

DOI:10.13671/j.hjkxxb.2019.0087

杨庆,李洋,崔斌,等.2019.城市污水处理过程中恶臭气体释放的研究进展[J].环境科学学报,39(7):2079-2087

Yang Q, Li Y, Cui B, et al. 2019. Research advances of odor released from municipal wastewater treatment process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 39(7):2079-2087

城市污水处理过程中恶臭气体释放的研究进展

杨庆,李洋,崔斌,杨忠启,刘智斌,彭永臻*

北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室,北京 100124

摘要:长期以来,我国城市污水处理相关工作人员职业病频发,与城市污水处理过程中会释放出大量的有毒有害气体有重要关系,我国现有的《城镇污水处理厂污染物排放标准》对水质排放指标作了明确规定,但对于污水处理过程中释放的气体污染物的类型及排放限值缺少详细说明.本文对城市污水处理厂不同污水处理工艺及不同污水处理单元在运行中所释放的气体污染物的特征进行了归纳总结,阐述了城市污水处理厂释放的主要恶臭挥发性有机物的产生途径、释放量及影响因素,并指出目前城市污水处理厂释放的气体污染物主要通过尾气末端收集综合处理的方式进行治理,而对于工艺运行参数与气体污染物释放特征之间的相关性关系仍需深入研究.

关键词:城市污水处理厂;恶臭挥发性有机物;污水处理构筑物;污水处理工艺

文章编号:0253-2468(2019)07-2079-09

中图分类号:X703

文献标识码:A

Research advances of odor released from municipal wastewater treatment process

YANG Qing, LI Yang, CUI Bin, YANG Zhongqi, LIU Zhibin, PENG Yongzhen*

National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124

Abstract: A large amount of toxic and harmful gases would be released from Municipal Wastewater Treatment Plants (WWTPs) during wastewater treatment, which causes occupational diseases frequently occurring among workers who work on sewage treatment for a long time in China. Detailed wastewater discharge standards are stated in the current "Standards for Pollutant Discharge from Municipal Sewage Treatment Plants", while the available types and discharge standards for gaseous pollutants are not elaborated clearly. In this paper the characteristics of gaseous pollutants emitted from different wastewater treatment processes and units in WWTPs were summarized, the release pathways, release amount and influencing factors were also described. Furthermore, the prevalent treatment pattern for gaseous pollutants was that the exhaust gas was collected at the end of wastewater treatment first, and then it was treated comprehensively. In future study, the correlated relationships between the parameters of wastewater treatment process and the characteristics of gaseous pollutants should be studied further.

Keywords: municipal wastewater treatment plant; malodorous volatile organic compounds; wastewater treatment units; wastewater treatment process

1 引言(Introduction)

目前,随着我国城市化进程的加快,城市污水处理厂已成为我国城市化建设进程当中所必备的设施.城市污水处理厂能够净化湖泊,改善环境.伴随我国城镇污水处理规模的不断扩增,截至 2017 年 6 月底,全国城镇总计建成在运行的污水处理厂已达 4063 座,处理能力高达 $1.78 \text{ 亿 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,从业人数达到数十万,在此过程中,城市污水处理厂中一些未被重视的问题也逐渐暴露出来.城市污水处理过程中会向外界环境释放大量恶臭性气体,这些气体会

会对人们的生活环境和身体健康造成潜在的危害.目前城市污水处理厂相关工作人员职业病频发,城镇污水处理厂气体释放的相关标准缺乏,因此污水处理过程中恶臭气体的释放问题已成为一个人们亟待解决的问题.

1.1 城市污水处理厂释放气体所造成的影响

国外某研究通过 NEAT 模型,对 1990—2003 年间德国的非能源性消费产业所排放的 CO_2 量进行了估算,结果表明污水处理行业排放的 CO_2 占 CO_2 排放总量的 4% (Weiss et al., 2008). 2005 年污水处理领域所排放的温室气体占全球非 CO_2 温室气体排放

收稿日期:2018-12-19

修回日期:2019-02-21

录用日期:2019-02-21

基金项目:国家自然科学基金(No.51878011);北京市自然科学基金(No.8182012)

作者简介:杨庆(1979—),男,副教授,E-mail: yangqing@bjut.edu.cn; * 责任作者

总量的 5%, 预计到 2030 年将高达 27% (Agency, US Environment Protection, 2012). 污水处理过程中释放的温室气体一直是国内外研究的热点问题, 然而污水处理过程中释放的恶臭气体问题直到近年来才逐渐引起人们的重视.

随着当前城市化步伐的加快, 城市污水处理厂周围逐渐出现大量的新建住宅, 城市污水处理过程中会释放大量的恶臭气体使得它逐渐成为人们头痛和关注的空气污染源 (Karageorgos *et al.*, 2010). 这些恶臭气体的主要化学成分包括硫化氢和氨气等无机化合物以及成分极为复杂的恶臭挥发性有机化合物 (MVOC). 这些恶臭气体通过人们的呼吸以及饮食等途径进入人体内, 将会引发呼吸系统、消化系统、循环系统、内分泌系统和神经系统等疾病, 而且长期的恶臭刺激会导致人的感觉疲劳, 致使工作效率、判断力和记忆力降低 (唐小东等, 2011b; 王灿等, 2005). 污水中的 H_2S 可以扩散到污水表面或进入空气层并与其中的溶解氧结合, 在硫细菌作用下被氧化为硫酸, 腐蚀混凝土和铸铁, 不但降低了建筑结构的牢固性, 还影响了美观. 有文献报道高浓度的含硫以及含氮恶臭物质会抑制硝化反应的进行, 降低污水处理的脱氮效果 (罗固源等, 2001).

伴随我国污水处理规模的不断扩大, 我国污水

处理行业相关工作人员职业病的隐患也逐渐引起人们的重视. 有调查显示: 城市污水处理厂工作人员在呼吸系统疾病的患病率方面明显高于普通人群 (Olin *et al.*, 1987; Lafleur *et al.*, 1991; Smit *et al.*, 2005). 国外某调查试验结果发现污水处理厂工人患膀胱癌风险明显高于普通人群 (Nasterlack *et al.*, 2009). 国外某调查结果表明污水处理过程中释放的有害气体会对人的身心健康造成不同程度的危害. 某机构还对城市污水处理厂相关工作人员进行了随机问卷调查. 结果显示约 80% 以上的受访工人存在心理问题, 有 42.2% 的受访工人存在呼吸道粘膜刺激症状 (Abdou, 2007). 我国污水处理相关工作人员普遍患有不同程度的过敏性鼻炎等呼吸系统疾病. 国外则较早通过检测污水处理厂释放的恶臭气体来建立模型, 通过模型对恶臭与环境及健康风险的关系进行了研究 (Vega *et al.*, 2015; Alfonsín *et al.*, 2015). 而我国对于污水处理过程中释放的多种挥发性污染物和职业健康风险评估还很缺乏.

1.2 城市污水处理厂释放气体的排放标准

2003 年我国颁布并实施《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002), 该标准对硫化氢、氨和臭气浓度的厂界最高允许排放浓度作出了限值规定 (表 1).

表 1 城镇污水处理厂污染物排放标准

Table 1 Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant

序号	控制项目	单位	一级标准	二级标准	三级标准
1	氨	$mg \cdot m^{-3}$	1.0	1.5	4.0
2	硫化氢	$mg \cdot m^{-3}$	0.03	0.06	0.32
3	臭气浓度	无量纲	10	20	60
4	甲烷 (厂区最高体积浓度%)	$mg \cdot m^{-3}$	0.5	1	1

臭气浓度 (单位: 无量纲) 解释: 《空气质量恶臭的测定》(GB/T14675-93) 定义臭气浓度: 臭气浓度是根据嗅觉器官试验法对臭气气味的大小予以数量化表示的指标, 用无臭的清洁空气对臭气样品连续稀释至嗅辨员阈值时的稀释倍数叫臭气浓度.

我国在 1993 年颁布实施的《恶臭污染物排放标准》(GB14554-93) 中也仅对部分气体浓度的厂界最高允许排放浓度作出了限值规定 (表 2).

目前我国关于城镇污水处理过程中释放的气体污染物仅有以上两个文件以供参考, 随着我国污水处理行业的快速发展, 以上两个标准均存在过时、标准制定不够准确并且标准定位与当今污水处

理过程中所释放的污染物不符等问题. 由此可见我国现有的关于城市污水处理厂相关标准和评价体系相当缺乏, 因此急需对《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18198-2002) 中指定的恶臭污染物的种类和最高允许排放浓度作出相应的补充和修正. 我国城市污水处理厂绝大多数为地上式污水处理厂, 但随着我国城市化水平的提高及人们对生存环境要求的提升, 地上式污水处理厂的问题也在逐渐出现. 尤其对土地资源稀缺的大城市而言, 地上式污水处理厂不仅存在土地资源利用率低及环境噪声污染的问题, 而且还造成周边土地资源的贬值. 因此近年来, 全国各地正在逐渐兴建占地面积小, 噪

音污染小的地下式污水处理厂.截至 2016 年,我国建成在使用的地下式污水处理厂超过 10 座,在建的也有近 30 多座.地下式污水处理厂大多数为全封闭

或半封闭式,对于臭气等有害气体污染问题将更加严重.而我国目前还没有完善的关于地下式污水处理厂气体的释放标准.

表 2 恶臭污染物厂界标准

Table 2 Plant discharge standard for odor pollutants

序号	控制项目	单位	一级	二级		三级	
				新扩改建	现有	新扩改建	现有
1	氨	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.0	1.5	2.0	4.0	5.0
2	三甲胺	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.05	0.08	0.15	0.45	0.80
3	硫化氢	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.03	0.06	0.10	0.32	0.60
4	甲硫醇	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.004	0.007	0.010	0.020	0.035
5	甲硫醚	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.03	0.07	0.15	0.55	1.10
6	二甲二硫	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.03	0.06	0.13	0.42	0.71
7	二硫化碳	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	2.0	3.0	5.0	8.0	10
8	苯乙烯	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	3.0	5.0	7.0	14	19
9	臭气浓度	无量纲	10	20	30	60	70

由此可见,对于治理污水处理过程中释放的有害气体方面还有许多工作要完成.本文对典型污水处理工艺下不同构筑物中有害恶臭气体的释放量和释放特征及其影响因素进行了综述,对常见污水处理工艺中释放的恶臭挥发性有机物的产生途径、释放量、影响因素进行了总结,希望为今后污水处理过程中恶臭气体减排研究提供参考.

2 城市污水处理过程中释放恶臭气体的研究进展 (Research advances of odor released from municipal wastewater treatment process)

目前,国内城市污水处理过程中释放的恶臭有害气体对周边居民及城市环境空气质量影响较大,污水处理过程中释放臭气的影响较大,污水处理过程中释放臭气的来源、气体成分的分析及气体释放的影响因素研究则相对较少.国外则较早地开始了这方面的研究.Devai 等认为污水处理过程中恶臭气体的来源主要包括两个方面:其一是从污水中直接挥发出来的,例如源于排入下水道中的工业废水和其他废水中包含的有机溶剂、衍生物及其他挥发性的有机组分 (Devai *et al.*, 1999); 另一方面则是源自污水中的微生物菌群通过生物化学反应对有机物进行降解而产生的产物,主要与厌氧菌的活动关系密切 (De Bont *et al.*, 1981).Frechen 认为城市污水处理厂的恶臭气体主要产生于进水部分及污泥处理部分 (Frechen, 2004).随着 GC-MS 等分析手段的广泛应用,城市污水处理过程中释放的某些有害臭气的成分已经可以被确定和量化,例如:氨、含硫化合

物和部分 VOC (Mayer *et al.*, 1994; Frechen, 1994; Hamoda, 2006).然而城市污水厂中还有很多恶臭等有害气体的成分尚未确定,恶臭气体释放的影响因素还需要进一步研究.

2.1 城市污水处理过程中释放气体的组成

城市污水处理厂的设计初衷是降解污水中的污染物质,但城市污水处理过程中释放的大量有害气体违背了其设计目的.城市污水处理过程中会释放大量的有害气体,污水及污泥处理过程中气体可能的释放源如图 1 所示.从物质组成上来看,污水处理单元中释放气体主要可以分为以下 4 类:第 1 类是含硫化合物,如硫化氢、硫醇类、硫醚类和噻吩类等;第 2 类是含氮化合物,如氨、胺类、酰胺类以及吡啶类等;第 3 类是烃类化合物,如烷烃、烯烃、炔烃以及芳香烃等;第 4 类是含氧有机物,如醇、醛、酮、酚以及有机酸等.此外还会释放大量的挥发性有机化合物 (Volatile Organic Compound, 简称 VOC).目前人们普遍关注较多的气体可分为 3 类:第一类是温室气体,如 CO_2 、 CH_4 、 NO_2 ; 第二类为无机恶臭气体,如 H_2S 、 NH_3 等; 第三类为恶臭挥发性有机物 (Malodorous Volatile Organic Compound, 简称 MVOC).

2.1.1 恶臭挥发性有机物 (MVOC) 的来源、释放量及影响因素 污水处理过程中释放的恶臭有机污染物成分非常复杂,目前已知的就有 80 余种.城市污水处理过程中排放的 MVOC 主要是从原污水中直接挥发出来或是由微生物对污水中有机物的分

解而来(刘锴等,2004).MVOC 成分中除了包括非甲烷碳氢化合物以外,还有大量含硫、含氮、含氧和含卤素等元素的挥发性有机化合物,例如有机硫化物、胺类、吡啶类、醛酮类、酸、有机氯和硝基苯类等.恶臭挥发性有机污染物的成分相对于无机污染物而言要复杂许多.某研究利用 GC/MC(气相色谱-质

谱联用)检测广州市某污水处理厂的挥发性有机物.结果共检测出 80 余种 VOC 成分,其中 54 种 VOC 为 MVOC.其中主要成分包括芳香烃、卤代烃、烷烃、烯烃、好氧化合物、含硫化合物等 6 类有机物.表 3 列举了某城市污水处理厂(AB 法)不同处理单元释放的 MVOC 浓度(唐小东,2011a).

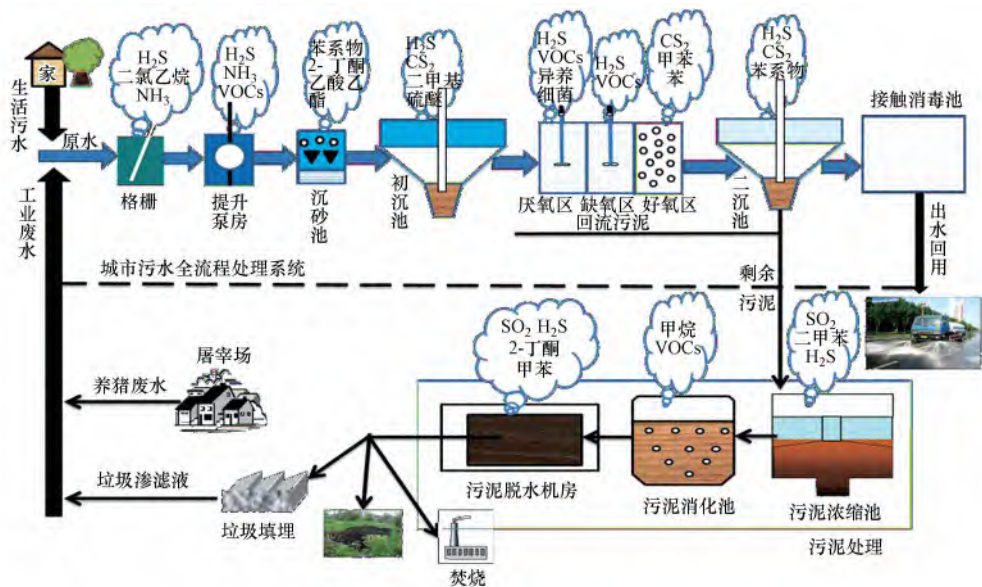


图 1 污水及污泥处理过程中气体可能的释放源

Fig.1 Wastewater and sludge treatment flows and possible gas emission sources

表 3 城市污水处理厂(AB 法)不同处理单元释放的 MVOC 的浓度

Table 3 Concentrations of MVOC released from different wastewater treatment units of WWTPs

处理工艺	处理构筑物	MVOC 浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
AB 法	沉砂池	132.36
	格栅	234.62
	A 级曝气池	314.76
	污泥浓缩池	616.06
	污泥脱水机房	905.96

由表 3 可知在污泥脱水机房中,恶臭挥发性有机物的排放量最大.其原因是有机物在生活污泥中的含量较高,污泥脱水后含水率为 75%~80%,污泥中的易挥发性有机物经过离心脱水机的剧烈搅动后进入空气中,导致污泥脱水机房 MVOC 的含量上升.污泥浓缩池一般为密闭式的,产生的污染物不易扩散,而浓缩的停留时间较长可能会造成缺氧,而污泥浓缩过程中发生的湍动也可能导致恶臭气体的逸出.在曝气池中,污水中的有机污染物通过曝气

过程释放到空气当中.格栅处产生 MVOC 的主要原因是污水在长距离的管道输送过程中,由于下水道缺氧,厌氧微生物对污水中的有机污染物进行生物降解,产生恶臭气体.由此可以归纳出在厌氧、缺氧、污水停留时间过长等条件下容易导致污水中 MVOC 的释放.

2.2 城市污水处理厂不同构筑物不同工艺下气体的释放

近年来,国内外研究人员通过气相色谱质谱法、嗅觉法、电子鼻以及微生物采样培养等方法对我国城市污水处理厂不同处理单元所释放的气体污染物进行了定性定量检测分析.有关研究结果参见表 4、表 5.

由表 4 分析得知,格栅处释放的气体当中,硫化氢的浓度最高.原因是污水在长距离管道输送过程中,由于下水道处在缺氧条件下,污水中的有机污染物在厌氧菌的生化降解作用下产生硫化氢,而格栅的栅渣若不及时清理,也会造成缺氧环境产生硫化氢.沉砂池中释放的一些气体可能是由于进水的 BOD 浓度较高,造成缺氧,会产生大量还原性恶臭

表 4 城市污水处理厂不同处理单元释放的气体

Table 4 Summary of gas released from different wastewater treatment units of WWTPs			
构筑物	气体种类	主要结论	文献
格栅	硫化氢、甲苯、乙苯、对/间二甲苯、苯乙烯、三氯甲烷、二氯乙烯、乙酸、丁酸、二氯乙烷	其中 A 厂格栅间的二氯乙烷浓度高达 $955.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.B 厂格栅间中 H_2S 最高可达 $14\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$	Lehtinen <i>et al.</i> ,2011
沉砂池	硫化氢、苯、甲苯、乙苯、四氯乙烯、间二甲苯、邻二甲苯、对二甲苯、2-丁酮	硫化氢、苯系物沉砂池中是主要的污染物.不同处理单元的各个污染物浓度;沉砂池>B 级曝气池>A 级曝气池	冯志诚,2009
初沉池	二硫化碳、硫化氢、二甲基硫醚、二甲基二硫醚	当挥发性硫化物 VOS 浓度超过本底背景浓度 ($<50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 时,二甲基硫醚是恶臭污染物的主要成分,浓度范围在 $5\sim1260\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Cheng Xianhao <i>et al.</i> ,2005
	<i>S.aureus</i> ; <i>Bacillus</i> ; <i>S. saprophyticus</i> ; <i>S. epidermidis</i> ; <i>M. agilis</i> ; <i>M. rezeus</i> <i>M. luteus</i> ; <i>M. nishinomycesis</i> 等 12 种类微型生物	预处理单元(格栅、沉砂和初沉池)周围的真菌浓度最高 $1063\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ (夏季)和 $781\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ (冬季);曝气池和二沉池周边的空气真菌浓度可达 $944\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ (夏季)和 $704\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ (冬季);污泥脱水单元真菌浓度平均小于 $625\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$	Niazi <i>et al.</i> ,2015
曝气池	硫化氢、苯、甲苯、1-4-二氯苯、乙酸、苯甲醛、二硫化碳、柠檬烯、壬醛、对二甲苯、丙酸、三甲基苯	整个污水处理单元中共检测出 30 余总挥发性有机污染物,主要污染物包括 CS_2 、甲苯.曝气池释放污染物种类最多.	Zarran <i>et al.</i> ,2014
生物反应器出口	<i>Enterobacter cloacae</i> ; <i>Kluyvera spp.</i> ; <i>Serratia ficaria</i> ,;等 10 种异养细菌以及硫化氢等气体	在生化反应器内部空气中;异养嗜热细菌平均浓度为 $2\times10^3\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$,异养嗜冷细菌平均浓度为 $4\times10^3\text{ CFU}\cdot\text{m}^{-3}$.	Korzeniewska <i>et al.</i> ,2009
二沉池	硫化氢、甲苯、二甲二硫醚、乙苯、二硫化碳、甲硫醇、间二甲苯、甲硫醚、乙酸乙酯、苯乙烯	二沉池释放的恶臭气体当中硫化氢所占比例较高	王钊等,2013
污泥处理单元(浓缩脱水)	2-丁酮、2-乙基己醇、蒽烯、乙酸、苯甲醛、二甲苯、二甲基二硫醚、硫化氢、柠檬烯、八甲基环四硅氧烷、二氧化硫、甲苯、三甲基苯	整个污水处理单元中共检测出 30 余总挥发性有机污染物,其中污泥处理单元释放污染物平均浓度最大.每个检测单元都检测出了二氧化硫.二氧化硫是该厂浓度最高的挥发性物质之一.	Zarra <i>et al.</i> ,2014

表 5 城市污水处理厂不同处理工艺下气体的释放情况

Table 5 Summary of gas released from different wastewater treatment Processes of WWTPs			
工艺	气体种类	主要结论(特征)	文献
A^2/O	主要包括烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、含硫有机物和含氧有机物等 6 类共 80 种 VOC,其中有 54 种 MVOC	各采样点均检测出芳香烃.污泥脱水机房中的 MVOC 的含量最高,浓度为 $905.96\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;VOC 总浓度变化范围为: $132.36\sim905.96\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;各处理单元排放的分子标志物为苯系物、 CS_2 、甲硫醚	唐小东,2011a
	烷烃、烯烃、芳香烃、含氧有机物和含硫有机物等 70 种 VOC.	VOC 的总浓度为 $(2053.11\pm202.34)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中 MVOC 有 30 种,浓度范围为 $0.37\sim1872.24\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;污泥脱水机房等 6 个处理单元的卤代有机物的平均浓度范围为 $0\sim33.4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.	刘舒乐等,2011;何洁等,2011
A/O	硫化氢、氨气、甲硫醇、甲硫醚、苯乙烯、二甲苯、异养细菌、真菌	各个采样点释放的硫化氢和氨气浓度均较高;尤其是污泥浓缩池和污泥脱水间产生的恶臭物质浓度很高;曝气池上空产生的异养细菌和真菌浓度最高;	黄力华等,2015
AB 法	烷烃类、烯烃、卤代烃类、苯系物、含氧有机物和单萜类等共 36 种 VOC	苯系物、乙酸乙酯和 2-丁酮是主要污染物.各个污染物浓度数量 $10^{-1}\sim10^1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,沉砂池浓度为 $(299.42\pm4.86)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;B 级曝气池沙池浓度为 $(299.42\pm4.86)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;B 级曝气池浓度为 $(246.45\pm9.14)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;A 级曝气池浓度为 $(200.82\pm6.22)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.	冯志诚,2009
SBR 法	二硫化碳(CS_2)、甲硫醚(DMS)和二甲基二硫醚(DMDS)等几种挥发性有机硫化物(VOS)	各单元中的 CS_2 ,DMS 和 DMDS 的浓度范围为 $0.01\sim0.52\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.污泥单元的 DMS 浓度最高达 $5.41\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.结果显示进水有机污染物浓度越高,厌氧停留时间越长,释放出的 VOS 的浓度越大	盛彦清,2007

续表5

工艺	气体种类	主要结论(特征)	文献
MBR 工艺	氨气和硫化氢	预处理单元释放的 NH_3 浓度为 $0.0043 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 生物处理单元释放和 H_2S 浓度为 $0.059 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Zhang, 2016
Orbal 氧化沟工艺	细菌、真菌和放线菌	污泥脱水机房的细菌和放线菌气溶胶浓度最高分别可达 $((7866\pm 960) \text{CFU}\cdot\text{m}^{-3})$, 和 $(2139\pm 227) \text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$, 真菌气溶胶浓度最高出现在氧化沟, 为 $(2156\pm 119) \text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$	邱雄辉, 2012
A/O 与 A ² /O 联用脱氮除磷	共检测出 67 种恶臭气体, 包括烷烃 21 种、烯烃 5 种、芳香烃 15 种、卤代烃 14 种、含硫化合物 5 种及含氧化合物 7 种	格栅处硫化氢的含量占该处恶臭气体总含量的 82%. 各处理单元恶臭气体总浓度为: 格栅 $(2775.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$; 二沉池 $(513.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$; 初沉池 $(565.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$; 曝气池 $(436.99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$; 污泥浓缩 $(814.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$; 污泥脱水间 $(574.04 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$.	王秀艳, 2013

气体.随着进水的水流湍动和出水的辐流方式,都会使得气体释放出来.曝气池中臭气释放可能是由于在曝气池中,污水中的有机污染物进行好氧生物降解,原污水中的有机污染物及降解后产生的有机物经曝气过程释放到空气中.而某些生化池中由于采用的是厌氧或是缺氧工艺,那么释放一些恶臭气体将是难以避免的.在污泥处理过程当中,生活污水中含有大量的有机污染物,污泥脱水后含水率一般在 75%~80%,污泥中的有机污染物在离心脱水机的剧烈搅动下释放到空气中.污泥浓缩池为密闭式的,产生的污染物不易扩散,若污泥浓缩的停留时间较长则会造成缺氧条件,污泥浓缩过程中发生的湍动也将导致恶臭气体的释放.此外某些污水处理构筑物还会释放一些细菌和微生物.由此归纳出城市污水处理厂不同构筑物当中释放气体的原因主要包括:①缺氧条件下,厌氧微生物菌群对污水中的有机污染物进行生物降解产生恶臭气体释放.如:格栅.缺氧厌氧反应区.②进水 BOD 浓度过高,好氧降解有机物的过程造成水体中缺氧,还原性细菌在缺氧条件下产生还原性气体,如:沉砂池.③污水和污泥中的有机物通过曝气充氧和搅拌等方式挥发到空气当中,如:曝气池和污泥处理单元.目前国内研究较少关注空气中的细菌和真菌,针对空气中细菌真菌的检测也鲜见报道,国外主要通过微生物空气采样培养法对空气中存在的细菌和真菌进行量化分析(Korzeniewska *et al.*, 2009; Niazi *et al.*, 2015).

由表 5 可知,污水处理过程释放的气体污染物种类较多,包括烯烃、烷烃、卤代烃、芳香烃、含硫有机物、含氧有机物、 H_2S 、 CS_2 和 NH_3 等数十种挥发性气体污染物.不同的处理工艺所释放出的气体污染物在种类和浓度上也存在较大差异.

A²/O 工艺释放的气体种类最多,A²/O 污水处

理工艺中污水经过厌氧段释放磷,进入缺氧段脱氮,最后进入好氧段(曝气)去除有机物并利用聚磷菌过量吸磷.由此可以推断,厌氧菌在缺氧和厌氧阶段对污水中的有机物进行生物降解释放了多种恶臭挥发性有机物 MVOC;而在好氧阶段通过对污水进行曝气充氧使得恶臭气体大量逸出.与 A²/O 相比较,A/O 工艺虽然也有厌氧阶段,但其水力停留时间较短且没有缺氧段,所以 A/O 工艺释放的气体污染物种类较少.由此推断恶臭气体的释放与污水中溶解氧的浓度以及曝气时间相关.

AB 法是吸附-生物降解工艺,A 段按高负荷运行,水中的悬浮固体和溶解性有机物主要是通过 A 段世代周期短且活性强的细菌的絮凝吸附作用和生物降解作用进行去除,其中絮凝、吸附起主导作用.水力停留时间为 30 min.而 B 段在低负荷下运行,水力停留时间长达 2~5 h,污泥龄较长,一般为 15~20 d,在 B 段曝气池中,除了菌胶团微生物,还有一定量的高级真核微生物,能够充分分解有机物.由表 5 可知 B 段释放的气体浓度比 A 段高的原因是 B 段的水力停留时间长,B 段的曝气时间也比 A 段曝气时间长,且 B 段的真核微生物对有机物进行了充分分解.使得 B 段更利于水中有有机物的挥发.

SBR 工艺的特点是按照顺序间歇运行,空间上混合液呈理想的完全混合,时间上有机物降解呈理想推流式.SBR 法能够轻松实现好氧、缺氧和厌氧状态的转换.在进水负荷较低的情况下,释放的气体浓度很低;而当进水负荷较高,厌氧时间要延长,释放的气体浓度则会上升.

MBR 是一种将高效膜分离技术与传统活性污泥法相结合的新型污水处理工艺,利用高效膜将污水与活性污泥分隔开,污水及含某些专性细菌的活性污泥在膜内外分别流动,污水与微生物不直接接

触,污水中的有机污染物则可以选择性透过膜而被微生物所降解.因为生物反应器中营养物质和微生物生存条件不受污水水质的影响,所以污水处理效果稳定.而传统的好氧生物处理过程中有机污染物可能在曝气过程中随气流挥发出去,不仅处理效果很不稳定,还会造成大气污染.而 MBR 则很少发生这种情况,因此利用 MBR 工艺处理污水造成的臭气污染问题相比部分传统污水处理工艺要小.但是 MBR 工艺也存在膜的使用寿命有限(3~5 年)而导致的膜污染问题.

氧化沟工艺是一种传统的活性污泥法工艺,氧化沟是一种存在着好氧断的交替变化的构筑物,具有较大的气液表面.通过氧化沟的循环处理过程,污水在曝气机、搅拌器等设备作用下处于紊流状态,使得污水中的污染物容易挥发到大气中去,对大气环境造成污染.并且氧化沟工艺由于污泥龄较长,有利于世代时间较长的微生物增殖,所以氧化沟上空易出现挥发性真菌、细菌且排出的污泥当中也会滋生真菌等各种菌种.

3 城市污水处理厂中臭气治理技术(Odor removal techniques in municipal wastewater treatment plants)

随着我国城市化建设步伐的加快,城市污水处理系统也在日益完善当中.与此同时,城市污水处理厂已经被报道出多种恶臭有害气体的释放.已有某些国家明文规定,在居民住宅小区 300 m 范围内的城市污水处理厂必须配备相应的除臭设施.当前,城市污水处理厂除臭技术的选择需考虑臭气的主要产生原因、臭气的主要成分、臭气的主要产生源、臭气的允许排放标准及臭气浓度等各种综合因素.城市污水处理厂恶臭废气治理技术主要分为物理法、化学法和生物法.

物理法是指不改变恶臭物质本质的情况下,通过物理手段将臭味遮蔽、转移或者稀释的一种方法(张钊彬,2013).常见的物理方法包括活性炭吸附法、液体吸收法等(Barker *et al.*, 1998; Ten, 2006; Rattanapan *et al.*, 2010; 黄智等, 2011).活性炭吸附法主要是利用活性炭能够吸附臭气物质这一原理而开发的,该法目前广泛应用于空气净化和水的深度净化.例如活性炭吸附塔可以通过物理吸附作用去除乙醛、吡啶类等多种臭气物质.活性炭吸附法对硫化氢等含硫化化合物的去除效果比较好,对含氮化合物的去除效果则稍差,原因是活性炭吸附法对臭

气的处理效果与臭气物质的化学组分有关.因此实际应用中为了提高除臭效果,通常在吸附塔内填充各种不同性质的活性炭,分别吸附酸碱性程度不同的臭气物质(杨国瑞,2010).

化学法主要原理是臭气物质能与某些化学物质产生反应,通过反应改变臭气的化学性质以达到除臭的目的.目前,实际应用中常用的化学除臭方法主要包括:化学氧化法、化学吸收法和燃烧法等(Burgess *et al.*, 2001; Charron *et al.*, 2004; Uroz *et al.*, 2009; Santelli *et al.*, 2009).化学氧化法是通过强氧化剂对污水处理过程中释放的大量还原性臭气物质进行处理,使其转变成无臭气体.化学氧化方法中应用最广泛的是催化氧化法.催化氧化法是通过使用催化剂来加快还原性臭气氧化速度的一种方法.因此催化氧化法的关键在于催化剂的选择.目前在实际应用中应用较多且催化效果较好的催化剂主要有 TiO_2 、 ZnS 和 ZnO 等.然而催化氧化法的催化剂多为贵金属,成本较高,且催化剂在使用一段时间后,活性可能会下降甚至失活,这两点是催化氧化法的局限性所在.

生物法是指首先在合适的条件下富集培养微生物,随后利用微生物的新陈代谢降解臭气进而达到除臭目的的一种方法.微生物降解臭气一般分为 3 个步骤(谢冰, 1997; 刘国华, 2009):①恶臭气体首先溶解于水中并与微生物载体接触,完成由气相到液相的扩散过程,此过程遵循亨利定律;②在恶臭气体的浓度梯度差作用的推动下,使溶解于液相的恶臭气体向生物膜扩散继而微生物所吸收;③通过微生物的新陈代谢,臭气被微生物作为营养物质所利用、分解,最终通过生物化学反应转化为不同的无毒无害物质(张钊彬,2013).生物除臭的研究最早始于 1957 年,当时的美国学者利用土壤中的微生物处理硫化氢气体并发明了专利.20 世纪 70 年代,许多国家开始对生物除臭领域进行更加深入且广泛的研究,其中荷兰和德国率先建立了具有较好处理效果的臭气治理系统(Leson *et al.*, 1991).此后,生物除臭法于 80 年代发展的更为广泛,日本、美国等其它发达国家开始将生物除臭法应用于冶金、化工及污水处理厂等领域中(Van *et al.*, 2005).生物除臭法具有运行管理简单、高效且处理成本相对较低等优点,因此近几年来生物法也成了国内外学者的研究重点(Ramirez-Lopez *et al.*, 2010; Contators, 2001).目前生物除臭法主要可分为以下

3类:生物洗涤法、生物滤池法和生物滴滤法(Edwards *et al.*, 1996; Liu *et al.*, 2011).生物滤池法是使收集到的臭气在适宜的条件下通过长满微生物的固体载体(填料),被填料吸收后进而作为营养物质被填料上的微生物氧化分解,完成臭气的处理过程.这种除臭装置具有安装、运行和维护费用低,便于操作,除臭效果好,能彻底降解恶臭污染物且不产生二次污染等多重优势,因而在臭气治理领域应用的前景将更加广阔.

传统的污水处理厂除臭工艺中,主要是对臭气进行末端收集集中处理的方式处理.末端收集集中处理的方式即将各处理单元进行密封,通过管道将臭气进行集中输送至处理系统内.根据臭气的组分浓度等条件选择合适的除臭方式进行处理.常见的除臭工艺形式如:生物除臭滤池和化学洗涤塔等.然而,以上这些方法并没有从源头减少污水处理过程中有害臭气的释放.通过调控污水处理工艺和运行参数减少污水处理过程中有害臭气的释放,既可以从源头减少臭气的释放,又能够极大地减少臭气末端治理的费用.

4 展望(Prospect)

目前对于城市污水处理过程当中释放恶臭气体的含量和组成研究较少,对于释放恶臭气体的含量和组成以及释放源头仍不清晰.污水处理过程当中影响恶臭气体释放的原因种类繁多,已知的有温度、水力停留时间、曝气时间等.污水处理过程中影响恶臭气体释放的因素仍不明确.

污水处理过程中,有毒有害气体的种类和组成应尽快明确.通过对实际污水处理过程中释放臭气的组成和含量进行分析,进一步优化城镇污水处理厂气体的释放标准.这些气体的释放由外界环境条件、水质条件、污水处理工艺、工艺的运行工况、工艺的运行参数以及微生物种群结构所决定.因此,应该尽快建立释放的气体和各种条件的关系,明确释放气体的产生机理.污水处理过程中释放的气体问题应从工艺运行工况的优化、调节运行参数和处理系统中微生物种群结构的调控等方面进行解决.通过从源头减少污水处理过程中释放的恶臭气体,优化城市污水处理厂工作人员的工作环境,降低污水厂工作人员的职业病发生的机率.以上仅给出了从源头控制污水处理厂有毒有害气体产生释放的基本思想,有关运行工况的优化,工艺运行参数的调

节等问题仍需进行深入系统的研究.

责任作者简介:彭永臻(1949—),男,教授,主要从事污水脱氮除磷方面的研究. E-mail:pyz@bjut.edu.cn.

参考文献(References):

- Abdou M H. 2007. Health impacts on workers in wastewater treatment plants in jeddah city, saudi Arabia [J]. Journal of the Egyptian Public Health Association, 82(5/6):405-417
- Agency US Environmental Protection. 2012. Summary report: global anthropogenic Non-CO₂ greenhouse gas emissions; 1990—2030 [R]. Washington, D.C. U S; Environmental Protection Agency: 1-10
- Alfonsín C, Lebrero R, Estrada J M, *et al.* 2015. Selection of odour removal technologies in wastewater treatment plants: A guideline based on Life Cycle Assessment [J]. Journal of Environmental Management, 149:77-84
- Barker W W, Welch S A, Chu S, *et al.* 1998. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering [J]. Am Mineral, 83(11):1551-1563
- Burgess J E, Parsons S A, Stuetz R M. 2001. Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review [J]. Biotechnology Advances, 19(1):35-63
- De Bont J A M, Van Dijken J P, Harder W. 1981. Dimethyl sulphoxide and dimethyl sulphide as carbon, sulphur and energy source for growth of *Hyphomicrobium* S [J]. Journal of General Microbiology, 127:315-323
- Charron I, Féliers C, Couvert A, *et al.* 2004. Use of hydrogen peroxide in scrubbing towers for odor removal in wastewater treatment plants [J]. Water Science and Technology, 50(4):267-274
- Contators R B. 2001. Bioreactors for waste gas treatment [J]. Environmental Pollution, 4(2):99-126
- Cheng X H, Peterkin E, Burliname G A. 2005. A study on volatile organic sulfide causes of odors at Philadelphia's Northeast Water Pollution Control Plant [J]. Water Research, 39(16):3781-3790
- Devai I, Delaune R D. 1999. Emission of reduced malodorous sulfur gases from wastewater plants [J]. Water Environment Research, 71(2):203-208
- Edwards F G, Nirmalakhandan N. 1996. Biological treatment of Airstreams Contaminated with VOCs: An overview [J]. Water Science and Technology, 34(3/4):565-571
- Frechen F B. 1994. Odour emission of wastewater treatment plants-recent German experiences [J]. Water Science and Technology, 30(4):35-46
- Frechen F B. 2004. Odour emission inventory of German wastewater treatment plants - odour flow rates and odour emission capacity [J]. Water Science and Technology, 50(4):139-146
- 冯志诚. 2009. 城市典型恶臭源的挥发性有机物的分子标志物初步研究 [D]. 广州:暨南大学. 73
- Van Groenestijn J W, Kraakman N J R. 2005. Recent developments in biological waste gas purification in Europe [J]. Chemical Engineering Journal, 113(2/3):85-91
- Mayer G J, Cheng I S, Pau P, *et al.* 1994. Emissions of air toxics from wastewater treatment plants [J]. Water Environment Research, 66

- (2):140-144
- Hamoda M F. 2006. Air pollutants emissions from waste treatment and disposal facilities[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 41(1): 77-85
- 黄智, 何琳燕, 黄静, 等. 2011. 硅酸盐矿物分解细菌 *Bacillus globisporus* Q12 与云母矿物相互作用的研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 30(3): 286-291
- 黄力华, 刘建伟, 夏雪峰, 等. 2015. 城市污水处理厂典型气体污染物产生特性研究[J]. *科学技术与工程*, 15(3): 295-299
- 何洁, 王伯光, 刘舒乐, 等. 2011. 城市污水处理厂挥发性卤代有机物的排放特征及影响因素研究[J]. *环境科学*, 32(12): 3577-3581
- Karageorgos P, Latos M, Kotsifaki C, *et al.* 2010. Treatment of unpleasant odors in municipal wastewater treatment plants[J]. *Water Science and Technology*, 61(10): 2635-2644
- Korzeniewska E, Filipkowska Z, Gotkowska-Plachta A, *et al.* 2009. Determination of emitted airborne microorganisms from a BIO-PAK wastewater treatment plant[J]. *Water Research*, 43(11): 2841-2851
- Lafleur J, Vena J E. 1991. Retrospective cohort mortality study of cancer among sewage plant workers[J]. *American Journal of Industrial Medicine*, 19(1): 75-86
- Smit L A M, Spaan S, Heederik D. 2005. Endotoxin exposure and symptoms in wastewater treatment workers[J]. *American Journal of Industrial Medicine*, 48(1): 30-39
- Lehtinen J, Veijanen A. 2011. Determination of odorous VOCs and the risk of occupational exposure to airborne compounds at the waste water treatment plants [J]. *Water Science & Technology*, 63(10): 2183-2192
- Leson G, Winer A M. 1991. Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 41(8): 1045-1054
- Liu J, Ma W. 2011. Odor and VOCs Treatment from wastewater treatment plant using a full-scale biofilter [J]. *Business Management and Electronic Information*, 4(1): 840-843
- 刘国华. 2009. 生物除臭技术研究进展[J]. *广东化工*, 36(8): 102-103
- 刘锴, 白登明. 2004. 污水处理系统臭气污染问题的研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 5(5): 38-42
- 罗固源, 孙永利, 吉方英, 等. 2001. 污水生物处理系统中逸出气体的危害与控制[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, (6): 131-133, 145
- 刘舒乐, 王伯光, 何洁, 等. 2011. 城市污水处理厂恶臭挥发性有机物的感官定量评价研究[J]. *环境科学*, 31(12): 3582-3587
- Niazi S, Hassanvand M S, Mahvi A H, *et al.* 2015. Assessment of bioaerosol contamination (bacteria and fungi) in the largest urban wastewater treatment plant in the Middle East [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(20): 16014-16021
- Nasterlack M, Messerer P, Pallapies D, *et al.* 2009. Cancer incidence in the wastewater treatment plant of a large chemical company [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 82(7): 851-856
- Olin R G, Ahlbom A, Lindberg-Navier I, *et al.* 1987. Occupational factors associated with astrocytomas: A case-control study [J]. *American Journal of Industrial Medicine*, 11(6): 615-625
- 邱雄辉. 2012. 污水厂微生物气溶胶的逸散特征、传输特征及健康风险评估研究[D]. 西安: 长安大学. 69
- Rattanapan C, Kantachote D, Yan R, *et al.* 2010. Hydrogen sulfide removal using granular activated carbon biofiltration inoculated with *Alcaligenes faecalis* T307 isolated from concentrated latex wastewater [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 64(5): 383-387
- Ramirez-Lopez E M, Corona-Hernandez J, Avelar-Gonzalez F J. 2010. Biofiltration of methanol in an organic biofilter using peanut shells as medium[J]. *Bioresource Technology*, 101(1): 87-91
- 盛彦清. 2007. 广州市典型污染河道与城市污水处理厂中恶臭有机硫化物的初步研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所). 125
- Santelli C M, Edgcomb V P, Bach W, *et al.* 2009. The diversity and abundance of bacteria inhabiting seafloor lavas positively correlate with rock alteration [J]. *Environmental Microbiology*, 11(1): 86-98
- Ten Cate J M. 2006. Biofilms, a new approach to the microbiology of dental plaque[J]. *Odontology*, 94(1): 1-9
- 唐小东. 2011a. 城市污水处理厂挥发性有机恶臭污染物的来源及感官定量评价[D]. 广州: 暨南大学. 72
- 唐小东, 王伯光, 赵德骏, 等. 2011b. 城市污水处理厂的挥发性恶臭有机物组成及来源[J]. *中国环境科学*, 31(4): 576-583
- Uroz S, Calvaruso C, Turpault M-P, *et al.* 2009. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms [J]. *Trends in Microbiology*, 17(8): 378-387
- Vega E, Monclús H, Gonzalez-Olmos R, *et al.* 2015. Optimizing chemical conditioning for odour removal of undigested sewage sludge in drying processes[J]. *Journal of Environmental Management*, 150: 111-119
- Weiss M, Neelis M L, Blok K, *et al.* 2008. Non-energy use and related carbon dioxide emissions in Germany: A carbon flow analysis with the NEAT model for the period of 1990 - 2003 [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 52(11): 1252-1265
- 王灿, 胡洪营, 席劲璞. 2005. 城市污水处理厂恶臭污染及其评价体系[J]. *给水排水*, (9): 15-19
- 王秀艳, 易忠芹, 王钊, 等. 2013. 污水处理厂恶臭气体健康风险评估[J]. *土木建筑与环境工程*, 35(5): 50-54
- 王钊, 王秀艳, 高爽, 等. 2013. 天津市纪庄子污水处理厂恶臭气体排放研究[J]. *环境工程学报*, 7(4): 1459-1464
- 谢冰, 史家樑. 1997. 微生物法脱臭及其应用[J]. *上海环境科学*, (3): 14-16; 23
- 杨国瑞. 2010. 天津纪庄子污水处理厂除臭工程结构方案研究[D]. 天津: 天津大学. 79
- Zarra T, Reiser M, Naddeo V, *et al.* 2014. Odour emissions characterization from wastewater treatment plants by different measurement methods [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 40: 37-42
- Zhang C H, Wang L L, Wang X C, *et al.* 2016. Odor emission impact assessment of Zhengwangfen wastewater treatment plant in Beijing [J]. *Desalination and Water Treatment*, 57(38): 17901-17910
- 张利彬. 2013. 污水处理厂高标准除臭技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. 57