

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.016

重庆市城镇生活污水碳排放时空分布特征

汪宙峰^{1,2,3}, 张焱菁¹, 沈惠龄¹, 郑博¹, 蒲朝东², 张胜雷⁴

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 重庆市荣冠科技有限公司, 重庆 400039; 3. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川 成都 610500; 4. 中国城市科学研究会, 北京 100835)

摘要: 化粪池中因发生生活污水生化消解反应而产生的碳排放问题应予以重视。为此, 提出生活污水“首次”生化消解反应的概念, 并选择重庆市这一西部重镇作为研究区域, 通过3 389台气体传感设备, 采用Fick扩散定律测算出2019年—2021年的“首次”碳排放量, 得出重庆市主城区居民生活污水“首次”生化消解反应碳排放的时空分布特征。结果表明, 2019年—2021年生活污水碳排放量(以二氧化碳当量计)分别约为 4.443×10^8 、 4.554×10^8 和 2.730×10^8 kg, 其中各区县均有超过99%的甲烷会从化粪池逸散到外部空间; 实现化粪池的取缔工作与城市碳减排工作的有机结合、新建污水处理厂, 充分挖掘城镇生活污水及其生化消解反应产生的甲烷气体的各种价值必然是大势所趋, 为未来逐步取消化粪池提供了新思路和新动力; 2019年—2021年生活污水“首次”生化消解反应的高碳排放区域均分布在主城区西部、南部以及主城区中心地带, 低碳排放区域减少, 中碳排放区域增加, 碳排放空间分布差异减小; 气候对生活污水“首次”生化消解反应碳排放有显著影响, 2019年—2021年, 碳排放随冬、春、夏、秋的季节变化呈现出“高-低-高-低”的分布态势。

关键词: 生活污水; 碳排放; 化粪池; 时空分布特征; Fick扩散定律

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0102-07

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Carbon Emissions from Urban Domestic Sewage in Chongqing

WANG Zhou-feng^{1,2,3}, ZHANG Yan-jing¹, SHEN Hui-ling¹, ZHENG Bo¹,
PU Chao-dong², ZHANG Sheng-lei⁴

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Chongqing Rongguan Science Technologies Co. Ltd., Chongqing 400039, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610500, China; 4. Chinese Society for Urban Studies, Beijing 100835, China)

Abstract: The carbon emissions resulting from the biochemical digestion of domestic sewage in septic tanks require greater attention. The concept of the “first” biochemical digestion of domestic sewage was introduced, with Chongqing City, a key town in western China, selected as the research area. By utilizing 3 389 gas sensing devices, Fick’s diffusion law was employed to calculate the “first” carbon

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFF0414359); 四川省知识产权高价值专利实施及产业化项目(2022-ZS-00022); 四川省科技计划资助项目(2023YFS0406); 重庆市建设科技计划项目(2023-0384)

通信作者: 汪宙峰 E-mail: wangzf@swpu.edu.cn

emissions from 2019 to 2021. This study obtained the temporal and spatial distribution characteristics of carbon emissions from the “first” biochemical digestion of domestic sewage in the main urban area of Chongqing. The carbon emissions of domestic sewage (in terms of carbon dioxide equivalent) from 2019 to 2021 were approximately 4.443×10^8 kg, 4.554×10^8 kg and 2.730×10^8 kg, respectively. It was worth noting that more than 99% of the methane in each district and county escaped into the external space. The organic combination of the prohibition of septic tanks and urban carbon emission reduction work, and the construction of sewage treatment plants necessitated the full exploitation of various values of urban domestic sewage and methane generated by biochemical digestion. These measures represented inevitable trends, providing new ideas and impetus for the gradual elimination of septic tanks in future. From 2019 to 2021, the high-carbon emission areas of the “first” biochemical digestion of domestic sewage were predominantly located in the western and southern regions of the main urban area, as well as in the central area. Conversely, there was a decrease in low carbon emission areas, an increase in medium carbon emission areas, and a reduction in spatial distribution disparity of carbon emissions. The climate exerted a significant influence on the carbon emissions resulting from the “first” biochemical digestion of domestic sewage. Over the period from 2019 to 2021, there was an observable fluctuation in carbon emissions, following a pattern of high-low-high-low distribution corresponding to the four seasons of winter, spring, summer, and autumn.

Key words: domestic sewage; carbon emissions; septic tank; temporal and spatial distribution characteristic; Fick's diffusion law

以变暖为主要特征的气候变化问题正成为人类面临的巨大挑战。生活污水从产生到最后成功处理并排放存在一个漫长的周期,综合时间和空间尺度,将整个周期分为两个阶段,即发生在化粪池中的“首次”生化消解反应和发生于污水处理厂中的“二次”生化消解反应。通过这样的区分,使得研究对象更加具有针对性。根据现有的研究,目前生活污水的“首次”生化消解反应碳排放研究具有以下特点及意义:①碳排放量巨大,分布广泛。根据郝晓地等^[1]的研究,理论上全国化粪池的标准碳排放量为 3×10^{10} kg/a, 超过整个西藏自治区碳排放量^[2-3] (6.635×10^9 kg/a) 的4倍,而且目前作为城市的重要设施之一,化粪池广泛存在于生活中的各个角落。②影响范围广。随着对碳排放重视程度的提高,取缔化粪池这一旧时代产物的呼声更加高涨,对生活污水碳排放进行研究具有十分重要的实际意义^[4]。③缺少应有的重视。现阶段对污水处理过程中碳排放的研究几乎都集中在污水厂,而对生活污水生化消解的第一场所——化粪池的碳排放研究,还存在较大的学术空白。基于此,笔者对重庆市城镇生活污水碳排放时空分布特征展开了研究。

1 研究区概况

重庆市近年来经济快速发展,城镇化水平不断提高,是全国7个碳排放权交易试点城市之一。随着“西气东输”“西电东送”“东数西算”等工程的不断推进,未来我国将形成以西部为供血底层、东部为发展表层的格局,而重庆市作为西部的唯一直辖市,也将成为这三大工程的核心城市。因此,未来重庆市必然是碳排放的重灾区、碳中和的主战场。笔者选择重庆市的21个主城都市区作为研究区,对未来西部基础建设和碳排放研究均具有一定借鉴意义,研究区概况如图1所示。

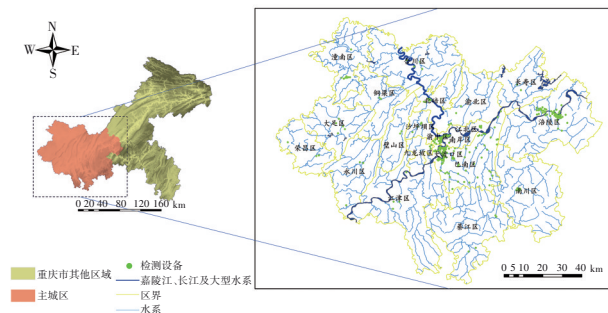


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

采用高精度红外气体传感器实地测量 CH_4 浓度,设备数量达 3 389 台,大约每 5 min 采集一次数据,共有数据约 10×10^8 条,有效降低了误差,确保了测算的准确性;人口、COD 数据来自重庆市统计局的统计年鉴、重庆市生态环境局的环境统计年报;水系、数字高程模型(DEM)等基础地理数据来自国家基础地理信息中心。

2 技术路线和研究方法

2.1 技术路线

首先,采用 SPSS 描述性统计法和分箱处理法对检测到的数据进行清洗,筛选出甲烷浓度为 0~10% 的数据,该区间的数据占比为 99.6%。其次,引入 Fick 扩散定律计算平均日碳排放量。最后,进行数据的汇总、统计与分析:对每个县级行政区内的设备进行分区汇总统计,计算出 2019 年—2021 年每个区生活污水“首次”生化消解反应的碳排放情况;采用反距离权重(IDW)分析方法,探究碳排放空间分布特征;采用 MATLAB 的小波分析技术,探究在时间尺度上的碳排放规律。

2.2 主要研究方法

2.2.1 碳排放量的测定方法

化粪池中甲烷的采样和检测如图 2 所示。

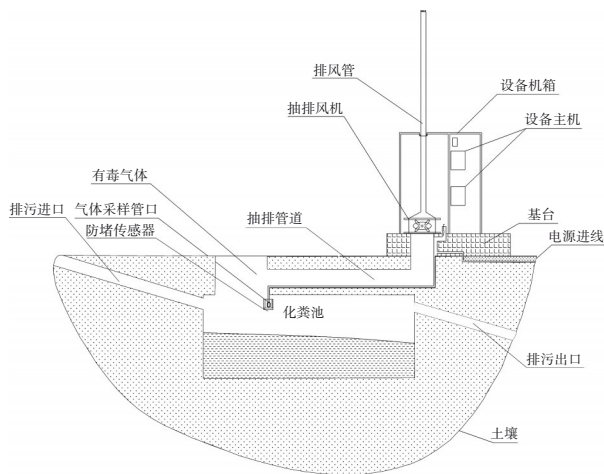


图2 甲烷采样检测示意

Fig.2 Schematics of methane sampling and detection

利用风机从化粪池检查井中抽取化粪池中的气体到设备主机(内含甲烷气体红外传感器)进行检测。气体采样口设置在检查井底部,为了防止水位过高而导致堵塞,气体采样管口旁安装防堵传感器。除甲烷气体外,设备还对化粪池中 H_2S 气体和

温度进行检测,若有毒气体浓度过高,可以使用风机通过抽排管道将其排出。

2.2.2 碳排放量的计算方法

CH_4 气体的摩尔质量为 16 g/mol,远低于空气的摩尔质量,因此,化粪池中产生的 CH_4 分为两部分,绝大部分会逸散到管道中,剩余部分残留在化粪池内部,如下式所示:

$$M_{\text{CH}_4} = M_{\text{Fick}} + M_{\text{Inter}} \quad (1)$$

式中: M_{CH_4} 为生化消解反应产生的 CH_4 总质量, kg; M_{Fick} 为逸散出去的 CH_4 质量, kg; M_{Inter} 为残留在化粪池内部的 CH_4 质量, kg。

① 扩散的甲烷测算方法

逸散到化粪池外部的 CH_4 质量通过 Fick 扩散定律进行测算, Fick 定律是在不依靠宏观的混合作用发生传质现象时,描述分子扩散过程中传质通量与浓度梯度之间关系的定律^[5-8]。化粪池中 CH_4 外部空间的浓度始终处于极低值,无限接近于 0。因此,扩散的浓度差始终等于化粪池内部的 CH_4 浓度,即浓度梯度为 t 时刻的 CH_4 浓度。扩散通量的计算如下式所示:

$$J = -D \frac{dC}{dx} = -D \cdot \alpha f(t) \quad (2)$$

式中: J 为扩散通量, $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; D 为扩散系数,取 $0.219 \text{ cm}^2/\text{s}$ ^[9]; $\frac{dC}{dx}$ 为 x 方向上的浓度梯度;负号表示扩散方向始终与浓度梯度方向相反; $\alpha f(t)$ 为 CH_4 在 t 时刻的瞬时浓度梯度。由于传感器检测的 CH_4 浓度是 CH_4 在化粪池中的体积分数,需要将体积分数转化为 Fick 扩散定律支持的体积浓度,其转化系数 α 取 $0.000\,007\,142\,857 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

根据扩散通量,计算出在一定时间内通过扩散面的 CH_4 质量,如下式所示:

$$M_{\text{Fick}} = S \cdot t \cdot J = -\alpha D S \int_0^t f(t) dt \quad (3)$$

式中: S 为扩散界面的面积, cm^2 ; t 为扩散时间, s。

化粪池的扩散面一共分为两部分,分别是化粪池的进水口和出水口,这里取目前市面上通用的化粪池的管道直径大小,进水口为 200 mm,出水口为 300 mm。

② 内部甲烷测算方法

通常情况下,化粪池的体积由其服务的人数决

定,人均化粪池的有效容积为108.67 L。本研究统计了整个主城区各区域的化粪池数量和区域人数,以计算化粪池的平均服务人数。部分区域(大渡口区、江北区、南岸区、南川区、潼南区和渝北区)因为实地条件的限制,仅对部分街道(乡、镇)进行统计,未完全统计的区域,以现有的部分街道(乡、镇)数据为样本计算平均服务人数,得出化粪池平均有效容积。

化粪池内部甲烷的质量通过甲烷浓度和化粪池体积计算得出,如下式所示:

$$M_{\text{Inter}} = C_{\text{CH}_4} \cdot M_{\text{mol}_{\text{CH}_4}} \cdot \frac{V_{\text{CH}_4}}{V_{\text{mol}_{\text{CH}_4}}} \quad (4)$$

式中: $M_{\text{mol}_{\text{CH}_4}}$ 为 CH_4 的标准摩尔质量,取16 g/mol; $V_{\text{mol}_{\text{CH}_4}}$ 为 CH_4 的标准摩尔体积,取22.4 L/mol; V_{CH_4} 为化粪池的体积,L; C_{CH_4} 为产生的 CH_4 的体积分数。

由式(1)~(4)可计算得到化粪池产生的甲烷总质量 M_{CH_4} ,如下式所示:

$$M_{\text{CH}_4} = -\alpha DS \int_0^t f(t) dt + C_{\text{CH}_4} \cdot M_{\text{mol}_{\text{CH}_4}} \cdot \frac{V_{\text{CH}_4}}{V_{\text{mol}_{\text{CH}_4}}} \quad (5)$$

根据《IPCC 国家温室气体清单指南》, CH_4 作为贡献率第二的人为温室气体,其全球变暖潜力(GWP)至少是 CO_2 的25倍,如下式所示:

$$E = M_{\text{CH}_4} \cdot \text{GWP}_{\text{CH}_4} \quad (6)$$

式中: E 为产生的标准 CO_2 排放当量,kg; GWP_{CH_4} 为IPCC规定的 CH_4 的GWP值,取25。

2.2.3 IDW 插值分析

IDW 插值法是基于相近相似的原理,即两个物体离得越近,它们的性质就越相似^[10]。测算出每个化粪池产生的碳排放量后,采用ArcGIS软件进行IDW插值,实现离散数据的连续化,预测每个位置的碳排放量,得出2019年—2021年碳排放分布情况。

2.2.4 小波分析

小波分析是一种时间序列分析方法,由傅里叶变换发展而来,与傅里叶变换相比,在分析非平稳时间序列方面优势明显,因此成为当前分析时间序列的有效工具,是一种研究对象发展周期性规律的高效方法^[11-14],利用MATLAB小波分析方法,可得出2019年—2021年生活污水“首次”生化消解反应碳排放的时间序列特征。

3 结果与分析

3.1 分区统计与分析

研究结果如图3所示。2019年—2021年重庆市主城区生活污水碳排放量(以 CO_2 当量计)分别为 4.443×10^8 、 4.554×10^8 和 2.730×10^8 kg,其中各个区县均有超过99%的甲烷从化粪池逸散到外部空间。化粪池作为旧时代的产物已经存在了一百多年,其污水处理能力有限且存在较大的安全隐患,取消化粪池的呼声早已存在。广州、上海等地已出台政策明确要求在新建、改建、扩建建筑物中取消化粪池,但在经济条件的制约下,全国大多数城市在取消化粪池的态度上有所保留^[1]。在碳排放的视角下,城市建设过程中结合碳减排的思路,为取消化粪池提供了新动力。在众多温室气体中,甲烷无疑是特殊的一种,其同样是一种天然的能源气体,具有很高的回收价值。同时,现阶段在污水处理过程中产生的甲烷气体的捕捉、回收和利用方面的相关研究取得了很多成果^[15-16],但这些均无法在小小的化粪池中实现。因此,取消化粪池、新建污水处理厂,充分挖掘污水处理过程的各种价值会是未来的研究热点。

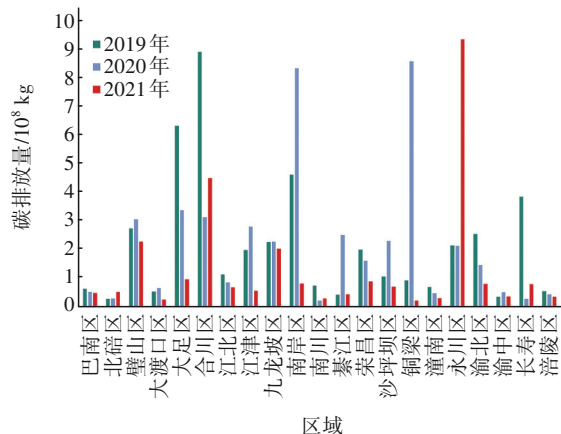


图3 2019年—2021年重庆市主城区碳排放情况

Fig.3 Carbon emissions in main urban area of Chongqing City from 2019 to 2021

3.2 空间分布特征

2019年—2021年重庆市主城区碳排放空间分布情况如图4所示。可知,2019年和2020年重庆市主城区生活污水“首次”生化消解反应的碳排放主要集中在西部、南部以及主城区中心地带嘉陵江和长江交界处,东部和北部的碳排放量较小。在2021年,西部和中部仍然是高碳排放区域,无明显的低

碳排放聚集区域,中碳排放区域明显增加,碳排放的空间差异正在减小。

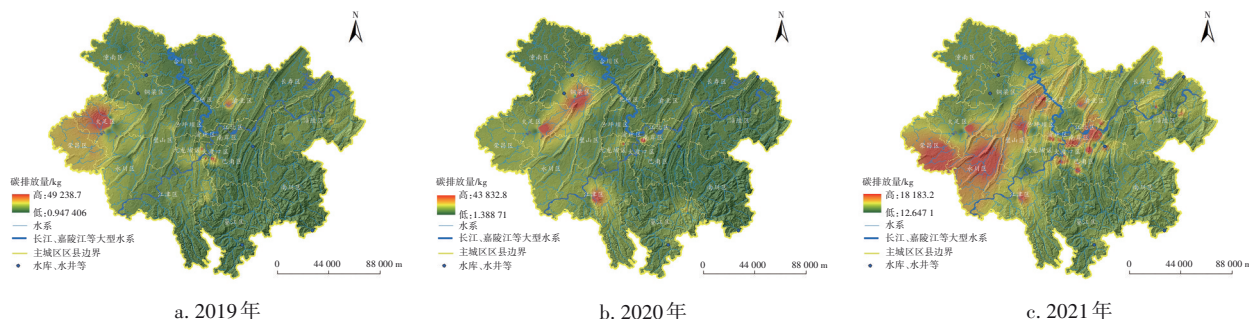


图4 2019年—2021年重庆市主城区碳排放空间分布情况

Fig.4 Spatial distribution of carbon emissions in main urban area of Chongqing City from 2019 to 2021

3.3 时间演化规律

分别统计2019年—2021年整个主城区的周平均碳排放量,并对其进行小波转换,同时,为研究季节对碳排放量的影响,将第10~23周(3月—5月)、第24~37周(6月—8月)、第38~49周(9月—11月)、第50周~次年第9周(12月—次年2月)分别划分为

春季、夏季、秋季和冬季,结果见图5。在小波分析等值线图中,小波系数越大代表浓度越高,反之越低,0代表突变点^[17](也称振荡周期)。由小波分析方差图可知,2019年—2021年第一主周期均可取为43周左右。在这个周期尺度下,均有4个振荡周期,分别第8周、第20周、第32周和第48周左右。

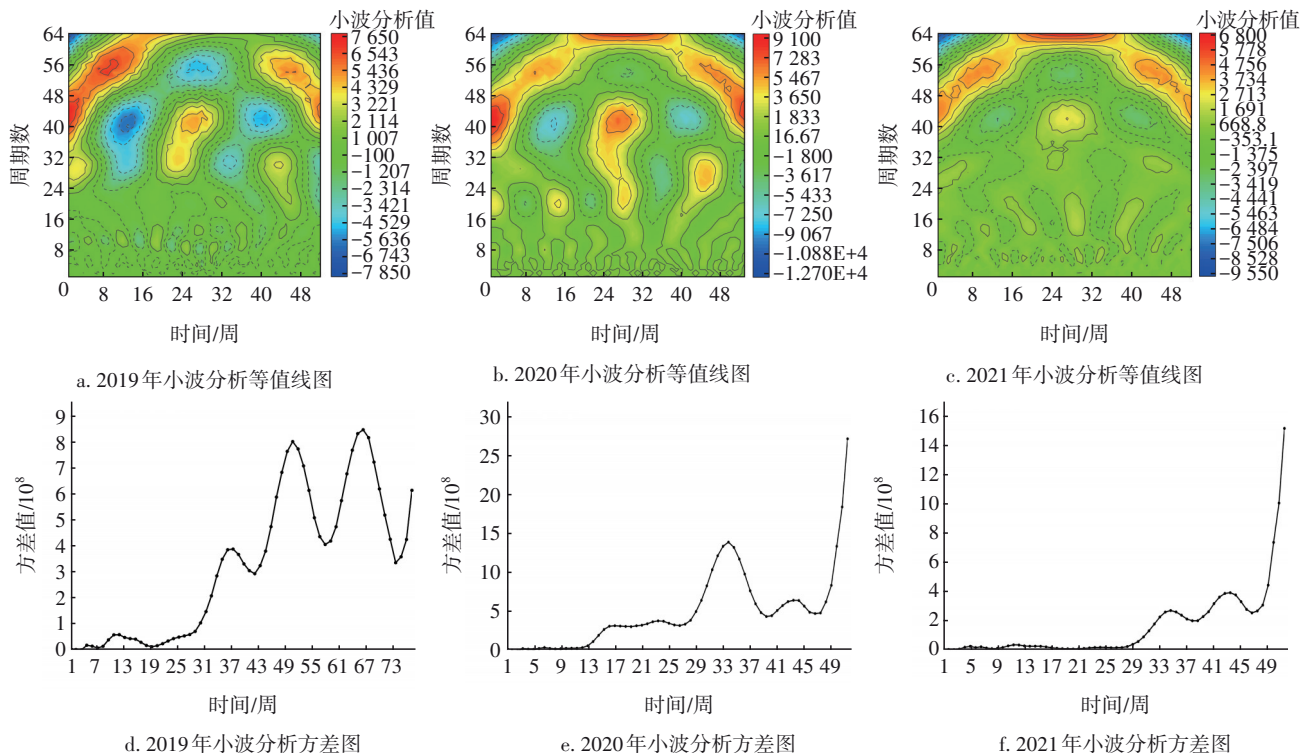


图5 2019年—2021年小波分析结果

Fig.5 Results of wavelet analysis from 2019 to 2021

在43周的时间尺度下,2019年—2021年重庆市生活污水“首次”生化消解反应碳排放的主周期和振荡周期均极为接近,其时间序列特征具有极大的相似性。说明在一年的时间尺度下,碳排放量整体随冬、春、夏、秋的季节变化呈现出“高-低-高-

低”的分布态势,这一分布特征与辽宁省龙凤山以及北京市的甲烷浓度时间变化特征高度相似^[18]。这与化粪池位于地下特殊的地理条件有关,充足的、流动的污水和COD形成了冬暖夏凉的环境^[19],成为了极端天气情况下产甲烷菌等微生物滋生的

温床;同时,根据黄建洪^[20]的研究,夏季是生活污水中COD和H₂S气体浓度最高的季节,这些都是可能导致化粪池碳排放增长的关键因素。

4 结论

① 2019年—2021年重庆市主城区生活污水碳排放量分别约为 4.443×10^8 、 4.554×10^8 和 2.730×10^8 kg,其中各个区县均有超过99%的甲烷会由化粪池逸散到外部空间。

② 未来实现化粪池的取缔与城市碳减排工作的有机结合、新建污水处理厂,充分挖掘城镇生活污水及其生化消解反应产生的甲烷气体的各种价值必然是大势所趋,也为未来逐步取消化粪池提供了新思路和新动力。

③ 2019年—2021年重庆市主城区生活污水“首次”生化消解反应碳排放的高碳排放区域均分布在主城区西部、南部以及主城区中心地带,低碳排放区域减小,中碳排放区域增加,碳排放空间分布差异减小。

④ 气候对重庆市主城区生活污水“首次”生化消解反应的碳排放有着显著影响,2019年—2021年,碳排放随冬、春、夏、秋的季节变化呈现出“高—低—高—低”的分布态势。

参考文献:

- [1] 郝晓地,杨文字,林甲.不可小觑的化粪池甲烷碳排放量[J].中国给水排水,2017,33(10):28-33.
HAO Xiaodi, YANG Wenyu, LIN Jia. Non negligible carbon emission with methane from septic tanks [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(10): 28-33 (in Chinese).
- [2] LI M, LIU H, GENG G, *et al.* Corrigendum to anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. National Science Review, 2018, 5(4): 603.
- [3] ZHENG B, TONG D, LI M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2018, 18(19): 14095-14111.
- [4] 陆少鸣,尹宇鹏,张忠东,等.广州市旧城区取消化粪池的可行性研究[J].环境科学与技术,2007,30(10):53-57.
LU Shaoming, YIN Yupeng, ZHANG Zhongdong, *et al.* Feasibility study: abandonment of septic tank in Guangzhou's old district [J]. Environmental Science &

Technology, 2007, 30(10): 53-57 (in Chinese).

- [5] 丁锐,桂泰江,蒋建明,等.应用拉普拉斯变换和留数法求解常见非稳态扩散情况下的菲克定律[J].数学的实践与认识,2017,47(1):271-279.
DING Rui, GUI Taijiang, JIANG Jianming, *et al.* Solution of Fick's second law in the case of common diffusion [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(1): 271-279 (in Chinese).
- [6] 段正祥,余际星,吴昶,等.利用菲克扩散定律计算脱碳层厚度[J].锻压装备与制造技术,2008(4):73-75.
DUAN Zhengxiang, YU Jixing, WU Chang, *et al.* Thickness of decarburized layer can be calculated by Fick's law of diffusion [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2008(4): 73-75 (in Chinese).
- [7] 何龙庆,林继成,石冰.菲克定律与扩散的热力学理论[J].安庆师范学院学报(自然科学版),2006,12(4):38-39.
HE Longqing, LIN Jicheng, SHI Bing. Fick law and the diffusion's thermodynamics theory [J]. Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition), 2006, 12(4): 38-39 (in Chinese).
- [8] 林亚平,卢维伦.非溶蚀型药物体系的释放动力学新模型——Fick第一扩散定律的修正及其应用[J].药学报,1997(11):869-874.
LIN Yaping, LU Weilun. A new dynamic model of release for not-corroded drug system revision and use of Fick's first law [J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 1997(11): 869-874 (in Chinese).
- [9] VELLA J R. Fick diffusion coefficients of the gaseous CH₄-CO₂ system from molecular dynamics simulations using TraPPE force fields at 101.325, 506.625, 1 013.25, 2 533.12, and 5 066.25 kPa [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2019, 64(9): 3672-3681.
- [10] 白杨,杨剑,陈鹏,等.基于空间插值的西安市重空气污染期间主要污染物时空变化特征及相关性分析[J].环境科学研究,2020,33(4):809-819.
BAI Yang, YANG Jian, CHEN Peng, *et al.* Spatiotemporal characteristics and relationships of the main air-pollutants during a typical heavy air pollution in Xi'an City based on a spatial interpolation method [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(4): 809-819 (in Chinese).
- [11] ADAMOWSKI J, ADAMOWSKI K, PROKOPH A.

- Quantifying the spatial temporal variability of annual streamflow and meteorological changes in eastern Ontario and southwestern Quebec using wavelet analysis and GIS[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 499: 27–40.
- [12] GUO T, ZHANG T, LIM E, *et al.* A review of wavelet analysis and its applications: challenges and opportunities [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 58869–58903.
- [13] 蔡富, 孙付平, 戴海亮, 等. 小波和傅里叶变换在坐标时间序列分析中的应用[J]. *全球定位系统*, 2019, 44(4): 40–46.
- CAI Fu, SUN Fuping, DAI Hailiang, *et al.* Application of wavelet and Fourier transform in time series analysis [J]. *GNSS World of China*, 2019, 44(4): 40–46 (in Chinese).
- [14] 孙春媛, 李令军, 赵文吉, 等. 基于小波变换的北京市PM_{2.5}时空分布特征及成因分析[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1343–1350.
- SUN Chunyuan, LI Lingjun, ZHAO Wenji, *et al.* Temporal and spatial characteristic and factors analysis of PM_{2.5} on the basis of wavelet transformation in Beijing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1343–1350 (in Chinese).
- [15] 蒋彬, 刘中亚, 陈垚, 等. 碳中和视角下污水处理现状与展望[J]. *工业水处理*, 2022, 42(6): 51–58.
- JIANG Bin, LIU Zhongya, CHEN Yao, *et al.* Current situation and prospect of wastewater treatment under the perspective of carbon neutralization [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(6): 51–58 (in Chinese).
- [16] 唐娇娇, 谢军祥, 陈重军, 等. 城镇污水处理厂碳中和技术及案例[J]. *化工进展*, 2022, 41(5): 2662–2671.
- TANG Jiaojiao, XIE Junxiang, CHEN Chongjun, *et al.* Carbon neutral technologies and case studies in urban sewage treatment plants [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(5): 2662–2671 (in Chinese).
- [17] 王海鹏, 张斌, 刘祖涵, 等. 基于小波变换的兰州市近十年空气污染指数变化[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(5): 1070–1076.
- WANG Haipeng, ZHANG Bin, LIU Zuhan, *et al.* Wavelet analysis of air pollution index changes in Lanzhou during the last decade [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(5): 1070–1076 (in Chinese).
- [18] 杨倩, 官莉, 陶法, 等. 中国5个大气本底站观测的CH₄浓度变化规律[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(6): 1–7.
- YANG Qian, GUAN Li, TAO Fa, *et al.* Changes of CH₄ concentrations obtained by ground-based observations at five atmospheric background stations in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(6): 1–7 (in Chinese).
- [19] 郝晓地, 方晓敏, 李季, 等. 污水碳中和运行潜能分析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(10): 11–16.
- HAO Xiaodi, FANG Xiaomin, LI Ji, *et al.* Analysis of potential in carbon-neutral operation of WWTPs [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(10): 11–16 (in Chinese).
- [20] 黄建洪. 城市生活排水系统废气产排污系数核算研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- HUANG Jianhong. Study on Production Emission Calculation of Exhaust Gas Emission from Sewer System [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013 (in Chinese).

作者简介:汪宙峰(1983–),男,安徽东至人,博士,副教授,正高级工程师,主要从事地理空间人工智能、智慧城市地下管网安全监测、数字油田等方面的教学与科研工作。

E-mail:wangzf@swpu.edu.cn

收稿日期:2022–10–19

修回日期:2023–07–25

(编辑:沈靖怡)