

中文引用格式:王永军,郑倩,张河猛,等.采空区地下遗煤燃烧-地表碳通量相关性分析[J].中国安全科学学报,2024,34(2):161-167.

英文引用格式:WANG Yongjun, ZHENG Qian, ZHANG Hemeng, et al. Correlation analysis between combustion of underground residual coal and surface carbon flux in goaf[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 161-167.

采空区地下遗煤燃烧-地表碳通量相关性分析*

王永军^{1,2}讲师,郑倩¹,张河猛^{1,2}讲师,董伟³,

张晓明^{1,4}教授,佐佐木久郎³教授

(1 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院,辽宁葫芦岛 125105;2 辽宁工程技术大学
矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁葫芦岛 125105;3 九州大学工学部,
日本福冈 819-0385;4 辽宁工程技术大学工程与环境研究所,辽宁葫芦岛 125105)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.02.0420

基金项目:国家自然科学基金资助(52304220);辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220667);日本JSPS科研费项目(JP-20K21163)。

【摘要】为探究复杂条件下地表碳通量对地下遗煤自燃的响应机制,通过长期监测阜新海州露天矿采空区上覆地表碳通量、土壤温度、地表裂缝、环境风速、土壤湿度等数据,并结合现场试验,研究遗煤燃烧与地表碳通量的相关性,分析地表裂缝、环境风速、土壤湿度等因素对地下煤自燃-地表碳通量的影响特征。结果表明:地下遗煤燃烧是触发地表碳通量异常响应的根本因素,碳通量与土壤温度分布呈正相关;裂缝是影响地表碳通量分布的主要因素,环境风速与地表碳通量基本呈正相关,地表碳通量一般不受土壤湿度影响,但受降雨影响较大。

【关键词】采空区; 遗煤燃烧; 地表碳通量; 相关性分析; 地表裂缝; 环境风速; 土壤湿度

Correlation analysis between combustion of underground residual coal and surface carbon flux in goaf

WANG Yongjun^{1,2}, ZHENG Qian¹, ZHANG Hemeng^{1,2}, DONG Wei³,

ZHANG Xiaoming^{1,4}, SASAKI Kyuro³

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China; 3 Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0385, Japan; 4 Institute of Engineering and Environment, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: In order to explore the response mechanism of spontaneous combustion of underground coal and surface carbon flux under complex conditions, the surface CO₂ flux, soil temperature, fissure, environmental wind velocity and soil humidity in Fuxin Haizhou open-pit mine were monitored for a long time. Field tests, data analysis and other methods were applied to study the correlation between the

underground coal spontaneous combustion and surface CO₂ flux. The influence of surface fissure, environmental wind velocity and soil humidity on the response mechanism of underground coal spontaneous combustion-surface carbon flux were analyzed. The results show that underground coal combustion is the fundamental factor triggering the abnormal surface carbon flux response. The surface CO₂ flux is positively correlated with the surface soil temperature distribution. Surface fissure is the main factor affecting the surface CO₂ flux distribution. The environmental wind speed is positively correlated with the surface CO₂ flux. The surface CO₂ flux response is generally not affected by soil humidity, but it is greatly affected by rainfall.

Keywords: goaf; combustion of residual coal; soil surface CO₂ flux; correlation analysis; surface fissure; environmental wind velocity; soil humidity

0 引言

随着我国能源结构转型工作的推进,关闭/废弃矿井地下空间和遗煤量不断增加^[1],采空区遗煤自燃现象频繁发生。遗煤自燃不但会造成地质灾害加剧、制约地下空间资源利用,还会排放大量以 CO₂ 为主的温室气体^[2-4]。由于地下关闭/废弃矿井环境十分复杂,导致利用地下煤火释放温室气体分析火区位置及发展趋势方面的研究难以开展。因此,研究采空区上覆地表碳通量(也称地表 CO₂ 通量)与地下煤自燃之间的关系,对合理判定地下煤火范围、发展趋势以及评估煤田火区碳排放量具有重要意义。

IDE 等^[5]采用裂缝监测、地表测温和铯蒸气磁强计探测等方法,分别测量地下煤火活跃区域的燃烧率,得到相近的 CO₂ 排放速率值;刘生根等^[6]通过自开发环境数据采集系统,评估了内蒙古典型煤火裂隙区的 CO₂ 排放量;张晓明等^[7]对采空区地表 CO₂ 通量和土壤温度开展长期监测,验证了地表 CO₂ 通量与土壤温度的关联性,并评估了采空区遗煤燃烧产生的 CO₂ 年涌出量;MARK 等^[8]应用动态封闭气室法监测了地下煤火及地表 CO₂ 通量,并利用序贯高斯模拟法绘制了地表碳分布云图;王海燕^[9]汇总了不同煤田火区温室气体通量测量方法,研究了未来煤田火区温室气体通量监测设备研发的趋势。

然而,露天矿边坡下部采空区地质条件复杂,影响煤火因素众多,目前关于这类遗煤自燃所导致的温室气体释放及其影响因素的研究较少。因此,笔者拟选定海州露天矿边坡下部采空区作为研究对象,针对地表裂缝及周围区域开展综合性地表 CO₂ 通量监测,研究地下遗煤燃烧与地表碳通量的相关性,以及现场其他因素对地表碳通量的影响,探究复杂条件下的地下遗煤燃烧-地表 CO₂ 通量影响特征。

1 现场概况及试验方法

海州露天煤矿位于辽宁省阜新市,存在滑坡、煤自燃、地面塌陷变形等诸多环境灾害^[10-11]。试验区紧邻海州露天矿东北侧边坡,面积为 24 000 m² (60 m×400 m),处于原高海矿井田范围内,图 1 为测定区域地质剖面图,由图可知:该区域下方存在 4 层采空区、2 层未开采煤层,采空区埋深为 150~250 m。

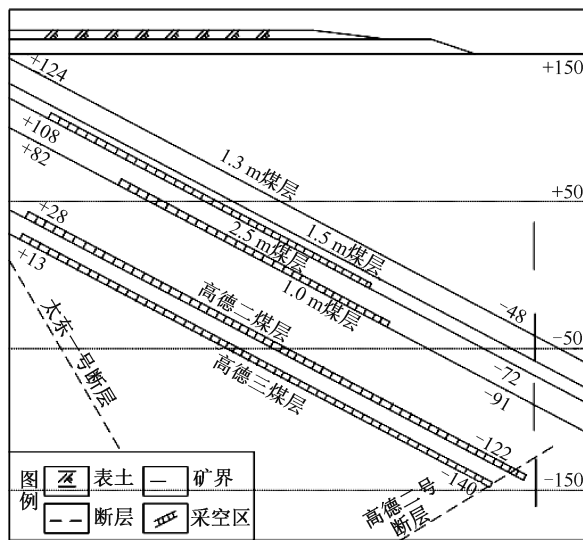


图 1 测定区域地质剖面

Fig. 1 Geological profile of survey area

试验区测点布置及试验设备如图 2 所示,露天矿东北、东南、西南边坡和底面均存在冒烟现象,且东南和西南边坡出现明火。根据地表条件,将试验区划分为西北区域 (Westnorth, WN)、中心区域 (Center, CT) 和东南区域 (Eastsouth, ES) 3 个区块。试验区域内存在 6 条地表裂缝 (I—VI), 其中裂缝 I—III 的长度分别为 18、12 和 17 m, 宽度均为 10 cm 左右, 裂缝 IV 长 5 m, 宽度约 5 cm。地表裂

缝距离露天矿边坡 15~25 m。裂缝 I—IV 为既有裂缝,常年释放高温烟气,而裂缝 V、VI 为监测期间出现的新增裂缝。试验区域内布置 49 个地表 CO₂ 通量测点,应用自主研发的碳通量监测系统、皮托管、土壤温度针、风速仪、SF₆ 激光检漏仪等仪器,分别监测试验区域地表 CO₂ 通量、土壤温度、土壤湿度、风速、地下裂隙渗流。

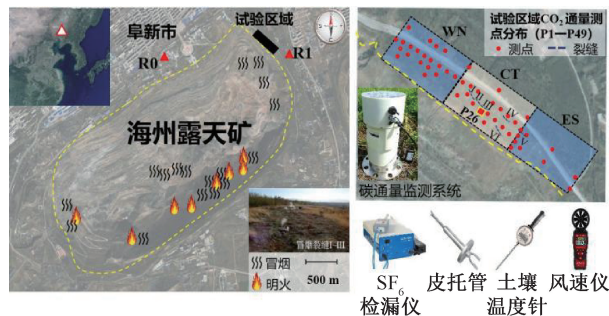


图2 试验区域测点布置及试验设备

Fig. 2 Arrangement of measuring points and experimental equipment

为消除其他因素干扰,在无自燃采空区上覆地表布置参考点 R1,在无采空区地表设置参考点 R0。

1.1 地表 CO₂ 通量监测

在试验区域内选取 19 个主要测点,监测原位地表 CO₂ 通量,在高通量的主测点附近布置 30 个辅助测点,辅助测点与主测点距离不超过 15 m。无裂缝地表 CO₂ 释放主要通过自由扩散形式,碳通量监测系统可通过气室内置传感器获得 CO₂ 体积分数随时间变化曲线,经过压力与温度修正,输出地表 CO₂ 通量值,计算公式如下^[7]:

$$F_{pi} = 86.617\rho H \frac{dC_t}{dt} \frac{T_0}{T} \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

式中: F_{pi} 为 i 测点气体通量, $g/(m^2 \cdot d)$; ρ 为标准状态下气体密度, kg/m^3 ; H 为气室高度, m ; t 为时间, s ; C_t 为 t 时刻仪器气室内气体的体积分数, 10^{-6} ; P 为测点的气压, Pa ; P_0 为标准状况下气压, Pa ; T 为测点的温度, K ; T_0 为标准状况下的温度, K 。

分别于 2019 年 5 月、2020 年 1 月和 10 月开展 3 次地表 CO₂ 通量监测,选取 2 个参考点 R0(无采空区)、R1(采空区无自燃)和测点 P26(采空区自燃)作为长期地表 CO₂ 通量监测点(图 2),监测时间为 2 周。露天矿边坡受地下开采等因素影响会产生纵向裂缝。纵向裂缝与地下采空区及遗留巷道联通,形成贯通型地表采动裂缝。大量地下遗煤燃烧产生的 CO₂ 会通过较强对流作用运移至地表。采

用皮托管测流速^[12],结合裂缝 CO₂ 体积分数采样检测,确定每条裂缝 CO₂ 涌出量,计算如下式:

$$F_{li} = C_i AV \quad (2)$$

式中: F_{li} 为 i 号地表裂缝 CO₂ 涌出量, g/s ; C_i 为检测气体的质量浓度, g/m^3 ; A 为裂缝的面积,裂缝 I、II、III 的面积分别为 0.13、0.62 和 0.22 m^2 ; V 为皮托管测量的气体流速, m/s 。

1.2 其他相关参数监测

在 CO₂ 通量测点及其周围布置 155 个地表土壤温度测点;为削弱气候环境温度的影响,在通量参考点 R1 布置 1 个土壤温度测点,采用土壤温度针测量地表下 30 cm 处的土壤温度。碳通量监测系统可同步记录土壤湿度(49 个测点)。采用手持式风速仪采集试验区域的地表风速、风向。在露天矿东北侧边坡下部定时释放示踪气体 SF₆,裂缝 II 处设置监测点,采用 SF₆ 激光检漏仪采集示踪气体 SF₆^[13-14],释放点和监测点的垂直和水平距离分别为 30 和 120 m。

2 影响因素相关性分析

2.1 遗煤燃烧与地表 CO₂ 通量相关性分析

图 3 为不同条件地表 CO₂ 通量与土壤温度对比结果(第 1 次监测),49 个测点(P1—P49)的地表 CO₂ 通量范围为 5.854~190.08 $g/(m^2 \cdot d)$,而参考点 R0、R1 的地表 CO₂ 通量范围分别为 0.011~1.634 $g/(m^2 \cdot d)$ 和 0.007~4.322 $g/(m^2 \cdot d)$,远低于自燃采空区上覆地表的通量值,其他 2 次监测均表现相同结果。由于露天矿东北侧边坡存在冒烟现象,加之试验区域盛行西南风,通过与以往研究中对比分析^[5-6,8],可推断试验区域高通量 CO₂ 主要源于地下遗煤燃烧。而同样处于露天矿东北侧采空区上覆地表,但距边坡较远的参考点 R1,其监测到的地表 CO₂ 通量较低,说明地下遗煤燃烧可能位于试验区域下方或靠近边坡侧。遗煤燃烧产生的 CO₂ 在强制对流作用下沿着阻力较小的地下裂缝通道运移至地表。所以,试验区域地表裂缝周围地表 CO₂ 通量较高。

图 4 为不同时期试验区域地表 CO₂ 通量与土壤温度分布云图。通过对比可知:WN 区块 CO₂ 高通量区域范围随时间呈先扩大后缩小趋势,说明在监测期间,受地下遗煤量、燃烧范围及强度等因素影响,导致该区域地下遗煤燃烧经历增强扩展和缩减

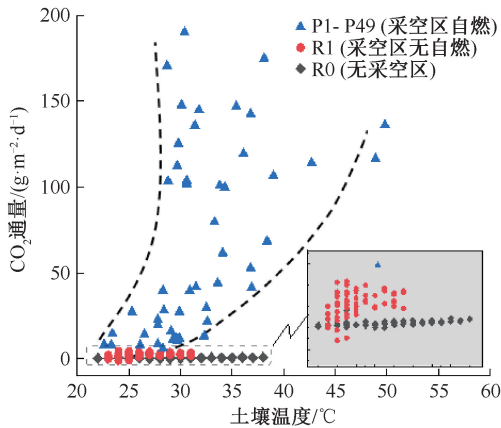


图3 不同条件地表 CO₂ 通量与土壤温度对比
Fig. 3 Comparison of surface CO₂ flux and soil temperature under different conditions

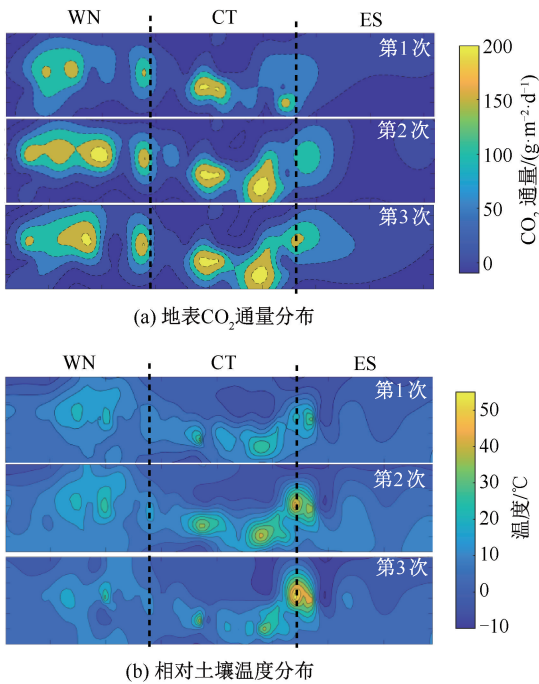


图4 不同时期地表 CO₂ 通量

Fig. 4 Distribution of surface CO₂ flux (a) and relative soil temperature (b) in different periods

的状态;CT 区块的高通量范围一直呈现扩大的趋势,并且逐渐向 ES 区块扩展,涌出强度也逐渐增强,这是由遗煤燃烧发展及新裂缝发育的综合作用造成的。地下煤火形成的空腔及上覆岩层破坏,会引发遗煤燃烧加剧及地表碳通量的强反馈响应。受到 CT 区块扩展的影响,ES 区块与 CT 区块交界处地表 CO₂ 通量增大,其他无明显变化,整体保持较低值(5.55~12.13 g/(m²·d)),可推断此区块基本不存在遗煤自燃现象。3 次监测得到的整个区域地表 CO₂ 涌出量分别为 23.2、41.2 和 52.8 t/月,说明

地下遗煤燃烧随时间加剧。地下遗煤燃烧所释放的热量通过传导及对流的方式传递至地表,因此地表高温区的扩张也会反映地下遗煤燃烧范围的扩大。如图 4 所示,相对土壤温度(测点温度与参考点 R1 温度差值)与地表 CO₂ 通量存在明显的正相关性:高通量区域一般也是高温区域。所以,地下煤火及发育是触发地表碳通量异常响应的根本因素,遗煤燃烧加剧会导致地表 CO₂ 高通量范围扩大。

2.2 地表裂缝与地表 CO₂ 通量相关性分析

试验区域的地表裂缝主要是由坡体采动形成的岩石破裂和移动及采空区顶板垮落等向上发展引起的地表下沉和变形造成的,地下遗煤燃烧会加剧裂隙的发育^[15-16]。新鲜空气由边坡进入燃烧区,煤体燃烧产生大量热并形成火风压,驱使 CO₂ 气体由纵向裂缝运移至地表;吹向边坡的强制风流也会增加裂缝通道内 CO₂ 的流动速度。因此,煤氧剧烈反应生成的 CO₂ 在风压差的作用下会随着风流运移至地表。采用流速法测得第 2 次和第 3 次的地表裂缝 CO₂ 涌出量分别为 522.88 和 729.65 t/月,远大于无裂缝地表 CO₂ 涌出量。CO₂ 在纵向裂缝内运移的过程中,高体积分数 CO₂ 会自由扩散至裂缝周围的土壤。图 5 所示为地表裂缝与预测潜在裂缝分布,从中可以观察到 CT 区块的高通量区域沿地表裂缝分布,P26 测点(与裂缝 II 距离 0.5 m)具有最大的地表 CO₂ 通量值(150.163 2 g/(m²·d))。第 2 次监测前,在 ES、CT 区块出现新增裂缝 V 和 VI,造成附近地表 CO₂ 通量的明显增加。第 1 次监测时,V、VI 裂缝位置均已出现高通量现象,说明在地下裂缝发展到地表前,会在其上覆地表形成高通量和高温区。所以,可推断 WN 区块的高 CO₂ 通量由地下隐藏裂缝导致,且裂缝位置应在 P2 和 P38 测点连线以及 P5 和 P8 测点连线附近。另外,通过裂缝和通量云图发展方向,可推断 CT、ES 区块地下遗煤燃烧范围向东南发展,CT 区块地下遗煤逐渐烧尽可能是导致裂缝 I 附近地表 CO₂ 通量相对较低的原因。

2.3 环境风速与地表 CO₂ 通量相关性分析

图 6 为裂缝 II 监测点 SF₆ 质量浓度、环境风速随时间变化曲线。整个监测过程持续时间为 65 min,环境风速稳定在(3.5±0.5) m/s 范围内。自释放 SF₆ 气体后,在 45 min 时检测到 SF₆ 气体质量浓度开始上升(0.011 g/m³);随后,在 50 min 时 SF₆ 气体质量浓度达到最大值(0.103 g/m³)。峰值质量

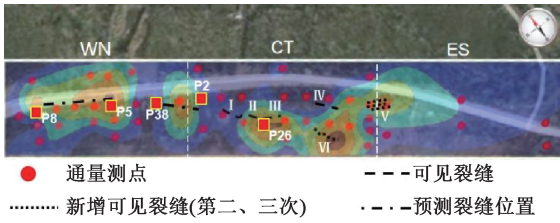
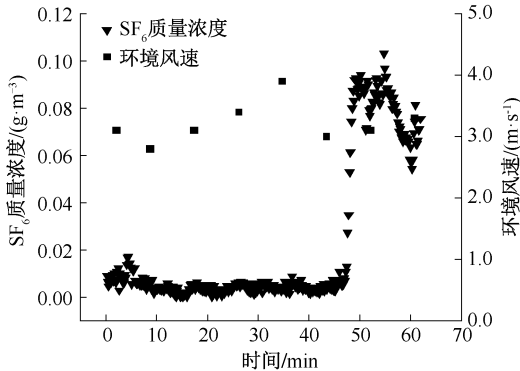


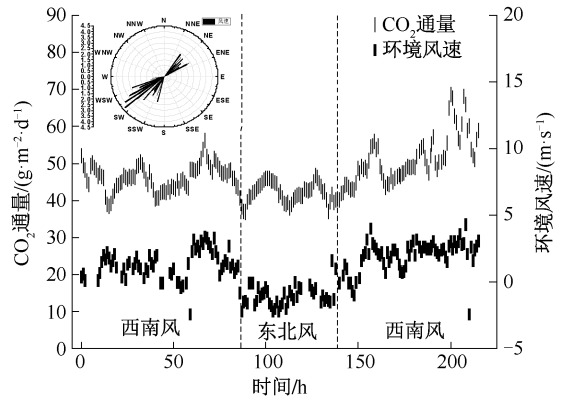
图5 地表裂缝与预测潜在裂缝分布

Fig. 5 Distribution diagram of surface fissures and predicted potential fissures

浓度是 SF_6 气体通过主要漏风通道运移至地表时的量化表征,由于地下联通裂缝的不规则性,裂缝通道理论长度范围为 150~490 m。因此,可计算出主要联通裂缝内的漏风风速范围为 0.05~0.15 m/s。

图6 SF_6 示踪气体质量浓度与环境风速监测Fig. 6 Monitoring results of SF_6 tracer gas concentration and wind velocity

持续的漏风向地下遗煤区域输送氧气,促使遗煤持续燃烧。煤火产生的 CO_2 等气体,在风压差和体积分数差的驱动下,主要经由漏风通道运移至地表。另外,根据当地气候和长期监测数据显示,海州露天矿所在区域盛行西南风,边坡迎风易使漏风通道内形成强制对流。图7为P26测点长期连续(216 h)监测的地表 CO_2 通量及环境风速、风向情况,从中可以看出,环境风速波动与地表 CO_2 通量波动趋势类似,说明两者具有直接相关性。当环境风速较大时,地下裂缝通道内形成的风压差较大,更多氧气由边坡进入燃烧区域,造成地下遗煤燃烧加剧及 CO_2 释放增加。 CO_2 气体在纵向运移过程中,体积分数差驱动 CO_2 气体向裂缝两侧土壤扩散,造成近裂缝范围地表 CO_2 通量增加。而由 SF_6 监测实验可得:漏风流在地下主要裂缝通道内的流动时间约为 50 min,因此,可认为环境风速与地表 CO_2 通量的变化同步。另外,当风向为东北风时,漏风通道形成的风压差较小,此阶段 CO_2 通量值整体偏小。

图7 地表 CO_2 通量与环境风速的关系(P26测点)Fig. 7 Relationship between surface CO_2 flux and wind velocity at P26

2.4 土壤湿度与地表 CO_2 通量相关性分析

研究^[17]表明:自然状态下土壤湿度与地表气体通量成反比。由于所选试验区域地下存在遗煤自燃,本文仅分析有无降雨时土壤湿度与地表 CO_2 通量的关系。图8为地表 CO_2 通量与土壤相对湿度的关系,无降雨时,地表 CO_2 通量与土壤湿度无明显相关性,说明地下存在高体积分数 CO_2 源时,土壤湿度对 CO_2 涌出强度的影响可以忽略不计。

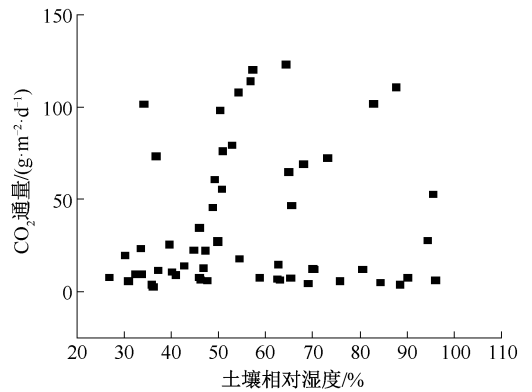
图8 地表 CO_2 通量与土壤相对湿度的关系Fig. 8 Relationship between surface CO_2 flux and relative moisture of soil

图9为降雨对地表 CO_2 通量的影响,P26测点持续监测期间出现降雨,降雨初期干湿交替激发土壤呼吸^[18],增加土壤中微生物代谢活动,促进 CO_2 的产生;雨水渗入土壤置换土壤孔隙中的气体,导致地表 CO_2 通量的突增。随着降雨持续,大量水分堵塞土壤孔隙,阻碍 CO_2 气体的涌出,造成地表 CO_2 通量快速下降,并在整个降雨期间维持在较低水平($<75 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。降雨结束后,随着水分的蒸发,降雨堵塞的土壤孔隙再次联通,地下大量被封堵的

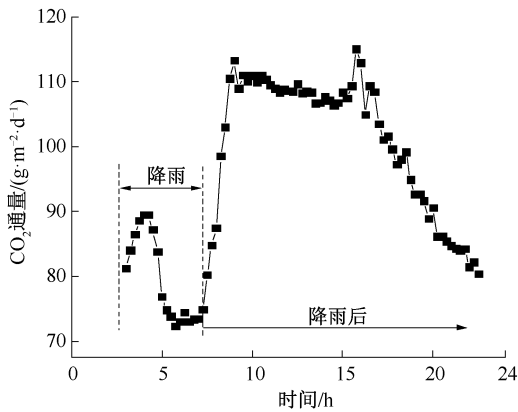


图9 降雨对地表CO₂通量影响(P26测点)

Fig.9 Effect of rainfall on surface CO₂ flux (P26 point)

CO₂涌出造成地表CO₂通量快速上升,随后,CO₂逐渐下降并恢复至降雨前水平。因此,降雨对自燃采空区上覆地表CO₂的涌出强度具有短暂影响。

3 结论

1) 经长期、多点监测可知:高碳通量区域位于试验CT和WN区块,碳通量和土壤温度在时空关系上呈正相关性;遗煤燃烧是地表CO₂通量异常偏高的根本原因,地表CO₂通量波动和高碳通量区域的变化是对地下遗煤燃烧动态变化的量化响应。

2) 裂缝碳涌出量远高于无裂缝地表扩散涌出量,地表高CO₂通量范围沿裂缝分布,在一定程度上可根据碳通量值预测潜在裂缝位置;环境风速和风向均会影响地下煤火发展,环境风速与地表碳通量基本呈正相关性;无降雨情况时,土壤湿度对遗煤燃烧上覆地表碳通量无明显影响,但降雨导致的土壤水分激增,会引起地表CO₂通量的较大波动,并呈现先减后增的趋势。

参考文献

- [1] 袁亮,姜耀东,王凯,等.我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报,2018,43(1):14-20.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14-20.
- [2] 郭军,刘华,金彦,等.地下煤自燃隐蔽火源探测方法综述及新技术展望[J].中国安全科学学报,2022,32(8):111-119.
GUO Jun, LIU Hua, JIN Yan, et al. Summary of underground hidden coal spontaneous combustion fire source detection methods and prospect of new technologies[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 111-119.
- [3] 邓军,李贝,王凯,等.我国煤火灾防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2016,44(10):1-7,101.
DENG Jun, LI Bei, WANG Kai, et al. Research status and outlook on prevention and control technology of coal fire disaster in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 1-7, 101.
- [4] SONG Zeyang, CLAUDIA K. Coal fires in China over the last decade: a comprehensive review[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 133: 72-99.
- [5] IDE S T, ORR F M. Comparison of methods to estimate the rate of CO₂ emissions and coal consumption from a coal fire near Durango, CO[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 86(1): 95-107.
- [6] 刘生根,吴日峰,李润奎,等.煤火裂隙区CO₂排放通量观测装置的开发与应用[J].环境污染与防治,2014,36(2):32-36,42.
LIU Shenggen, WU Rifeng, LI Runkui, et al. Development and application of advice for CO₂ emission flux observation in coal spontaneous combustion zone[J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(2): 32-36, 42.
- [7] 张晓明,刘筱颖,董伟,等.海州露天矿采空区地表CO₂通量的试验研究[J].中国安全科学学报,2022,32(2):66-73.
ZHANG Xiaoming, LIU Xiaoying, DONG Wei, et al. Experimental study on soil surface CO₂ fluxes in goaf area of Haizhou open-pit mines[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(2): 66-73.
- [8] ENGLE M A, OLEA R A, O'KEEFE J M K, et al. Direct estimation of diffuse gaseous emissions from coal fires: current methods and future directions[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 112: 164-172.
- [9] 王海燕.煤田火区温室气体通量测量方法研究进展[J].安全,2021,42(3):1-11.
WANG Haiyan. Review on flux measurement methods for green house gases in coal field fire zones[J]. Safety &

Security, 2021, 42(3): 1-11.

- [10] 白羽. 海州露天矿边坡残煤自燃诱发滑坡的数值模拟研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2009.
BAI Yu. Numerical simulation of Haizhou open-pit mine slope residual coal landslide inducing spontaneous[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2009.
- [11] 祝司永. 海州露天矿矿山地质灾害成因及治理措施[D]. 长春:吉林大学,2013.
ZHU Siyong. Management measures and causes of geological hazards in Haizhou open-cast mine[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [12] O'KEEFE J M K, HENKE K R, HOWER J C, et al. CO₂, CO, and Hg emissions from the Truman Shepherd and Ruth Mullins coal fires, eastern Kentucky, USA[J]. Science of the Total Environment, 2009, 408(7): 1 628-1 633.
- [13] 刘思鑫, 李洪先, 王国芝, 等. 基于 SF₆ 示踪试验的孤岛面采空区漏风规律研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(12): 166-170.
LIU Sixin, LI Hongxian, WANG Guozhi, et al. Study on leakage law of isolated island surface mining area based on SF₆ tracer test[J]. Coal Technology, 2021, 40(12): 166-170.
- [14] WIDIATMOJO A, SASAKI K, WIDODO N P, et al. Numerical simulation to evaluate gas diffusion of turbulent flow in mine ventilation system[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(3): 349-355.
- [15] 崔铁军, 李莎莎. 露天矿边坡岩体状态变化与多灾害耦合作用关系研究[J]. 防灾减灾学报, 2023, 39(4): 34-42.
CUI Tiejun, LI Shasha. Study on the relationship between the change of rock mass state and coupling of multiple disasters in open pit slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2023, 39(4): 34-42.
- [16] 王来贵, 白羽, 牛爽. 残煤自燃过程中温度场与应力场耦合作用[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2009, 28(6): 865-868.
WANG Laigui, BAI Yu, NIU Shuang. Coupling effect of temperature field and stress field in residual coal spontaneous combustion[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Sciences, 2009, 28(6): 865-868.
- [17] SALMAWATI Salmawati, SASAKI Kyuro, SUGAI Yuichi, et al. Estimating a baseline of soil CO₂ flux at CO₂ geological storage sites[J]. Ecology Environment & Conservation, 2019, 191(9): DOI: 10.1007/s10661-019-7724-5.
- [18] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 342-350.
WANG Yuan, SONG Xinshan, WANG Jun, et al. Effect of drying-rewetting alternation on soil carbon pool and mineralization of soil organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 342-350.



作者简介: 王永军 (1985—),男,山东临沂人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事煤炭自燃、矿井通风等方面的研究。E-mail:wyj917@126.com。