



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

井工煤矿甲烷排放精准监测与核算

解北京 李晓旭 张景顺 栾铮 李军 陈伟 王兹尧 汤效平

引用本文:

解北京, 李晓旭, 张景顺, 等. 井工煤矿甲烷排放精准监测与核算[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 119–130.

XIE Beijing, LI Xiaoxu, ZHANG Jingshun. Accurate monitoring and accounting of methane emission in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 119–130.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1992>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深部煤炭地下气化制氢碳排放核算及碳减排潜力分析

Carbon emission accounting and carbon reduction analysis for deep coal underground gasification to hydrogen
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 531–541 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1638>

煤矿静载型冲击地压地音监测预警技术

Monitoring and warning technology of acoustic emission in static loading rock burst of coal mine
煤炭科学技术. 2021, 49(6): 94–101 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/97e98d7d-956a-4b8b-97bb-91941de616cc>

基于边缘计算的煤矿工作面甲烷监测模式探讨

Research on methane monitoring mode of coal mining face based on edge computing
煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/808742e3-79d4-488c-bb70-95103b3b2c29>

煤矿井下瓦斯高效精准抽采定向钻进技术与装备

Directional drilling technology and equipment for efficient and accurate gas drainage underground coal mine
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 65–72 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq22-24>

甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用

Methane gas detection technology and its application in coal mines
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 40–48 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.005>

急倾斜特厚煤层水平分段开采工作面瓦斯涌出影响因素研究

Study on influencing factors of gas emission in horizontal sub-level mining face of steeply inclined and extra-thick coal seam
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 127–135 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f5ce26fc-a6e8-4b9d-a5a7-611047fe8a4d>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

解北京, 李晓旭, 张景顺, 等. 井工煤矿甲烷排放精准监测与核算[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 119-130.
XIE Beijing, LI Xiaoxu, ZHANG Jingshun, *et al.* Accurate monitoring and accounting of methane emission in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 119-130.

井工煤矿甲烷排放精准监测与核算

解北京¹, 李晓旭¹, 张景顺¹, 栾 铮¹, 李 军², 陈 伟², 王兹尧³, 汤效平³

(1. 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;
3. 华电电力科学研究院有限公司, 北京 100071)

摘 要: 甲烷作为全球第二大温室气体, 具有增温潜势高、寿命短的特点, 主要来源于煤炭、油气生产、农业、畜牧业和废弃物处理等领域。积极稳妥有序控制甲烷排放, 兼具减缓全球温升的气候效益、能源资源化利用的经济效益、协同控制污染物的环境效益和减少生产事故的安全效益。甲烷也是煤矿生产排放中最主要的温室气体, 目前对煤矿甲烷的排放监测及其在煤矿三维立体空间内的浓度分布研究将成为我国甲烷排放控制行动的重点, 对煤矿企业更好顺应国家战略具有重要意义。选取山西某高瓦斯矿井、陕西某低瓦斯矿井进行甲烷排放监测核算, 以固定监测、手工监测、无人机监测及矿后活动监测等方式研究我国高低瓦斯矿井甲烷分布, 并对其甲烷排放量开展分析。结果表明: ①美国 Climate TRACE 网站公布的山西某高瓦斯矿井、陕西某低瓦斯矿井 2022 年度甲烷排放量与实测法计算的结果差异较大, 其中公布的某低瓦斯矿井年度甲烷排放量为实测法计算结果的 10.92 倍, 自上而下的监测核算方法准确性不足, 无法为碳交易提供可靠的数据支持。②矿后活动监测核算发现, 采用 IPCC 缺省值计算的矿后活动甲烷排放量是实测法计算的 3~5 倍, 且不同粒径和暴露时间下煤样反馈的矿后活动排放量差异较大。亟需一套统一精准的测试标准, 为未来碳市场交易提供公平准确的数据。

关键词: 井工煤矿; 甲烷排放; IPCC 缺省值; 精准监测核算; 排放因子

中图分类号: X5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)04-0119-12

Accurate monitoring and accounting of methane emission in underground coal mine

XIE Beijing¹, LI Xiaoxu¹, ZHANG Jingshun¹, LUAN Zheng¹, LI Jun², CHEN Wei², WANG Ziyao³, TANG Xiaoping³

(1. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083;
2. School of Earth Science and Mapping Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083;
3. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100071)

Abstract: Methane, the second most prevalent greenhouse gas globally, is characterized by its high global warming potential and short atmospheric lifetime. It is primarily emitted from sectors such as coal mining, oil and gas production, agriculture, livestock rearing, and waste management. Active, prudent, and orderly control of methane emissions offers a multifaceted benefit: it mitigates global warming, enhances the economic value through the resource utilization of energy, provides environmental advantages by control of pollutants, and improves safety by reducing production accidents. Methane is also the principal greenhouse gas emitted in coal mine operations. Currently, monitoring and researching the distribution of methane emissions and their concentration within the three-dimensional space of coal mines have become a key focus in China's methane emission control efforts, which is of significant importance for coal mining enterprises to align with national strategies. A study conducted on a high-gas mine in Shanxi and a low-gas mine in Shaanxi for methane emission monitoring and accounting utilized fixed monitoring, manual monitoring, drone monitoring, and post-mining activity monitoring to investigate the distribution of methane in high and low gas mines in China and to analyze their methane emissions. The results indicate that: ① The methane emission volumes for a certain high-gas mine in Shanxi and a low-gas mine in Shaanxi published by the U.S.-based Climate

收稿日期: 2023-12-06

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-1992

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC2904100, 2023YFC3011300); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2023ZKPYAQ04)

作者简介: 解北京(1984—), 男, 安徽滁州人, 副教授, 博士生导师, 博士。E-mail: bjxie1984@163.com

TRACE website for the year 2022 show a significant discrepancy from the results calculated using the ground measurement method, with the published annual methane emission volume for a certain low-gas mine being 10.92 times that of the ground measurement calculation. The top-down monitoring and accounting methods have been found to be insufficiently accurate and unable to provide reliable data support for carbon trading. ② In the monitoring and accounting of post-mining activities, the use of default values recommended by the IPCC results in methane emissions that are 3 to 5 times higher than those calculated using the ground measurement method, and there is a significant variation in the emissions calculated based on coal samples of different sizes and exposure durations. There is an urgent need for a unified and precise testing standard to ensure fair and accurate data for future carbon market transactions.

Key words: underground coal mine; methane emission; IPCC default value; accurate monitoring and accounting; emission factor

0 引言

“双碳”背景下,我国煤矿企业未来必然面对因碳排放权导致的企业经营成本上升等问题。全国碳排放权交易市场是利用市场机制控制和减少温室气体排放、推动绿色低碳发展的重大制度创新,也是落实中国碳达峰目标与碳中和愿景的重要政策工具,而碳排放量的精准监测与核算是保证碳交易准确性基础^[1]。2023年11月,我国生态环境部等11部门公布《甲烷排放控制行动方案》并提出,“十四五”期间,甲烷排放控制政策、技术和标准体系逐步建立,甲烷排放统计核算、监测监管等基础能力有效提升,甲烷资源化利用和排放控制工作取得积极进展^[2]。2024年3月,由EDF的下属机构开发的MethaneSAT搭乘SpaceX猎鹰9号火箭升空。它为全球甲烷监测开启新篇章,能够监测其他卫星无法测出的甲烷排放,为促进负责的、快速的减排铺平道路。

煤炭行业作为我国能源结构的主体,亟需解决碳排放量监测核算及控制问题^[3-5]。苏义脑等^[6]针对碳达峰碳中和能源发展战略,提出中国碳排放居高不下的根本原因为化石能源的消费,而实现双碳目标需要将化石能源开采和消费环节的碳排放作为研究与控制重点。《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》提出,相较于欧美发达国家50~70a的过渡期,我国计划从碳达峰过渡至碳中和的时间仅为30a,且在2030年后将逐渐提高减排力度,年减排率为8%~10%,远远高于发达国家^[7-8]。若想实现“双碳”目标,在控制二氧化碳排放的同时,对其他主要温室气体的监控减排尤为重要。甲烷是第二大温室气体,也是煤矿企业产生的最主要的温室气体。甲烷排放约占全球温室气体排放总量的16%,其温室作用仅次于二氧化碳,在20a尺度下甲烷的全球增温潜势是二氧化碳的81.2倍,但甲烷寿命仅为8~11a,约为二氧化碳的1/10,因此甲烷控排效益远高于二氧化碳^[9-11]。

2019年《IPCC2006年国家温室气体清单指南

2019修订版》增补了井工开采及露天开采煤矿中二氧化碳排放核算方法和排放因子^[12-13],二氧化碳排放核算已趋近完善,但对甲烷排放核算仍存在一定程度的缺失,特别是大多数矿井仍采用缺省值核算矿后活动的甲烷排放。我国煤矿甲烷排放核算虽有《2006IPCC国家温室气体清单指南》(简称《IPCC指南》)及《中国煤矿生产企业温室气体排放核算方法》(简称《排放核算方法》)可进行初步使用,但前者适用于国家层面核算,不适用于企业落实,后者制定了碳排放流程计算,但完善度较低,且没有具体验证方式,落地困难,无法进一步推进煤矿碳排放监测与核算的标准化实施,难以有效支撑“碳达峰、碳中和”政策实施,也难以满足未来企业减排履约需求^[14-17]。综上所述,我国多数煤矿企业的甲烷排放仍为灰色系统,缺乏适用于具体煤矿的甲烷排放监测核算方法,需在《IPCC指南》基础上优化并落实至具体企业,得出一套统一精准的甲烷排放量监测与核算标准。

为实现井工煤矿甲烷排放精准监测与核算,借助长时手工/自动监测手段,核算高/低瓦斯井工煤矿甲烷排放量,表征矿后活动缺省值、Climate TRACE结果与实际监测的偏差,并利用手工监测手段分析高瓦斯矿井高排放区域,为获取本地化排放因子,构建我国温室气体排放监测技术体系提供理论参考。

1 研究概况与方案

1.1 研究矿井概况

研究以井工开采煤矿为主,鉴于山西省呈中部低、四周高的地理特征,大气甲烷均位于中部难以扩散,故选取山西省中部某高瓦斯煤矿作为高瓦斯矿井监测核算试点^[18]。该矿井地质构造简单,包括主、副井,回风井,建有高、低压瓦斯抽采系统及瓦斯抽采发电系统,在瓦斯排放利用方面为典型煤矿。同时,选取陕西某低瓦斯矿井为低瓦斯矿井监测试点,该矿井煤炭储量大,产量高,为低瓦斯矿井甲烷监测核算典型。

1.2 监测核算方案

为实时监测矿井地面生产系统、井下生产系统、矿后活动等不同地点甲烷排放情况，依托矿井原有各地点甲烷、流量传感器等自动监测装置，结合手工监测设备，重点考察了煤矿乏风和矿后活动甲烷排放情况。监测核算方案如图1所示。

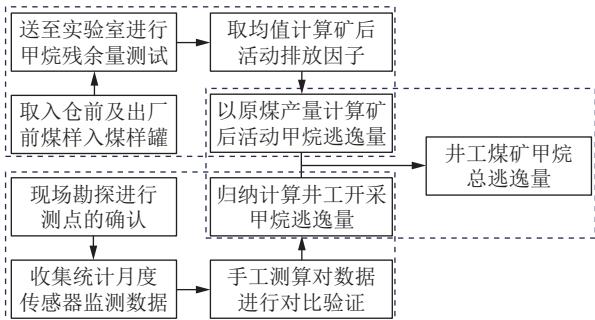


图1 监测核算方案示意

Fig.1 Schematic diagram of monitoring accounting scheme

2 监测核算方法

2.1 固定监测

监测位置为两矿井乏风系统及某高瓦斯煤矿抽采系统，固定监测项目包含计算碳排放量所需的所有参数，即甲烷浓度、工况流量、大气温度、地面静压、大气湿度、大气压力等。通过现场勘探，确认两矿井监测点位为进风01号、进风02号、回风01号，高瓦斯矿增加高低负压抽采管路测点。

两矿乏风甲烷浓度自动监测设备参数见表1。通过月度数据的统计，计算进风系统、回风系统及抽采系统甲烷排放量，排放数据与矿井开采情况相关，虽有波动但相对均衡，具有监测核算意义。

表1 甲烷浓度自动监测设备参数

Table 1 Automatic methane concentration monitoring equipment parameters

序号	量程(瓦斯体积分数)/%	测量误差
1	0 ~ 1.00	≤±0.10%
2	1.00 ~ 3.00	真值±10%
3	3.00 ~ 4.00	≤±0.30%

注：量程(0 ~ 4.00%)，响应时间≤20 s。

2.2 手工监测

Scot M. Miller 指出中国的 CMM 法规对中国甲烷排放量的持续增长没有明显的影响^[19]。为控制甲烷排放的持续增长，我国环保部要求矿井测量检出限为 2×10^{-6} 以内。此外，受煤矿瓦斯等级、生产环

节、固定监测传感器精度的影响，煤矿甲烷浓度差异较大，检测精度较低，不利于后续碳监测及碳交易系统的逐步完善。为保障碳监测数据质量，于2022年7—8月中旬，对某高瓦斯煤矿采取不定期现场手工监测核算。

2.2.1 实时手工监测

实时手工监测设备如图2所示。采用MS600便携式有毒有害气体检测仪对进风系统、回风系统及抽采系统的甲烷进行监测，监测过程中需与固定测点中甲烷浓度传感器对应，具体监测方式如图3所示。手工监测核算目的在于与固定监测进行对比分析，判断自动监测系统的准确性，分析甲烷排放波动情况。



图2 手工监测设备

Fig.2 Manual monitoring equipment



图3 手工监测方法

Fig.3 Manual monitoring method

2.2.2 气相色谱测试

受手工监测设备精度的影响，为判定不同位置甲烷含量，在低浓度甲烷监测的场景(回风井、筒仓提煤、筒仓不提煤、矸石场、主井提煤、主井不提煤)下同步取得气样，利用GC-4000A高精度气相色谱仪，确定甲烷排放空间分布。气相色谱仪如图4所示。



图4 GC-4000A 气相色谱仪
Fig.4 GC-4000A Gas Chromatograph

2.3 无人机监测

采用多旋翼无人机搭载 TDLAS 甲烷检测仪监测某高瓦斯矿的工业广场及风井,如图5所示。机载甲烷检测仪参数见表2。



图5 无人机成套监测系统 (TDLAS)
Fig.5 UAV complete monitoring system (TDLAS)

表2 机载甲烷检测仪参数

Table 2 Parameters of airborne methane detector

项目	详细参数
检测方式	可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)
分辨率	10^{-6}
检出限	10^{-6}
量程	$0 \sim 1\,000 \times 10^{-6}$
响应时间	1 s
监测原理	吸入式, 非遥测可定量

其中,工业广场飞行高度为 100 m,飞行路线如图6所示。风井的监测位置位于乏风口正上方 20 ~ 100 m 高度。



图6 工业广场无人机飞行路线
Fig.6 Industrial square UAV flight route

2.4 矿后活动监测

2.4.1 煤样残存瓦斯含量测试

煤样残存瓦斯含量测试,执行标准 GB/T 19559—2021。煤样送到实验室,经过两个步骤测定煤样的残存瓦斯含量。首先进行脱气,加热至 95 °C 真空抽出气体进行色谱分析;将煤样粉碎后进行加热和真空脱气,根据两次脱气气体体积和煤样重量,计算单位质量煤中的瓦斯量,即残存瓦斯量^[20-22]。实验室采用 FH-5 型瓦斯残存含量测定仪对煤样罐的残存瓦斯量和瓦斯成分进行了测定。通过甲烷残存量分析,计算煤样瓦斯排放量,进而根据煤矿产量推算矿后活动甲烷排放量。甲烷残存量测试设备如图7所示。



图7 甲烷残存量测试设备
Fig.7 Methane residue test equipment

2.4.2 不同粒径煤样瓦斯残存量测试

采用改进型 CWH12 煤层瓦斯含量测定仪对不同粒径煤样的残存瓦斯含量进行测定,如图8所示。该装置的测定方法执行标准 GB/T 23250—2009。将煤样放入破碎机,与测定仪相连即可在 20 min 之内出具测定报告,克服了传统实验室测试方法中煤样罐易漏气及测试周期长的缺点。



图8 改进型 CWH12 煤层瓦斯含量测定仪
Fig.8 Improved CWH12 coal seam gas content measuring instrument

筛分入库时和出厂前的煤样,获得粒径 0 ~ 6、6 ~ 13、13 ~ 25、25 ~ 50 mm 的煤样,并按照暴露时间 0、12、24、48 h,测试暴露时间对出厂前煤样瓦斯

残存量的影响。

3 监测核算模型

《排放核算方法》指出，我国甲烷排放量的计算模型^[23]为

$$E_{\text{CH}_4\text{-T}} = E_{\text{CH}_4\text{-J}} + E_{\text{CH}_4\text{-L}} + E_{\text{CH}_4\text{-K}} \quad (1)$$

式中： $E_{\text{CH}_4\text{-T}}$ 为我国煤矿甲烷总排放量，t； $E_{\text{CH}_4\text{-J}}$ 为我国井工开采煤矿甲烷总排放量，t； $E_{\text{CH}_4\text{-L}}$ 为我国露天开采煤矿甲烷总排放量，t； $E_{\text{CH}_4\text{-K}}$ 为我国煤矿矿后活动甲烷总排放量，t。

该模型适用于具体排放清单的计算，其中井工煤矿甲烷排放的计算模型为

$$E_{\text{CH}_4\text{-J}} = (Q_{\text{CH}_4\text{-F}} + Q_{\text{CH}_4\text{-C}} - Q_{\text{CH}_4\text{-H}} - Q_{\text{CH}_4\text{-U}}) \times 717 \quad (2)$$

式中： $Q_{\text{CH}_4\text{-F}}$ 为我国矿井通风系统甲烷排放量， Nm^3 （标准立方米）； $Q_{\text{CH}_4\text{-C}}$ 为我国矿井抽放系统甲烷排放量， Nm^3 ； $Q_{\text{CH}_4\text{-H}}$ 为我国矿井火炬甲烷销毁量， Nm^3 ； $Q_{\text{CH}_4\text{-U}}$ 为我国矿井甲烷利用量， Nm^3 。

针对具体煤矿企业甲烷排放，应在 $E_{\text{CH}_4\text{-J}}$ 计算基础上增加矿后活动甲烷排放量，即为该企业总甲烷排放量。但目前《排放核算方法》并未提及特定煤矿的矿后活动甲烷排放计算方法。

通过分析入仓前和出厂前甲烷残存量差值计算煤样甲烷排放量，归纳矿后活动排放因子，结合原煤产量计算煤矿月度矿后活动甲烷排放量，计算公式为

$$E_{\text{CH}_4\text{-K}} = D_A E_Y \quad (3)$$

式中： D_A 为样残存瓦斯含量测试得到的矿后活动排放因子； E_Y 为原煤产量。

通过优化后的监测核算模型，以两矿井多路传感器监测数据为基础，对两矿井甲烷排放进行监测核算。

4 监测核算结果

4.1 固定监测核算结果

我国高瓦斯矿井通常采用煤层气预抽采或煤与瓦斯共采的方式对瓦斯进行高效利用^[24-26]。然而，抽采后仍有大量无法利用的瓦斯被排放，这部分瓦斯常常在碳排放统计中被忽略。基于此，对某高瓦斯煤矿甲烷排放量及利用量进行监测。

图9和图10分别为某高瓦斯煤矿2022年乏风系统和抽采系统甲烷排放量月度统计。可以看出，6月某高瓦斯煤矿乏风系统甲烷排放量最高，为 $1.01 \times$

10^6 Nm^3 （标准立方米），12月份乏风系统甲烷排放最低，为 $6.85 \times 10^5 \text{ Nm}^3$ ，月均排放 $7.76 \times 10^5 \text{ Nm}^3$ 。某高瓦斯煤矿2022年抽采系统甲烷排放最高为1月份 $6.38 \times 10^5 \text{ Nm}^3$ ，最低月份为8月 $3.82 \times 10^5 \text{ Nm}^3$ ，月均抽采量 $4.63 \times 10^5 \text{ Nm}^3$ ，抽采甲烷浓度较低（5%~30%），主要减排途径为生活区发电。

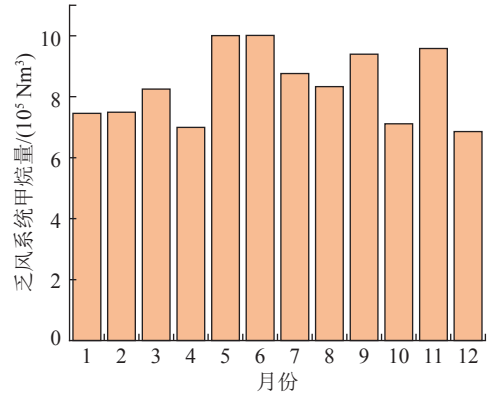


图9 某高瓦斯乏风系统甲烷排放量

Fig.9 Methane emission of a high gas ventilation system

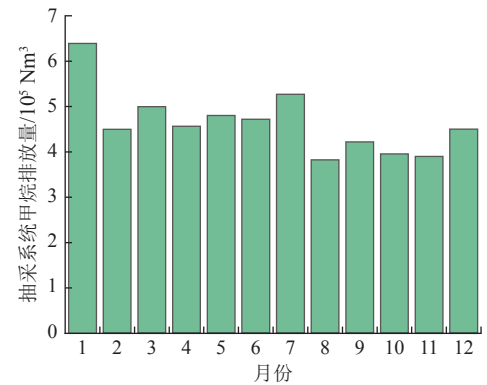


图10 某高瓦斯抽采系统甲烷排放量

Fig.10 Methane emission of a high gas extraction system

图11为某高瓦斯煤矿甲烷排放利用占比图，该矿自2022年3月建立发电站，并开始进行瓦斯利用，首年有效瓦斯利用率22.67%，5月利用率最高，为26%。

4.2 手工监测结果

目前，我国井工煤矿的甲烷排放监测核算主要集中在主井、副井、回风井和抽采系统等关键位置。虽然采用了多路传感器的固定监测装置来监控甲烷排放，但仍无法全面捕捉到矿井内甲烷排放的具体位置和浓度分布。因此，需要通过手工监测的方式，对煤矿的多个位置进行甲烷浓度监测，以便分析甲烷的空间分布特征。

4.2.1 实时手工监测结果

图12为某高瓦斯矿井不同点位的甲烷浓度监

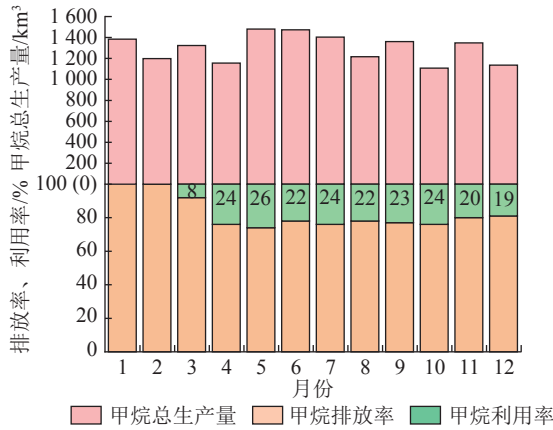


图 11 某高瓦斯煤矿甲烷排放利用占比
Fig.11 Proportion chart of methane emission and utilization in a high gas coal mine

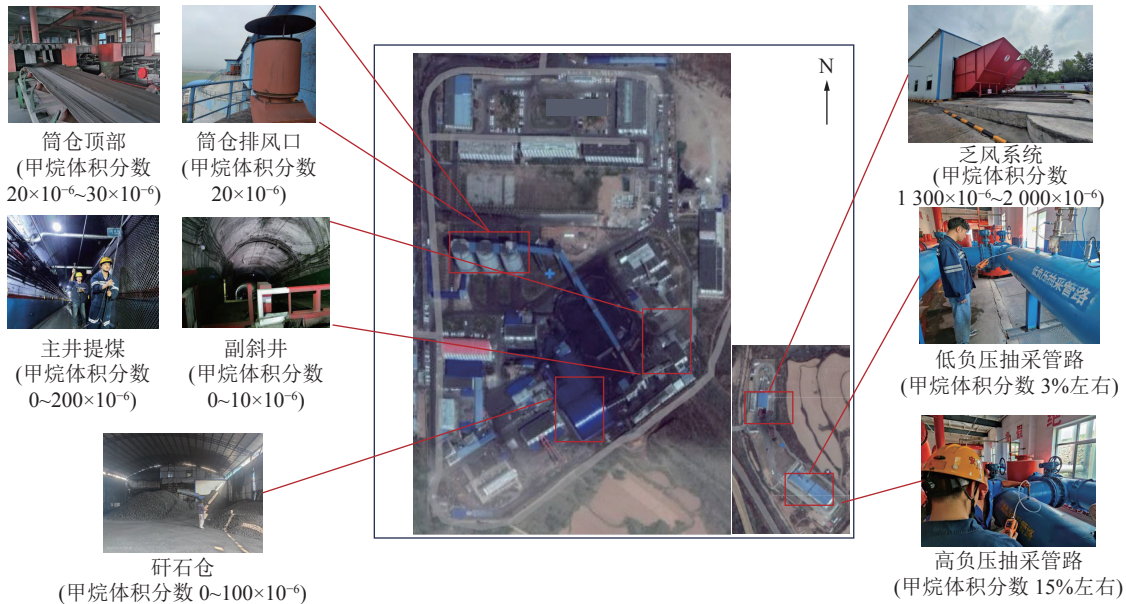


图 12 某高瓦斯矿手工监测结果
Fig.12 Manual monitoring results of a high gas mine

4.2.2 色谱测试结果

色谱测试结果如图 13 和 14 所示。经色谱分析可知, 甲烷主要排放源为回风井, 其中高瓦斯矿井回风井甲烷体积分数最高为 3744×10^{-6} , 但色谱测试无法长期连续监测, 仍需高精度甲烷监测设备对煤矿甲烷进行连续监测。

4.3 无人机监测结果

某高瓦斯矿的地面广场甲烷浓度分布云图如图 15 所示。由图 15 可知, 主井口的南侧及筒仓北侧监测到的甲烷浓度较高, 可能是由于风速较大气体扩散的原因, 浓度高值区域并没有位于两个地点的正上方。风井 20~100 m 高度甲烷浓度云图如图 16 所示, 甲烷体积分数范围为 $1.88 \times 10^{-6} \sim 86.38 \times 10^{-6}$, 随着气体的扩散, 监测高度越高, 甲烷浓度越低。后期

测结果, 除进风系统、回风系统及抽采系统外, 甲烷仍分布于筒仓、矸石仓等位置, 其中甲烷矸石仓体积分数为 $0 \sim 100 \times 10^{-6}$, 高于其余部分。根据固定监测结果, 主井甲烷排放量为 0, 但采用手工监测时, 提煤过程中仍存在 200×10^{-6} 的甲烷排放, 可知煤炭运输的过程中也存在一定的甲烷排放。但上述位置甲烷浓度低于固定监测系统的检出限, 固定监测系统无法进行实时监测。

经分析, 矿井固定监测系统仍需进行监测精度优化升级以保证碳监测的准确性, 矿井甲烷空间分布缺少验证, 目前多数矿井仍通过经验模型进行固定位置的监测核算分析, 缺少对煤矿甲烷排放源及甲烷时空分布的确定性分析。

可对浓度高值区域规划不同高度的圆形环绕飞行路线, 以期反演出甲烷排放量, 与地面监测的甲烷排放

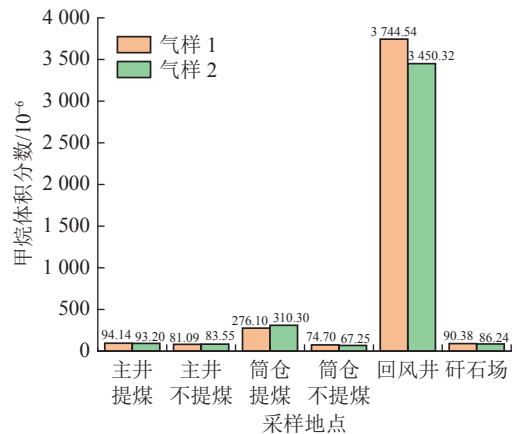


图 13 高瓦斯矿井色谱测试结果
Fig.13 High gas mine chromatographic test results

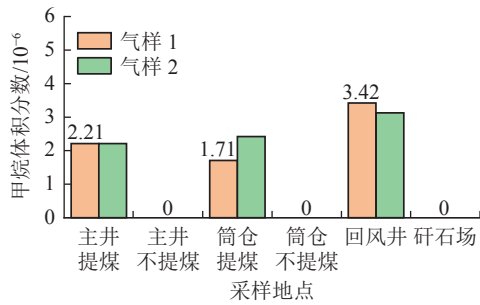


图 14 低瓦斯矿井色谱测试结果

Fig.14 Low gas mine chromatographic test results

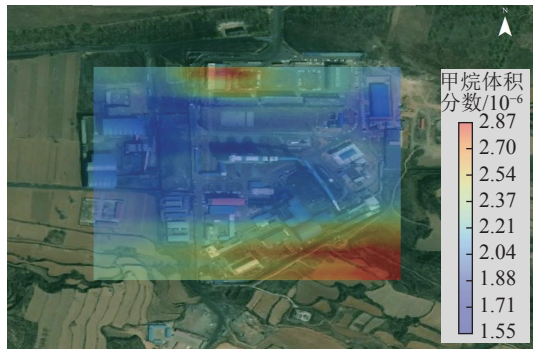


图 15 工业广场甲烷浓度分布

Fig.15 Methane concentration distribution cloud map of industrial square

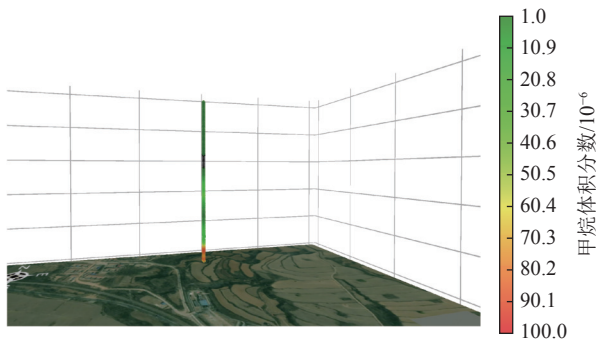


图 16 风井甲烷浓度分布

Fig.16 Methane concentration distribution cloud diagram of air shaft

量进行对比验证。

4.4 矿后活动监测核算结果

4.4.1 煤样残存瓦斯含量测试结果

2022年7—9月于2矿进行煤样取样,取入库前和出厂前的煤样装入煤样罐,送至河南理工大学瓦斯地质重点实验室完成瓦斯含量分析,得到煤样瓦斯残存含量数据,见表3。

4.4.2 不同粒径煤样瓦斯残存量测试结果

入库和出厂时的不同粒径煤样解析量时程曲线如图17和图18所示。

由图17可知,入库时取得的煤样粒径越大,解析的瓦斯含量越多,最终测得的不同粒径瓦斯含量

表 3 两煤矿 7—9 月瓦斯残存含量数据

Table 3 Data of gas residual content in two coal mines from July to September

矿区类型	瓦斯残存量/(m ³ ·t ⁻¹)			
	7月	8月	9月	平均
某高瓦斯矿	1.08	1.44	0.73	1.08
某低瓦斯矿	0.56	0.17	0.23	0.32

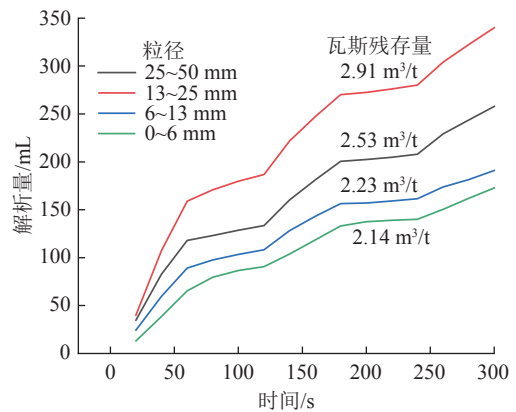


图 17 入库不同粒径煤样解析量时程曲线

Fig.17 Time history curve of analytical amount of coal samples with different particle sizes in storage

最大相差达 0.77 m³/t。由图 18 可知,出厂时煤样整体同样符合煤样粒径越大,可解析出的瓦斯含量越多的规律;同时,48 h 暴露时间的粒径 25 ~ 50 mm 煤样比 0 的含量少了 1.1 m³/t。分析可知,不同粒径和暴露时间的煤样瓦斯含量结果差异较大,在对煤矿矿后活动进行取样监测核算时,应建立统一标准,为未来碳市场交易提供公平准确的数据。

4.5 甲烷排放因子分析

为确定某高瓦斯矿甲烷排放规律,基于煤矿甲烷动态监测数据,引入甲烷排放因子 K_Y ,即矿井甲烷排放总量与原煤产量 M 之比,计算甲烷排放因子^[27]:

$$K_Y = \frac{\sum_{i=1}^i Q_{Yi}}{\sum_{i=1}^i M_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 12) \quad (4)$$

式中: i 为月份; Q_Y 为月甲烷排放量, Nm³; M_i 为月原煤产量, t。

甲烷净排放因子 K_p 指甲烷利用后净排放量 Q_p 与原煤产量 M 比值:

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^i Q_{pi}}{\sum_{i=1}^i M_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 12) \quad (5)$$

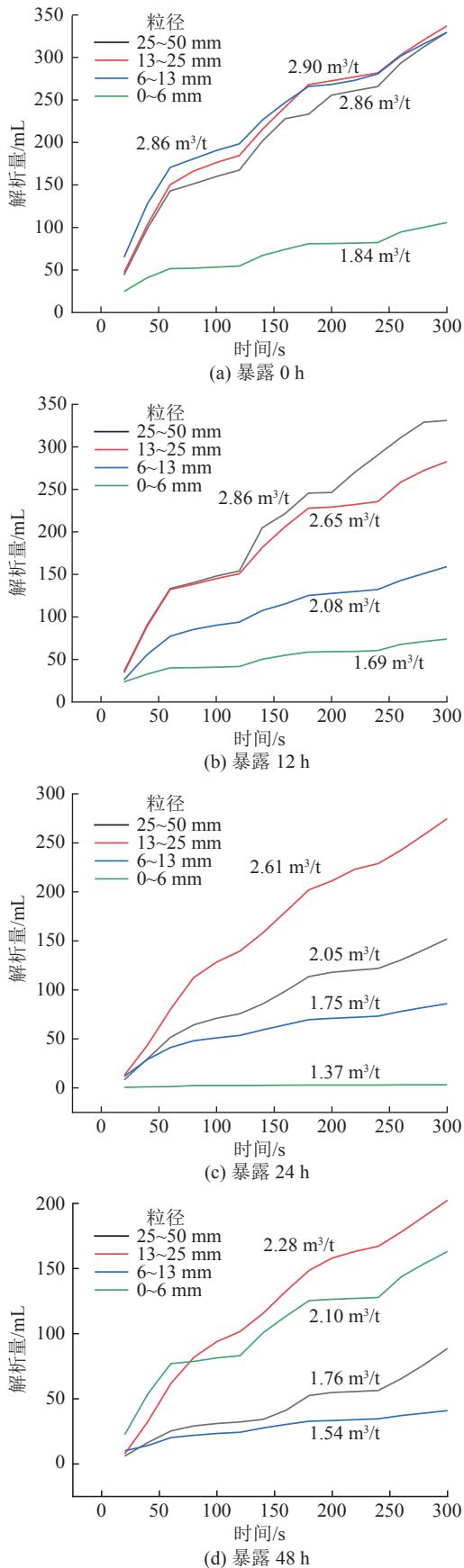


图 18 出厂不同粒径及暴露时间煤样解析量时程曲线
Fig.18 Time history curve of analytical amount of coal samples with different particle sizes upon factory dispatch

某高瓦斯矿 2022 年原煤产量 1 264 kt, 乏风系统排放甲烷总量 $1.02 \times 10^7 \text{ Nm}^3$, 抽采系统排放甲烷总量 $5.56 \times 10^6 \text{ Nm}^3$, 矿后活动排放甲烷总量 $1.36 \times 10^6 \text{ Nm}^3$, 利用甲烷 $2.74 \times 10^6 \text{ Nm}^3$, 利用后净排放甲烷 $1.28 \times 10^7 \text{ Nm}^3$ 。

根据式(4)和式(5), 对某高瓦斯矿 2022 年甲烷排放和利用进行核算。该矿甲烷排放因子 K_V 和甲烷净排放因子 K_p 分别为 $13.41 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $11.24 \text{ m}^3/\text{t}$, 两者在高瓦斯矿井中均属较高水平。图 19 为排放因子计算值与实际排放对比图。

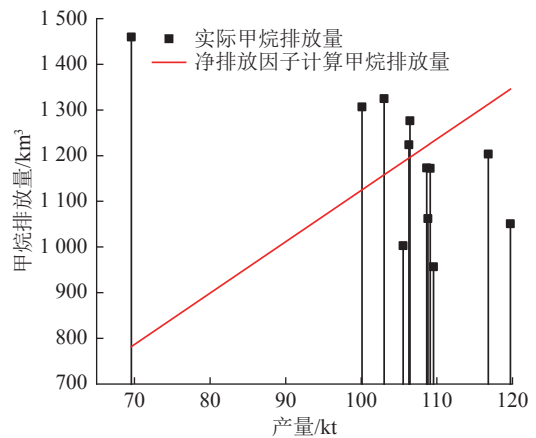


图 19 排放因子计算值与实际排放对比
Fig.19 The comparison between the calculated value of emission factor and the actual emission

由图 19 可知, 通过排放因子计算的甲烷排放量与实际甲烷排放量相差较大, 并非单纯的一次函数关系, 其中最大相差 677.6 km^3 。煤矿甲烷排放量不能仅仅通过原煤产量推算, 仍需根据矿井实际情况进一步比较分析。

5 监测核算结果对比分析

5.1 基于手工监测核算与固定监测对比分析

手工监测所使用的高精度监测设备能够精确研究矿井甲烷浓度的变化情况, 这对于验证固定监测核算结果的准确性至关重要。通过比较同一时段内两种监测方法测得的甲烷浓度的微小差异, 可以评估这些差异对总甲烷排放量的影响范围。基于这些比较和分析, 可以为煤矿甲烷监测核算工作提出优化建议, 从而提高监测核算的全面性和准确性。

图 20 为手工监测与固定监测同时段的甲烷浓度对比图。由图 20 可知, 手工监测相较于固定监测可识别乏风系统甲烷浓度的微小变化。对两者分别积分, 固定监测甲烷总排放为 $1 069.58 \text{ m}^3/\text{h}$, 手工监测结果为 $1 021.70 \text{ m}^3/\text{h}$, 两者差值为 $47.88 \text{ m}^3/\text{h}$, 根

据此差值推算某高瓦斯7月份甲烷排放误差为 $3.44 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。未来仍需提升手工和自动监测设备的精度,不断缩小实际排放与监测数据之间的误差。

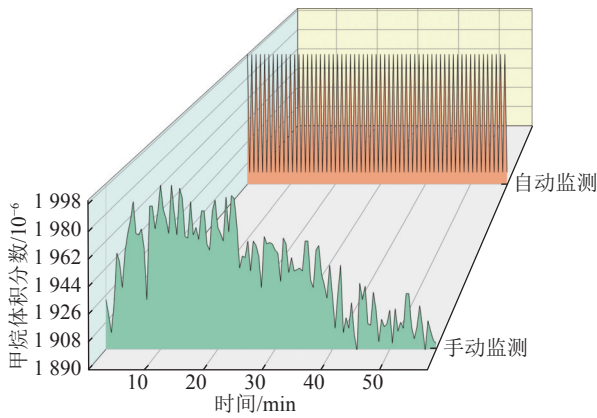


图20 回风井手工与自动监测浓度对比

Fig.20 Comparison diagram of manual and automatic monitoring concentration in return air shaft

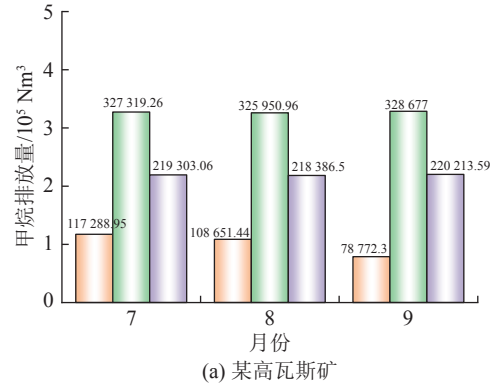
5.2 基于监测核算与 IPCC 缺省值对比分析

以7—9月瓦斯残存含量均值代表两煤矿2022年的矿后活动排放因子,则某高瓦斯矿井实际测试矿后活动甲烷排放因子为 $1.08 \text{ m}^3/\text{t}$,远低于《温室气体排放核算与报告要求 第11部分:煤炭生产企业》(GB/T 32151.11—2018)即IPCC给出的缺省值 $3 \text{ m}^3/\text{t}$ 和《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(以下简称《指南》)2.01 $\text{ m}^3/\text{t}$;低瓦斯矿井矿后活动平均甲烷排放因子为 $0.32 \text{ m}^3/\text{t}$,远低于IPCC和《指南》给出的矿后活动缺省值 $0.94 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $0.6 \text{ m}^3/\text{t}$ 。实际测试、IPCC缺省值计算和《指南》缺省值计算得到的两矿矿后活动甲烷排放量如图21所示。

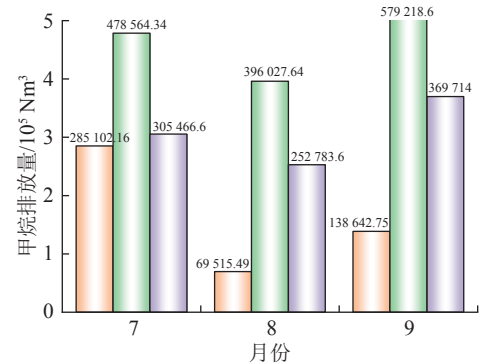
经分析,IPCC和《指南》缺省值并不适用于特定的煤矿企业,且采用缺省值计算的矿后活动甲烷排放量远高于实际测试值,该情况表明我国对于煤矿的矿后活动甲烷排放监测核算仍存在不足。IPCC给出的煤矿甲烷排放因子是一种全球的排放因子,并不符合中国实际现状^[28],实际监测核算更贴近矿井的真实甲烷排放情况,而矿后活动的甲烷排放监测核算需要一种既具体又高效的方法,以便针对各个煤矿进行精准监测核算。

5.3 基于固定监测与 Climate TRACE 对比分析

美国 Climate TRACE 利用卫星遥感等技术对全球温室气体排放进行观测并归纳汇总,提供了世界上第一份主要基于直接、独立观测的温室气体排放综合核算清单。该网站统计的2022年度中国煤矿及各行业甲烷总排放量如图22所示。



(a) 某高瓦斯矿



(b) 某低瓦斯矿

图例: 实际测试 (橙色), IPCC 缺省值计算 (绿色), 指南缺省值计算 (紫色)

图21 不同标准下矿后活动甲烷排放量

Fig.21 Methane emissions from post-mine activities under different standards

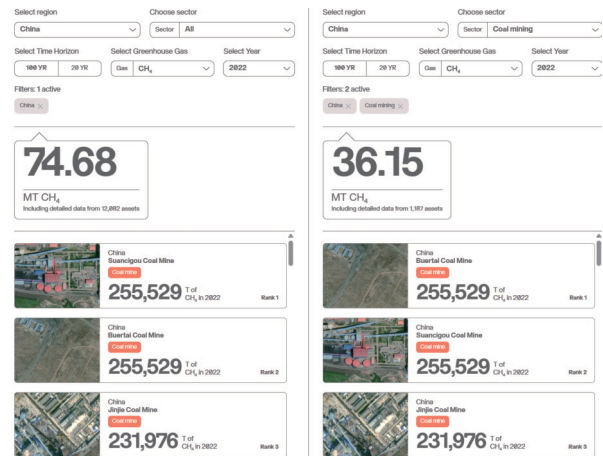
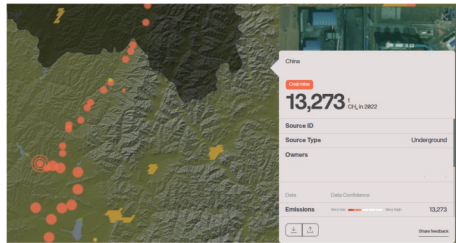


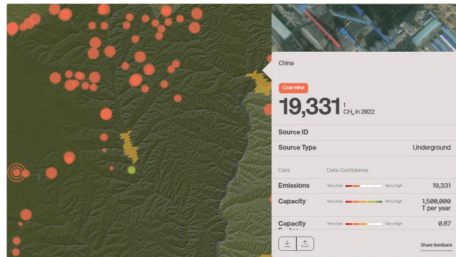
图22 2022年度中国煤矿及各行业总甲烷排放量(数据来源: Climate TRACE)

Fig.22 Total methane emissions from China's coal mines and various industries in 2022 (data source: Climate TRACE)

Climate TRACE 统计的中国2022年度煤矿甲烷排放量为36.15 MT,而2022年度各行业甲烷总排放量为74.68 MT,煤矿甲烷排放占总排放的48.41%,化石能源行业依然是我国甲烷排放的主要来源。该网站统计的某高瓦斯、某低瓦斯煤矿2022年度甲烷排放量如图23所示。2022年某高瓦斯矿、某低瓦斯矿碳排放监测核算数据见表4。



(a) 某高瓦斯矿



(b) 某低瓦斯矿

图 23 两煤矿 2022 年排放数据(数据来源: Climate TRACE)

Fig.23 Emission data of two coal mines in 2022 (Source: Climate TRACE)

表 4 2022 年碳排放监测数据

Table 4 Carbon emission monitoring data in 2022

矿区类型	某高瓦斯煤矿	某低瓦斯煤矿
乏风系统排放量/kt	7.19	0.08
抽采系统排放量/kt	3.99	0
利用量/kt	1.97	0
矿后活动排放因子/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	1.08	0.32
2022年产量/kt	1 264	7 345
矿后活动排放量/kt	0.98	1.69
净排放量/kt	10.19	1.77
Climate TRACE监测排放量/kt	13.27	19.33

根据 2022 年某高瓦斯煤矿及某低瓦斯煤矿实际监测核算结果可知,高瓦斯矿井甲烷排放以乏风系统为主,乏风系统甲烷排放量占总排放的 70.56%,而低瓦斯矿井甲烷排放主要来源为矿后活动。因此,高瓦斯矿井减排对策的提出需针对乏风系统进行研究,低瓦斯矿井需针对矿后活动环节进行着重分析。

在与 Climate TRACE 统计结果的对比中发现,某高瓦斯煤矿实测甲烷排放量为 10.19 kt,低于 Climate TRACE 的监测结果 13.27 kt;某低瓦斯煤矿实测甲烷排放量为 1.77 kt,远低于 Climate TRACE 的监测数值 19.33 kt。根据分析结果可知,Climate TRACE 通过卫星遥感技术得到的监测结果与现场实测法所得到的数据存在显著差异,这种差异在低瓦斯矿井的监测核算中尤为明显,自上而下的监测核算方法尚不足以提供精准数据。为响应

国家“双碳”战略,我国煤炭企业亟需建立一套精准的监测核算体系,不断完善国家清单和碳足迹基础数据库,为碳排放交易提供支撑。

6 结 论

1)国内现有以保障安全为目标的煤矿安全监测监控系统的甲烷传感器精度不足,且为单点取样,严重影响煤矿甲烷排放监测结果的准确性。应安装高精度甲烷在线监测系统,尤其是低瓦斯矿井,同时应加装前处理系统以排除水分、干扰气体对监测结果的影响,并在乏风出口平面布设多个取样点,采用超声流量计等更高精度流量计,以获得更为准确的风量数据,为碳排放的核算提供可靠依据。

2) IPCC 和《指南》缺省值不适用于特定的煤矿企业,采用缺省值计算的矿后活动甲烷排放量远高于实际测试值,高估了矿后活动甲烷排放量,为实测值的 3~5 倍。通过不同粒径和暴露时间的煤样计算出的矿后活动排放量差异较大。我国对于煤矿的矿后活动甲烷排放监测核算存在不足,亟需一套统一精准的测试标准,为未来碳市场交易提供公平准确的数据。

3)美国 Climate TRACE 网站公布的 2022 年度某高瓦斯和低瓦斯煤矿的甲烷排放量统计结果与实测数据有显著差异,其中低瓦斯矿井的统计数据高达实测排放量的 10.92 倍。自上而下的监测核算方式仍缺乏准确性,暂时无法为碳交易提供准确数据支持。我国煤炭企业亟需建立面向“双碳”目标的监测核算体系,以便更好地适应国家战略并确保碳交易政策的科学性和公正性。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 中国应对气候变化的政策与行动 [N]. 人民日报, 2021-10-28(014).
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境部等 11 部门关于印发《甲烷排放控制行动方案》的通知 [Z]. 2023-11-07.
- [3] 任世华, 谢亚辰, 焦小森, 等. 煤炭开发过程碳排放特征及碳中和发展的技术途径 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 60-68.
REN Shihua, XIE Yachen, JIAO Xiaomiao, et al. Characteristics of carbon emissions during coal development and technical approaches for carbon neutral development [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 60-68.
- [4] 李 鑫. 煤炭开发环节碳排放测算及低碳路径研究 [J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(7): 39-44.
LI Xin. Research on carbon emission calculation and low-carbon pathway in coal development [J]. Coal Economic Research, 2021, 41(7): 39-44.
- [5] KEITH H, VARDON M, OBST C, et al. Evaluating nature-based

- solutions for climate mitigation and conservation requires comprehensive carbon accounting[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 796(1): 838.
- [6] 苏义脑. 中国碳达峰碳中和与能源发展战略的认识与思考[J]. *世界石油工业*, 2022, 29(4): 7-11.
SU Yinao. Understandings and thinkings of China's carbon peaking, carbon neutrality and energy development strategies[J]. *World oil industry*, 2022, 29(4): 7-11.
- [7] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1-25.
- [8] 刘文革, 徐鑫, 韩甲业, 等. 碳中和目标下煤矿甲烷减排趋势模型及关键技术[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 470-479.
LIU Wenge, XU Xin, HAN Jiaye, *et al.* Trend model and key technologies of coal mine methane emission reduction aiming for the carbon neutrality[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 470-479.
- [9] 刘艳秋, 秦凯, COHEN Blake Jason, 等. 基于涡动及走航观测的晋东南煤矿区甲烷分布特征[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4395-4402.
LIU Yanqiu, QIN Kai, COHEN Blake Jason, *et al.* Analysis of the characteristics of methane in the coal mining area of southeastern Shanxi with eddy and mobile observation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4395-4402.
- [10] 樊星, 李路, 秦圆圆, 等. 主要发达经济体从碳达峰到碳中和的路径及启示[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(1): 102-115.
FAN Xing, LI Lu, QIN Yuanyuan, *et al.* The pathway from carbon peak to carbon neutrality in major developed economies and its insights[J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(1): 102-115.
- [11] 李树华. 基于 Citespace 的我国碳排放权交易研究可视化分析[C]//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(三). 北京:《工业建筑》杂志社有限公司. 2022: 799-807.
LI Shuhua. Visual analysis of carbon emission trading research in CHINA based on cite space [C]//The 2022 Annual Conference of Science and Technology of the Chinese Society of Environmental Sciences - Proceedings of the Branch of Environmental Engineering Technology Innovation and Application (III). Beijing: Industrial Architecture Magazine Co., Ltd. 2022: 799-807.
- [12] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 1-11.
CAI Bofeng, ZHU Songli, YU Shengmin, *et al.* The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(8): 1-11.
- [13] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [R]. Japan: The 49th Session of the IPCC, 2019.
- [14] 李学武, 张伟, 李跃, 等. 基于涌出因子分析煤矿区甲烷利用及减排[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(S2): 390-396.
LI Xuewu, ZHANG Wei, LI Yue, *et al.* CMM utilization and emission reduction based on gush factor analysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(S2): 390-396.
- [15] 王莉莉. 永煤集团煤炭矿区碳排放核算及减排对策研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015: 18-22.
WANG Lili. Study on the carbon emissions accounting and reduction measures of Yongmei Group Coal Mining Area. [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015: 18-22.
- [16] 张振芳. 露天煤矿碳排放量核算及碳减排途径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013: 4-17.
ZHANG Zhenfang. Study on Carbon emissions accounting and carbon emission reduction approach of surface coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013: 4-17.
- [17] 马翠梅, 戴尔阜, 刘乙辰, 等. 中国煤炭开采和矿后活动甲烷逃逸排放研究[J]. *资源科学*, 2020, 42(2): 311-322.
MA Cuimei, DAI Erfu, LIU Yichen, *et al.* Methane fugitive emissions from coal mining and postmining activities in China[J]. *Resources Science*, 2020, 42(2): 311-322.
- [18] 刘艳秋, 秦凯, COHEN Blake Jason, 等. 基于涡动及走航观测的晋东南煤矿区甲烷浓度特征研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4395-4402.
LIU Yanqiu, QIN Kai, COHEN Blake Jason, *et al.* Analysis of the Characteristics of Methane in the Coal Mining Area of Southeastern Shanxi with Eddy and Mobile observation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4395-4402.
- [19] MILLER S M, MICHALAK A M, DETMERS R G, *et al.* China's coal mine methane regulations have not curbed growing emissions[J]. *Nat Commun* 2019, 303(10): 1-3.
- [20] 袁亮, 薛生. 煤层瓦斯含量法确定保护层开采消突范围的技术及应用[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(9): 1786-1791.
YUAN Liang, XUE Sheng. Defining outburst-free zones in protective mining with seam gas content-method and application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(9): 1786-1791.
- [21] 周福宝, 康建宏, 王有湃, 等. 煤层瓦斯含量井下一站式自动化精准测定方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(8): 2873-2882.
ZHOU Fubao, KANG Jianhong, WANG Youpai, *et al.* Method of underground integrated automatic and accurate determination of coalbed gas content[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 2873-2882.
- [22] 王猛, 马如英, 代旭光, 等. 煤矿区碳排放的确认和低碳绿色发展途径研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(5): 63-69.
WANG Meng, MA Ruying, DAI Xuguang, *et al.* Confirmation of carbon emissions in coal mining areas and research on low-carbon green development path[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(5): 63-69.
- [23] 夏丹. 中国煤炭生命周期碳排放核算与预测研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021: 14-22.
XIA Dan. Research on accounting and forecasting of coal life cycle carbon emissions in China. [D] Huainan: Anhui University of Technology: 2021: 14-22.
- [24] 张千贵, 李权山, 范翔宇, 等. 中国煤与煤层气共采理论现状及发展趋势[J]. *天然气工业*, 2022, 42(6): 130-145.
ZHANG Qiangui, LI Quanshan, FAN Xiangyu, *et al.* Current situation and development trend of theories and technologies for

- coal and CBM co-mining in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 130–145.
- [25] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 1–6
- YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 1–6.
- [26] 袁亮. 我国煤矿安全发展战略研究[J]. *中国煤炭*, 2021, 47(6): 1–6.
- YUAN Liang. Study on the development strategy of coal mine safety in China[J]. *China Coal*, 2021, 47(6): 1–6.
- [27] 刘虹, 赵美琳, 赵康, 等. 山西省煤矿甲烷排放量与利用量精细测算[J]. *天然气工业*, 2022, 42(6): 179–185.
- LIU Hong, LIU Meilin, ZHAO Kang, *et al.* Fine calculation of methane emissions and utilization amount from coal mines in Shanxi Province [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 179–185.
- [28] JU Y, SUN Y, SA Z, *et al.* A new approach to estimate fugitive methane emissions from coal mining in China[J]. *Science of the Total Environment*. 2016, 543(Pt A): 514–523.