

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.005

全覆盖污水处理厂 N_2O 排放实测及本地化因子测算

熊鹏宇^{1,2}, 钱晓雍², 王丽花³, 万春黎¹, 林冰洁³, 汪吉祥²,
吕燕³, 李政文², 刘翔¹

(1. 复旦大学 环境科学与工程系, 上海 200433; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘要: 准确核算氧化亚氮(N_2O)排放量是碳减排研究的重要基础。为此,选取上海市采用UNITANK工艺的某全覆盖污水处理厂为研究对象,对4个污水处理单元(进水泵房、沉砂池、调蓄池和生物反应池)的 N_2O 排放量进行了长期监测和全面评估。结果表明,污水脱氮过程是污水处理厂中 N_2O 排放的主要来源(92.94%),排放量均值为 0.13 g/m^3 ;UNITANK工艺全年不间断排放 N_2O 。在季节性尺度上,相关性分析显示, N_2O 排放量与水温、进水总氮浓度和总氮去除率相关。 N_2O 排放量在日变化上可能受到水温及进水水质的影响,其与水温及进水总氮浓度同步达到峰值。经计算,UNITANK工艺的本地化 N_2O 排放因子(EF_{N_2O})为 $0.07\%\sim 0.425\%$,显著低于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的 EF_{N_2O} 默认值(1.6%)。本地化 EF_{N_2O} 的提出,可为准确核算上海市及周边地区污水处理厂的 N_2O 排放量提供参考。

关键词: 全覆盖污水处理厂; N_2O 排放因子; 本地化; UNITANK工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0028-08

Measurement of Nitrous Oxide Emission and Localization Factor Determination in a Fully Covered Wastewater Treatment Plant

XIONG Peng-yu^{1,2}, QIAN Xiao-yong², WANG Li-hua³, WAN Chun-li¹,
LIN Bing-jie³, WANG Ji-xiang², LÜ Yan³, LI Zheng-wen², LIU Xiang¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. Shanghai Chengtou Wastewater Treatment Group Co. Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Accurate quantification of nitrous oxide (N_2O) emission is a crucial foundation for research on carbon reduction. Therefore, a fully covered wastewater treatment plant utilizing the UNITANK process in Shanghai was chosen as the study subject for conducting long-term monitoring and comprehensive assessment of N_2O emission from four treatment units (inlet pumping station, grit chamber, storage tank, and bioreactor). The nitrogen removal process accounted for 92.94% of N_2O emission in the wastewater treatment plant, with an average emission of 0.13 g/m^3 . The UNITANK process exhibited continuous N_2O emissions throughout the year. For seasonal variation, the correlation analysis revealed that N_2O emission was associated with water temperature, influent total nitrogen, and total nitrogen

基金项目: 上海市科委技术标准项目(22DZ2200100)

通信作者: 钱晓雍 E-mail: qianxy@saes.sh.cn; 刘翔 E-mail: liuxiang@fudan.edu.cn

removal rate. The diurnal variation of N_2O emission might be influenced by water temperature and influent quality, and its peak value was synchronized with water temperature and total nitrogen concentration. The localization factor (EF_{N_2O}) for the UNITANK process was calculated to range from 0.07% to 0.425%, which was significantly lower than the default EF_{N_2O} value (1.6%) proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The localization of EF_{N_2O} can provide reference for the accurate calculation of N_2O emission of wastewater treatment plants in Shanghai and surrounding areas.

Key words: fully covered wastewater treatment plant; N_2O emission factor; localization; UNITANK process

氧化亚氮(N_2O)是一种强效温室气体,其全球变暖潜力是二氧化碳(CO_2)的265倍^[1]。污水处理行业作为全球温室气体排放的一个重要来源,其 N_2O 排放总量占全球人为排放 N_2O 总量的5.6%^[2]。因此,准确核算污水处理厂的 N_2O 排放量至关重要,是进行污水处理 N_2O 减排研究的重要基础。

污水处理行业 N_2O 排放核算需要建立在大量现场实测数据的基础之上。大量实测研究表明, N_2O 排放量由于受到区域、工艺设计、运行参数和监测方法等因素的影响而表现出巨大差异^[3]。Kosonen等人利用在线监测技术对芬兰全覆盖污水处理厂展开长期监测活动,发现 N_2O 排放因子(EF_{N_2O})为1.9%,是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的 EF_{N_2O} 默认值(1.6%)的1.19倍^[4];Duan等人通过对澳大利亚污水处理厂展开短期在线监测,得到SBR工艺的 EF_{N_2O} 均值为0.89%,比IPCC提出的 EF_{N_2O} 默认值低44%^[5]。Gruber等人利用长期监测数据估算了瑞士全国14个污水处理厂的 EF_{N_2O} 值,发现其在0.1%~8%之间^[6]。显然,IPCC提出的 EF_{N_2O} 默认值若在全球范围内广泛使用,可能会导致污水处理厂估算出的 N_2O 排放总量严重偏离实际值^[6]。因此,IPCC鼓励各个国家和地区开发适合各自具体情况的核算方法。

目前,对 N_2O 的排放核算研究主要集中在敞开式污水处理厂^[6-8]。然而,近年来为了美化城市风貌,减少污水处理厂产生的臭气对周边居民造成的影响,全覆盖污水处理厂正在逐渐普及。因此,对全覆盖污水处理厂 N_2O 排放的监测和评估是匮乏的。同时,与敞开式污水处理厂相比,全覆盖污水处理厂中各处理单元均进行了密闭处理,产生的 N_2O 通过排放口集中高空排放,气体不易外泄。相对于开放式 N_2O 排放监测方法,在集中式排放口监

测得到的 N_2O 排放结果可能更加准确^[9]。因此,全覆盖式污水处理厂的 EF_{N_2O} 可能不同于开放式污水处理厂,这使得监测和评估全覆盖污水处理厂的 EF_{N_2O} 尤为重要。

笔者基于上海市采用UNITANK工艺的全覆盖污水处理厂的长期监测数据,对污水处理厂各单元的 N_2O 排放量进行全面监测与评估。通过长达10个月的离线监测活动研究 N_2O 排放重点环节的日变化和季节性变化规律,同时利用相关性分析方法解释 N_2O 排放变化背后的可能原因。最后,综合计算并提出了典型UNITANK工艺的本地化 N_2O 排放因子(EF_{N_2O}),以期为上海市及周边地区污水处理厂的 N_2O 排放核算提供参考。

1 材料和方法

1.1 污水处理厂概况

上海市某污水处理厂设计规模为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,整厂全覆盖式设计,每个处理单元均设有独立的排气口集中排放废气。主体构筑物为4座完全相同且并联运行的UNITANK一体化生物反应池,分别命名为1~4号。UNITANK工艺类似于三沟式氧化沟工艺,每座反应池由3个池子并列组成。3个池子均设有进水口与底部曝气系统,中间池处于长曝气状态,外侧两池设有出水堰和剩余污泥排放口,进水池和沉淀池功能可相互转换(转换时间为3h),从而实现持续流的方式处理污水,有效提高生物处理效率和容积利用率,节省能耗的同时高效去除污染物。在长期监测过程中,反应池基本没有额外投加碳源,水力停留时间(HRT)约为15.9h,污泥停留时间(SRT)为15~20d,曝气池DO浓度保持在5.0~7.2mg/L。污水处理厂总体工艺流程如图1所示,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准。

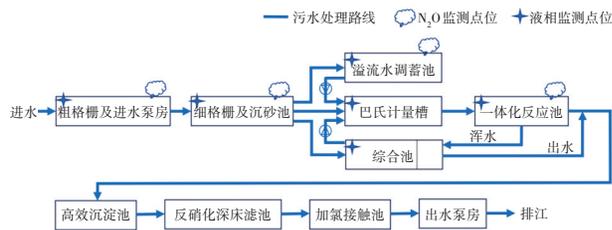


图1 污水处理厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment plant

1.2 N₂O排放监测

2022年9月—2023年6月期间,对污水厂各环节对应的排气口进行N₂O气体样品采集,每月取样1~2次,采样时间固定在10:00—16:00之间。每日间隔一定时间在反应池采样4~6次,在其他单元排放口采样2~3次,N₂O日排放结果取平均值。

本研究采用离线监测方法对排气口N₂O浓度进行测定。利用大气采样仪收集气体样品,于200 mL铝箔气袋内保存。每次采样时,将气管一端安装在仪器进气口,另一端伸入排气筒并固定在1/2筒径处。同时,为避免管路及气袋中的残留气体影响最终检测结果,每次采样前抽吸废气冲洗气袋和管路2~3次。每个点位采集平行气体样品2~3个,于实验室气相色谱仪中离线运行测定排气口N₂O浓度。在气体取样的同时,使用水质采样器采集各单元进出口水样,于实验室进行水质参数测定。另外,在UNITANK反应池中采集2个均质泥水混合液样品,用以微生物多样性分析。

1.3 N₂O排放量和EF_{N₂O}的计算

由于排气口人工测定鼓风量和设计鼓风量相近,考虑到人为测量误差,采用设计鼓风量与排气口N₂O浓度计算各单元N₂O排放量。

$$N_2O_{\text{sum}} = \sum (N_2O_{\text{日均}-i}) \quad (1)$$

$$N_2O_{\text{日均}-i} = \frac{\sum (C_{N_2O-n} \times Q_{\text{air}})_n}{n} \quad (2)$$

根据各污水处理单元的N₂O日均排放量,结合每日进水总氮负荷计算EF_{N₂O}。

$$EF_{N_2O-i} = \frac{N_2O_{\text{日均}-i} \times 28/44}{TN_{\text{in}}} \quad (3)$$

式中:N₂O_{sum}为4个污水处理单元一日之内的N₂O排放总量,kg/d;N₂O_{日均-i}为某个污水处理单元一日之内的N₂O平均排放量,kg/d;C_{N₂O-n}为某个污水处理单元排气口监测的N₂O排放浓度,kg/m³;Q_{air}为排气口设计鼓风量,m³/d;i为某个污水处理单元;

n为一日之内的采样次数,次;EF_{N₂O-i}为某个污水处理单元的日均N₂O排放因子;TN_{in}为污水处理厂日均进水总氮负荷,kg/d;28/44为单位质量N₂O转换为N₂O-N的系数。

1.4 样品处理和数据分析

N₂O浓度采用装配电子俘获检测器(ECD)的气相色谱仪(安捷伦7890B)测定。进样量为1 mL,色谱柱温度为60℃,检测器温度为300℃,载气流量为20 mL/min,平行样品浓度误差不得大于5%。水样经0.45 mm一次性无菌过滤器预处理后进行水质参数分析。COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N和TN根据《水和废水监测分析方法》测定,DO和温度采用便携式溶氧仪现场测定。将采集到的活性污泥样品通过高通量测序分析微生物群落结构,引物为338F和806R,测序方式为PE300。使用Origin 2018和R studio等软件进行数据分析。每日处理水量及污泥性能等数据均由厂方提供。

2 结果和讨论

2.1 污水处理能力概况

2022年9月—2023年6月,该污水处理厂进水COD浓度在157.0~371.0 mg/L之间,出水COD浓度较低(7.6~18.6 mg/L);进水BOD₅浓度在74.8~181.0 mg/L之间,出水BOD₅浓度在0.9~2.6 mg/L之间。BOD₅/COD>0.5,表明进水可生化性较好。进水TN和TP浓度分别在21.9~55.3 mg/L和1.3~5.0 mg/L之间,进水C/N常年较为稳定(均值为5.5)。NH₄⁺-N(13.4~43.2 mg/L)是进水中氮的主要形式,占TN的62.0%;出水中的氮主要为NO₃⁻-N(4.5~9.8 mg/L),未出现NO₂⁻-N的积累(0.1~0.9 mg/L)。COD、BOD₅、TN和TP的平均去除率分别为94.8%、99.0%、76.3%和95.3%。进水和出水SS均值分别为220.0、5.9 mg/L。4个反应池的微生物量相近,MLSS和MLVSS均值分别为4.0、2.4 g/L,MLVSS/MLSS在0.4~0.8之间,污泥沉降比(SV₃₀)和污泥容积指数(SVI)均值分别为45.5%和117.7 mL/g。以上表明,该污水处理厂对污染物的去除性能优越且相对稳定。因此,N₂O长期监测结果具有可靠性。

为了给后续N₂O排放研究提供理论依据,除定期监测污泥基本性质外,还对活性污泥进行了微生物群落分析,结果如图2所示。可以看出,在目水平上,相对丰度>1%的微生物主要包括Burkholderiales

(17.83%)、*Chitinophagales* (14.04%)、*Microtrichales* (5.98%)、*Lactobacillales* (5.09%)、*Rhizobiales* (4.24%)等。它们已被研究证明普遍存在于海洋、淡水及活性污泥中,主要功能为降解污水和污泥中的有机物^[10]。同时,在污泥中检测到大量与硝化-反硝化相关的功能菌,包括 *Nitrospiraceae* (0.72%)、*Nitrosomonadaceae* (0.59%)、*Zoogloea* (2.69%)、*Paracoccus* (0.13%)等,它们在污水脱氮过程中起着至关重要的作用^[11]。其中, *Nitrosomonadaceae* 为氨氧化菌(AOB)的优势菌,其功能是将氨氮转化为亚硝酸盐氮; *Nitrospiraceae* 为亚硝酸盐氧化菌(NOX)的优势菌,其功能是将亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮。这两种菌大量存在于好氧环境中,其相对丰度与顾晓丹等人在苏州污水处理厂改良型UNITANK反应池中检测到的相对丰度相近^[12]。

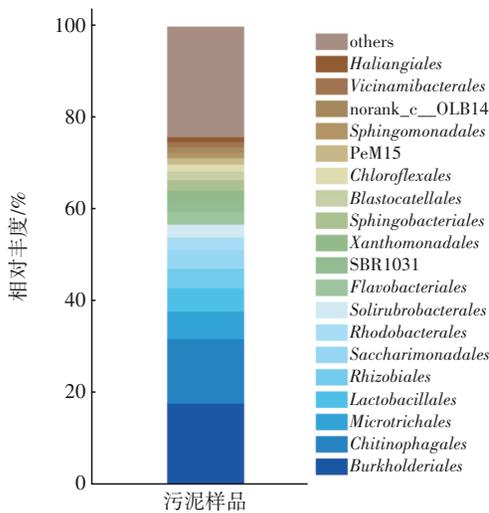


图2 污泥中目水平上的微生物相对丰度

Fig.2 Relative abundance of microorganisms in activated sludge at order level

2.2 各污水处理单元的N₂O排放量

该污水厂各处理单元的N₂O排放量如图3所示。进水泵房、沉砂池和调蓄池存在明显的N₂O排放,日均值分别为1.07、0.93和1.08 kg/d,这3个预处理单元的N₂O排放水平之间没有明显差异($p > 0.05$)。在污水运输过程中,排水管道会形成少量生物膜,污水在微生物作用下会产生少量N₂O^[13],这可能是污水预处理单元N₂O排放的主要原因。生物反应池的N₂O排放量最大,均值为40.52 kg/d(相当于0.13 g/m³),占污水厂各处理单元N₂O排放总量的92.94%。生物脱氮是N₂O排放的主要过程。与管

道中少量的生物膜相比,生物反应池作为污水脱氮的主要环节,含有大量具有硝化-反硝化功能的微生物,污水进入反应池后,其中的氮在微生物作用下会产生大量N₂O并释放^[14]。

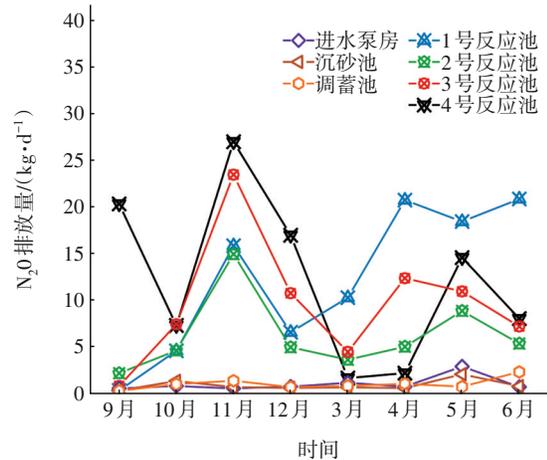


图3 2022年9月—2023年6月期间4个污水处理单元的N₂O排放量

Fig.3 N₂O emission of four wastewater treatment units from September 2022 to June 2023

图3显示,4座生物反应池的月均N₂O排放量波动较大,这与许多研究结果相似^[5]。但是差异性分析显示(如图4所示,NS.表示无显著差异),4座UNITANK反应池的N₂O排放水平并无显著差异($p > 0.05$)。这些结果表明,在相同条件下,虽然相同工艺的N₂O排放量波动较大,但是在长时间尺度上结果是一致的,说明本研究的N₂O排放长期监测结果具有可靠性。

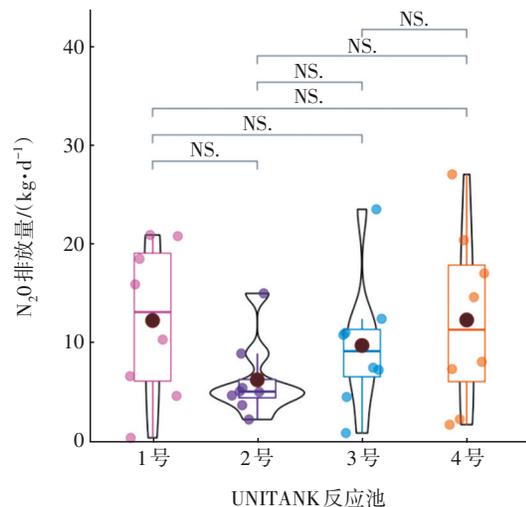


图4 4座UNITANK反应池的N₂O排放量差异性分析
Fig.4 Difference analysis of N₂O emission among four UNITANK bioreactors

2.3 反应池 N_2O 排放量日变化规律

为探究 UNITANK 工艺 N_2O 排放量日变化规律,选取 7 组 N_2O 日排放量监测数据,如图 5(a)所示。基于文献回顾和历史数据分析,选取进水 TN、 NH_4^+-N 和 $NO_2^- - N$ 浓度以及温度作为研究与 N_2O 排放量日变化相关的指标^[2,4,15]。由图 5(a)可知, N_2O 排放量在上午 10:00 左右处于较低水平,随着时间的推移, N_2O 排放量呈升高趋势,春季在 13:00 左右达到峰值,秋季在 14:00 左右达到峰值,之后缓慢降低。

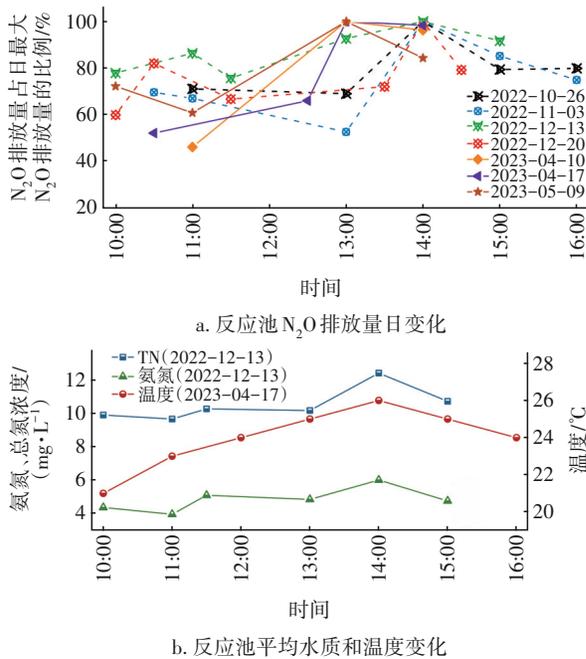


图 5 反应池 N_2O 排放量及其相关因素的日变化

Fig.5 Diurnal variation of N_2O emission and its related factors in bioreactor

图 5(b)显示,在同一时段内,温度、进水 TN 和 NH_4^+-N 浓度都表现出了与 N_2O 排放量相同的变化趋势,均在 14:00 左右存在峰值。同时,反应池中 $NO_2^- - N$ 浓度也在同一时间存在峰值。温度与 N_2O 排放量之间的相关性主要取决于 AOB 和 NOB 对温度变化的不同反应,较高的环境温度会增加 AOB 活性从而导致 N_2O 排放量升高^[2]。此外,可能由于日间生活用水量增加,污水处理厂进水 TN 和 NH_4^+-N 浓度在 13:00—14:00 达到高峰。Ahn 等人使用多元回归方法对美国 12 座污水处理厂的监测数据进行分析发现,反应池中 NH_4^+-N 浓度与 N_2O 排放量呈正相关^[16]。 N_2O 排放量可能会随着底物 NH_4^+-N 浓度的增加而增加。此外,Valkova 等人通过相关性分析发现, NH_4^+-N 浓度与 AOB 活性相关, N_2O 排放量

增加也可能是 AOB 活性增加的结果^[8]。同时,硝化过程中 $NO_2^- - N$ 的积累可能是由于 NOB 活性降低导致的。较高的 $NO_2^- - N$ 浓度可能促使 AOB 进行同步亚硝化-反硝化作用来产生更多的 N_2O ^[17]。综上所述,温度以及进水 TN、 NH_4^+-N 和 $NO_2^- - N$ 浓度等因素均会通过影响 AOB 和 NOB 活性使 N_2O 排放量产生变化。

2.4 反应池 N_2O 排放量季节性变化规律

在 2022 年 9 月—2023 年 6 月期间反应池不间断排放 N_2O 。2022 年 11 月 N_2O 排放量达到月排放量峰值,为 0.23 g/m^3 ;2023 年 4 月—6 月 N_2O 排放量处于较高水平,均值为 0.16 g/m^3 ;其余月份 N_2O 排放量较低,均值为 0.07 g/m^3 。先前研究表明,大多数活性污泥工艺的 N_2O 排放量均表现出明显的季节性变化规律: N_2O 排放量在 2 月—5 月达到峰值,剩余月份排放量非常低^[1,6,18]。然而,在本研究和 Kosonen 等人长期监测的污水处理厂中^[4], N_2O 排放量没有明显的季节性规律。

大量研究结果表明, N_2O 排放量可能与进水 C/N、DO、 $NO_2^- - N$ 浓度以及温度等因素有关^[19]。本研究通过 Pearson 系数矩阵分析了 N_2O 月均排放量与上述因素及进水 TN 之间的相关性。分析结果与 2.3 节得到的结果相似, N_2O 月均排放量与温度、进水 TN 和 TN 去除率相关。其中,温度和进水 TN 无论在日变化还是季节性变化尺度上都可能对 N_2O 排放量产生影响。稳定且高效的 TN 去除率可以为 N_2O 排放没有明显的季节性规律做出合理解释,但是由于受到温度和进水 TN 变化的影响, N_2O 月均排放量会在一定范围内产生波动。与 N_2O 日排放量的影响因素相比, $NO_2^- - N$ 仅在日变化尺度上对 N_2O 排放量产生影响。这主要是由于 UNITANK 工艺常年脱氮的运行特点,可能导致 $NO_2^- - N$ 难以在反应池中积累^[6]。相对稳定的 $NO_2^- - N$ 月均浓度对 N_2O 月均排放量影响较小。

2.5 污水处理工艺的 N_2O 排放因子

为了消除不同进水水质影响,便于比较不同研究的温室气体排放数据,本研究选取长期监测数据,将 N_2O 排放量与进水 TN 进行归一化处理[见式(3)],得到典型 UNITANK 处理工艺的 EF_{N_2O} ,结果如图 6 所示。 EF_{N_2O} 整体表现出与 N_2O 月均排放量相同的变化趋势。2022 年 11 月 14 日的 EF_{N_2O} 均值最高,为 0.425% ;2023 年 3 月 20 日的 EF_{N_2O} 均值最低,为

0.07%。监测期间EF_{N₂O}均值为0.195%。

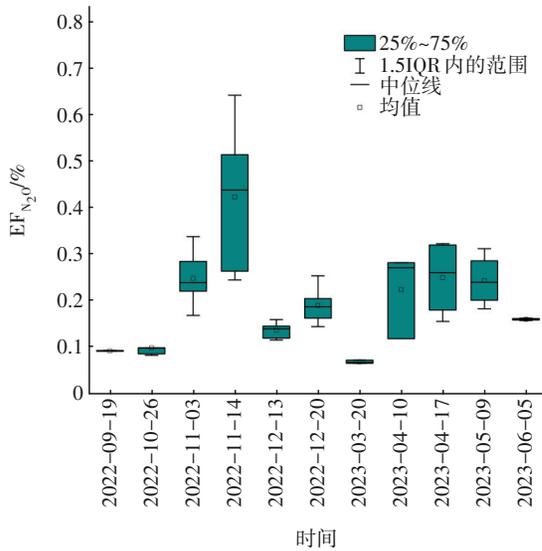


图6 2022年9月—2023年6月期间UNITANK工艺的EF_{N₂O}
Fig.6 N₂O emission factor of UNITANK process from September 2022 to June 2023

表1列出了几种典型污水处理工艺的EF_{N₂O}以及IPCC提出的污水处理厂EF_{N₂O}默认值。

表1 典型污水处理工艺的EF_{N₂O}比较

Tab.1 Comparison of N₂O emission factors in typical wastewater treatment processes %

工艺	EF _{N₂O}
IPCC默认值	1.6
本研究UNITANK	0.07~0.425
氧化沟 ^[20]	0.098~0.275
SBR ^[20]	0.89~5.60
部分硝化/厌氧氨氧化 ^[20]	0.17~5.1
A/O ^[20]	0.018~1.9
AAO ^[21]	0.05~2.51
CAS ^[21]	0.08~0.97
MBBR ^[21]	0.24~1.88
MBR ^[21]	0.32
厌氧氨氧化 ^[19]	1.1~2.8

由表1可知,本研究得到的UNITANK工艺的EF_{N₂O}明显低于当前主流的SBR工艺(0.89%~5.60%)和厌氧氨氧化工艺(1.1%~2.8%),而与当前报道的氧化沟、AAO以及A/O工艺相比,EF_{N₂O}范围均存在重叠区域,说明N₂O排放水平接近;另外,不同工艺组之间的EF_{N₂O}范围差异较大,相同工艺组之间的EF_{N₂O}波动范围较大,这可能与不同研究的处理规模、处理对象、运行条件、设计参数以及监测方法等方面的差异有关^[2]。尽管EF_{N₂O}的范围较广,

Vasilaki等人通过统计分析51个污水处理系统的监测数据发现,多数EF_{N₂O}数据实际上集中在0.01%~2%之间^[20]。

本研究中UNITANK工艺的EF_{N₂O}较低可能与DO有关。以Duan等人在澳大利亚污水处理厂(SBR工艺)得到的EF_{N₂O}[(0.89±0.05)%]为例^[5],两个污水处理厂的进水TN处于同一水平(50 mg/L),UNITANK工艺由于进水COD浓度较低导致其进水C/N(5.5)低于SBR工艺的(9.14)。有研究表明,低进水C/N会影响MLSS浓度和降低N₂O还原酶的电子竞争能力,进而导致N₂O的积累与排放^[22]。理论上UNITANK工艺的N₂O排放量应高于SBR工艺,但是高进水COD一般通过促使反应池中MLSS浓度升高来减缓N₂O的排放^[22],而在污水处理厂实际运行过程中,MLSS浓度由于人为控制始终保持在4.0 g/L,因此,进水C/N在进水TN浓度相近的条件下对N₂O排放的影响较小。同时本研究发现,UNITANK曝气区的DO浓度(5.0~7.2 mg/L)显著高于SBR工艺的DO浓度(0.5~2.8 mg/L)。低DO浓度可以改变AOB代谢和抑制N₂O还原酶活性,从而促进N₂O的排放^[23];而高DO环境非常有利于硝化菌属的生长,微生物群落分析发现UNITANK反应池中存在大量的AOB和NOB优势菌属,高DO环境和大量硝化微生物的存在可以加速硝化过程,有利于HDN(N₂O清除剂)的产生,导致N₂O的排放量较低^[24]。因此,本研究中的低EF_{N₂O}可能归因于反应池曝气区的高DO浓度。此外,本研究中UNITANK工艺的EF_{N₂O}仅为IPCC提出的EF_{N₂O}默认值的12%,采用EF_{N₂O}默认值可能会导致对本地污水处理厂的N₂O排放核算被严重高估。这一结果表明,本地化EF_{N₂O}的提出对准确核算各地区污水处理厂的N₂O排放量十分重要。同时,本研究提出的UNITANK工艺本地化EF_{N₂O}可为上海市及周边地区污水处理厂的N₂O排放核算提供理论基础。

3 结论

① 通过对全覆盖污水处理厂进行长期N₂O排放监测,统计得出低于EF_{N₂O}默认值的UNITANK工艺本地化EF_{N₂O},可为准确核算上海市及周边地区污水处理厂的N₂O排放量提供参考依据。

② 在该全覆盖式污水处理厂中,发现进水泵房、沉砂池和调蓄池单元存在稳定的N₂O排放情况

(0.93~1.08 kg/d),这可能是由城市污水运输管网中少量微生物的作用造成的;生物反应池为污水处理厂 N_2O 排放的主要单元,排放量均值为40.52 kg/d(相当于 0.13 g/m^3),占污水处理厂 N_2O 排放总量的92.94%。

③ 反应池的 N_2O 排放量存在明显的日变化规律,温度及进水 TN 、 NH_4^+-N 和 $NO_2^- -N$ 浓度等因素均通过影响AOB和NOB活性使 N_2O 排放量发生变化。同时,由于UNITANK工艺稳定且高效的脱氮性能, N_2O 排放量并没有表现出明显的季节性变化规律,但仍然受到温度和进水 TN 浓度变化的影响而在一定范围内波动。

④ 本研究中,UNITANK工艺的 EF_{N_2O} 在0.07%~0.425%之间,均值为0.195%。与大多数工艺的 EF_{N_2O} 相比,UNITANK工艺的 EF_{N_2O} 可能因受到曝气区高DO浓度的影响而处于较低水平,同时相比IPCC提出的 EF_{N_2O} 默认值降低了约88%。

参考文献:

- [1] GRUBER W, VILLEZ K, KIPF M, *et al.* N_2O emission in full-scale wastewater treatment: proposing a refined monitoring strategy [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134157.
- [2] YAO H, GAO X, GUO J, *et al.* Contribution of nitrous oxide to the carbon footprint of full-scale wastewater treatment plants and mitigation strategies—a critical review [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 314: 120295.
- [3] LEE Y J, LIN B L, LEI Z. Nitrous oxide emission mitigation from biological wastewater treatment—a review [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362: 127747.
- [4] KOSONEN H, HEINONEN M, MIKOLA A, *et al.* Nitrous oxide production at a fully covered wastewater treatment plant: results of a long-term online monitoring campaign [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50(11): 5547–5554.
- [5] DUAN H R, VAN DEN AKKER B, THWAITES J B, *et al.* Mitigating nitrous oxide emissions at a full-scale wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2020, 185: 116196.
- [6] GRUBER W, KÄNEL L V, VOGT L, *et al.* Estimation of countrywide N_2O emissions from wastewater treatment in Switzerland using long-term monitoring data [J]. *Water Research X*, 2021, 13: 100122.
- [7] MARQUES R, RODRIGUEZ-CABALLERO A, OEHMEN A, *et al.* Assessment of online monitoring strategies for measuring N_2O emissions from full-scale wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 2016, 99: 171–179.
- [8] VALKOVA T, PARRAVICINI V, SARACEVIC E, *et al.* A method to estimate the direct nitrous oxide emissions of municipal wastewater treatment plants based on the degree of nitrogen removal [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 279: 111563.
- [9] BAI M, SUTER H, LAM S K, *et al.* Comparison of slant open-path flux gradient and static closed chamber techniques to measure soil N_2O emissions [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(2): 1095–1102.
- [10] CARLES L, WULLSCHLEGER S, JOSS A, *et al.* Wastewater microorganisms impact microbial diversity and important ecological functions of stream periphyton [J]. *Water Research*, 2022, 225: 119119.
- [11] JIA L, CHENG X, FANG L, *et al.* Nitrogen removal in improved subsurface wastewater infiltration system: mechanism, microbial indicators and the limitation of phosphorus [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 335: 117456.
- [12] 顾晓丹, 黄勇, 丁永伟, 等. 改良型UNITANK工艺冬季运行特性及微生物群落分析 [J]. *环境工程学报*, 2021, 15(7): 2480–2487.
GU Xiaodan, HUANG Yong, DING Yongwei, *et al.* Winter operation characteristics and microbial community analysis of improved UNITANK process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(7): 2480–2487 (in Chinese).
- [13] 郝晓地, 杨振理, 张益宁, 等. 排水管道中 CH_4 、 H_2S 与 N_2O 的产生机制及其控制策略 [J]. *环境工程学报*, 2023, 17(1): 1–12.
HAO Xiaodi, YANG Zhenli, ZHANG Yining, *et al.* Generation mechanism and control strategy of CH_4 , H_2S and N_2O in drainage pipelines [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(1): 1–12 (in Chinese).
- [14] DUAN H, YE L, ERLER D, *et al.* Quantifying nitrous oxide production pathways in wastewater treatment systems using isotope technology—a critical review [J]. *Water Research*, 2017, 122: 96–113.
- [15] MASSARA T M, MALAMIS S, GUIASOLA A, *et al.*

- A review on nitrous oxide (N_2O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 596(1): 106–123.
- [16] AHN J H, KIM S, PARK H, *et al.* N_2O emissions from activated sludge processes, 2008–2009: results of a national monitoring survey in the United States [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(12): 4505–4511.
- [17] KIM S W, MIYAHARA M, FUSHINOBU S, *et al.* Nitrous oxide emissions from nitrifying activated sludge dependent on denitrification by ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(11): 3958–3963.
- [18] DAELMAN M R J, VAN VOORTHUIJEN E M, VAN DONGEN U G J M, *et al.* Seasonal and diurnal variability of N_2O emissions from a full-scale municipal wastewater treatment plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 1–11.
- [19] KAMPSCHREUR M J, VAN DER STAR W R L, WIELDERS H A, *et al.* Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject water treatment [J]. *Water Research*, 2008, 42(3): 812–826.
- [20] VASILAKI V, MASSARA T M, STANCHEV P, *et al.* A decade of nitrous oxide (N_2O) monitoring in full-scale wastewater treatment processes: a critical review [J]. *Water Research*, 2019, 161: 392–412.
- [21] ZHOU X, YANG F, YANG F, *et al.* Analyzing greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment plants using pollutants parameter normalizing method: a case study of Beijing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376: 134093.
- [22] ZHENG M S, ZHOU N, HE S S, *et al.* Nitrous oxide (N_2O) emissions from a pilot-scale oxidation ditch under different COD/N ratios, aeration rates and two shock-load conditions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111657.
- [23] CHEN H B, ZENG L, WANG D B, *et al.* Recent advances in nitrous oxide production and mitigation in wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2020, 184: 116168.
- [24] XIE W M, NI B J, LI W W, *et al.* Formation and quantification of soluble microbial products and N_2O production by ammonia-oxidizing bacteria (AOB)-enriched activated sludge [J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 71: 67–74.

作者简介:熊鹏宇(1999–),男,江西南昌人,硕士研究生,研究方向为污水碳排放监测技术。

E-mail:21210740098@m.fudan.edu.cn

收稿日期:2023-09-12

修回日期:2024-01-09

(编辑:刘贵春)

优化国土空间开发保护格局,
加强生态环境分区管控,
加快推进重要生态系统保护和修复重大工程