal mine gas[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 273(4): 99–103(in Chinese with English abstract)
- Fu Xuehai, Zhang Xiaodong, Wei Chongtao. 2021. Review of research on testing, simulation and prediction of coalbed methane content[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 50(1): 13–31(in Chinese with English abstract).
- Han Jiaye, Ying Zhongbao. 2012. Study on utilization technologies of low concentration CMM[J]. *China Coalbed Methane*, 9(6): 39–41 (in Chinese with English abstract).
- He Tiancai, Wang Baoyu, Tian Yongdong. 2014. Development and issues with coal and coal-bed methane simultaneous exploitation in Jincheng mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 39(9): 1779–1785(in Chinese with English abstract).
- Hu Xiaolan, Song Wei, Peng Chuansheng, Li Bo, Jiang Lihong, Xiao Zhaohui, Hong Keyan. 2021. Control and utilization of coal mine gas to achieve carbon peaking and carbon neutrality[J]. *Huadian Technology*, 43(12): 52–59(in Chinese with English abstract).
- Li Guofu, Li Bo, Jiao Haibin, Liu Xing. 2014. Three – region integrated CBM stereo- extraction in Jincheng mining area[J]. *China Coalbed Methane*, 11(2): 3–7(in Chinese).
- Li Lei, Fu Guoting, Cui Baoku, Li Luping, Jin Shuchen, Hua Mingguo. 2021. Technology and engineering practice of coal mine methane cascade utilization in Lu'an mining area[J]. *China Coalbed Methane*, 18(6): 30–32(in Chinese with English abstract).
- Li Zhongjun. 2018. Research status of low concentration coal mine methane utilization technology and application prospect[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 40(6): 152–156(in Chinese with English abstract).
- Liang Litong, Hu Yizhi. 2008. Analysis of the market of coal bed methane emission reduction in Shanxi Province [J]. *Coal Chemical Industry*, 134(1): 7–9 (in Chinese ).
- Liu Jianzhong, Shen Chunming, Lei Yi, Zhang Lang, Ji Wenbo. 2017. Coordinated development mode and evaluation method of coalbed methane and coal in coal mine area in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 42(5): 1221–1229(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianzhong, Xie Heping, Wang Jinhua, Ren Shihua. 2017. Study on disruptive technology development countermeasure of coal green development and utilization [J]. *Coal Economic Research*, 12(37): 6–10 (in Chinese).
- Liu Yanqing, Zhao Can, Li Guofu, Zhang Lang, Zhao Xueliang, Li Zhenfu, Zhang Xuechao, Li Yang, Guo Jianhang, Guo Dingding. 2020. Optimized decision method of coordinated development mode of coal and coalbed methane in Jincheng mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 45(7): 2575–2589(in Chinese with English abstract).
- Pan Haiyang, Cheng Aiguo, Zhao Xin, Yin Rongwei, Chen Meiyong. 2019. Contrastive study of coal seam gas and CBM testing standards during exploration[J]. *Coal Geology of China*, 31(4): 30–34 (in Chinese with English abstract).
- Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin. 2007. Green mining of coal resources harmonizing with environment [J]. *Journal of China Coal Society*, 32(1): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Qian Minggao, Xu Jialin, Miao Xiexing. 2003. Green technique in coal mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 32(4): 343–348(in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Shen Jian, Wang Baowen, Yang Song, Zhao Lijuan. 2012. Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(1): 48–53 (in Chinese with English abstract).
- Sang Shuxun, Yuan Liang, Liu Shiqi, Han Sijie, Zheng Sijian, Liu Tong, Zhou Xiaozhi, Wang Ran. 2022. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization[J]. *Journal of China Coal Society*, 47(4): 1430–1451(in Chinese with English abstract).
- Sun Jie, Chen Meiyong, Tang Zhaomiao, Zheng Cui. 2017. Tracking study of coal resources exploration status quo in China [J]. *Coal Geology of China*, 29(11):1–8(in Chinese with English abstract).
- Sun Jie, Wang Tong, Zhao Xin, Lin Zhongyue, Wang Suizheng, Jiang Tao, He Liang. 2018. Pondering on CBM geological features and research trend in China [J]. *Coal Geology of China*, 30(6):30–34.
- Sun Xudong, Zhang Bo, Peng Suping. 2020. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China Toward 2035[J]. *Engineering Sciences*, 22(3): 132–140 (in Chinese with English abstract).
- Tang Hanying. 2022. Present situation and prospect of coal mine gas utilization technology[J]. *Coal Quality Technology*, 37(1): 69–77 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiachen. 2011. Key theoretical issue need to be solved and research status of coal and gas co-mining[J]. *Coal Engineering*, (1): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shengjian, Gao Wei, Guo Tianxu, Bao Shujing, Jin Jun, Xu

- Qiufeng. 2020. The discovery of shale gas, coalbed gas and tight sandstone gas in Permian Longtan Formation, northern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 47(1): 249–250 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Guo Chihui, Chen Xijie, Jia Liqiong, Guo Xiaona, Chen Ruishan, Zhang Maosheng, Chen Zeyu, Wang Haodong. 2021b. Carbon peak and carbon neutrality in China: Goals, implementation path and prospects[J]. *China Geology*, 4: 720–746.
- Wang Yao, Guo Chihui, Zhuang Shurong, Chen Xijie, Jia Liqiong, Chen Zeyu, Xia Zilong, Wu Zhen. 2021a. Major contribution to carbon neutrality by China's geosciences and geological technologies[J]. *China Geology*, 4: 329–352.
- Xie Heping, Ju Yang, Gao Mingzhong, Gao Feng, Liu Jianzhong, Ren Huaiwei, Ge Shirong. 2018. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 43(5): 1210–1219(in Chinese with English abstract).
- Xie Heping, Zhou Hongwei, Xue Dongjie, Gao Feng. 2014. Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 39(8): 1391–1397(in Chinese with English abstract).
- Xie Heping. 2022. Coal Carbon Neutralization Strategy and Technology Path[M]. Beijing: Science Press, 91(in Chinese).
- Xing Hong. 2018. Concentration and purification technology of coal mine gas coalbed methane and its application[J]. *Coal Engineering*, 50(1): 13–15 (in Chinese with English abstract).
- Xu Fengyin, Wang Bo, Zhao Xin, Yun Jian, Zhang Shangyuan, Wang Hongya, Yang Yun. 2021. Thoughts and suggestions on promoting high quality development of China's CBM business under the goal of "double carbon" [J]. *China Petroleum Exploration*, 26(3): 9–18 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shuo. 2017. Research on voltage stability and control strategy of wind/photovoltaic power generation connected to power grid[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 30(2): 102–103(in Chinese with English abstract).
- Ye Jianping, Hou Songyi, Zhang Shouren. 2022. Progress of coalbed methane exploration and development in China during the 13th Five-Year Plan period and the next exploration direction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 50(3): 15–22(in Chinese with English abstract).
- Yuan Liang, Xue Junhua, Zhang Nong, Lu Ping. 2013. Development orientation and status of key technology for mine underground coal bed methane drainage as well as coal and gas simultaneous mining[J]. *Coal Science and Technology*, 41(9): 6–11(in Chinese with English abstract).
- Yuan Liang. 2016. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 41(1): 1–6.
- Yuan Liang. 2009. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 34(1): 1–8(in Chinese with English abstract).
- Yuan Liang. 2010. Concept of gas control and simultaneous extraction of coal and gas[J]. *China Coal*, 36(6): 5–12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qiangui, Li Quanshan, Fan Xiangyu, Liu Chao, Ge Zhaolong, Jang Zhigang, Peng Xiaolong, Li Xiangchen, Zhu Suyang, Zhao Shilin, Zhao Pengfei, Chen Yufei. 2022. Current situation and development trend of theories and technologies for coal and CBM co-mining in China[J]. *Natural Gas Industry*, 42(6): 130–145(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuxuan, Tang Jinrong, Niu Yazhuo, Zhang Jingya, Zhao Yu, Wei Jianshe, Jiang Guangzheng, Wang Liwei. 2022. Resource advantage and geological work suggestions under carbon neutralization in Northwest China[J]. *Geology in China*, 49(5): 1458–1480(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jinghui, Gao Yuqiao, Chen Zhenlong, Guo Tao, Gao Xiaokang. 2021. Stress state of deep seam and its influence on development performance of CBM wells in South Yanchuan Block, Odors Basin [J]. *Geology in China*, 48(3): 785–793(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xin, Cheng Aiguo, Pan Haiyang, Cheng Meiyang, Sun Jie, Tang Chaomiao. 2017a. Study on evaluation technology of coalbed methane resources in coal resource exploration process[J]. *Coal Science and Technology*, 45(11): 180–186, 198(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xin, Cheng Aiguo, Pan Haiyang, Cheng Meiyang, Sun Jie, Tang Chaomiao, Xu Qiang. 2017b. Comparative study of coal and CBM resources exploration technical systems[J]. *Coal Geology of China*, 29(4): 8–11(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 毕彩芹, 单衍胜, 逢磷, 张家强, 刘伟, 赵英凯, 周阳. 2018. 鸡西盆地煤炭资源枯竭矿区钻获高含气量煤系储层[J]. *中国地质*, 45(6): 1306–1307.
- 程爱国, 赵欣, 潘海洋, 孙杰, 张守仁, 陈美英. 2020. 煤炭与煤层气综合勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 168–175.
- 程爱国. 2020. 中国煤炭资源保障程度及绿色勘查开发途径[J]. *中国煤炭地质*, 32(1): 5–10.
- 程远平, 俞启香, 袁亮, 李平, 刘永庆, 童云飞. 2004. 煤与远程卸压瓦斯安全高效共采试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 33(2): 132–136.
- 董玉辉, 梁君亮. 2022. 风电/光伏发电接入电网的电压稳定及控制分析[J]. *中国新技术新产品*, 459(5): 68–70.
- 范文利, 杨伟峰. 2022. 煤矿瓦斯创新利用与实践[J]. *煤炭加工与综合利用*, 273(4): 99–103.
- 傅学海, 张晓东, 韦重涛. 2021. 煤层气含量的测试、模拟与预测研究进展[J]. *中国矿业大学学报*, 50(1): 13–31.

- 韩甲业, 应中宝. 2012. 我国低浓度煤矿瓦斯利用技术研究[J]. 中国煤层气, 9(6): 39-41.
- 贺天才, 王保玉, 田永东. 2014. 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, 39(9): 1779-1785.
- 胡晓兰, 宋伟, 彭传圣, 李博, 蒋礼宏, 肖朝晖, 洪克岩. 2021. 双碳目标下煤矿瓦斯治理与利用[J]. 华电技术, 43(12): 52-59.
- 李国富, 李波, 焦海滨, 刘星. 2014. 晋城矿区煤层气三区联动立体抽采模式[J]. 中国煤层气, 11(2): 3-7.
- 李中军. 2018. 低浓度煤层气利用技术研究现状及应用展望[J]. 能源与环保, 40(6): 152-156.
- 栗磊, 傅国廷, 崔宝库, 栗鲁平, 靳曙琛, 华明国. 2021. 潞安矿区煤矿瓦斯梯级利用技术与工程实践[J]. 中国煤层气, 18(6): 30-32.
- 梁丽彤, 胡益之. 2008. 利用“清洁发展机制”促进山西煤层气开发[J]. 煤化工, 134(1): 7-9.
- 刘见中, 沈春明, 雷毅, 张浪, 季文博. 2017a. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发模式与评价方法[J]. 煤炭学报, 42(5): 1221-1229.
- 刘见中, 谢和平, 王金华, 任世华. 2017b. 煤炭绿色开发利用的颠覆性技术发展对策研究[J]. 煤炭经济研究, 12(37): 6-10.
- 刘彦青, 赵灿, 李国富, 张浪, 赵学良, 李振福, 张学超, 李阳, 郭建行, 郭丁丁. 2020. 晋城矿区煤与煤层气协调开发模式优化决策方法[J]. 煤炭学报, 45(7): 2575-2589.
- 潘海洋, 程爱国, 赵欣, 殷榕蔚, 陈美英. 2019. 地勘时期煤层瓦斯与煤层气测试标准对比研究[J]. 中国煤炭地质, 31(4): 30-34.
- 钱鸣高, 廖协兴, 许家林. 2003. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 32(4): 343-348.
- 钱鸣高, 廖协兴, 许家林. 2007. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 32(1): 1-7.
- 秦勇, 申建, 王宝文, 杨松, 赵丽娟. 2012. 深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J]. 石油学报, 33(1): 48-53.
- 桑树勋, 袁亮, 刘世奇, 韩思杰, 郑可建, 刘统, 周效志, 王冉. 2022. 碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻[J]. 煤炭学报, 47(1): 1430-1451.
- 孙杰, 陈美英, 唐朝苗, 郑翠. 2017. 我国煤炭资源勘查现状跟踪研究[J]. 中国煤炭地质, 29(11): 1-8.
- 孙杰, 王佟, 赵欣, 林中月, 王遂正, 江涛, 何亮. 2018. 我国煤层气地质特征与研究方向思考[J]. 中国煤炭地质, 30(6): 30-34.
- 孙旭东, 张博, 彭苏萍. 2020. 我国洁净煤技术2035发展趋势与战略对策研究[J]. 中国工程科学, 22(3): 132-140.
- 唐韩英. 2022. 煤矿瓦斯利用技术现状与展望[J]. 煤质技术, 37(1): 69-77.
- 王家臣. 2011. 煤与瓦斯共采需解决的关键理论问题与研究现状[J]. 煤炭工程, (1): 1-3.
- 王胜建, 高为, 郭天旭, 包书景, 金军, 徐秋枫. 2020. 黔北金沙地区二叠系龙潭组取得页岩气、煤层气和致密砂岩气协同发现[J]. 中国地质, 47(1): 249-250.
- 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 高峰, 刘见中, 任怀伟, 葛世荣. 2018. 煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 43(5): 1210-1219.
- 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 高峰. 2014. 我国煤与瓦斯共采: 理论与技术与工程[J]. 煤炭学报, 39(8): 1391-1397.
- 谢和平. 2022. 煤炭碳中和战略与技术路径[M]. 北京: 科学出版社, 91.
- 邢红. 2018. 煤矿瓦斯(煤层气)浓缩提纯技术及其应用[J]. 煤炭工程, 50(1): 13-15.
- 徐凤银, 王勃, 赵欣, 云箭, 张双源, 王虹雅, 杨贇. 2021. 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, 26(3): 9-18.
- 杨朔. 2017. 风电/光伏发电接入电网的电压稳定性及控制策略研究[J]. 科学技术创新, 30(2): 102-103.
- 叶建平, 侯淞泽, 张守仁. 2022. “十三五”期间煤层气勘探开发进展及下一步勘探方向[J]. 煤田地质与勘探, 50(3): 15-22.
- 袁亮, 薛俊华, 张农, 卢平. 2013. 煤层气抽采和煤与瓦斯共采关键技术与发展展望[J]. 煤炭科学技术, 41(9): 6-11.
- 袁亮. 2016. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 41(1): 1-6.
- 袁亮. 2009. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报, 34(1): 1-8.
- 袁亮. 2010. 瓦斯治理理念和煤与瓦斯共采技术[J]. 中国煤炭, 36(6): 5-12.
- 张千贵, 李权山, 范翔宇, 刘超, 葛兆龙, 蒋志刚, 彭小龙, 李相臣, 朱苏阳, 赵世林, 赵鹏斐, 陈昱霏. 2022. 中国煤与煤层气共采理论技术现状及发展趋势[J]. 天然气工业, 42(6): 130-145.
- 张宇轩, 唐金荣, 牛亚卓, 张静雅, 赵禹, 魏建设, 姜光政, 王利伟. 2022. 中国西北在碳中和进程中的资源优势 and 地质工作建议[J]. 中国地质, 49(5): 1458-1480.
- 赵景辉, 高玉巧, 陈贞龙, 郭涛, 高小康. 2021. 鄂尔多斯盆地延川南区块深部地应力状态及其对煤层气开发效果的影响[J]. 中国地质, 48(3): 785-793.
- 赵欣, 程爱国, 潘海洋, 陈美英, 孙杰, 唐朝苗, 徐强. 2017a. 煤炭与煤层气资源勘查技术体系对比研究[J]. 中国煤炭地质, 29(4): 8-11.
- 赵欣, 程爱国, 潘海洋, 陈美英, 孙杰, 唐朝苗. 2017b. 煤炭资源勘查过程中煤层气资源评价技术研究[J]. 煤炭科学技术, 45(11): 180-186, 198.