

城市污水厂主要处理单元恶臭及挥发性有机物的逸散

林 坚^{1,2} 李 琳^{1,2*} 刘俊新^{1,2} 李美艳^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 在污水处理厂的主要处理工艺段设置采样点, 采用在线监测仪, 检测空气中恶臭及挥发性有机物(VOCs)的浓度, 明确主要恶臭物质和排放源, 研究恶臭及 VOC 在不同季节的逸散特征。结果表明, 恶臭和 VOC 的排放主要集中在进水区, 浓度与进水水质相关。粗格栅间是主要的恶臭源, 其恶臭、TVOC、硫化物和胺类的浓度分别为 3 458.54 ~ 5 028.03 OU、120 ~ 221 mg/m³、253 ~ 464 mg/m³ 和 15 ~ 36 mg/m³, 占各个监测点浓度总量的 80.6%、93%、90% 和 89%。主要的恶臭物质为硫化氢和氨, 其浓度对应的臭气强度超过 4 级。恶臭与 VOC 的排放呈现季节变化, 夏季的浓度明显高于冬季。相关性分析显示, 恶臭浓度与 TVOC、硫化物、胺类浓度具有明显的相关性。

关键词 污水处理厂 恶臭 TVOC 硫化物 胺类

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)05-2329-06 DOI 10.12030/j.cjee.201412148

Odors and volatile organic compounds emission from main processing units of wastewater treatment plant

Lin Jian^{1,2} Li Lin^{1,2} Liu Junxin^{1,2} Li Meiyang^{1,2}

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Sampling sites were established in the main processing units of a wastewater treatment plant. The concentrations of odors and volatile organic compounds (VOCs) were detected by online monitoring and their seasonal emission variations were investigated. The main odorous substances and emission sources were identified. Results showed that odors and VOCs were mainly emitted in the water inlet areas, and their levels related to water quality. The coarse screen was the dominant emission source of the wastewater treatment plant used in this study, 3 458.54 to 5 028.03 OU of odor, 120 to 221 mg/m³ of TVOC, 253 to 464 mg/m³ of sulfur compounds, and 15 to 36 mg/m³ of amines were detected from the screen. The proportions of total emissions from all monitoring sites were 80.6%, 93%, 90%, and 89%, respectively. Hydrogen sulfide and ammonia were the dominant odors and their corresponding odor intensity reached level 4. The emissions of odors and VOCs presented seasonal variations. Levels emitted in summer were much higher than those in winter. TVOC, sulfur compounds, and amines exhibited correlation with odor concentration.

Key words wastewater treatment plant; odors; TVOC; sulfur compounds; amines

污水及污水处理过程中产生的恶臭和挥发性有机物逸散到空气中, 污染周边环境, 危害污水厂工人及周围居民的身体健康^[1-3]。污水处理厂恶臭污染问题逐渐引起公众的关注, 许多国家制定了恶臭污染物质的排放标准, 研发了高效处理技术。1993 年我国就制定了《恶臭污染物排放标准》(GB 14554-1993), 严格限制硫化氢、氨、苯乙烯等污染物质的排放。认识和了解污水处理厂恶臭物质的主要来源及排放规律, 有助于正确选择恶臭物质的处理技术与工艺。以往的研究显示, 城市污水处理厂的恶臭

源主要分布在进水区(进水泵站、格栅)和污泥处理区(污泥浓缩池、污泥脱水间)^[4-6], 主要恶臭物质包括: 氨^[7-8]、硫化氢^[7-8]、硫醇^[9]、吲哚、甲基吲哚^[10]、

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2010ZX07319-001-03); 国家自然科学基金资助项目(51478456)

收稿日期: 2014-12-17; 修订日期: 2015-02-04

作者简介: 林坚(1990—), 男, 硕士, 研究方向: 恶臭及挥发性有机物的生物处理技术。E-mail: jianlin3433@126.com

* 通讯联系人, E-mail: leel@rcees.ac.cn

乙醛、酮类和挥发性碳基化合物^[11-12]等。这些报道主要针对生活污水处理厂某一类恶臭污染物的排放与逸散,在恶臭物质与水质的关系方面鲜有研究。实际上污水处理厂恶臭污染物的逸散与污水的水质密切相关,对总恶臭浓度的贡献也有差异。本研究在北京某污水处理厂的主要处理工艺段设置采样点,采用在线监测仪,检测空气中恶臭及挥发性有机物(TVOC)的浓度,明确主要恶臭物质和排放源,研究恶臭及TVOC随季节的变化特征,分析了硫化物、胺类和TVOC等物质对恶臭的贡献以及与进水水质的关系,为污水处理厂恶臭及挥发性有机物的控制与治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

本研究的采样点位于北京南部的某污水处理厂。该污水处理厂采用活性污泥法处理以工业废水为主的污水,处理规模为5万t/d,服务区域46.8 km²。污水经过粗格栅后经水泵提升进入细格栅、沉砂池,随后进入生化池,处理后的水经消毒池消毒后达标排放;剩余污泥经带式压滤机脱水后外运。

在北京,12月至来年2月为冬季,3—5月为春季,6—8月为夏季,因此,本研究分别在1月(冬季)、4月(春季)和7月(夏季)对污水处理厂的粗格栅、细格栅、沉砂池、生化处理池、污泥脱水间等主要处理单元以及厂界的恶臭进行了监测与分析。采样点分布如图1所示,所有采样点设置在距离地面1.5 m处。

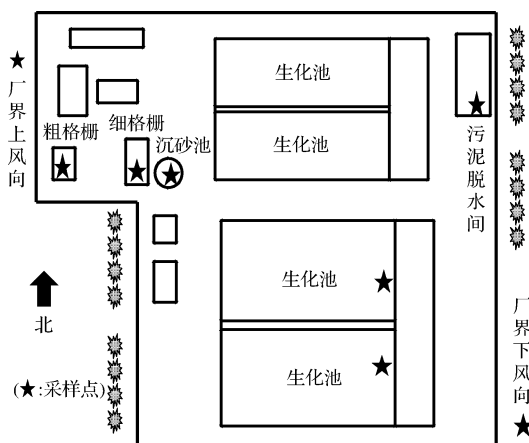


图1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points

1.2 分析方法

恶臭、TVOC、硫化物类和胺类浓度的监测采用

在线恶臭检测仪(Odor Catch/SLC-OPO22, 韩国), MOS、EC和PID为检测器。恶臭、硫化物、胺类以及TVOCs的监测范围分别为:0~10 000 OU, 7~300 mg/m³, 4~150 mg/m³, 以及2.4~380 mg/m³。在线检测仪具有连续监测的功能,每隔2 min自动采样一次、分析一次。一天之内,每个处理单元检测2次,每次连续监测30 min以上,2个时间段内的平均值为该处理单元的检测结果。硫化氢、氨的检测采用检知管(Gastec, 日本),乙酸检测采用气相色谱(岛津GC-MS-QP2010, 日本),色谱柱(DB-624-30M)氢火焰离子化检测器(FID)。环境温度和相对湿度采用手持式智能温湿度记录仪(179-TH, 美国)监测。光照度计(DeltaOHM HD2302, 意大利)和风速仪(DeltaOHM HD2303.0, 意大利)记录光照强度和风速。水中的总有机碳(TOC)和硫酸根(SO₄²⁻)分别采用TOC仪(TOC-V CPH, 岛津, 日本)和离子色谱仪(DIONEX ICS1000, 美国)测定。靛酚蓝分光光度法^[13]分析氨氮,采用紫外分光光度计(UV-1800, 上海美普达仪器有限公司)。

2 结果与讨论

2.1 采样环境条件

监测及采样分析主要污水处理单元的恶臭及挥发性有机物的同时,记录监测点周围的环境条件,环境条件(平均值)如表1所示。

1月、4月和7月监测当天的平均气温分别为6.94、23.72和34.50℃。北京市气象局发布的数据显示北京同期的日间月平均气温分别为2、20和31℃。环境温度、相对湿度和光照强度呈现明显的季节变化,夏季的温度、湿度以及光照强度远高于冬季和春季。而风速在1~4 m/s之间,变化不明显。粗格栅、细格栅、污泥脱水间等处理单元位于室内,沉砂池、生化池、厂界上风向和厂界下风向等单元的处理设施位于室外。室内空气的相对湿度始终高于室外,处理设施内的污水挥发并在室内积累导致室内的相对湿度较高。与相对湿度不同,室外采样点的光照强度及风速远高于室内采样点,由于构筑物房顶和墙壁的阻隔,显著降低了室内的光照强度和风速。季节不同室内外的温度有差异,冬季室外温度较低,由于房屋的保温作用,位于室内的处理单元,如粗格栅、细格栅、污泥脱水间,环境温度高于位于室外的生化池、厂界上风向和厂界下风向等处理

表 1 环境条件						
Table 1 Meteorologic conditions						
采样时间	采样点	处理设施位置	环境条件(平均值)			
			温度(℃)	相对湿度(%)	光照强度(W/m ²)	风速(m/s)
1 月	粗格栅	室内	7.36	42.78	1.509	0
	细格栅	室内	7.36	30.27	1.623	0.12
	沉砂池	室外	13.51	21.36	475	0.79
	生化池/A	室外	7.04	20.2	443	0.98
	生化池/NA	室外	5.38	22.12	400	0.55
	污泥脱水间	室内	9.6	62	0.962	0.02
	厂界上风向	室外	4.66	24.78	78.1	2.22
	厂界下风向	室外	0.6	25	430	1.83
4 月	粗格栅	室内	19.45	67.37	1.546	0.04
	细格栅	室内	20.35	51.99	6.776	0.25
	沉砂池	室外	22.85	41.29	270	2.55
	生化池/A	室外	24.7	34.78	235.2	1.69
	生化池/NA	室外	25.46	31.38	270.5	2.61
	污泥脱水间	室内	25.26	40.01	3.15	0.01
	厂界上风向	室外	26.4	29.07	335.2	2.25
	厂界下风向	室外	25.31	31.02	288.2	2.12
7 月	粗格栅	室内	32	41	1.23	0.02
	细格栅	室内	33	30	1.42	0.11
	沉砂池	室外	36	29	697.7	4.16
	生化池/A	室外	35	28	590.3	1.23
	生化池/NA	室外	35	28	590.5	1.23
	污泥脱水间	室内	33	35	1.33	0.02
	厂界上风向	室外	36	26	700.1	3.55
	厂界下风向	室外	36	26	703.6	3.76

注:A表示曝气,NA表示未曝气。

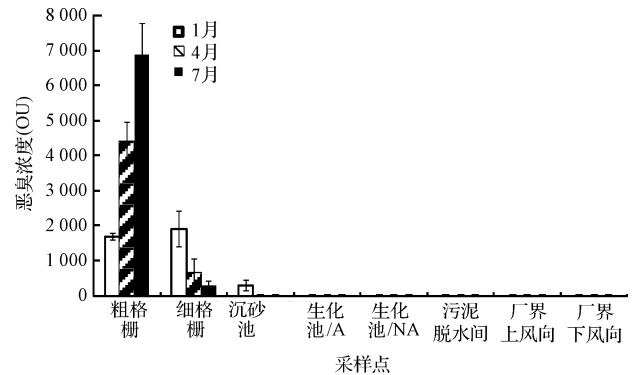


图 2 主要处理单元的恶臭浓度

Fig. 2 Odors concentrations from main processing units

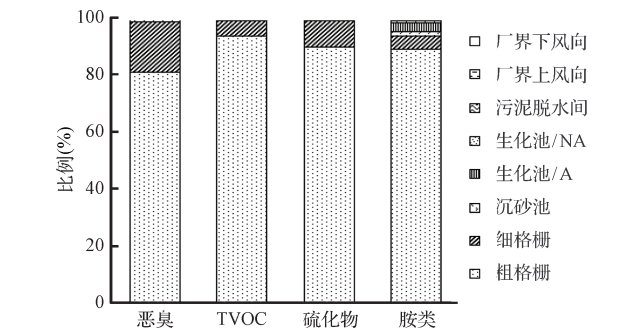


图 3 各检测点恶臭及挥发性有机物的比例

Fig. 3 Percentages of odors and VOCs from each sampling site

单元的环境温度。在夏季,构筑物的房顶和墙体对阳光的遮蔽作用,使室内的环境温度略低于室外。

2.2 恶臭浓度

污水处理厂可以检测出恶臭的处理单元包括粗格栅、细格栅和沉淀池,其他采样点恶臭未检出。其中,检出的粗格栅的恶臭浓度为 3 458.54 ~ 5 028.03 OU,细格栅的恶臭浓度为 638.24 ~ 1 901.53 OU,沉砂池的恶臭浓度为 0 ~ 281.33 OU(图 2)。分别占有所有采样点恶臭浓度总量的80.6%、17.6%和 1.8%(图 3),粗格栅和细格栅是主要的恶臭源。图 2 显示,恶臭浓度按污水处理单元的顺序依次降低。

污水经过输水管道进入污水处理厂后,首先流入格栅间。输水管道内通常为厌氧或缺氧环境,在缺氧条件下污水中的含氮、含硫等物质会转化为氨、硫化氢等恶臭物质^[14]。这些恶臭物质随污水流入格栅间,格栅机的机械转动引起水的紊流,使恶臭物质从水中释放,并逸散到格栅间的空气中。格栅间是相对密闭的空间,空气流动较少,恶臭物质积聚在格栅间内,导致格栅间空气中的恶臭浓度明显高于

其他处理单元。

生化处理单元采用活性污泥法处理污水,微孔曝气方式提供生化反应所需的氧气,因此,生化池内是好氧环境,水中的氨、硫化氢以及有机物等物质在该处理单元被氧化为硝酸盐、硫酸盐以及二氧化碳等物质。并且,生化池位于室外,空气流动加速气体扩散,使生化池的恶臭值极低。

通常污泥脱水间的恶臭浓度较高,也是重要的恶臭源之一^[15-16]。但是本研究在污泥脱水间设置的采样点处检出的恶臭浓度极低。可能的原因是,该污水处理厂采用高效脱水工艺对剩余污泥进行直接脱水处理,没有经过污泥浓缩工艺段,缩短了污泥的停留时间,避免了浓缩过程中因污泥的厌氧发酵而产生的恶臭。选择适宜的污泥处理工艺有助于减少恶臭物质的产生。

该污水处理厂主要处理单元空气中的恶臭主要在进水区,而污水或污泥处理过程产生的较少。

1 月、4 月和 7 月粗格栅间的恶臭浓度平均为 1 673.65、4 396.57 和 6 892.48 OU。相同时间,细

格栅间的恶臭浓度平均为 1 901.53、638.24 和 291.76 OU。2 个处理单元排放的恶臭总浓度呈现季节变化,粗格栅间夏季的恶臭浓度高于春季和冬季;而在细格栅间,夏季的恶臭浓度最低。夏季温度较高,输水管道中的微生物活性高,新陈代谢快,因而会产生较多的恶臭物质。并且,温度升高加快了气体从水相到气相的传质速度,恶臭物质能够较快地逸散到空气中。夏季进水中的大部分恶臭物质在粗格栅间释放,而留在污水中并流入到细格栅间的恶臭物质较少,使得夏季粗格栅间恶臭浓度较高而细格栅间的恶臭浓度较低。

2.3 总挥发性有机物、硫化物以及胺类

春季和夏季硫化物的浓度显著高于冬季。1 月、4 月和 7 月粗格栅硫化物的平均浓度为 23.97、313.12 和 749.35 mg/m^3 。相同时间,细格栅的平均浓度为 29.89、51.07 和 30.88 mg/m^3 ;沉砂池的平均浓度为 10.09、1.84 和 0.44 mg/m^3 (图 4(a))。经检测,硫化氢为主要致臭硫化物。硫化氢在粗格栅的平均浓度为 13.68 mg/m^3 (1 月)、76 mg/m^3 (4 月) 和 182.40 mg/m^3 (7 月),同时细格栅检出的平均值为 16.72 mg/m^3 (1 月)、30.4 mg/m^3 (4 月) 和 4.56 mg/m^3 (7 月)。

与硫化物类似,粗格栅也是胺类的主要排放源,并且夏季胺类的浓度最高,是其他季节的 10 倍。粗格栅空气中的 NH_3 最高为 25.57 mg/m^3 。各个处理单元胺类的最高浓度为 57.32 mg/m^3 (粗格栅),1.61 mg/m^3 (细格栅),0.57 mg/m^3 (沉砂池),1.91 mg/m^3 (生化池/A),0.82 mg/m^3 (生化池/NA),0.40 mg/m^3 (污泥脱水间) 和 0.07 mg/m^3 (厂界上风向),其中粗格栅胺类的浓度占有所有采样点的 89% (图 4(b))。除了粗格栅以外,细格栅、沉砂池以及生化池等处理单元均有少量的胺类检出。值得注意的是,当生化池处于在曝气状态时,胺类的浓度较高,逸散的硫化物也有类似现象。曝气造成了水面的剧烈搅动,加快胺类等物质从水的表面向气相扩散和传质的速度,导致较高的排放浓度。

各处理单元检出的总挥发性有机物 (TVOC) 为 0 ~ 222 mg/m^3 。除了厂界下风向 200 m 处以外,其他各个采样点均有 TVOC 检出。粗格栅间空气中的 TVOC 为 120.15 ~ 222.03 mg/m^3 ,细格栅间 5.86 ~ 15.99 mg/m^3 ,生化池 0 ~ 3.12 mg/m^3 ,其他采样点的浓度均低于 0.95 mg/m^3 (图 4(c))。粗格栅间空气中的 TVOC 占各个采样点 TVOC 总量的 93%,是

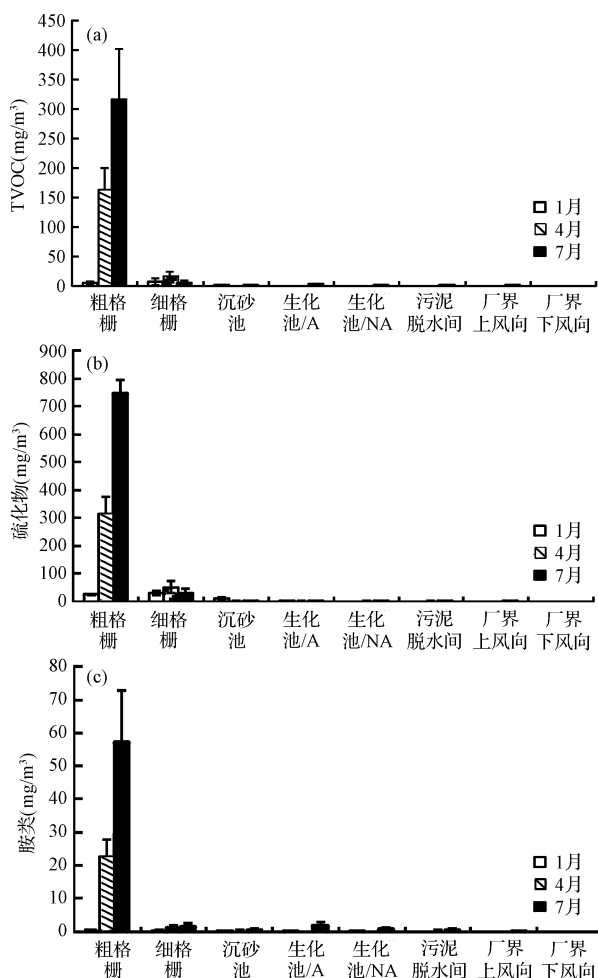


图4 主要处理单元的硫化物、胺类和 TVOC

Fig. 4 Sulfur compounds, amines and TVOC from main processing units

TVOC 的主要排放源。

各处理单元空气中 TVOC 的浓度呈现明显的季节变化,冬季 TVOC 的浓度极低,春季和夏季较高 (图 4(c))。粗格栅间 TVOC 各季节的平均浓度分别为 5.44 mg/m^3 (1 月)、164.6 mg/m^3 (4 月) 和 315.58 mg/m^3 (7 月)。检出的挥发性有机物主要为乙酸和甲烷,平均浓度分别为 0.31 mg/m^3 和 16.07 mg/m^3 。

恶臭浓度及强度决定于空气中致臭污染物的浓度、种类与组成^[9-11,17]。相关性分析结果显示,TVOC、硫化物、胺类与恶臭浓度的皮尔森相关系数分别为 0.972 ($p < 0.01$), 0.963 ($p < 0.01$), 0.921 ($p < 0.01$)。表明 TVOC、硫化物、胺类对复合恶臭均有贡献。臭气强度与恶臭污染物浓度的对数呈正比,根据修正的韦伯-费希纳公式 (式 1) 可以计算相应的臭气强度^[18]。对于不同的物质, K 、 α 值不相

同。我国采用日本的方法,将恶臭强度分为 0~5 级,一般以 2.5 级作为生活环境条件下的最大允许强度。根据恶臭污染物质质量浓度与臭气强度对应关系,该污水处理厂检出的硫化氢和氨的浓度,对应的臭气强度均高于 4 级。以往的研究证实, H_2S 或 NH_3 浓度的增加必然引起臭气强度的增加。同时也发现,在 H_2S 和 NH_3 的浓度均较低时,现场测定人员仍然能感觉到较强的臭味^[7]。因此,该污水处理厂排放的恶臭物质值得关注。另外,污水处理厂除了有硫化物、胺类等常见的恶臭物质以外,还有一定的挥发性有机物释放,在关注恶臭污染的同时,也应重视 VOC 的排放与削减。

$$I = K \cdot \lg C + \alpha \tag{1}$$

式中: I 为臭气强度(级); C 为臭气物质浓度, 1×10^{-6} ; K 、 α 为系数。

2.4 进水水质与恶臭物质的释放

从粗格栅间采集水样,分析水中的总有机碳(TOC)、硫酸根(SO_4^{2-})浓度以及氨氮浓度,结果如表 2 所示。

表 2 水质及硫化氢浓度

Table 2 Water quality and H_2S concentrations

月份	进水 TOC (mg/L)	进水氨氮 (mg/L)	处理单元	SO_4^{2-} (mg/L)	H_2S (mg/m ³)
1	12.64	38.24	粗格栅	428	13.68
			细格栅	421.79	0
			沉砂池	142.75	0
			生化池	0	0
4	14.96	48.92	粗格栅	224	76
			细格栅	218.9	22.8
			沉砂池	184	0
			生化池	10.5	0
7	23.32	105.85	粗格栅	400.3	182.4
			细格栅	397	60.8
			沉砂池	162.1	0
			生化池	38.4	0

VOC 如本研究检测到的乙酸等,是水中的有机质发生厌氧反应的产物^[19]。水中的蛋白质和脂类等,在厌氧条件下,分解成有机酸、氨以及二氧化碳等物质^[20-22]。总有机碳(TOC)通常用于描述水中总有机质的含量。TOC 值显示水中含有一定浓度的有机物,并且夏季最高。格栅间空气中的 TVOC 浓度与进水 TOC 值呈现正相关。进水中硫酸盐的浓度较高,通常为 224~400 mg/L。厌氧条件下,硫酸盐被硫酸盐还原菌转化为硫离子(S^{2-})。当溶液中有 H^+ 存在时, S^{2-} 与 H^+ 结合生成硫化氢,硫酸盐的

转化如式(2)所示。硫化氢极易从溶液中逸散到空气中,形成恶臭污染^[23-24]。另外,其他的有机硫化物如硫氨基酸、磺胺酸和磺化物等,在厌氧菌作用下也会降解生成硫化氢。夏季进水氨氮显著高于春季和冬季,推测是导致 7 月空气中的 NH_3 检出浓度较高的原因。空气中的 TVOC、硫化物、胺类与进水中的有机质、硫酸盐以及氨氮浓度相关。即,进水中 TOC、硫酸盐、氨氮浓度较高时,格栅间空气中恶臭污染物及挥发性有机物的检出值也高。



3 结 论

研究结果显示,该污水厂空气中的 TVOC、硫化物、胺类以及恶臭浓度按处理单元的顺序依次降低。粗格栅和细格栅是主要的排放源。检出的恶臭物质主要由进水带入污水处理厂,并在进水区如粗格栅间、细格栅间释放。曝气增加生化池空气中的硫化物和胺类的浓度。恶臭与 VOC 的浓度呈现明显的季节变化,夏季浓度显著高于冬季。TVOC、硫化物和胺类对复合恶臭浓度均有贡献,且与进水水质,如 TOC、硫酸盐和氨氮等物质的浓度密切相关。污水处理过程中,除了有硫化物和胺类等常见的恶臭物质以外,还有一定的挥发性有机物释放,在关注污水处理厂恶臭问题的同时,也应重视 VOC 的削减与控制。

参 考 文 献

[1] Aatamila M., Verkasalo P. K., Korhonen M. J., et al. Odour annoyance and physical symptoms among residents living near waste treatment centres. *Environmental Research*, **2011**, 111(1): 164-170

[2] Sucker K., Both R., Winneke G. Review of adverse health effects of odours in field studies. *Water Science and Technology*, **2009**, 59(7): 1281-1289

[3] Witherspoon J. R., Adams G., Cain W. S., et al. Water environment research foundation (WERF) anaerobic digestion and related processes, odour and health effects study. *Water Science and Technology*, **2004**, 50(4): 9-16

[4] 刘锴,何群彪,屈计宁. 城市污水处理厂臭气问题分析与控制. *上海环境科学*, **2003**(S2): 4-7
Liu Kai, He Qunbiao, Qu Jining. Odour analysis and control in sewage treatment plant. *Shanghai Environmental Sciences*, **2003**(S2): 4-7(in Chinese)

[5] Frechen F. B. Odour emissions of wastewater treatment

- plants: Recent German experiences. *Water Science and Technology*, **1994**, 30(4): 35-46
- [6] 王灿, 胡洪营, 席劲瑛. 城市污水处理厂恶臭污染及其评价体系. *给水排水*, **2005**, 31(9): 15-19
- Wang Can, Hu Hongying, Xi Jinying. Odor pollution and evaluation system in municipal wastewater treatment plant. *Water & Wastewater Engineering*, **2005**, 31(9): 15-19 (in Chinese)
- [7] 席劲瑛, 胡洪营, 罗彬, 等. 城市污水处理厂主要恶臭源的排放规律研究. *中国给水排水*, **2006**, 22(21): 99-103
- Xi Jinying, Hu Hongying, Luo Bin, et al. Odorants emission characteristics in a municipal wastewater treatment plant. *China Water & Wastewater*, **2006**, 22(21): 99-103 (in Chinese)
- [8] 睦光华, 李建军, 孙国萍. 城市污水处理厂恶臭污染源调查与研究. *环境工程学报*, **2008**, 2(3): 399-402
- Sui Guanghua, Li Jianjun, Sun Guoping. Investigation of odor pollution in a municipal wastewater treatment plant. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2008**, 2(3): 399-402 (in Chinese)
- [9] Muezzinoglu A. A study of volatile organic sulfur emissions causing urban odors. *Chemosphere*, **2003**, 51(4): 245-252
- [10] Young P. J. Odors from effluent and waste treatment. *Effluent & Water Treatment Journal*, **1984**, 24(5): 189-195
- [11] Dincer F., Muezzinoglu A. Odor-causing volatile organic compounds in wastewater treatment plant units and sludge management areas. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, **2008**, 43(13): 1569-1574
- [12] 周咪, 王伯光, 赵德骏, 等. 城市污水处理厂恶臭挥发性羰基化合物的排放特征. *环境科学*, **2011**, 32(12): 3571-3576
- Zhou Mi, Wang Boguang, Zhao Dejun, et al. Source emission characteristics of malodorous volatile organic carbonyls from a municipal sewage treatment plant. *Environmental Science*, **2011**, 32(12): 3571-3576 (in Chinese)
- [13] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**: 284-285
- [14] Carrera-Chapela F., Donoso-Bravo A., Souto J. A., et al. Modeling the odor generation in WWTP: An integrated approach review. *Water, Air, & Soil Pollution*, **2014**, 225(6): 1932
- [15] Frechen F. B. Odour emission inventory of German wastewater treatment plants-odour flow rates and odour emission capacity. *Water Science and Technology*, **2004**, 50(4): 139-146
- [16] Witherspoon J. R., Sidhu A., Castleberry J., et al. Odour emission estimates and control strategies using models and sampling for East Bay Municipal Utility District's collection sewage system and wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, **2000**, 41(6): 65-71
- [17] Mao Ifang, Chen Meiru, Wang L., et al. Method development for determining the malodor source and pollution in industrial park. *Science of the Total Environment*, **2012**, 437: 270-275
- [18] 赵庆良, 刘雨. 废水处理与资源化新工艺. 北京: 中国建筑工业出版社, **2006**: 357-358
- [19] Fuerhacker M., Bauer H., Ellinger R., et al. Approach for a novel control strategy for simultaneous nitrification/denitrification in activated sludge reactors. *Water Research*, **2000**, 34(9): 2499-2506
- [20] Bouallagui H., Touhami Y., Cheikh R. B., et al. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*, **2005**, 40(3-4): 989-995
- [21] Knol W., Van Der Most M. M., De Waart J. Biogas production by anaerobic digestion of fruit and vegetable waste. A preliminary study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **1978**, 29(9): 822-830
- [22] Veeken A., Kalyuzhnyi S., Scharff H., et al. Effect of pH and VFA on hydrolysis of organic solid waste. *Journal of Environmental Engineering*, **2000**, 126(12): 1076-1081
- [23] Otieno F. A. O. Anaerobic digestion of wastewaters with high strength sulphates. *Discovery and Innovation*, **1996**, 8(2): 143-150
- [24] Jameel P. The use of ferrous chloride to control dissolved sulfides in interceptor sewers. *Journal of Water Pollution Control Federation*, **1989**, 61(2): 230-236