

卞荣星,滕 晓,孙治国,等.季节性气象因子对生活垃圾填埋场甲烷释放的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2008-2015.

Bian R X, Teng X, Sun Z G, et al. The impact of seasonal meteorological factors on methane emissions from municipal solid waste landfills [J]. The impact of seasonal meteorological factors on methane emissions from municipal solid waste landfills [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2008-2015.

## 季节性气象因子对生活垃圾填埋场甲烷释放的影响

卞荣星<sup>1\*</sup>,滕 晓<sup>1</sup>,孙治国<sup>2</sup>,朱润泽<sup>1</sup>,牛亚婷<sup>1</sup>,杜欣然<sup>1</sup>,高淑丹<sup>1</sup>,刘克琼<sup>2</sup>,孙英杰<sup>1</sup> (1.青岛理工大学环境与市政工程学院,山东 青岛 266520; 2.青岛洁源环境有限公司,山东 青岛 266300)

**摘要:** 为明确填埋场甲烷释放的时空变化规律及其影响机制,以青岛某生活垃圾填埋场为例,采用静态箱法测定了不同季节甲烷释放通量日动态变化。结果表明,填埋场甲烷释放通量季节变化显著,冬季释放最高为(115.67±65.34) mmol/(m<sup>2</sup>·h),夏季释放最低为(61.51±74.57)mmol/(m<sup>2</sup>·h)。不同季节的日甲烷释放通量存在明显差异,夏季甲烷释放通量呈现双峰曲线,秋冬季甲烷释放通量呈现单峰曲线。相关性分析表明甲烷释放通量与大气压、大气温度、大气相对湿度、风速、土壤温度、土壤相对湿度显著相关;夏秋季甲烷释放通量与大气相对湿度和大气温度分别呈显著正相关和负相关,而冬季则相反。

**关键词:** 甲烷释放; 生活垃圾填埋场; 气象因子; 季节变化; 日变化

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)04-2008-08

**The impact of seasonal meteorological factors on methane emissions from municipal solid waste landfills.** BIAN Rong-xing<sup>1\*</sup>, TENG Xiao<sup>1</sup>, SUN Zhi-guo<sup>2</sup>, ZHU Run-ze<sup>1</sup>, NIU Ya-ting<sup>1</sup>, DU Xin-ran<sup>1</sup>, GAO Shu-dan<sup>1</sup>, LIU Ke-qiong<sup>2</sup>, SUN Ying-jie<sup>1</sup> (1.College of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2.Qingdao Jieyuan Environment Co., Ltd., Qingdao 266300, China). *China Environmental Science*, 2025,45(4): 2008~2015

**Abstract:** To clarify the temporal and spatial variation patterns of methane emissions from landfills and their influencing mechanisms, a case study was conducted at a municipal solid waste landfill in Qingdao. The static chamber method was used to measure the diurnal dynamics of methane emission fluxes across different seasons. The results indicate significant seasonal variations in methane emission fluxes from the landfill, with the highest emissions occurring in winter at (115.67±65.34) mmol/(m<sup>2</sup>·h) and the lowest in summer at (61.51±74.57) mmol/(m<sup>2</sup>·h). The diurnal methane emission fluxes also varied markedly between seasons, with summer fluxes exhibiting a bimodal curve and autumn and winter fluxes showing a unimodal curve. Correlation analysis revealed that methane emission fluxes were significantly related to atmospheric pressure, air temperature, relative humidity, wind speed, soil temperature, and soil relative humidity. In summer and autumn, methane emission fluxes showed a significant positive correlation with atmospheric relative humidity and a negative correlation with air temperature, whereas the opposite was true in winter.

**Key words:** methane emission; meteorological factors; landfills; seasonal variation; diurnal variation

由温室效应导致的全球性气候变化和生态环境问题是 21 世纪人类面临的严重威胁<sup>[1]</sup>。甲烷作为第二大温室气体,其全球增温潜势是二氧化碳的 28 倍<sup>[2]</sup>,生活垃圾填埋场是第三大人为甲烷排放源,占比达 19%<sup>[3]</sup>。我国过去 20 年累计垃圾填埋量超过 17 亿 t<sup>[4]</sup>,填埋场甲烷排放量高达 400 万 t/a<sup>[5]</sup>。填埋场甲烷减排已成为我国温室气体减排不容忽视的一个方面。填埋气收集系统是减少甲烷释放的有效措施,但世界上大多数发展中国家,由于缺乏科学可靠的填埋场甲烷产生及释放量基础数据,填埋气收集和利用工艺效率偏低,导致填埋气无序排放现象普遍存在<sup>[6]</sup>。

覆盖层作为填埋气无序释放的最后屏障,在填埋场甲烷减排中发挥着重要作用。甲烷在传输过程

中可被覆盖层中甲烷氧化菌氧化生成 CO<sub>2</sub> 和生物质。国内外学者对垃圾填埋场覆盖土甲烷氧化影响规律进行了系统研究,覆盖土壤的物理和化学性质,例如覆盖土壤类型、覆盖土壤厚度、有机质含量、孔隙率、含水率等<sup>[7-9]</sup>是影响甲烷氧化的主要因素。除覆盖土物理化学性质外,填埋场所在的气象参数也是影响甲烷传输、氧化和释放的重要因素。有研究表明填埋场甲烷释放通量昼夜差异明显,其释放通量与太阳辐射强度、大气温度、大气湿度等参数显著相关,且白天甲烷释放机制主要为太阳辐射升温引

收稿日期: 2024-09-27

基金项目: 中国博士后科学基金(2022M711747);国家自然科学基金项目(52000112);山东省高等学校青年创新团队项目(2023KJ117);山东省博士后创新项目(SDCX-ZG-202203023)

\* 责任作者, 副教授, bianrongxing@126.com

起的气体扩散<sup>[10-11]</sup>.Shen 等<sup>[12]</sup>和 Xu 等<sup>[13]</sup>的研究发现大气压与甲烷释放通量呈负相关.通常,扩散被认为是甲烷在填埋场覆盖层中传输的主要机制,然而,由于覆盖层表面大气压力的时空变化,以及垃圾填埋层不断产生的填埋气会造成覆盖层上下存在压差,因此,对流作用在甲烷传输和释放中也发挥重要作用<sup>[14]</sup>.Bian 等<sup>[15]</sup>通过模拟研究表明低气压会诱导填埋气体传输机制由扩散转为对流,进而导致较低的甲烷氧化效率.在填埋场,覆盖层土壤温度随着热对流传导呈现明显的变化特征<sup>[16]</sup>,变化的温度则通过影响气体扩散和微生物活性来影响甲烷传输、氧化和释放过程.Boeckx 等<sup>[17]</sup> 研究表明甲烷氧化的最佳温度为 20~30℃,Reddy 等<sup>[18]</sup>研究表明填埋场覆盖土在 6~50℃均具有甲烷氧化能力,最佳反应温度为 30℃.填埋场覆盖层含水率通过影响气体的扩散和微生物活性影响甲烷氧化和释放,甲烷氧化最佳含水率为 15%~25%<sup>[19]</sup>,具体取决于覆盖土壤类型<sup>[20]</sup>.填埋场覆盖层干湿交替会造成覆盖土表面堵塞,从而形成甲烷释放热点<sup>[3]</sup>.Delkash 等<sup>[21]</sup>发现有风条件下填埋场甲烷释放更大,且甲烷释放通量与风速呈正相关.在实际填埋场中覆盖层甲烷释放具有明显的时空变化特性,其释放通量与气象参数具有显著相关性<sup>[22-23]</sup>,如冬季寒冷温度会抑制填埋场覆盖层甲烷氧化微生物活性,降低填埋场覆盖层甲烷氧化效率,导致高甲烷释放通量<sup>[23]</sup>,因此,实际填埋场覆盖

层甲烷释放呈现秋冬高春夏低的趋势<sup>[11]</sup>.

填埋场甲烷释放的准确预测是甲烷减排措施制定的前提.目前填埋场甲烷释放模型主要包括 IPCC 缺省模型、一级动力学衰减模型(IPCC FOD)和 US EPA LandGEM 模型<sup>[24-25]</sup>;然而以上模型注重填埋场垃圾的降解过程,忽视了甲烷在覆盖层的传输、氧化和释放过程.覆盖层甲烷氧化因子取缺省值,导致模型预测结果存在较大差异<sup>[26-27]</sup>.部分学者构建了基于气体在覆盖层的传输、氧化和释放模型,但是这些模型忽视了气象因子,无法实现甲烷释放的动态变化预测<sup>[15]</sup>.

目前,动态变化的气象因子对于填埋场覆盖层甲烷传输、氧化和释放的机制尚不明确.因此,建立基于覆盖层特性和气象因子的填埋场甲烷释放预测模型,是准确评估填埋场甲烷释放对全球温室效应的影响的前提.本研究以青岛某封场垃圾填埋场作为研究对象,系统分析填埋场甲烷释放通量的时空变化规律,深入探究气象因子对覆盖层甲烷传输、氧化和释放的规律,阐明气象因子对甲烷释放的影响及机制,相关研究将为建立准确的生活垃圾填埋场甲烷释放预测模型,评估填埋场甲烷释放对全球温室效应贡献具有重要指导意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

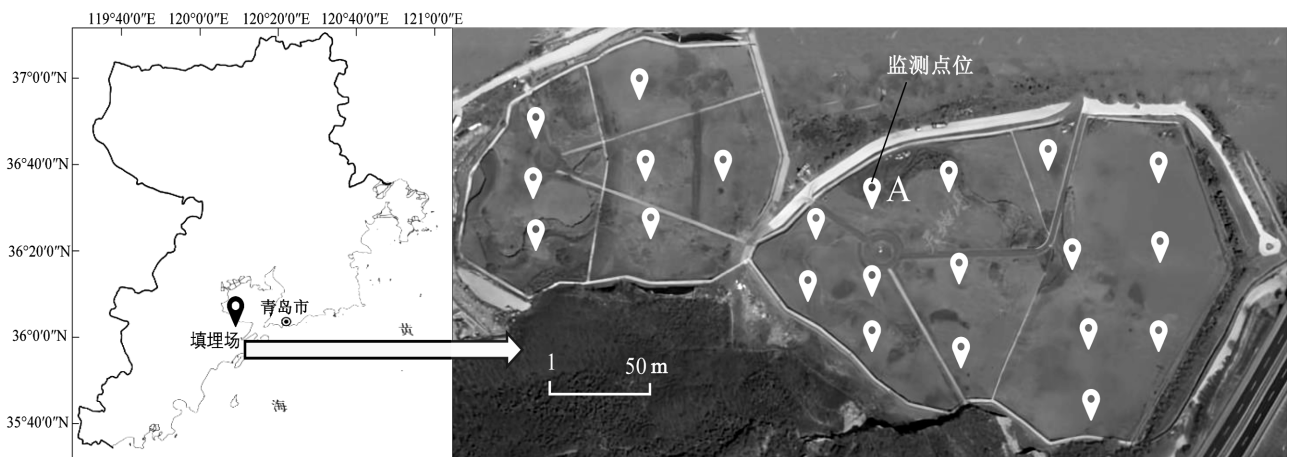


图1 填埋场监测点位分布

Fig.1 Distribution of monitoring points in the landfill site

基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为鲁 SG(2024)035 号的标准地图制作

本研究选取山东省青岛市某生活垃圾填埋场

(36°04'80.28"N, 120°15'94.65"E)(图 1).该填埋场于

2008 年 1 月投入使用,占地  $0.138\text{km}^2$ ,设计库容 115 万  $\text{m}^3$ ,2014 年 7 月封场,共填埋生活垃圾约 115 万  $\text{m}^3$ .封场覆土厚度约为  $0.6\sim 0.8\text{m}$ ,覆土均为黏质土,其性质见表 1.采用网格布点法,对整个填埋场进行甲烷释放量监测(具体监测点位见图 1),然后选取点位 A 作为实时动态甲烷释放监测点.

表 1 不同深度覆盖土性质一览

Table 1 The list of cover soil properties at different depths

指标	厚度(cm)			
	0~20	20~40	40~60	60~70
pH 值	$6.57\pm 0.27$	$6.41\pm 0.15$	$6.38\pm 0.26$	$6.5\pm 0.11$
含水率(%)	$21.42\pm 2.50$	$13.56\pm 3.70$	$15.61\pm 2.62$	$16.27\pm 3.66$
氨氮(mg/kg)	$19.66\pm 4.32$	$27.28\pm 4.56$	$29.41\pm 3.41$	$23.66\pm 3.75$
硝酸盐氮(mg/kg)	$38.37\pm 2.21$	$8.56\pm 0.87$	$18.79\pm 2.43$	$12.79\pm 3.11$
亚硝酸盐氮(mg/kg)	$1.34\pm 0.21$	$0.57\pm 0.17$	$1.6\pm 0.38$	$1.11\pm 0.41$
有机质(%)	$2.13\pm 0.25$	$3.08\pm 0.22$	$2.79\pm 0.30$	$3.07\pm 0.28$

## 1.2 甲烷释放通量测定

选取具有代表性的青岛四季气候特征时间点:春季(2024 年 3 月),夏季(2024 年 6 月),秋季(2023 年 9 月)和冬季(2023 年 12 月),采用静态箱法监测填埋场甲烷释放通量.静态箱为内径  $39\text{cm}\times$ 高  $30\text{cm}$  规格的圆柱体,有效覆盖面积为  $0.12\text{m}^2$ ,体积为  $0.04\text{m}^3$ .静态箱顶部设有气体取样口和温度口,用于气体取样和温度监测.静态箱的底部分埋于覆盖土层,为确保箱体密闭性,测试时以水封槽密封,运行时将静态箱内风扇通电,从而混合气体.密封结束后分别在 0, 10, 20, 30min 采用带有三通阀的  $50\text{mL}$  注射器取样,同时记录箱内温度及大气压力用于校正气体浓度.不同季节昼夜甲烷释放通量测定选择测定当日的 09:00 至次日 09:00(秋季从 10:00 至次日 12:00),每隔 1~2h 测定一组数据.甲烷测定采用气相色谱(GC9800-TCD,浙江福立)测定,检测器为 TCD 检测器,气相色谱条件设置如下:柱箱温度为  $80^\circ\text{C}$ ,填充柱进样口温度  $200^\circ\text{C}$ ,柱流量  $3.0\text{mL}/\text{min}$ ,载气为高纯氮( $\phi\geq 99.999\%$ ),TCD 检测器温度  $130^\circ\text{C}$ ,电流  $50\text{mA}$ ,  $\text{H}_2$  流量  $30\text{mL}/\text{min}$ ,空气流量  $300\text{mL}/\text{min}$ .

甲烷释放通量计算见下式所示.

$$F = \frac{\Delta m}{A \times \Delta t} = \frac{\rho \times V \times \Delta C}{1000 \times M \times A \times \Delta t}$$

式中: $F$  为气体通量,  $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;  $\rho$  为甲烷气体在

相应温度下的密度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $M$  为甲烷的摩尔质量,  $\text{g}/\text{mol}$ ;  $\Delta m$  和  $\Delta C$  分别是  $\Delta t$  时间内的通量箱中变化的气体质量和混合比浓度; $A$  和  $V$  分别为静态箱的底面积( $\text{m}^2$ )和体积( $\text{m}^3$ ). $F$  为正值时表示土壤向大气释放该气体,为负值时表示土壤从大气中吸收该气体.

## 1.3 气象因子的测定

在甲烷释放量取样的同时,用美国 Global 公司生产的微型气象工作站(Global Water IIIB,A Xylem brand,USA)同步测定大气温度、大气湿度、风速等气象参数.大气压强用为 DYM3 型空盒气压表测试,测试精度为  $1\text{hPa}$ .土壤温度和土壤湿度使用土壤测试仪(东美 TA8672)测定.

## 1.4 统计分析方法

采用 SPSS 软件进行数据分析处理,统计分析各影响因子之间的相关性,筛选影响甲烷释放的关键气象因子.

## 2 结果和讨论

### 2.1 填埋场甲烷释放的季节变化分析

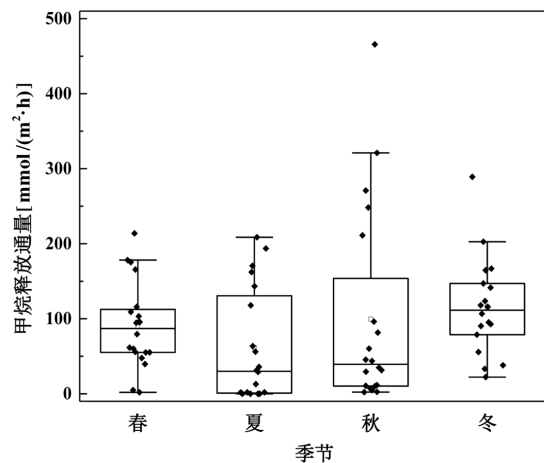


图 2 不同季节甲烷释放通量变化

Fig.2 Changes in methane emission flux in different seasons

不同季节甲烷释放通量变化如图 2 所示,甲烷释放通量在  $\text{ND}\sim 465.70\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  之间,呈现 3 个数量级的差异.甲烷释放通量为正值,表明该填埋场覆盖层表现为甲烷释放源.经统计分析表明,填埋场甲烷释放通量呈现明显的季节性差异,其春夏秋冬四季甲烷释放均值分别为  $(90.41\pm 57.21)$ ,  $(61.51\pm 74.57)$ ,  $(99.44\pm 131.55)$  和  $(115.67\pm 65.34)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,

呈现出冬季高,夏季低的趋势,该研究结果与 Christophersen 等<sup>[28]</sup>以及马占云等<sup>[29]</sup>的研究结果相同.甲烷释放通量的季节变化主要受垃圾填埋场覆盖土壤呼吸活动(特别是甲烷氧化能力)的季节性变化的影响<sup>[30]</sup>,冬季较低的温度使覆盖层甲烷氧化作用几乎为零甚至停止<sup>[31]</sup>,因此冬季甲烷氧化效率较低,导致了高甲烷释放通量<sup>[32]</sup>.而聂发辉等<sup>[33]</sup>对某南方生活垃圾填埋场的研究发现甲烷释放通量峰值出现在夏季的6~8月,而峰谷出现在2月,与本研究结果相反,这主要是由于南方夏季高温天气导致,高温促进了填埋气体在覆盖层的扩散,抑制了甲烷氧化微生物活性,导致了夏季高甲烷释放.

### 2.2 填埋场甲烷释放的昼夜变化分析

由图3可以看出,填埋场春、夏、冬季节甲烷释放通量均表现为昼间大于夜间,而秋季则相反,且昼夜甲烷释放通量差异显著,昼间均值为(35.24±29.91)mmol/(m<sup>2</sup>·h),夜间为(218.67±165.80)mmol/(m<sup>2</sup>·h),夜间释放通量是昼间的6.2倍.Tecle 等<sup>[34]</sup>发现,对于覆盖层厚度为90cm的垃圾填埋场,白天测

得的甲烷释放通量高,夜间通量低.在白天,甲烷释放机制主要是由于太阳辐射增加而引起的对流,而在夜间,甲烷释放受风速引起的对流和其他气象因子的综合影响<sup>[23]</sup>.秋季夜晚,大气温度下降、湿度增加,虽然会导致气体在覆盖层扩散系数降低,但同时会抑制甲烷氧化微生物活性,导致高甲烷释放.

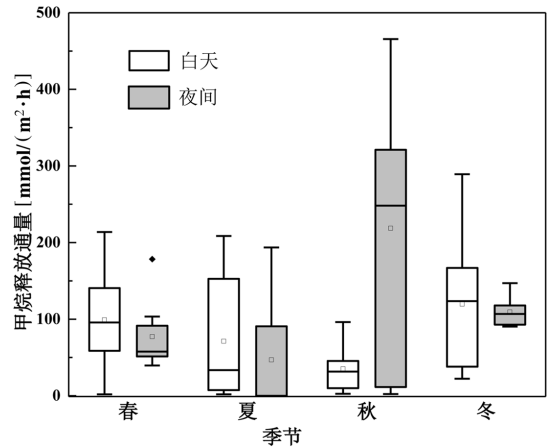


图3 不同季节昼夜甲烷释放通量对比  
Fig.3 Comparison of methane emission flux between day and night in different seasons

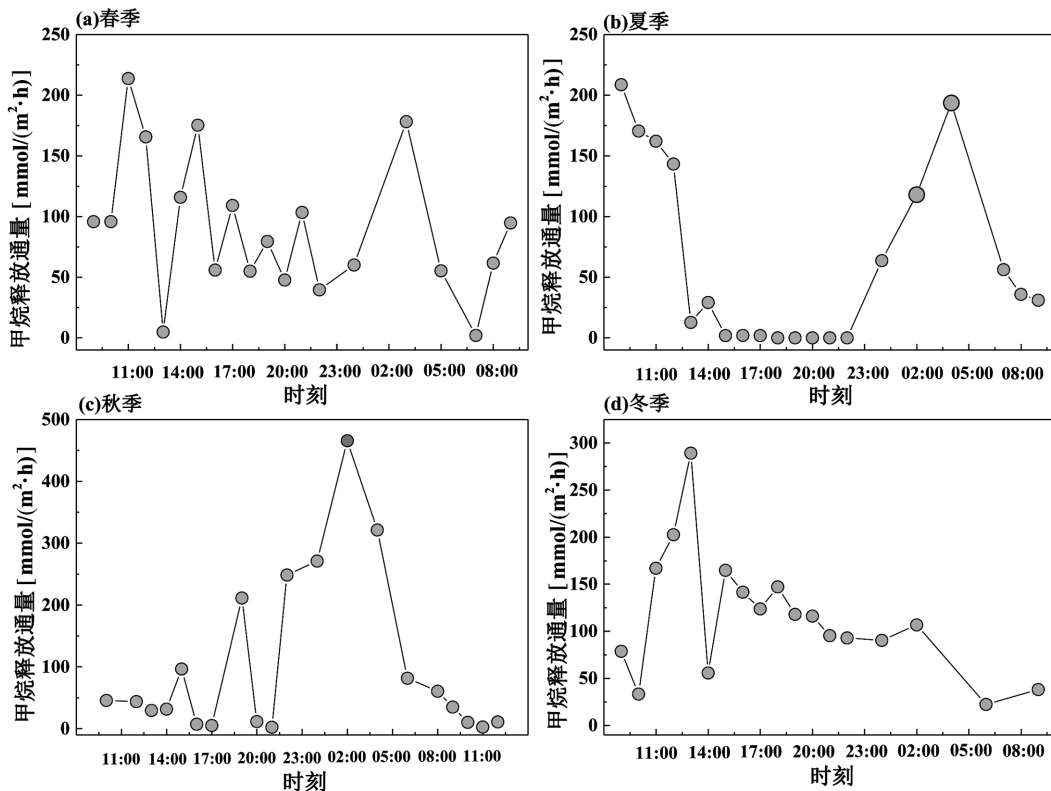


图4 不同季节甲烷释放通量昼夜变化  
Fig.4 Diurnal variation of methane emission flux in different seasons

由图 4 可以看出不同季节日甲烷释放通量存在明显差异.在秋季、冬季填埋场甲烷释放通量呈现明显的单峰曲线,分别在 02:00 和 13:00 出现释放峰值,分别为 465.70 和 289.13mmol/(m<sup>2</sup>·h),秋季甲烷释放通量峰值是夏季甲烷释放通量峰值的 2.23 倍.夏季甲烷释放峰值则呈现明显的双峰曲线,分别在 09:00 和 04:00 出现峰值,分别为 208.67 和 193.67mmol/(m<sup>2</sup>·h).春季填埋场覆盖层甲烷释放通量则无明显变化规律.Xin 等<sup>[23]</sup>对西安某生活垃圾填埋场秋季的现场监测数据也表明甲烷释放通量呈现明显的双峰曲线.

### 2.3 气象因子与甲烷释放通量的相关性分析

图 5 为甲烷释放通量与大气压力、风速、大气相对湿度、气温、土壤温度和土壤相对湿度等变化关系图.相关性分析表明(图 6),在夏秋季,甲烷释放通量与大气温度呈显著负相关性,与大气湿度呈显著正相关性,而在冬季则恰好相反,春季则无明显相关性.土壤温度也与甲烷释放通量呈显著相关性,秋季呈显著负相关,而冬季则呈显著正相关.另外风速也与甲烷释放通量呈显著相关性,在春冬季监测到甲烷释放通量与风速呈正相关关系.冬季,甲烷释放通量则与大气压呈显著负相关关系.

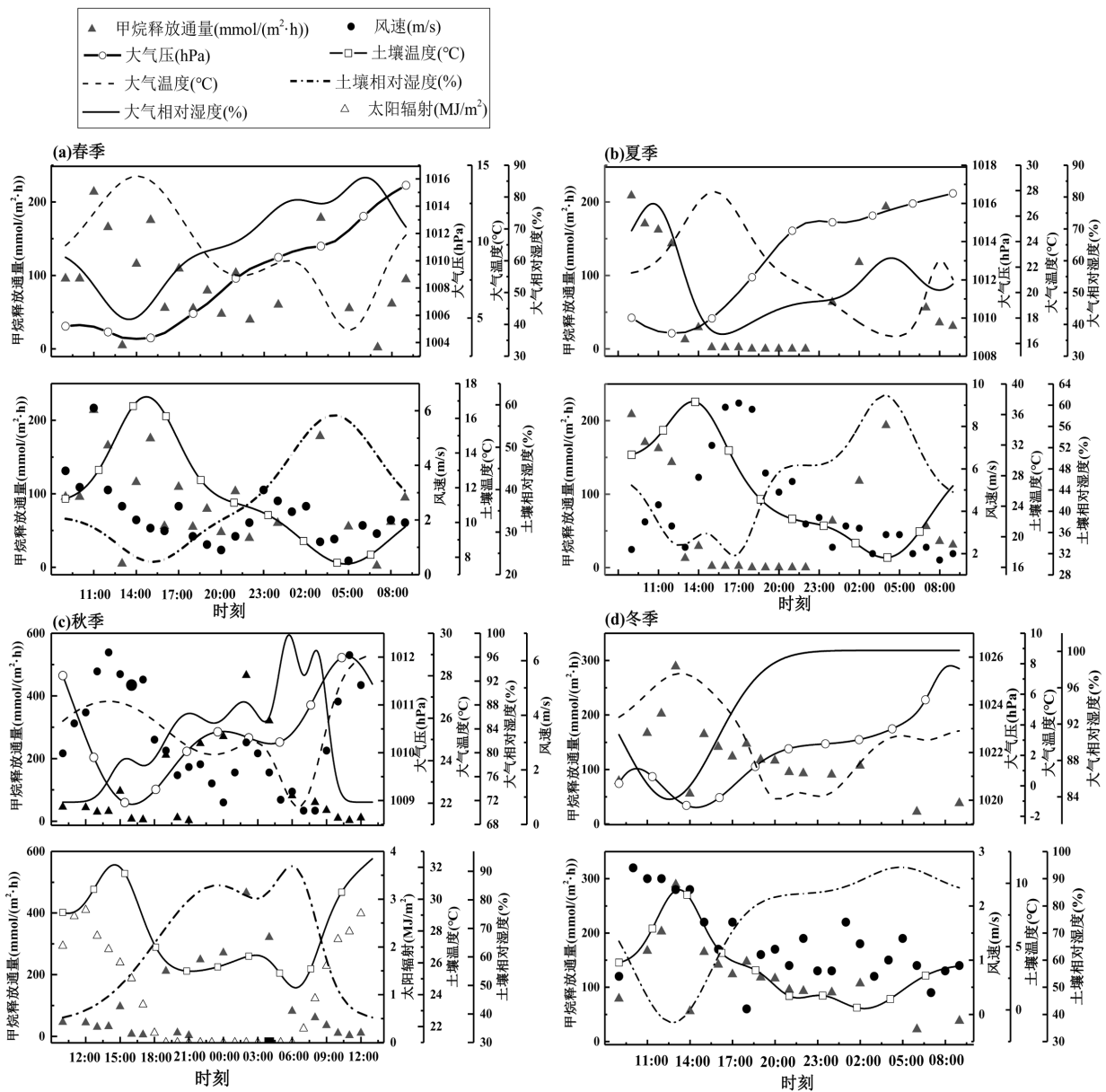


图 5 不同季节甲烷释放通量与气象因子动态变化

Fig.5 Dynamic changes of methane emission flux and meteorological factors in different seasons

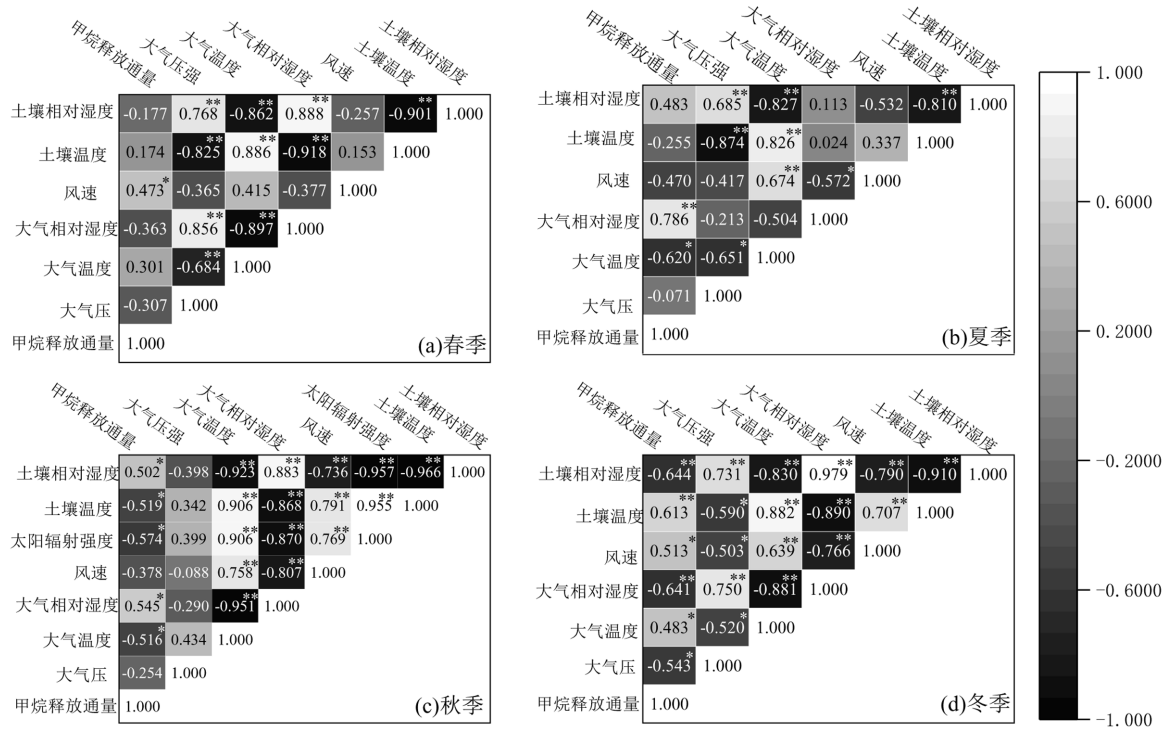


图 6 不同季节甲烷释放通量与气象因子的相关性

Fig.6 Correlation between methane emission flux and meteorological factors in different seasons

\*为  $P < 0.05$ , \*\*为  $P < 0.01$

温度主要通过影响气体在覆盖层的扩散和甲烷氧化相关微生物活性来影响填埋气在覆盖层中的传输和释放,在冬季低温条件下(0~10℃),甲烷氧化微生物随着温度的增加,活性增强是导致甲烷释放通量降低的主要因素,这与 Börjesson 等<sup>[35]</sup>研究结果一致.而在夏秋季节,覆盖层土壤温度范围在 17~38℃之间,而甲烷氧化微生物适宜活动范围在 20~30℃之间<sup>[17]</sup>,此时导致甲烷释放通量升高的原因是高温抑制了甲烷氧化微生物活性,同时温度升高也促进了填埋气在覆盖层的传输<sup>[15]</sup>.Xin 等<sup>[23]</sup>研究也表明太阳辐射升温导致的对流扩散增强是甲烷释放通量增加的主要原因.Bian 等<sup>[15]</sup>模拟了外部环境温度对甲烷传输、氧化和释放的影响,结果也表明在一定温度范围内(0~20℃)甲烷氧化效率随着温度升高而升高,而当温度高于 20℃时,氧化效率则下降.因此,温度是控制填埋场甲烷释放的重要因素,根据填埋场外部温度的变化制定相应的填埋气控制措施是降低填埋场甲烷释放的重要参考依据.

在甲烷释放通量监测中,夏季、秋季、冬季的大气相对湿度和甲烷释放通量呈显著相关,大气相对湿度的提高相应增加了覆盖土层土壤空气的湿度,湿度

对甲烷释放通量的影响可以用水作为甲烷扩散屏障来解释.这个屏障有两个相反的作用:(1)水汽限制了甲烷氧化细菌可以利用的甲烷和氧气的数量,从而导致甲烷氧化效率降低,甲烷释放通量增加;(2)水汽的存在同时降低了土壤的孔隙,而甲烷在水相的传质速率仅为气相的万分之一<sup>[36]</sup>,所以大气相对湿度的提高使得覆盖层层土壤的气体传质阻力增大,因而降低了甲烷的释放通量<sup>[37]</sup>.因此,甲烷释放通量的变化取决于这两种机制中哪一种占主导地位<sup>[35]</sup>.在夏季和秋季监测中,甲烷释放通量与大气相对湿度呈显著正相关,可能是由于第一个机制占主导作用,导致甲烷释放通量增加,而在冬季监测中,甲烷释放通量与大气相对湿度呈显著负相关,可能是由于第二个机制占主导作用.

冬季填埋场覆盖层甲烷释放通量与大气压力呈显著负相关,这与 Czepiel 等<sup>[38]</sup>、Shen 等<sup>[12]</sup>和 Xu 等<sup>[13]</sup>的研究结果一致.基于填埋场所在的特定地理位置,相对大气压力差可达 30kPa<sup>[13,28]</sup>,大气压力的变化会引起填埋场覆盖层的垂直压力梯度,进而导致气体对流作用增强.Molins 等<sup>[39]</sup>分析表明填埋场甲烷释放 99%来自于扩散传输机制,但是随着覆盖层上下压差的增大,对流传输作用也不可忽视.此外,

大气压力也可以通过影响氧气在覆盖层的扩散深度,通常低气压会降低氧气在覆盖层的扩散深度,从而降低甲烷氧化效率,导致甲烷释放。

Delkash 等<sup>[40]</sup>的研究表明,在有风条件下,垃圾填埋场甲烷释放量更高,在本研究中在冬季,甲烷释放通量与风速呈正相关。该研究结果与 Xin 等<sup>[23]</sup>以及 Kim 等<sup>[41]</sup>结果一致,分析认为高风速会增强填埋气在覆盖层的对流<sup>[41]</sup>来提高覆盖层甲烷释放通量。

基于以上分析可以看出,气象因子对填埋场覆盖层甲烷传输、氧化和释放发挥着重要的作用,且不同的气象参数如温度、大气相对湿度等对甲烷的释放具有双重作用。因此,对于垃圾填埋场管理者,应当基于变化的气象参数制定相应的碳减排策略。另外,目前国际通用的填埋场甲烷释放模型如 IPCC FOD 模型, LandGEM 模型,侧重于甲烷气体的产生,释放则主要是减去甲烷收集量和氧化量,无法有效指导填埋场甲烷减排实践<sup>[25,27]</sup>。虽然部分学者基于填埋气在覆盖层的传输氧化和释放机制,建立了理论分析模型<sup>[14,42]</sup>,但是这些模型未考虑气象参数对甲烷传输、氧化和释放的影响,仅仅简化为覆盖层的温度和含水率的差异,无法反应填埋气在覆盖层的实时传输、氧化和释放过程<sup>[15,25]</sup>。因此,构建基于气象因子和覆盖层特性的填埋场甲烷释放模型,实现填埋场甲烷释放的动态预测,是制定特定填埋场甲烷减排策略的前提。本研究明确了不同气象参数对甲烷释放的影响,为模型的构建提供了一定的理论支撑。

### 3 结论

3.1 填埋场甲烷释放季节变化明显,冬季释放量最高,夏季释放量最低。

3.2 不同季节的日甲烷释放通量存在明显差异,夏季甲烷释放通量呈现双峰曲线,秋季和冬季甲烷释放通量呈现单峰曲线。

3.3 夏季和秋季甲烷释放通量与大气温度呈负相关,而冬季则呈显著正相关;夏季和秋季,甲烷释放量与大气相对湿度呈显著正相关,而冬季甲烷释放通量与大气相对湿度呈显著负相关;风速、大气压也与甲烷释放通量呈显著相关性。

#### 参考文献:

[1] Karl T R, Trenberth K E. Modern global climate change [J]. *Science*,

2003,302(5651):1719-1723.

- [2] Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2009,1(5):285-292.
- [3] Scheutz C, Kjeldsen P, Bogner J E, et al. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions [J]. *Waste Management*, 2009,27(5):409-455.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [5] 詹良通, 王勇, 刘凯, 等. 生活垃圾填埋场黄土覆盖层的甲烷氧化能力现场测试和评估 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(6):3150-3157.
- Zhan L T, Wang Y, Liu K, et al. Field test and evaluation of methane oxidation capacity of loess cover in municipal solid waste landfill [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(6):3150-3157.
- [6] De la Cruz F B, Green R B, Hater G R, et al. Comparison of field measurements to methane emissions models at a new landfill [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(17):9432-9441.
- [7] Rachor I, Gebert J, Gröngroft A, et al. Assessment of the methane oxidation capacity of compacted soils intended for use as landfill cover materials [J]. *Waste Management*, 2011,31(5):833-842.
- [8] Regan K M, Nunan N, Boeddinghaus R S, et al. Seasonal controls on grassland microbial biogeography: Are they governed by plants, abiotic properties or both? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014,71(4):21-30.
- [9] Spokas K A, Bogner J E. Limits and dynamics of methane oxidation in landfill cover soils [J]. *Waste Management*, 2011,31(5):823-832.
- [10] Bian R, Xin D, Chai X. Methane emissions from landfill: influence of vegetation and weather conditions [J]. *Environmental Technology*, 2019,40(16):2173-2181.
- [11] Bian R, Komiya T, Shimaoka T, et al. Simulative analysis of vegetation on CH<sub>4</sub> emission from landfill cover soils: Combined effects of root-water uptake, root radial oxygen loss, and plant-mediated CH<sub>4</sub> transport [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,234(29):18-26.
- [12] Shen S, Chen Y, Zhan L, et al. Methane hotspot localization and visualization at a large-scale Xi'an landfill in China: Effective tool for landfill gas management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018,225(21):232-241.
- [13] Xu L K, Lin X M, Amen J, et al. Impact of changes in barometric pressure on landfill methane emission [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014,28(7):679-695.
- [14] Yao Y, Su Y, Wu Y, et al. An analytical model for estimating the reduction of methane emission through landfill cover soils by methane oxidation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015,283(3):871-879.
- [15] Bian R, Chen J, Li W, et al. Numerical modeling of methane oxidation and emission from landfill cover soil coupling water-heat-gas transfer: Effects of meteorological factors [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021,146(2):647-655.
- [16] Abichou T, Kormi T, Yuan L, et al. Modeling the effects of vegetation on methane oxidation and emissions through soil landfill final covers across different climates [J]. *Waste Management*, 2015,36(2):230-

- 240.
- [17] Boeckx P, Cleemput O V, Villaralvo I. Methane emission from a landfill and the methane oxidation capacity of its covering soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996,28(10):1397-1405.
- [18] Reddy K R, Rai R K, Green S J, et al. Effect of temperature on methane oxidation and community composition in landfill cover soil [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2019,46(9/10):1283-1295.
- [19] Izumoto S, Hamamoto S, Kawamoto K, et al. Monitoring of methane emission from a landfill site in daily and hourly time scales using an automated gas sampling system [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018,25(24):24500-24506.
- [20] Zhang H, Yan X, Cai B, et al. The effects of aged refuse and sewage sludge on landfill CH<sub>4</sub> oxidation and N<sub>2</sub>O emissions: Roles of moisture content and temperature [J]. *Ecological Engineering*, 2015,74(2):345-350.
- [21] Delkash M, Chow F K, Imhoff P T. Diurnal landfill methane flux patterns across different seasons at a landfill in Southeastern US [J]. *Waste Management*, 2022,144(8):76-86.
- [22] Fraser-McDonald A, Boardman C, Gladding T, et al. Methane emissions from forested closed landfill sites: Variations between tree species and landfill management practices [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,838(37):156019.
- [23] Xin D H, Hao Y X, Shimaoka T, et al. Site specific diel methane emission mechanisms in landfills: A field validated process based on vegetation and climate factors [J]. *Environmental Pollution*, 2016,218(11):673-680.
- [24] IPCC. 2006IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. 2006.
- [25] 辛丹慧,赵由才,柴晓利. 填埋场甲烷氧化传输与释放预测模型研究进展 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(3):819-826.
- Xin D H, Zhao Y C, Chai X L. Review on the landfill methane oxidation, transportation and emission models [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(3):819-826.
- [26] Zhao Z Y, Bian R X, Zhao F B, et al. Implications of municipal solid waste disposal methods in China on greenhouse gas emissions [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2020,39(3):e13372.
- [27] Cai B, Lou Z, Wang J, et al. CH<sub>4</sub> mitigation potentials from China landfills and related environmental co-benefits [J]. *Science Advances*, 2018,4(7):eaar8400.
- [28] Christophersen M, Kjeldsen P, Holst H, et al. Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: Factors governing emissions and methane oxidation [J]. *Waste Management and Research*, 2001,19(2):126-143.
- [29] 马云占,李海玲,岳波,等. 生活垃圾填埋场覆盖层温室气体 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 释放规律及其相关性研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2014,4(5):399-405.
- Ma Z Y, Li H L, Yue B, et al. Study on emission characteristics and correlation of GHGs CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in MSW landfill cover layer [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2014,4(5):399-405.
- [30] Li H, Meng B, Yue B, et al. Seasonal CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> effluxes in a final covered landfill site in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,725(28):138355.
- [31] 何晶晶,瞿贤,杨琦,等. 土壤因素对填埋场终场覆盖层甲烷氧化的影响 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007,35(6):755-759.
- He P J, Qu X, Yang Q, et al. Effects of soil factors on methane oxidation capacity in landfill cover soil [J]. *Journal of Tongji University (Natural ence)*, 2007,35(6):755-759.
- [32] 谢海建,王巧,邱战洪,等. 基于 CALMIM 程序的典型填埋场甲烷释放规律分析 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016,46(S1):31-35.
- Xie H J, Wang Q, Qiu Z H, et al. Analysis of methane emission of typical landfills based on CALMIM model [J]. *Journal of Southeast University*, 2016,46(S1):31-35.
- [33] 聂发辉,周永希,张后虎,等. 生活垃圾填埋场 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 释放规律及影响因素研究 [J]. *环境科学学报*, 2017,37(5):1808-1813.
- Nie F H, Zhou Y X, Zhang H H, et al. Characteristics of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from municipal solid waste landfill and their influencing factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017,37(5):1808-1813.
- [34] Teclé D, Lee J, Hasan S. Quantitative analysis of physical and geotechnical factors affecting methane emission in municipal solid waste landfill [J]. *Environmental Geology*, 2009,56(6):1135-1143.
- [35] Börjesson G, Svensson B H. Seasonal and diurnal methane emissions from a landfill and their regulation by methane oxidation [J]. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 1997,15(1):33-54.
- [36] 陈敏恒,丛德滋,方图南,等. 化工原理 (下册) [M]. 北京:化学工业出版社, 2000.
- Chen M H, Cong D Z, Fang T N, et al. Principles of chemical engineering (Vol.2) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [37] 高志文,何晶晶,邵立明,等. 生活垃圾填埋场甲烷排放规律的短期监测 [J]. *环境科学*, 2006,27(9):1727-1731.
- Gao Z W, He P J, Shao L M, et al. Short-term monitoring of methane emission regulation from a municipal solid waste landfill [J]. *Environmental Science*, 2006,27(9):1727-1731.
- [38] Czepiel P M, Shorter J H, Mosher B, et al. The influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions [J]. *Waste Management*, 2003,23(7):593-598.
- [39] Molins S, Mayer K U, Scheutz C, et al. Transport and reaction processes affecting the attenuation of landfill gas in cover soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008,37(2):459-468.
- [40] Delkash M, Zhou B, Han B, et al. Short-term landfill methane emissions dependency on wind [J]. *Waste Management*, 2016,55(9):288-298.
- [41] Kim J, Verma S B, Billesbach D P, et al. Diel variation in methane emission from a midlatitude prairie wetland: Significance of convective throughflow in *Phragmites australis* [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998,103(D21):28029-28039.
- [42] Bian R, Xin D, Chai X. A Simulation model for estimating methane oxidation and emission from landfill cover soils [J]. *Waste Management*, 2018,77(7):426-434.

**作者简介:** 卞荣星(1990-),男,山东临沂人,副教授,博士,研究方向为固体废物处理处置.发表论文 20 余篇.bianrongxing@126.com.