

煤田地质与勘探
Coal Geology & Exploration
ISSN 1001-1986, CN 61-1155/P

《煤田地质与勘探》网络首发论文

题目： 煤矿区碳排放的确认和低碳绿色发展途径研究
作者： 王猛，马如英，代旭光，单雅迪
收稿日期： 2021-07-08
网络首发日期： 2021-08-13
引用格式： 王猛，马如英，代旭光，单雅迪. 煤矿区碳排放的确认和低碳绿色发展途径研究[J/OL]. 煤田地质与勘探.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P20210813.1456.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

煤矿区碳排放的确认和低碳绿色发展途径研究

王 猛^{1,3,4}, 马如英², 代旭光⁴, 单雅迪⁴

(1. 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008; 2. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830046; 3. 中国矿业大学 低碳能源研究院, 江苏 徐州 221008; 4. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 开展煤矿区碳排放的系统评价和减排路径的综合分析, 是落实我国碳达峰与碳中和愿景的具体行动。针对煤矿区碳排放源边界不清、核算模型缺乏及碳中和背景下发展方向等问题开展分析。通过文献查阅、资料收集等方法, 厘清煤矿区碳排放源边界, 并建立碳排放量核算模型, 明确煤矿区低碳绿色发展方向。结果表明: 煤矿区碳排放(CH₄和CO₂)来源可划分为自然排放和人为排放两大类, 并细分为5种类型, 针对不同碳排放源提出相应的数学模型; 同时煤矿区要加大节能和低碳技术的投入, 提高综合资源的利用程度和瓦斯的监测力度, 加强绿色矿山修复和建设, 积极参与碳市场和碳排放权交易及培育适应市场的管理模式等一系列措施, 逐步实现低碳、绿色产业体系; 此外, 煤矿相关单位应高瞻远瞩, 深入分析并发挥政府的低碳环保政策, 与相关高校加强合作, 在我国碳减排目标下, 大力推动煤制氢技术的发展, 突破CO₂-ECBM和CCUS关键技术中的运输、封存选址、安全稳定性评价、降低成本等瓶颈问题, 以期在双碳背景下, 在碳减排过程中实现经济、环保双重效益。

关键词: 煤矿区; 碳排放源; 碳减排路径; 低碳化技术

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

Confirmation of carbon emissions in coal mining areas and research on low-carbon green development path

WANG Meng^{1,3,4}, MA Ruying², DAI Xuguang⁴, SHAN Yadi⁴

(1. Jiangsu Key Laboratory of Coal-based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221008, China; 2. College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Low Carbon Energy Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Analysis was carried out on the issues such as unclear boundaries of carbon emission sources in coal mining areas, lack of accounting models, and development directions in the context of carbon neutrality. Based on the previous researches and through literature review, data collection and other methods, the boundaries of carbon emission sources in coal mining areas have been clarified and accounting model has been established, clarifying the low-carbon and green development direction of coal mining areas. The sources of carbon emissions (CH₄ and CO₂) in coal mining areas are divided into two major categories: natural emission and anthropogenic emission and divided into seven types, further, corresponding mathematical models are proposed for different carbon emission sources. At the same time, in the coal mining areas the investment in energy saving and low carbon technology should be increased, the utilization degree of comprehensive resources and gas monitoring should be improved, the restoration and construction of green mines, actively participating in carbon market and carbon emission right trading should be strengthened, and a series of measures to adapt to the market should be formed, a low carbon green industrial system should be gradually set up; In addition, we must be far-sighted, give full play to the government's low-carbon environmental protection policy, and cooperate with relevant universities to vigorously promote the development of coal-to-hydrogen technology under China carbon emission reduction goals, the breakthrough in the bottleneck problems of transport, storage location, safety and stability evaluation and cost reduction of key technologies of CO₂-ECBM and CCUS, and achieve huge economic and environmental benefits in the process of carbon emission reduction.

Keywords: Coal mining area; carbon emission source; carbon reduction path; low carbon

随着全球变暖以及生态系统的失衡, 世界各国为了应对气候变化中减少温室气体的排放要求, 逐步减少煤炭的需求。在能源方面, 全球的CO₂排放主要源自化石能源(煤炭、石油、天然气), 并且呈逐年增加趋势。

收稿日期: 2021-07-08; 修回日期: 2021-08-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020ZDPYMS09)

第一作者: 王猛, 1982年生, 男, 山东邹城人, 博士, 教授, 从事非常规天然气地质、煤田地质、CO₂地质封存研究, E-mail: wangm@cumt.edu.cn

势，而其他来源的 CO₂ 在占比较小^[1-3]。EIA(International Energy Agency)^[3]指出，到 2060 年碳排放不能高于 90 亿 t，需要提高能源效率、规模化开发可再生能源、发展碳捕获、利用与封存(CCUS)等各类技术共同实现减排目标，在实现全球温控 1.5℃ 的目标下，IEA 预估利用 CCUS 技术，至 2060 年可减少 280 亿 t 的 CO₂ 排放量^[4-5]。煤矿区作为 CO₂ 重要的地质封存场所，为实现碳达峰与碳中和目标将发挥重要作用^[6-8]。

根据国际能源署、国务院发展中心、清华大学等多个机构预测结果表明，2020 年我国 CO₂ 年排放量为 100 亿 t 左右，至 2030 年 CO₂ 排放峰值为 105 亿 t 左右^[3,9]。我国拥有全球最大的能源系统(生产和消费)，2018、2035、2050 年化石能源在一次能源消费中分别占 86%、71%、62%^[10]。基于当前我国经济发展形势和能源构成类型，虽然化石能源的比例有所下降，但对煤炭资源的依赖程度依旧很大。在煤炭开采生产、加工及利用环节产生了大量的碳排放，造成了严重的环境负担。在上述背景下，为应对碳减排已提出一系

列相关政策与措施，将在一定程度上增加煤炭企业的成本，如何在优化产业结构，保持生产力的基础上，又能减少碳排放，这是当前煤炭企业面临的重大困难和挑战。

当前对煤矿区碳排放的研究主要集中在煤炭开采过程中瓦斯的直接逸散和电力消耗导致的间接碳排放，缺少对整个矿区碳排放的系统评估和在时间和空间尺度上矿区碳含量的变化趋势研究。因此，进行整个煤矿区碳排放的系统评价，结合矿区实际碳排放结构，提出相关碳减排建议 and 对策，对煤炭企业的绿色、安全可持续发展具有重大意义。

1 煤矿区碳排放来源的构成分析

煤矿区开展碳减排措施的首要前提是明确矿区碳排放的来源，且对各源头的碳排放进行确认和计量。本文将煤矿区碳排放(CH₄ 和 CO₂)来源划分为自然排放和人为排放两大类，并划分为 5 种类型，具体如下：未开采煤层、非受控燃烧、煤炭开采活动、能源资源消耗、垃圾处理等引起的碳排放，如图 1 所示。

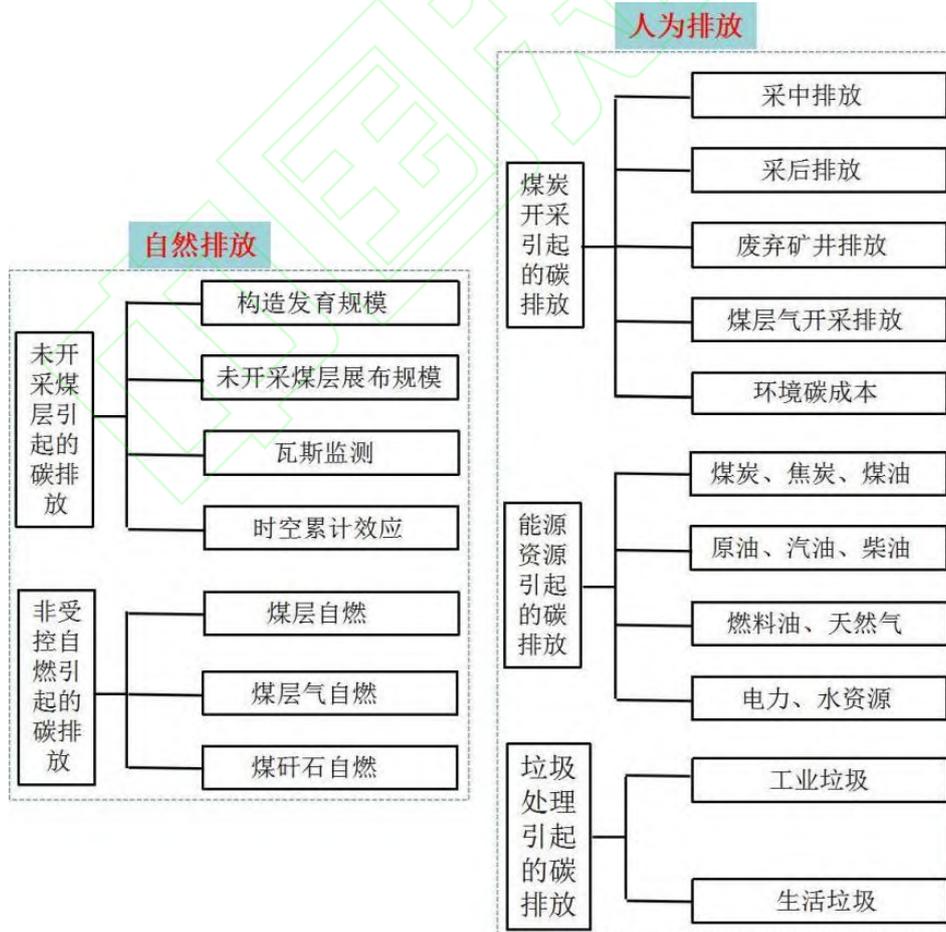


图 1 煤矿区潜在碳源分类和分析

Fig.1 Classification and analysis of potential carbon sources in coal mining areas

在明确了煤矿区各碳排放源边界的基础上,通过资料收集分析、实验测试等方法,选择适宜的数学模型,对碳排放源进行计量与分析,但目前缺乏对煤矿区碳排放量的计量模型。因此,本文针对各碳排放源提出了相应的数学模型。

1) 能源和资源利用中的碳排放 C_1

应用 IPCC 模型将煤矿区涉及的所有能源和资源进行计量。

$$C_1 = \sum_{i=1}^n Q_i \times e_i \times f_i \quad (1)$$

式中: i 为不同能源资源类型(煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、电力、水); Q_i 为 i 类型的能源资源消费量; e_i 为不同能源资源类型折算标准煤系数; f_i 为不同能源资源的碳排放系数。

2) 煤矿区未开采、开采及闭采过程中的碳排放 C_2

$$C_2 = \sum M \cdot \alpha + \sum N \cdot \beta + \sum Q \cdot \lambda + \sum P \cdot \theta + \sum R \cdot \varphi + \sum S \cdot \sigma \quad (2)$$

式中: M 、 α 为未开采煤层气量及碳排放系数; N 、 β 为开采煤层中总的煤层气含量及碳排放系数; Q 、 λ 为闭采煤层中剩余煤层气资源量及碳排放系数; P 、 θ 为煤层气开采资源量及碳排放系数; R 、 φ 为煤层气总利用量及利用过程中的碳排放系数; S 、 σ 为采出煤炭中剩余煤层气含量及碳排放系数。

3) 煤层、瓦斯及煤矸石自燃过程中碳排放 C_3

$$C_3 = \sum_{i=1}^3 X_i \cdot \chi_i \quad (3)$$

式中: X_i 为煤层、煤矸石、瓦斯自燃量; χ_i 为煤层、煤矸石、瓦斯自燃的碳排放系数。

4) 工业及生活垃圾处理中的碳排放 C_4

$$C_4 = \sum Bv + \sum D\psi \quad (4)$$

式中: B 为工业垃圾总量; v 为工业垃圾碳排放系数; D 为生活垃圾总量, ψ 为生活垃圾碳排放系数。

针对式(1)—式(4)中碳排放系数的确定,有条件的企业可采用实测,遵循 GB/T 476—2008《煤中碳和氢的测量方法》、NB/SH/T 0656—2017《石油产品及润滑油中碳、氢、氮测定法(元素分析仪法)》、GB/T 13610—2020《天然气的组成分析气相色谱法》、或 GB/T 8984—2008《气体中一氧化碳、二氧化碳和碳氢化合物的测定(气相色谱法)》等相关标准,或参考碳排放系数缺省值两种方法^[11]。

基于 LMDI 加和分解法,分析各碳排放源在煤矿

区碳排放过程中的比例,明确下一步从源头开展减排工作的方向。在分析煤矿区各碳排放源确认和计量的基础上,以生产技术、产业结构、技术创新、能源结构 4 个参数为对象,结合 STIRPAT 模型,分析并总结煤矿区碳减排的驱动要素。构建的 STIRPAT 如下:

$$\ln C = \ln a + \mu_1 \ln P_t + \mu_2 \ln I_s + \mu_3 \ln T_i + \mu_4 \ln E_s + \ln e \quad (5)$$

式中: a 、 e 分别为误差干扰项和常数项; C 为煤矿区碳排放量; P_t 为生产技术; I_s 为产业结构; T_i 为技术创新; E_s 为能源结构。 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 、 μ_4 分别为生产技术、产业结构、技术创新、能源结构的影响因子占比。

2 煤矿区碳减排途径分析

当前,我国煤矿区存在技术设备老旧、污染严重、管理模式落后^[8]、煤矿区碳排放核算边界不清、计量与分析模型缺乏等一系列问题。此外,在低碳绿色产业体系、附加资源的综合利用、碳排放物检测预警体系、碳排放核算体系及前沿技术的研发方面均缺乏系统研究。实现煤矿区碳减排绿色发展,应以煤矿区为核心,要充分发挥煤矿区、政府及高校间的联动作用,借助政府支持,并加强与高校间的紧密合作,推动煤矿区碳排放监测、CO₂ 地质封存、煤制氢领域等^[12-17]热点技术的发展,构建煤矿区碳减排的新技术体系。

2.1 煤矿区碳减排主要任务

1) 节能和低碳技术

基于煤矿区碳源分析,结合实际情况,加大引入先进开采技术,推动大型开采设备更新,逐步实现低能耗、自动化、智能化等综合机械化采煤,从而在煤炭开采过程中降低能耗和减少碳排放。多方面实施低碳和清洁生产利用等技术,降低在煤炭开采过程中的碳排放,构建环保型产业体系。

2) 附加资源利用

注重和加大对开采附加资源技术的研发力度,提高对瓦斯、共生矿产及伴生矿产等多种资源的综合开发和合理利用,以及对关闭矿井资源的二次评价与开发。其次,实现对煤炭生产过程中二次资源的回收和合理利用,具体包括:废气、废水(或废液)、固体废弃物、余热、余压等资源;此外,还有煤矸石综合利用、矿井水综合利用、粉煤灰综合利用、物料循环利用、工业用水循环利用等。

3) 瓦斯排放的监测力度

煤炭开采、矿井废弃及露天煤矿等,造成瓦斯自然逸散到大气中,增加碳排放量。结合基础地质数据,寻找并确定煤矿区废弃矿井、塌陷区、易燃煤层分布、受构造作用较强的未开采煤层分布等。对易燃煤层,

应采取相关措施,降低煤层的可燃性;加强矿区难抽采煤层瓦斯、低浓度煤层瓦斯的监测;加大对煤炭采中、采后、废弃矿井、塌陷区瓦斯碳排放的监测力度,对于高瓦斯逸散区块,应开展进一步更为细致的研究工作,减少瓦斯逸散,同时加强瓦斯资源利用。

4) 绿色矿山修复和建设

减少矿区建设用地和采矿用地,加大土地复垦和塌陷区治理及易燃煤层的监测力度,建立矿区生态园区,加强绿色矿山建设力度和实时监控力度。推进对开采后的矿山废弃空间旅游资源的开发,发展与旅游相关的服务行业;立足矿山生态,发展绿色农副产品产业,提高企业的综合效益。

5) 碳市场和碳排放权交易

加强培育碳交易和碳资产专业管理的队伍建设,拓展外部交流与合作等措施。结合我国出台的一系列生态环境保护、碳减排、绿色清洁生产等与发展低碳经济相关的法律、法规和税收减免政策等,逐步完善企业的监管、治理、研发及激励等机制,加快产业结构的升级。在碳排放权产权界定清晰下,积极参与碳排放权交易,并获得更多的碳排放权,实现经济效益。

6) 煤矿区相适宜的碳排放核算体系

基于煤矿区碳排放源清单,针对不同的煤矿及矿石类型、各碳排放源特征,建立更加准确的核算方法,分析各碳排放源的排放强度、结构,建立面向整个煤矿区的综合核算模型。针对煤矿区碳减排核算模型,明确各碳排放源减排贡献率,制定煤矿区碳减排综合分析模型。

2.2 前沿低碳技术研发

1) 煤矿区碳排放在线监测

(1) 卫星遥感碳排放时空分布,对比并分析 SCIAMACHY、AIRS 以及我国的 TanSat 等嗅碳卫星遥感影像数据,利用高光谱遥感数据分析煤矿区 CO₂ 排放的空间分布,以及煤矿区 CO₂ 排放的月份、季节和年度变化趋势,动态分析煤矿区 CO₂ 源汇格局的时空变化机制。

(2) 利用无线传感器网络和云计算等信息技术,在煤矿区(地面以上和地面以下)部署多组 CO₂、CH₄ 实时在线监测仪器,实现碳排放监测仪器自组网,并搭建煤矿区碳排放实时监测云平台,实现对监测数据的无线传输、网络汇聚和动态分析,进一步动态分析煤矿企业 CO₂ 和 CH₄ 排放的时空变化,构建“互联网+(CO₂ 和 CH₄)”排放监测模式。

2) 煤矿区 CCUS 潜力评价

查明区内可采煤层、废弃煤层、高瓦斯难采煤层、无商业价值或不可采煤层等规模,以及埋藏超过终采线的深部煤层的规模,收集煤矿区的基础地质资料,通过测试分析和实验模拟评价煤矿区储盖组合的孔渗等参数,筛选适宜性封存场所,评估 CO₂ 封存潜力,开展 CCUS 工程试点试验,对封存后 CO₂ 的稳定性建立预警、监测和防范机制,做出封存稳定性评估,最后通过建立数学模型以评价 CO₂ 利用和封存技术的适用性。在注入 CO₂ 提高煤层 CH₄ 采收率方面^[18-19],目前在已形成的开采技术基础上,加快理论研究和技术研发,进行 CO₂-ECBM 技术的经济、环境效益评价。CO₂ 地质利用与封存模式如图 2 所示。

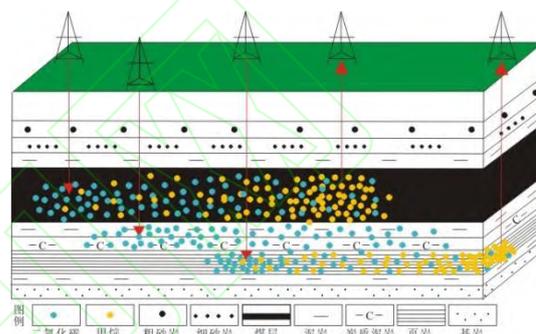


图 2 CO₂ 地质封存与利用模式

Fig.2 CO₂ geological storage and utilization model

3) 煤制氢技术

基于长期能源需求预测,我国氢气年需求量逐年增加,至 2050 年氢气年需求量可达 6 000 万 t(图 3),减排 CO₂ 可达 7 亿 t,具有空前的市场和碳减排潜力。在目前的制氢技术中,主要以化石能源制氢为主,预测至 2030 年,化石能源制氢占比仍约 60%,至 2050 年时,随着可再生能源制氢技术的发展,化石能源制氢比例有所下降,但仍占 20%左右(图 4a),表明在长达 30 年时间里,化石能源制氢仍是众多制氢技术中的关键技术。其次,在可再生资源制氢、天然气制氢、可再生电力制氢等技术未实现突破前,煤制氢技术的成本仅次于天然气制氢,仅为 14.59 元/kg,成为我国初期和中远期制氢技术中最为安全、经济、成熟的制氢方向^[20]。从 CO₂ 封存成本而言,煤制氢过程产生的 CO₂ 纯度最高达 98%左右,大大降低了 CCUS 技术中 CO₂ 的捕获成本。协同发展煤气化、煤液化、煤制油等工艺,虽然煤制油易受国际市场和油价波动的影响,但从碳减排、绿色清洁生产的角度来看,仍具有一定的发展潜力。

通过分析我国从 2014—2018 年的煤炭消费量,如图 4b 所示,发现火力发电占主要比例,虽然煤制气和煤制油过程中煤炭消费量较低,但呈逐年增长趋势。

我国作为富煤国家，煤制氢技术为煤炭清洁绿色发展提供了新的发展方向，在可再生能源制氢技术未完全成熟之前，应发展以煤炭为主的制氢技术，探索煤制氢技术的理论与方法，符合我国目前的碳减排需求。

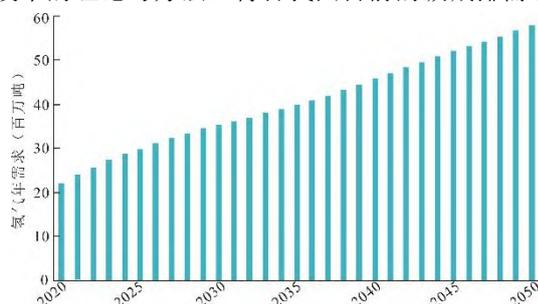
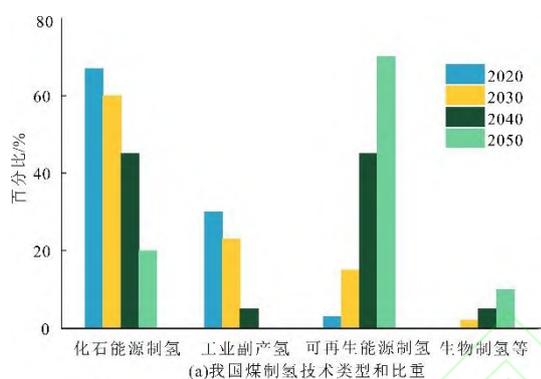
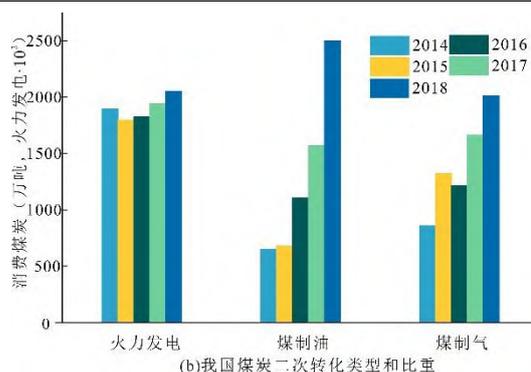


图3 我国氢能需求^[10]

Fig.3 Chinese hydrogen energy demand^[10]



(a)我国煤制氢技术类型和比重



(b)我国煤炭二次转化类型和比重

图4 我国制氢技术和比重与煤的二次利用^[10,21]

Fig.4 Proportions of hydrogen production technologies and secondary utilization of coal^[10,13]in China

3 建议与对策

应深刻认识煤炭产业在我国能源安全领域的基础兜底保障作用，是可清洁高效利用的最为经济和安全的能源^[22]。应以煤矿区为落脚点，通过碳排放的确认和计量，查明煤矿区碳排放来源、碳排放量、碳排放结构，分析煤矿区内企业规模、能耗强度和能源效率及低碳化实施程度，结合遥感卫星与在线监测仪器监测煤矿区碳排放源汇格局的时空变化机制。基于上述基础，总结分析煤矿区各碳排放源的碳排放特征，建立煤矿区碳排放相适宜的综合核算和分析模型。明确各碳排放源的碳排放因子，在碳排放各环节制定相应的减排途径。充分利用政府部门给予的政策优势，与高校积极合作，发挥高校的理论研发优势，推进煤制氢理论与技术研发，开展 CCUS 及 CO₂-ECBM 试点试验，提出面向煤炭企业低碳循环发展模式和碳达峰与碳中和目标的政策与对策研究(图 5)。

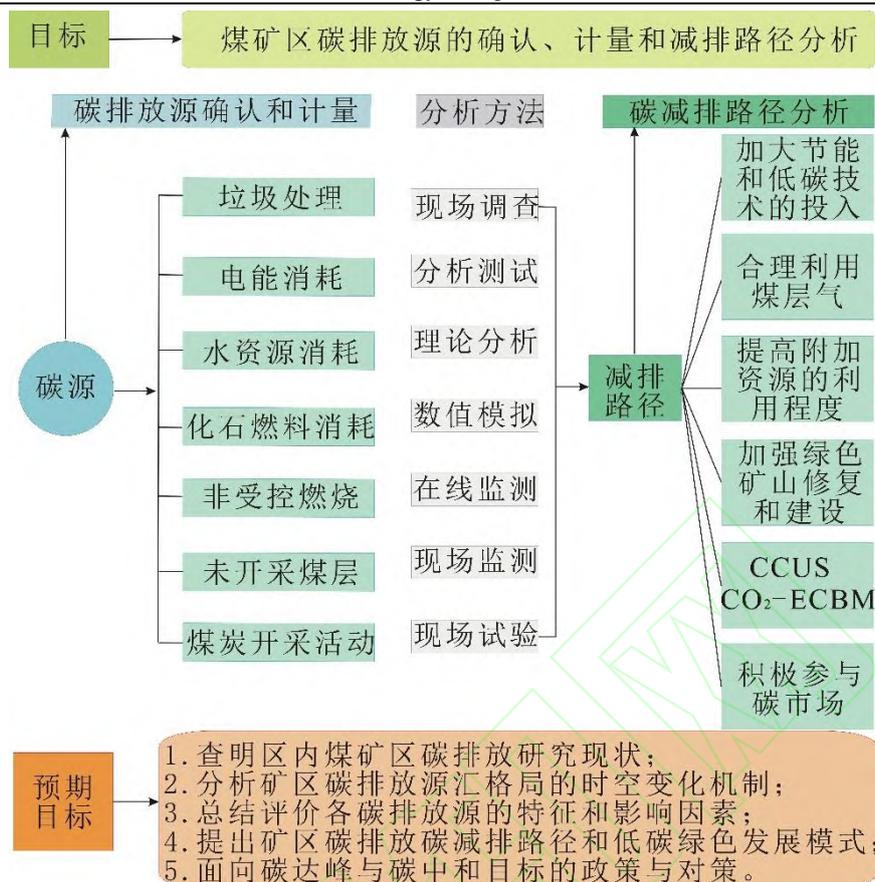


图5 煤矿区减排方案

Fig.5 Scheme of emission reduction in coal mining areas

4 结论

a. 厘清了煤矿区碳排放源的边界和建立了核算模型。将煤矿区碳排放(CH₄和CO₂)来源划分为自然排放和人为排放两大类,并划分为5种类型,针对不同的碳排放源提出相应的数学模型。

b. 明确了煤矿区低碳减排途径。煤矿区要强化煤炭绿色开发和矿区生态环境治理,通过加大节能和低碳技术的投入、提高综合资源的利用程度,加强培育适应市场的管理模式等一系列措施协同开展,逐步实现低碳、绿色产业体系。

c. 指出了煤炭企业布局的前沿科技领域。应逐步实现煤矿区碳排放的在线监测部署,突破CO₂-ECBM和CCUS等关键技术的瓶颈,大力推动煤制氢技术的发展,从而在碳减排中实现巨大的经济、环境效益。

参考文献(References)

[1] 邹才能,熊波,薛华庆,等. 新源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411-420.
ZOU Caineng, XIONG Bo, XUE Huaqing, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 411-420.
[2] IEA. Global CO₂ emissions in 2019[EB/OL]. (2020-02-11)[2021-

02-19].
[https://www.iea.org/articles/global-CO₂-emissions-in-2019](https://www.iea.org/articles/global-CO2-emissions-in-2019)
[3] IEA. CO₂ emissions statistics[EB/OL]. (2020-11-16)[2021-02-19].
[https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/CO₂-emissions-statistics](https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/CO2-emissions-statistics)
[4] 赵志强,张贺,焦畅,等. 全球CCUS技术和应用现状分析[J]. 现代化工, 2021, 41(4): 5-10.
ZHAO Zhiqiang, ZHANG He, JIAO Chang, et al. Review on global CCUS technology and application[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(4): 5-10.
[5] International Energy Agency. Transforming industry through CCUS[R]. Australia: International Energy Agency, 2019.
[6] 桑树勋,王冉,周效志,等. 试论煤地质学与碳中和[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 1-11.
SANG Shuxun, WANG Rang, ZHOU Xiaozhi, et al. Review on carbon neutralization associated with coal geology[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 1-11.
[7] 张九天,张璐. 面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 1-6.
ZHANG Jiutian, ZHANG Lu. Preliminary discussion on development of carbon capture, utilization and storage for carbon neutralization[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 1-6.
[8] 米剑锋,马晓芳. 中国CCUS技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537-2544.
MI Jianfeng, MA Xiaofang. Development trend analysis of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2537-2544.
[9] 李继峰,郭焦锋,高世楫,等. 我国实现2060年前碳中和目标

- 的路径分析[J]. 发展研究, 2021, 38(4): 37-47.
- LI Jifeng, GUO Jiaofeng, GAO Shiji, et al. Path analysis of China's carbon neutrality by 2060[J]. Development Research, 2021, 38(4): 37-47.
- [10] 《中国氢能源及燃料产业白皮书》[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/324011929_825427
“White Paper on China's Hydrogen Energy and Fuel Industry”[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/324011929_825427
- [11] 省级温室气体清单编制指南[EB/OL]. <https://www.doczhi.com/p-875449.html>
Guidelines for the preparation of provincial greenhouse gas inventories[EB/OL]. <https://www.doczhi.com/p-875449.html>
- [12] 马劲风, 杨杨, 蔡博峰, 等. 不同类型二氧化碳地质封存项目的环境监测问题与监测范围[J]. 环境工程, 2018, 36(2): 10-14.
- MA Jinfeng, YANG Yang, CAI Bofeng, et al. Environmental monitoring range for different types of CO₂ geologic sequestration projects and its related issues[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(2): 10-14.
- [13] 李琦, 刘桂臻, 蔡博峰, 等. 二氧化碳地质封存环境风险评估的空间范围确定方法研究[J]. 环境工程, 2018, 36(2): 27-32.
- LI Qi, LIU Guizhen, CAI Bofeng, et al. Principle and methodology of determining the spacial range of environmental risk assessment of carbon dioxide geological storage[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(2): 27-32.
- [14] 刘钦节, 王金江, 杨科, 等. 关闭/废弃矿井地下空间资源精准开发利用模式研究[J/OL]. 煤田地质与勘探. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.p.20210519.1733.004.html>
- LIU Qinjie, WANG Jinjiang, YANG Ke, et al. Research on the model of accurate exploitation and utilization of underground space resources in closed/abandoned mines[J/OL]. Coal Geology & Exploration. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.p.20210519.1733.004.html>
- [15] 王争, 李国富, 周显俊, 等. 山西省废弃矿井煤层气地面钻井开发关键问题与对策[J/OL]. 煤田地质与勘探. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P.20210507.1350.004.html>
- WANG Zheng, LI Guofu, ZHOU Xianjun, et al. Key problems and countermeasures of CBM surface drilling development in abandoned coal mines of Shanxi Province[J/OL]. Coal Geology & Exploration. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1155.P.20210507.1350.004.html>
- [16] 邹才能, 薛华庆, 熊波, 等. “碳中和”的内涵、创新与愿景[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 1-12.
- ZOU Caineng, XUE Huaqing, XIONG Bo, et al. Connotation, innovation and vision of “carbon neutral”[J]. Natural Gas Industry: 1-12.
- [17] 徐冬, 孙楠楠, 张九天, 等. 通过耦合碳捕集、利用与封存实现低碳制氢的潜力分析[J]. 热力发电: 1-9.
- XU Dong, SUN Nannan, ZHANG Jiutian, et al. Potential analysis of carbon dioxide capture, utilization and storage equipped low carbon hydrogen production[J]. Thermal Power Generation: 1-9.
- [18] MUKHERJEE M, MISRA S. A review of experimental research on enhanced coal bed methane(ECBM) recovery via CO₂ sequestration[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 179: 392-410.
- [19] WOLF K H A A, BARZANDJI O H, BRUINING H, et al. CO₂ injection in and CH₄ production from coal seams: Laboratory experiments and image analysis for simulations[J]. Fuel Communications, 2020, 1-14.
- [20] 殷雨田, 刘颖, 章刚, 等. 煤制氢在氢能产业中的地位及其低碳化道路[J]. 煤炭加工与综合利用, 2020(12): 56-58.
- YIN Yutian, LIU Ying, ZHANG Gang, et al. The status and low-carbon path of hydrogen from coal at hydrogen energy industry[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2020(12): 56-58.
- [21] 中华人民共和国国家统计局[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>
- [22] 王国法. 加快煤矿智能化发展建设智能+绿色煤炭工业新体系[J]. 中国煤炭工业, 2020(4): 8-15.
- WANG Guofa. Speed up the development of coal mine intelligence and build a new system of intelligent green coal industry[J]. China Coal Industry, 2020(4): 8-15.

(责任编辑 范章群)