

生物发酵制药废水产生的恶臭与 VOCs 特征及评估*

马嘉伟^{1,2} 王彦杰^{1,2} 郭雪松^{1,2} 李琳^{1,2} 刘俊新^{1,2} 李文凯^{1,2} 张文哲^{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 挥发性有机物污染
控制材料与技术国家工程实验室,北京 101408)

摘要: 生物发酵是医用、兽用抗生素的重要工业化生产途径。生物制药废水处理过程中产生大量的异味物质,污染环境。在宁夏北部某生物制药企业的污水处理站设置采样点,分析沉砂池、水解酸化池、生化池和污泥脱水间等处理工艺段的异味特征。4 个工艺段的恶臭浓度分别为 653.64、881.50、1988.71、998.00 OU。生化池是产生异味的主要单元;二乙胺和丙二醇甲醚是主要的 VOCs,总浓度分别为 3237.42、1132.73 mg/m³,总恶臭加权等标污染负荷比分别为 57.30% 和 19.52%,均超过 10%,是该污水处理站优先控制的异味污染物。采用韦伯-费希纳定律,构建评估指标体系,分级评估异味物质的潜在污染能力。二乙胺和丙二醇甲醚的污染能力指数均为 II 级,属于中度易污染,影响范围为 4~9 km。

关键词: 生物发酵制药; 恶臭气体; VOCs; 韦伯-费希纳定律; 潜在污染能力

DOI: 10.13205/j.hjgc.201909007

ODOR CHARACTERISTICS AND POLLUTION ESTIMATION OF BIOPHARMACEUTICAL WASTEWATER TREATMENT PROCESSES

MA Jia-wei^{1,2}, WANG Yan-jie^{1,2}, GUO Xue-song^{1,2}, LI Lin^{1,2}, LIU Jun-xin^{1,2}, LI Wen-kai^{1,2}, ZHANG Wen-zhe^{1,2}

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;
2. National Engineering Laboratory for VOCs Pollution Control Material & Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: Biological fermentation is an industrial production method which was applied widely to produce pharmaceutical and veterinary antibiotics. Considerable quantity of odorous substances are generated and released into the surrounding air during the processes of pharmaceutical wastewater treatment, causing environmental pollution and safety risks. In order to investigate the odors generated from different sewage treatment stages, sampling points were set up in a sewage treatment station of a pharmaceutical factory in this study. Results showed that the concentrations of odors were 653.64 OU at the grit chamber, 881.50 OU at hydrolytic acidification pool, 1988.71 OU at biological pool, and 998.00 OU at sludge dewatering chamber. The main source of odor was the biochemical pool in the wastewater treatment station. Diethylamine and propylene glycol methyl ether (PGME) were determined as the main odor pollutants, with total concentrations of 3237.42 mg/m³ and 1132.73 mg/m³, respectively. The total odor-weighted equivalent pollution load ratios of these two compounds were 57.30% and 19.52%, respectively, which both exceeded 10%. They were considered as the priority control pollutants. In order to assess their potential pollution capacities, the evaluation index system was established using the Weber-Fechner law. Both diethylamine and PGME had Grade II of potential pollution capacities, which assigned to moderate pollution with the impact range of 4~9 km.

Keywords: fermentation pharmacy; odor; volatile organic compounds; Weber-Fechner law; potential pollution capacity

0 引言

生物制药废水成分复杂,悬浮物、有机质及硫酸盐含量高,pH 值不稳定,通常带有较重的颜色和气味。

制药废水及污泥处理过程中,有机质易转化为氨、硫化氢及挥发性有机物(VOCs)等物质,逸散到空气中,形成恶臭污染,危害人体健康。从某维生素 C 生产废水处理系统的空气中检测出 25 种 VOCs,主要成分包括氯代烃类、酮类和苯系物,总挥发性有机物

* 国家自然科学基金(51878650)。

收稿日期:2019-01-03

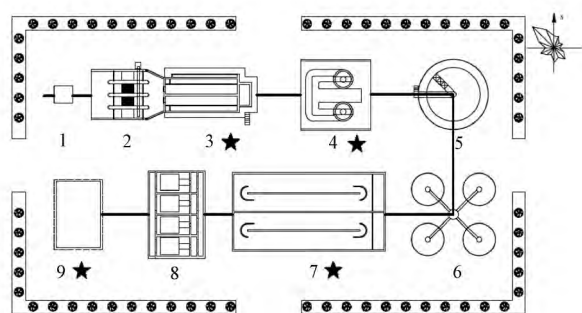
的浓度平均为 16.53 mg/m^3 ^[1]。采用恶臭气体源成分谱的方法,识别某生物制药企业废水处理产生的52种异味物质,发现乙醇、2,3-二甲基丁烷、3-甲基己烷、2,4-二甲基戊烷和对-二乙苯为特征污染物^[2]。

本研究在宁夏北部某城市生物发酵制药企业的污水处理站设置采样点,以制药废水处理过程产生的异味物质为研究目标,解析不同处理工艺段产生的恶臭物质及VOCs,识别典型污染物特征。参考当前VOCs分析评价研究^[3-4],基于韦伯-费希纳定律,构建污染潜力评估模型,分级评估制药废水产生的恶臭及VOCs的潜在污染能力,确定其污染程度和影响范围,以期对制药废水处理产生的恶臭物质及VOCs的有效控制和监管提供参考。

1 实验部分

1.1 制药废水处理工艺及采样点布设

生物制药企业位于宁夏回族自治区北部某城市。该企业以玉米粉、豆饼粉、玉米油、玉米浆、鱼粉和酵母粉等为原辅料,经过菌种活化、摇瓶培养、发酵、提取、精制等生产工序,合成医用和兽用抗生素。发酵剩余的营养物质、破乳剂、生物代谢产物和降解产物,以及提取过程中残留的各种有机溶剂等物质,通过管网进入该企业的污水处理站,经“预氧化+催化水解厌氧处理+A/O生物强化处理+深度处理”的工艺处理后排放,工艺流程如图1所示。



1—分流井;2—格栅;3—初沉池;4—气浮除渣池;5—水解酸化池;6—内循环厌氧反应池;7—生化池(好氧池、缺氧池);8—深度处理单元;9—污泥脱水车间;★采样点。

图1 制药废水处理工艺流程及采样点布设示意

Fig.1 Pharmaceutical wastewater treatment process and sampling points location

采样点分别布设在污水处理工艺段的气浮除渣池、水解酸化池、生化池(AO)以及污泥处理段的污泥脱水间。这些工艺段的构筑物均已加盖封闭,并建有气体收集系统和排放系统。取样点设置在排气筒上,

风机风量 $30000 \text{ m}^3/\text{h}$,排气筒总高 25 m ,采样口高 1.8 m 。

监测各个采样点的风速、温度、相对湿度等环境条件,用于分析和计算污染物的大气扩散情况和评估污染源恶臭的潜在污染能力和可能影响范围,监测结果见表1。

表1 采样位点环境条件

Table 1 The meteorologic conditions of each sample point

采样点	环境条件(平均值)			
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	风向	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
沉砂池	22.6	40.3	东北	1.05
水解酸化池	22.35	52	东北	0.95
生化池	20.45	44.1	东北	0.9
污泥脱水间	20.95	50	东北	0.95

1.2 分析方法

在线恶臭检测仪(Odor Catch/SLC-OP0200,韩国)分析恶臭浓度,检测器为半导体式传感器MOS,监测范围为 $0\sim 25000 \text{ OU}$ 。在线检测仪具有连续监测的功能,每隔 2 min 自动采集样品并加以分析。利用气体采样袋(20 L ,Hedetech,中国)收集各个采样点的气体样品,密封置于样品箱,带回实验室 48 h 内分析完毕。采样点的温度、相对湿度以及风速、风向采用便携式温湿度计(GM1361,BENETECH)和风速风向仪(P68232,Puxicoo,中国)测定。 H_2S 、 NH_3 以及VOCs采用FTIR红外气体分析仪(MKS 2030,美国)分析。

1.3 评价方法

遵循依量原则和依害原则,突出优先控制污染物对环境和人体的影响,根据污染源排放的恶臭物质和VOCs对人体健康和环境质量的危害程度,以及污染源气体的排出量等参数,建立评估指标体系。采用韦伯-费希纳方法,构建恶臭污染风险评估模型,分级评估制药废水处理过程产生的恶臭及VOCs的潜在污染能力。

2 结果与讨论

2.1 恶臭及VOCs物质排放特征解析

各个采样点的恶臭浓度值如图2所示。污水处理段和污泥处理段均有恶臭物质排放,其中生化池和污泥脱水间的恶臭浓度最高,分别为 1988.71 、 998.00 OU ,远大于上风向的恶臭浓度($<10 \text{ OU}$)。是厂界下风向恶臭浓度(104.79 OU)的 $19.9.5$ 倍。制药废水在输送、气浮除渣以及水解酸化等处理过程中,有机物分解会产生低分子有机酸、胺类、硫化氢等

气体或易挥发物质,逸散到空气中,形成该工艺段的恶臭污染。下风向的恶臭浓度远超过 GB 14554—1993《恶臭污染物排放标准》规定的厂界标准值(100OU),表明污水及污泥处理工艺段产生的恶臭物质及 VOCs 扩散到下风向,会对下风向周边居民有潜在的影响。

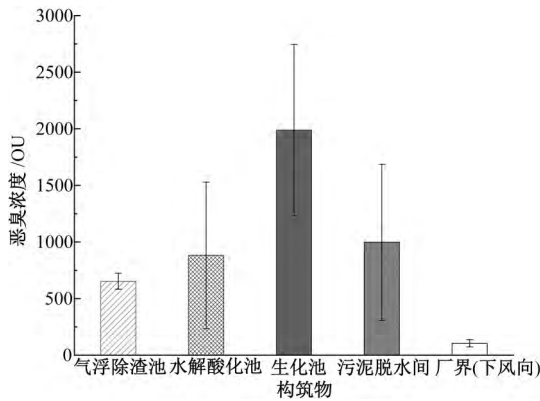


图 2 各个构筑物采样点恶臭浓度
Fig.2 Odor concentration at each sampling points

以往研究结果显示,城市污水处理厂臭味气体的产生源主要是进水池、格栅间、沉砂池、初沉池及污泥处理系统的储泥池、脱水机房等工艺段或构筑物^[6-7]。林坚等^[8]在北京某污水处理厂各个处理工艺段设置采样点监测空气中的恶臭浓度,发现格栅间和沉砂池的恶臭浓度分别为 638.24 ~ 1901.53 OU 和 0 ~ 281.33 OU,生化池恶臭浓度 < 100 OU。广东某城市污水厂的恶臭污染调查结果显示,各污水处理单元空气中的臭气浓度在 41 ~ 175 OU^[9]。德国工程师协会对城市污水厂各单元的气味扩散进行了调查,结果如表 2 所示^[10]。

表 2 城市污水处理厂污水部分和污泥部分的
气味值和波动范围

Table 2 Odor value and fluctuation range of sewage section and sludge section of urban sewage treatment plants OU

处理单元	恶臭值
初沉池	29~84
曝气沉砂池	30~90
曝气池	10~101
二沉池	12~50
污泥存放	30~800
机械污泥脱水室	50~770
预污泥处理	41000(平均)

污水水质不同导致恶臭浓度差异明显。城市污水厂的进水通常以生活污水为主 $\rho(\text{COD}) < 300 \text{ mg/L}$ $\rho(\text{氨氮}) < 30 \text{ mg/L}$ 。本研究的制药废水 $\rho(\text{COD})$

为 9500 mg/L $\rho(\text{氨氮})$ 为 750 mg/L,分别是一般生活污水的 60 25 倍。国内外城市污水处理厂恶臭污染的调查结果均远低于本研究中的各个采样点的监测值。可认为较高的有机物和氨氮含量,使制药废水处理引起的恶臭污染更为严重。

气浮除渣池、水解酸化池、生化池以及污泥脱水间等处理单元空气中累计检出 21 种物质(图 3)。污泥脱水间检出的物质种类最多,计 20 种;沉砂池检出的物质种类最少,仅 9 种。污泥脱水间检出的物质总浓度为 5242.39 mg/m³,生化池(4651.85 mg/m³)次之,气浮除渣池和水解酸化池的总浓度分别为 3868.67,3843.89 mg/m³。气浮除渣池、水解酸化池和生化池产生的物质总浓度与恶臭浓度的皮尔森相关系数 $r = 0.98$,呈显著正相关。

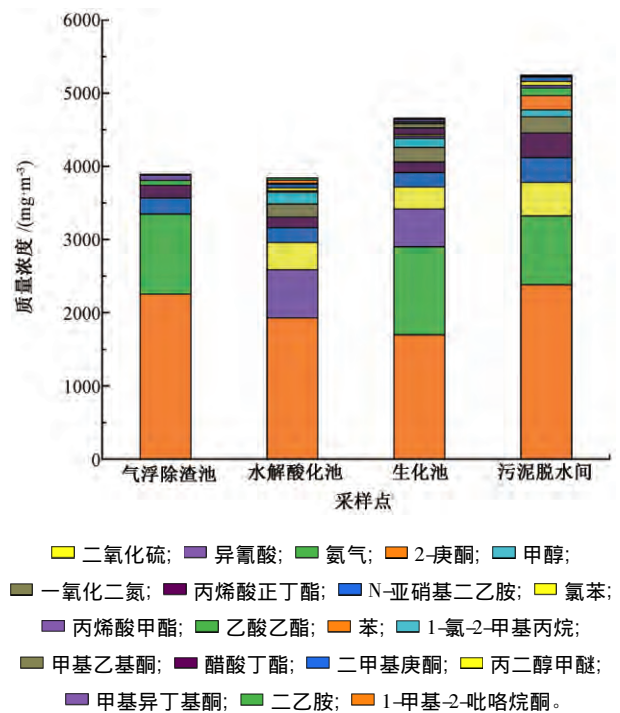


图 3 各采样点污染物质种类和浓度

Fig.3 Type and concentration of contaminants at each sampling point

各采样点 H₂S 和 NH₃ 的平均浓度为 22.41, 37.65 mg/m³,远低于检出 VOCs 的浓度(41.98 ~ 2383.49 mg/m³)表明 VOCs 是制药废水处理产生的主要恶臭污染物。制药废水处理工艺产生的恶臭污染物的主要成分依次为 1-甲基-2-吡咯烷酮、甲基异丁基酮、二乙胺、丙二醇甲醚、二甲基庚酮和乙酸丁酯(图 4)。

2.2 恶臭污染分析与污染源评估

2.2.1 恶臭污染分析

国内外的恶臭控制标准通常采用恶臭浓度控制

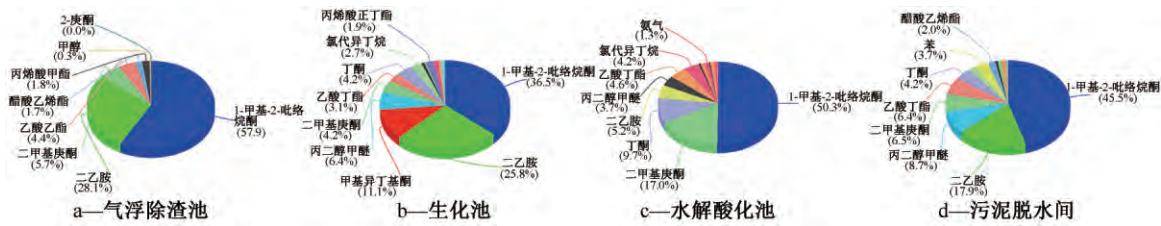


图 4 挥发性有机物成分

Fig.4 Compositions of VOCs in individual sampling points

值。欧洲标准(NVN2820)既规定了厂界恶臭浓度限值(15 OU),也规定了厂区的恶臭浓度限值(20 OU)。我国的GB 14554—1993中仅有厂界限值(表3)。根据国外的标准(20~46 OU),该污水处理站厂区的恶臭浓度超标,对现场操作工人具有潜在的健康影响。

表 3 部分国家和地区评估工业恶臭污染的详细技术标准(部分)

Table 3 Detailed technical criteria for assessing industrial odor pollution in different countries and religions (incomplete)

国家和地区	行业	范围	恶臭浓度限值/OU	引用文献
新西兰	造纸厂	厂区	20~30	[11-12]
西澳大利亚	蘑菇加工厂	厂区	30	[13]
	污水处理站	厂区	46	
欧洲	不限定	厂区	20	[14]
	污水处理厂、垃圾填埋场、化工企业	厂界	15	
中国	不限定	厂界	10	[15]

厂界下风向的恶臭浓度为 104.79 OU,超过我国 GB 14554—1993 规定的厂界限值(10 OU)。上风向厂界恶臭浓度平均值<10 OU,远低于厂界下风向的恶臭浓度,下风向恶臭浓度超标主要由该污水站排放的异味物质引起。该制药企业位于城郊过渡带 2 km 范围内有居住区,旅馆、学校、商业区及娱乐场所,其产生的恶臭物质及 VOCs 影响周边社区的环境质量。

2.2.2 污染源恶臭评估

1) 优先控制污染物的筛选。

优先控制污染物的筛选是恶臭污染源评估的关键和重要步骤^[16]。根据 GB 14554—1993 规定的 8 种受控物质,以面向污染源的优先控制恶臭污染物清单^[17]、人为源 VOCs 排放清单^[18-19]为基础,参考美国政府工业卫生专家会议(ACGIH)制定的有害物质的容许浓度^[20-21]运用加权等标污染负荷法^[22-23],计算、筛选该制药废水处理站恶臭排放源的优先控制污染物。

按式(1)和式(2)分别计算某污染物的恶臭等标污染负荷和加权等标污染负荷^[24]。将计算值从大

到小排序,筛选优先控制污染物。二乙胺和丙二醇甲醚的总恶臭加权等标污染负荷比分别为 57.30%和 19.52%(表 4),>10%,是该制药企业污水处理站优先控制的污染物。污染物的恶臭等标污染负荷见式(1):

$$P_i = W_i \frac{C_i}{M_i C_{oi}} \times Q_i \times 22.4 (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$k_i = \frac{P_{i总}}{P_{总}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_i 为 i 污染物的恶臭等标污染负荷, m^3/s ; C_i 为 i 污染物的实测物质浓度, mg/m^3 ; C_{oi} 为 i 污染物给人类嗅觉的最小感应量,即嗅阈值, mg/m^3 ; M_i 为 i 污染物的相对分子量; Q_i 为含有 i 污染物的排放量, m^3/s ; W_i 为 i 污染物的权重系数; m 为污染物种类; k_i 为区域(或企业)中某污染物的恶臭总加权等标污染负荷。

表 4 恶臭加权等标污染负荷比

Table 4 Weighted equivalent pollution load ratio

污染物质	权重系数 W	实测浓度/ ($mg \cdot m^{-3}$)	等标污染负 荷/($m^3 \cdot s^{-1}$)	等标污染 负荷比/%
二乙胺	0.2	3237.42	34413.26	57.30
丙二醇甲醚	0.2	1132.73	11726.5	19.52
二氧化硫	0.2	18.60	4929.845	8.21
甲基异丁基酮	0.5	1169.45	2317.675	3.86
丙烯酸甲酯	0.3	160.95	2135.78	3.56
二异丁基酮	0.5	959.96	1339.666	2.23
N-亚硝基二乙胺	0.2	107.33	816.8118	1.36
乙酸丁酯	0.3	794.77	580.3035	0.97
乙酸乙酯	0.3	170.03	526.463	0.88
1-甲基-2-吡咯烷酮	0.5	8268.59	479.4804	0.80
一氧化二氮	0.5	66.38	281.4995	0.47
甲烷	0.2	33.83	117.7688	0.20
氯苯	0.3	118.20	86.45246	0.14
丙烯酸正丁酯	0.3	86.63	77.21472	0.13
甲基乙基(甲)酮	0.5	593.94	76.84402	0.13
氨气	0.5	3.82	69.88053	0.12
氯代异丁烷	0.3	385.71	50.70457	0.08
苯	0.3	194.16	14.82069	0.02
异氰酸	0.2	32.54	13.18729	0.02
甲醇	0.5	49.16	4.337789	0.01
2-庚酮	0.5	43.82	0.639321	0.00

2) 恶臭污染潜力评估。

基于筛选出的优先控制污染物、综合污染源的排放特征,建立恶臭及 VOCs 的潜在污染能力评价体系,包括目标层、指标层以及分指标层。目标层是指污染源的潜在污染能力。指标层分为风险指标和臭气排放强度^[24]。其中,风险指标考虑了污染物的浓度、接触限制及健康危害程度等因素。臭气排放强度考虑了污染物扩散、地理条件和气象条件。

计算污染源恶臭评估分指标层的权重,确定二乙胺和丙二醇甲醚的分指标层权重分别为 $\omega_{\text{二乙胺}} = 0.26$, $\omega_{\text{丙二醇甲醚}} = 0.62$ 。根据式(3)和式(4)^[22],计算风险指标 P 为臭气排放强度 G 的特征值:

$$P = \sum_{j=1}^m w_j y_j (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

$$G = \sum_{j=1}^m S_j Q_j (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

二乙胺和丙二醇甲醚的风险指标和臭气排放强度的特征值为:

$$B' = \{780.08, 2.22 \times 10^6\}$$

根据污染源恶臭评估指标标准阈值的分级方法,将各评估指标分为 4 个等级,分别确定标准阈值,详见表 5。

表 5 恶臭评估指标等级划分

Table 5 Classification of odor assessment indicators

评估指标	IV级 (安全)	III级(轻度 易污染)	II级(中毒 易污染)	I级(重度 易污染)
风险指标	42.34	1.95×10^3	2.78×10^4	4.65×10^5
臭气排放强度	3.0×10^3	2.0×10^5	1.0×10^9	5.0×10^{11}

引入韦伯-费希纳定律,建立污染源潜在污染能力评估模型(式 5),计算二乙胺和丙二醇甲醚的各级潜在污染能力的等级标准阈值(表 6)。

$$d_i = \omega_i \lg(c_i + 1) \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

式中: d_i 为 i 指标的潜在污染能力; ω_i 为 i 指标的权重系数; c_i 为 i 指标的特征值, c_i 为了保证 $\lg(c_i + 1) > 0$,不会对结果产生明显影响。

表 6 恶臭评估标准阈值

Table 6 Odor assessment standard threshold

标准等级	IV (安全)	III(轻度 易污染)	II(中度 易污染)	I(重度 易污染)
潜在污染能力	0.15	0.92	5.50	8.22
污染范围	无潜在环境污染	1~2 km	4~9 km	>10 km

进行恶臭污染源潜在污染能力的综合评估时,需要确定权重向量 W ,即

$$W = \{\omega_1, \omega_2\} = \{0.26, 0.62\}$$

式中: ω_1, ω_2 分别为风险指标和臭气排放强度指标的权重值,以衡量相应评估指标对潜在污染能力的贡献率。权重值越大,贡献率越大^[24]。

指标层权重 (W_i) 按式(6)计算:

$$W_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^2 c_i} \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

$$c_i = \frac{c'_i}{S_{i4}} \quad (7)$$

式中: c_i 为第 i 个评估指标的标准化值; c'_i 为 i 评估指标的特征值,无量纲或 m^3/s ; S_{i4} 为第 i 评估指标 IV 级标准阈值,无量纲或 m^3/s 。

计算评估指标对潜在污染的贡献率,确定指标层权重为:

$$W = \{0.0243, 0.9757\}$$

将污染源恶臭评估指标的安全等级阈值作为相应指标的目标规划值,计算得到指标层的标准化值:

$$B = \{18.42, 740\}$$

加权计算潜在污染能力综合评估值:

$$A = (0.0243, 0.9757) \left[\frac{\lg(18.42 + 1)}{\lg(740 + 1)} \right] = 2.83$$

根据恶臭评估标准(表 6),该生物制药企业污水处理排放的恶臭及 VOCs 的潜在污染能力属于 II 级(中度易污染),可能的影响范围为 4~9 km。

3 结论

1) 该制药企业污水处理站的恶臭浓度较高,达到 653.64 ~ 1988.71 OU,厂界下风向恶臭浓度为 104.79 OU,远超过我国 GB 14554—1993、欧洲(NVN2820)标准及西澳大利亚和新西兰等国家和地区相关标准的投诉阈值。二乙胺和丙二醇甲醚是优先控制污染物,潜在污染能力属于 II 级(中度易污染),可能的影响范围为 4~9 km。

2) 近年来,VOCs 的削减成为大气污染源头控制的研究热点。制药废水处理过程产生的恶臭污染应引起重视,并建立相应收集和处理设施,有效降低恶臭物质和 VOCs 污染风险。

参考文献

- [1] 郭斌,律国黎,任爱玲,等. 维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4654-4660.
- [2] 翟增秀,张君,闫凤越,等. 生物制药企业恶臭污染物的排放特征[J]. 城市环境与城市生态, 2013(3): 19-21.
- [3] 陈金胜,伯鑫,徐君妃,等. 我国环境影响评价 VOCs 模拟研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 143-147.

- [4] 练川,周江,陈思琳,等. 贵阳市某工业园区环境空气中 VOCs 的污染特征与健康风险评价[J]. 环境工程, 2018, 36(7): 161-164.
- [5] 董艳平,王合生,喻义勇,等. 城镇污水处理厂进、出水 COD 浓度变化规律分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(11): 105-108.
- [6] 黄岑彦. 污水处理厂的挥发性有机物排放特征及健康风险评估[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(6): 704-709.
- [7] 耿雪松,张春林,王伯光. 城市污水处理厂污水处理工艺对 VOCs 挥发特征影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(7): 1990-1997.
- [8] 林坚,李琳,刘俊新,等. 城市污水厂主要处理单元恶臭及挥发性有机物的逸散[J]. 环境工程学报, 2016, 5(5): 2329-2334.
- [9] 睦光华. 城市污水处理厂及泵站除臭技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2008.
- [10] 李志强,刘绪宗,王建利. 生物除臭技术[J]. 中国给水排水, 1999, 15(9): 52-54.
- [11] Cudmore R S a D, A. Environmental Standards for Industrial Odour Effects: A Recommended Approach for New Zealand[R]. Aurora Environmental Limited, 1999.
- [12] Tracy Freeman R C. Air Quality Technical Report: Review of Odour Management in New Zealand[R]. No.24, 2002.
- [13] No 47—2002. Guidance for the Assessment of Environmental Factors—Assessment of Odour Impacts from New proposals[S]. Western Australian Environmental Protection Agency.
- [14] NVN 2820—1995. Air Quality—Sensory Odour Measurement Using An Olfactometer[S].
- [15] 国家环境保护局. 恶臭污染无排放标准: GB 14554—93[S]. 北京: 国家环境保护局, 1994.
- [16] 李伟芳. 国内恶臭污染物优先控制的筛选研究[J]. 上海环境科学, 2012(1): 1-4.
- [17] 环境保护部. 国家污染物环境健康风险名录[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [18] 魏巍,王书肖,郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 305-312.
- [19] 陆思华,白郁华,张广山,等. 大气中挥发性有机化合物(VOCs)的人为来源研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 757-763.
- [20] ACGIH 2010 年工作场所化学物质阈值名单(一)[J]. 职业卫生与应急救援, 2010, 28(6): 289-292.
- [21] Threshold limit values for chemical substances and physical agents in the workroom environment with intended changes for 1978. [J]. Medical Bulletin Exxon Corporation, 1978, 38(2): 107-143.
- [22] 张欢,赵杰,李伟芳,等. 恶臭污染源影响评估方法及其應用[J]. 天津化工, 2017, 31(5): 49-52.
- [23] 张欢,邹克华,李伟芳,等. 恶臭污染评估指标体系研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(2): 344-347.
- [24] 邹克华. 恶臭污染评估技术及环境基准[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- 第一作者: 马嘉伟(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为恶臭污染物的监测与控制技术. jwma_st@rcees.ac.cn
通信作者: 李琳(1966-),女,博士,研究员,主要研究方向为恶臭及挥发性有机物生物处理技术及应用. leel@rcees.ac.cn

(上接第7页)

- [39] 储长流,周敏东,方第超,等. 连续玄武岩纤维冷等离子改性处理性能研究[J]. 化工新型材料, 2013, 41(8): 89-91.
- [40] 靳婷婷,申士杰,李静,等. 低温等离子处理对玄武岩纤维表面及复合材料性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(6): 29-35.
- [41] 蒋霞,吴春笃,吴智仁,等. 玄武岩纤维载体生物接触氧化工艺处理印染废水[J]. 工业水处理, 2016, 36(1): 78-82.
- [42] 罗大军,徐彩云,高红娇,等. TiO₂ 负载玄武岩纤维毡复合材料的制备及其光催化性能[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(10): 2493-2497.
- [43] 戚永洁,吴智仁,许小红,等. 不同填料生物接触氧化法处理印染废水[J]. 印染, 2016(8): 16-19.
- [44] 三宅广大,杉浦岳人,杉浦美智代. 染色工場排水処理施設の水質改善とバイオマスコントロール[C]//第50回日本水環境学会年会, 熊本, 2017.
- [45] 堀尾明宏,筱原昇,杉浦美智代,等. 食料品製造業における排水処理水質の安定化とバイオマスコントロール[C]//第53回日本水環境学会年会, 山梨, 2019.
- [46] 吴智仁,彭娇,吴春笃,等. 新型生物接触氧化载体及其实验研究[J]. 水处理技术, 2016, 42(1): 52-55.
- [47] 储金宇,杨秀丽,蒋素英. 微生物制剂与玄武岩纤维联用处理城市废水[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 4372-4376.
- [48] 赵江,杨秀丽,蒋素英,等. 微生物菌剂与新型填料联用除磷研究[J]. 环境工程, 2013, 31(4): 21-24.
- [49] 堀尾明宏,赤羽根智加人,安福克人,等. パサルト纖維による浄化槽処理水中の懸濁物質の付着能の評価[J]. 土木学会論文集 G(環境), 2017, 73(7): III_63-III_69.
- [50] 吴春笃,姜大卫,彭娇,等. 基于玄武岩纤维载体的生物膜法净化污染河道水体[J]. 环境工程学报, 2015, 9(4): 1893-1897.
- [51] 黄娟,肖君,马溢轩,等. 多段玄武岩纤维束组合填料人工湿地: CN 108249594A [P]. 2018. 07. 06.
- 第一作者: 韦静(1984-),女,博士,教授,主要研究方向为水处理与环境功能材料. weijing@ujs.edu.cn
通信作者: 吴智仁(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为环境净化、替代、修复材料的研发及其应用技术的研究. wuzhiren@ujs.edu.cn