

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.017

降雨污染影响城市河道温室气体排放特征及机制

李鹤男^{1,2}, 范波², 刘茜², 黄鹏², 孙永利²

(1. 广西海洋科学院<广西红树林研究中心> 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西
北海 536000; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 当前许多城市和地区由于排水系统不完善,管网混接错接现象严重,城市水体降雨污染问题普遍存在。基于此,考察了华北地区典型城市河道温室气体(CO₂、CH₄和N₂O)排放情况,并分析了夏季降雨污染影响水体温室气体排放的特征和机制。结果显示,夏季雨后城市河道表层底泥的氧化还原电位(ORP)下降明显,雨后河道温室气体排放通量激增,河道释放温室气体产生的全球增温潜势(GWP)是雨前的160.6倍,并伴随河道污染物的增加;河道底泥是温室气体主要产生和释放源,且河道温室气体释放量与表层底泥ORP变化密切相关。另外,氨氮、ORP、温度等环境因素与水体温室气体排放显著相关。

关键词: 降雨污染; 城市河道; 温室气体; 排放特征

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0114-05

Characteristics and Mechanisms of Rainfall-induced Pollution Influencing Greenhouse Gas Emissions from Urban River Channel

LI He-nan^{1,2}, FAN Bo², LIU Qian², HUANG Peng², SUN Yong-li²

(1. Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Academy of Marine Sciences <Guangxi Mangrove Research Center>, Beihai 536000, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: Currently, owing to the inadequate drainage system in numerous cities and regions, the issue of improperly connected pipe networks is prevalent, leading to widespread rainfall-induced pollution of urban water bodies. This study investigated the greenhouse gas (CO₂, CH₄, and N₂O) emissions from a typical urban river channel in North China and analyzed the characteristics and mechanism of summer rainfall-induced pollution affecting these emissions. After the summer rainfall, the oxidation-reduction potential (ORP) of the surface sediment in the urban river channel decreased significantly, and there was a significant increase in greenhouse gas emission flux from the river channel. The global warming potential (GWP) caused by greenhouse gas emission from the river channel was 160.6 times higher than that before the rainfall. Additionally, pollutant concentrations in the river channel also increased. The river sediment constituted the primary source of greenhouse gas production and emission, with the release of greenhouse gas from the channel being intricately linked to variation in the ORP of the surface sediment. Furthermore, environmental parameters such as ammonia nitrogen, ORP and temperature were significantly correlated

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE020800)

通信作者: 刘茜 E-mail: 18622206356@163.com

with greenhouse gas emissions from the river.

Key words: rainfall-induced pollution; urban river channel; greenhouse gas; emission characteristics

全球气候变化(或“全球变暖”)是当今严峻的环境问题之一^[1]。城市水体受人类活动影响较大,大量研究表明城市水体作为陆地生态系统的重要组成部分,是温室气体重要排放源^[2]。

由于管道沉积物污染、合流制溢流污染、降雨径流冲刷污染、混接错接及不规范排放等原因,导致城市水体纳污问题一时难以解决。排入城市水体的生产和生活污染物经过一系列的物理、化学和生物反应得到降解或去除。当排入水体的可生物降解污染物过量时,则会加速微生物对氧的消耗,使水体因供氧量不足而形成厌氧环境,并伴随温室气体大量产生和释放。研究表明^[3],城市水体中CO₂、CH₄的溶存状态均为过饱和,城市小型景观水体CO₂、CH₄排放通量远高于大部分自然水体,呈一种较强的大气温室气体排放源。沉积物是水体N₂O和CH₄的主要来源^[4]。夏季降雨导致城市水体污染,尤其是对市政排水管网污水的影响,降雨会导致中心城区河流泵站下游水体的CH₄通量大幅增加,并且河流受降雨污染的程度与河流碳排放紧密相关。然而目前对底泥、水、气介质中温室气体产生及释放的整体机制还不清楚。因此,分析夏季降雨污染对温室气体排放的影响有助于更准确掌握城市水体的碳排规律,可为城市水体碳减排工作提供一定的理论基础和技术支持。

笔者针对降雨污染导致环境条件变化情况下底泥污染释放的影响机制、释放量及控制措施尚不明确的问题,探讨环境变量与底泥污染释放的关系和机制,明确影响底泥温室气体产生和排放的环境要素,旨在为城市水体温室气体减排及环境污染控制相关技术策略的研发提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验选址

研究区域属于天津市城市化较早的区域之一,城市建设导致该区域人口密集,河道沿岸全长20 km,管网情况复杂,夏季降雨经常会导致河道水体出现不同程度的水质恶化。本研究的采样监测点位于河道中游。

1.2 温室气体采集及检测方法

采用静态箱法测定水-气界面CO₂、CH₄和N₂O的通量。首先测定一段时间内,箱中CO₂、CH₄和N₂O气体浓度的变化,然后按照式(1)^[5]计算CO₂、CH₄和N₂O的通量(正值表示排放,负值表示吸收)。

$$F = \frac{(c_2 - c_1) \cdot h}{\Delta t \cdot V_m} \quad (1)$$

式中: F 为气体通量,mg/(m²·h); c_1 、 c_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻的气体浓度; Δt 为 t_2-t_1 时间间隔; h 为箱体高度,取0.4 m; V_m 为气体摩尔体积,取22.4 L/mol。

样品采集后暂存于4℃冰箱中,并于1~2周内完成检测。气体测定方法:使用注射器通过安装在腔室上的采样口收集25 mL气体样品,然后立即注入12 mL预真空的Labco Exetainer。用配备火焰电离检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD)的气相色谱对气体进行测量^[6],根据质量平衡和亨利定律计算液相中溶解气体的初始浓度。水体中溶存CO₂、CH₄和N₂O浓度的测定方法:使用连接在塑料注射器上的皮下针头,将5 mL过滤后的水样注入预抽真空的BD真空中。这些管子在振动筛中混合过夜,以使气相和液相达到平衡。在此过程中,大部分气体(25℃时约为97%)转移到气相。用气相色谱测量管中气体浓度,利用亨利定律计算初始液相(反应器)中CO₂、CH₄和N₂O的浓度^[7]。

1.3 检测项目及方法

使用多参数水质分析仪测定表层水体温度、氧化还原电位(ORP)和DO理化参数。按照《水和废水监测分析方法》(第4版)测定COD、TN、NH₄⁺-N、TP等指标。使用模拟量采集模块(阿尔泰DAM-3055N)采集表层底泥的ORP数据。将氯化银参比电极和铂片电极置于表层底泥,间隔不小于10 cm,氯化银参比电极与铂片电极之间电位差采集时间间隔为10 min,数据自动记录保存。

2 结果与讨论

2.1 夏季降雨污染对城市水体的影响

2.1.1 降雨污染对水质的影响

夏季是城市河道黑臭最明显的季节,通过现场

踏勘发现,夏季炎热天气发生降雨后,城市河道往往发生严重污染,主要表现为散发刺激性臭味、伴随固体物和漂浮物出现、水生动植物大量死亡并漂浮于水体表面等。雨后检测发现,DO和ORP均下降,TN、TP、COD、 NH_4^+-N 等污染物浓度明显上升。

2022年6月14日—7月23日对城市河道水质进行了连续监测,分析了水体ORP和温度等变化情况,结果如图1所示。夏季水体水质会伴随降雨发生恶化,ORP也会伴随降雨开始下降。当水体温度为24~25℃时,水体ORP维持在110~150 mV,水质较好。进入7月份后,水体温度逐渐升高,表层水体温度高于28℃,平均水温超过29℃。降雨过后,水体温度维持在25℃以上,并在24 h内升温至28℃以上,可见夏季水体温度较高。发生降雨后水体ORP快速下降,由降雨前120~150 mV下降至-300~-100 mV,且需要36~48 h才能恢复至降雨前水平。可见,对于城市河道来说,夏季降雨污染是导致水体水质快速恶化的主要原因。

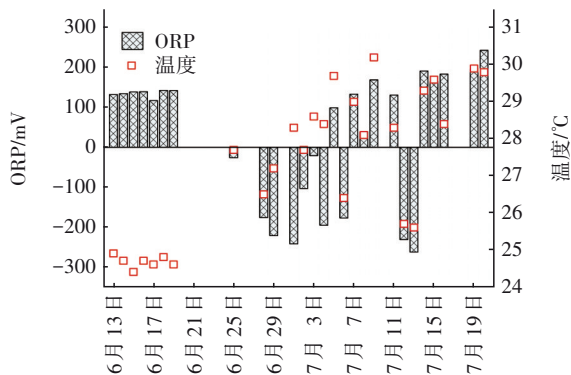


图1 水体ORP和温度的变化

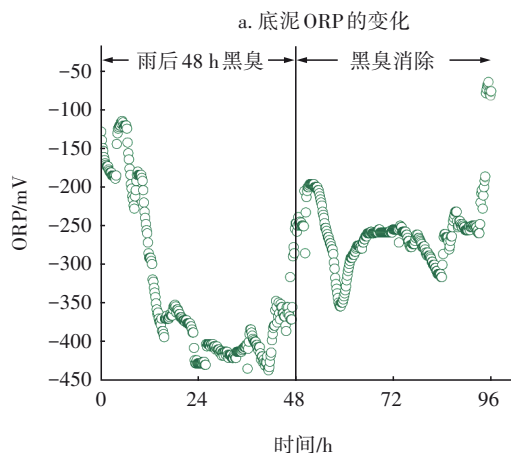
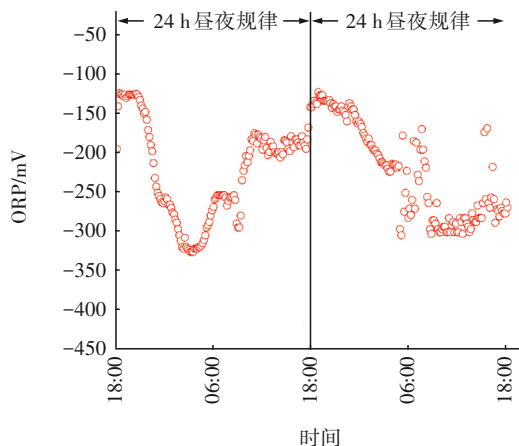
Fig.1 Change in ORP and temperature of water

6月中下旬水体温度基本在24~25℃,水体DO维持在2~4 mg/L,水质较好。进入7月后,温度逐渐升高,发生降雨后水体DO快速下降,由降雨前的2~4 mg/L下降至0.1~1 mg/L,且需要36~48 h才能恢复至降雨前水平。可见,对于城市河道来说,夏季降雨污染是导致水体水质快速恶化、DO快速下降的主要原因。

2.1.2 降雨污染对底泥氧化还原特性的影响

基于内陆水体中的温室气体主要由分布于水层底部的厌氧区或沉积层内的微生物介导产生,对表层底泥ORP进行了监测,以探寻底泥氧化还原特征变化与温室气体产生之间的规律,结果如图2所示。

从图2(a)可以看出,表层底泥ORP具有明显的昼夜变化规律。每日05:30—17:30,ORP基本上呈现逐渐上升的趋势,提升幅度较大;每日17:30—次日05:30,ORP逐渐下降。可见,ORP主要表现为白天上升、夜晚下降。城市河道ORP的昼夜变化规律可能与光照、温度等环境条件密切相关,水体中水生植物光合和呼吸作用的昼夜转换以及其他水生动物、微生物和藻类的生理生化活动等均会影响水体的ORP^[4]。



b. 雨后底泥ORP的变化

图2 表层底泥ORP的变化

Fig.2 Change in ORP in surface sediment

结合典型降雨对表层底泥ORP进行了监测,数据间隔为10 min。选取降雨强度为中雨、降雨时长为6~12 h的典型降雨进行表层底泥ORP监测,结果如图2(b)所示。降雨末期或降雨刚刚结束时开始记录表层底泥ORP,发现伴随降雨污染,表层底泥ORP具有明显的变化规律。降雨末期或降雨刚刚结束时的表层底泥ORP开始下降,从-150~-100 mV下降至-450~-400 mV,ORP下降过程持续24~36 h,

之后,ORP开始逐渐上升。可见,伴随降雨污染的发生,ORP开始下降,雨后36 h后开始上升,表层底泥ORP受降雨影响明显。

降雨污染会导致水体和表层底泥的ORP出现明显下降,同时伴随水体透明度下降,以及TN、TP、COD和NH₄⁺-N等污染物浓度明显上升。降雨污染发生后,因水体中的还原性污染物质超过环境自净能力或溶解氧等氧化性物质的含量而不能满足水生生物新陈代谢所需时,水体呈现还原性环境,可加速水体微生物对氧的消耗,使水体因供氧量不足而趋于厌氧状态,这是城市降雨污染导致水体环境恶化甚至黑臭的主要原因。

2.2 降雨污染对温室气体产生和释放的影响

2.2.1 降雨污染对温室气体水体溶存的影响

对夏季晴天和雨后黑臭水体中温室气体溶存情况进行分析,结果表明,降雨前CO₂、CH₄和N₂O在水中的溶存浓度分别为5.3、0.2和0.004 mg/L,雨后水中CO₂、CH₄和N₂O的溶存浓度分别为17.7、0.24和0.005 mg/L。雨后水体中CO₂、CH₄和N₂O的溶存浓度分别为降雨前的3.3、1.2和1.1倍,在雨后黑臭水体中3种气体的溶存浓度均较雨前出现明显增加。

2.2.2 降雨污染对温室气体释放的影响

分析晴天和雨后24 h温室气体的释放情况,结果发现,夏季晴好天气时河道CO₂、CH₄和N₂O的排放通量分别为37.4、8.4和0.04 mg/(m²·h),其中CO₂的排放通量最高,分别为CH₄和N₂O的4.45和935倍。降雨后收集到的气体中CO₂、CH₄和N₂O的浓度分别为14 318、383 724和51 cm³/m³,分别为晴天浓度的4.3、183和13倍;降雨后河道单位面积的CO₂、CH₄和N₂O排放通量分别为166.4、1 617和0.54 mg/(m²·h),分别为晴天的4.4、192.5和13.5倍,降雨污染会导致水体温室气体释放浓度和释放量明显增加。降雨前河道温室气体排放量和排放浓度依次为CO₂>CH₄>N₂O,降雨后温室气体排放量和排放浓度依次为CH₄>CO₂>N₂O,可见降雨污染会导致CH₄释放量急剧增加,进而加剧温室效应。雨后CH₄的产生量分别为CO₂和N₂O的9.7和2 994倍,无论是气体浓度还是产生量,CH₄都远高于CO₂和N₂O。

在100年尺度上,CH₄和N₂O的全球增温潜势(GWP,以CO₂计)分别为CO₂的28和265倍。晴天

CO₂、CH₄和N₂O的GWP分别为327.6、2 066.4和92.75 g/(m²·a),晴天CH₄的GWP分别为N₂O和CO₂的22.3和6.3倍。雨后CO₂、CH₄和N₂O的GWP分别为1 457.3、396 617.2和1 253.45 g/(m²·a),雨后CH₄的GWP分别为N₂O和CO₂的316和272倍。可见,雨后CH₄释放量和GWP的激增是导致水体温室效应上升的主要原因。

2.3 降雨污染影响温室气体释放的机制

将温室气体排放通量与水温、DO、ORP、TN、TP、COD和NH₄⁺-N进行了相关性分析,结果发现,降雨对温室气体排放的影响与水温、DO、ORP、TN、TP、COD和NH₄⁺-N等环境因子具有显著的相关关系,见表1。

表1 夏季降雨前后温室气体排放通量与环境因子的相关性

Tab.1 Correlation of greenhouse gas emission flux and environmental factors before and after rainfall in summer

项 目		N ₂ O通量	CO ₂ 通量	CH ₄ 通量
水温	雨前	-0.518	-0.136	-0.263
	雨后	0.999*	0.999*	0.986
DO	雨前	-0.915	-0.989*	-0.993**
	雨后	-0.553	-0.487	-0.372
ORP	雨前	-0.975*	-0.960*	-0.986*
	雨后	-0.998**	-0.996	-0.977
TN	雨前	0.965*	0.939	0.962*
	雨后	0.970	0.986	0.999*
TP	雨前	0.981*	0.859	0.919
	雨后	0.843	0.798	0.715
COD	雨前	0.859	0.899	0.935
	雨后	0.565	0.499	0.385
氨氮	雨前	0.921	0.947	0.943
	雨后	0.965	0.982	0.998*
注: *表示双尾检验在0.05水平上显著相关,**表示双尾检验在0.01水平上显著相关。				

从表1可以看出,夏季降雨前CO₂释放与DO和ORP呈显著负相关,与水体中含氮污染物含量呈正相关。夏季降雨后CO₂释放与ORP呈负相关,与水温和水体中含氮污染物含量呈正相关。夏季降雨前CH₄释放与DO和ORP呈显著负相关,与水体中含氮污染物和TP含量呈正相关。夏季降雨后CH₄释放与ORP呈负相关,与水体中含氮污染物含量呈显著正相关,与水温呈正相关。夏季降雨前N₂O释放与DO和ORP呈负相关,与水体中含氮污染物和

TP含量呈正相关。夏季降雨后 N_2O 释放与ORP呈显著负相关,与水体中含氮污染物含量呈正相关,与水温呈显著正相关。

有研究表明,水体沉积物各区域均以发酵为主,发酵过程引起颗粒污染物的水解和分解,溶解有机质的积累和较低的ORP导致了产甲烷菌和硫酸盐还原菌存在于沉积物中^[8-9],一旦环境条件适宜微生物则会产生大量温室气体。本研究中,伴随雨后水体温度的升高,温室气体释放量激增, CO_2 和 CH_4 的产生和释放过程对温度较为敏感,水体温度可能是影响沉积物产生并释放温室气体的关键因子。同时降雨污染导致短时间内大量污染物进入城市河道,增强了水体及沉积物中的物质能量供给和循环,致使温室气体产生和释放情况加剧,另一方面造成水体扰动,促使沉积物释放大量温室气体。

3 结论

夏季雨后城市河道表层底泥ORP下降明显,且雨后36 h后开始上升,夏季降雨污染是导致水体水质快速恶化的主要原因。雨后河道温室气体释放量剧增, CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的气体排放通量分别为晴天的4.4、192.5和13.5倍,其中 CH_4 的气体浓度和产生量都远高于 CO_2 和 N_2O ,是雨后温室效应的主要气体。降雨对温室气体排放的影响与水温、DO、ORP、TN、TP、COD和 NH_4^+-N 等环境因子具有显著的相关关系。

参考文献:

- [1] NAKAZAWA T. Current understanding of the global cycling of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide [J]. *Proceedings of the Japan Academy Series B:Physical & Biological Sciences*, 2020, 96(9): 394-419.
- [2] 温志丹,宋开山,赵莹,等. 长春城市水体夏秋季温室气体排放特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 102-111.
WEN Zhidan, SONG Kaishan, ZHAO Ying, *et al.* Seasonal variability of greenhouse gas emissions in the urban lakes in Changchun, China [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(1): 102-111 (in Chinese).
- [3] 黄婷,王晓峰,刘婷婷,等. 城市小型景观水体 CO_2 与 CH_4 排放特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(15): 6024-6037.
- HUANG Ting, WANG Xiaofeng, LIU Tingting, *et al.* Spatiotemporal variations and influencing factors of CO_2 and CH_4 emissions from urban small landscape waters [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15): 6024-6037 (in Chinese).
- [4] 邓焕广,刘涛,鲁长娟,等. 山东省东平湖菹草(*Potamogeton crispus*)腐烂过程中水体温室气体溶存浓度及扩散通量变化[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1484-1495.
DENG Huangang, LIU Tao, LU Changjuan, *et al.* The effect of *Potamogeton crispus* decomposition on the dissolved concentrations and fluxes of greenhouse gases in Lake Dongping, Shandong Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1484-1495 (in Chinese).
- [5] 荀凡,杜先,陈新芳,等. 秋季连续打捞蓝藻对水-气界面温室气体通量的影响[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(6): 1707-1722.
XUN Fan, DU Xian, CHEN Xinfang, *et al.* Effects of continuous cyanobacterial salvaging on greenhouse gas flux on water-air interface in autumn [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(6): 1707-1722 (in Chinese).
- [6] LIU Y W, SHARMA K R, MURTHY S, *et al.* On-line monitoring of methane in sewer air [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 6637.
- [7] GUO H X, TIAN L X, LIU S R, *et al.* The potent effects of polyoxometalates (POMs) on controlling sulfide and methane production from sewers [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 453: 139955.
- [8] SHI X, NGO H H, SANG L T, *et al.* Functional evaluation of pollutant transformation in sediment from combined sewer system [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 85-93.
- [9] BAKER B J, LAZAR C S, TESKE A P, *et al.* Genomic resolution of linkages in carbon, nitrogen, and sulfur cycling among widespread estuary sediment bacteria [J]. *Microbiome*, 2015. DOI: 10.1186/s40168-015-0077-6.

作者简介:李鹤男(1988-),女,黑龙江大庆人,博士,高级工程师,从事水环境治理及修复工作。

E-mail: 327314837@163.com

收稿日期: 2023-07-25

修回日期: 2023-10-08

(编辑:任莹莹)