

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.009

污水处理厂恶臭气体健康风险评估

王秀艳, 易忠芹, 王 钊, 高 爽, 金陶胜

(南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘要:2011 年和 2012 年夏季在天津市纪庄子污水处理厂进行恶臭气体监测, 通过 GC-MS 分析恶臭气体的浓度及恶臭指数, 同时选取 24 名(男 11 名, 女 13 名)被试者佩戴 HOLTERR 进行急性暴露实验, 评估其健康风险。实验共检测出 67 种恶臭物质, 格栅处恶臭气体浓度最高, 以硫化物和含氧化合物为主; 格栅处的急性暴露实验结果显示被试者血压反应正常, 最快心率明显偏高, 且多出现于现场测试时段, HRV 参数值均偏离正常范围, 表明受恶臭气体刺激被试者交感神经活动增强; 对污泥脱水间恶臭气体进行致癌和非致癌风险评估可知, 二氯甲烷和苯存在潜在致癌风险, 恶臭非致癌危害指数 HI 小于 1, 其非致癌健康风险在可接受范围内。

关键词:污水处理厂; 恶臭; 心率变异性; 健康风险

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)05-0050-05

Health Risks Assessment of Odor Gases from Sewage Treatment Plant

Wang Xiuyan, Yi Zhongqin, Wang Zhao, Gao Shuang, Jin Taosheng

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, P. R. China)

Abstract: The compositions of odor gases in Jizhuangzi sewage treatment plant of Tianjin in the summer of 2011 and 2012 were monitored by GC-MS. Meanwhile 24 subjects (11 male, 13 female) were selected for acute exposure experiment by HOLTERR. 67 kinds of odors were detected out, the concentration of odor gases emitted from grid was the highest, sulfide and oxygen-contained were major species of odor gases; the acute exposure experiment at the grid showed that blood pressure reacted normal, maximum heart rate was significantly higher than normal value, mostly in the field test period, while the HRV parameters all deviated from normal range, which indicated that malodorous gases induced the subjects' sympathetic nerve activity. According to health risks assessment of odor gases from sewage treatment plan, methylene chloride and benzene of malodorous gases in the sludge dewatering had potential risk, non-carcinogenic hazard index (HI) was less than 1, within an acceptable range.

Key words: sewage treatment plant; odors; heart rate variability; health risks

污水处理厂作为环保工程, 缓解了污水直接排放对地表水的污染, 但污水处理厂的恶臭问题对周边环境造成了二次污染, 引发了人们越来越多的关注, 恶臭气体刺激对人体健康具有较大的潜在影响, 比如危害呼吸系统、循环系统、消化系统、内分泌系统、神经系统等, 同时也影响人的精神状态^[1]。Aatamila等^[2]通过对废物处理中心附近区域的恶臭

气体评估发现恶臭气体对居民的健康症状(如呼吸急促、眼睛不适、声音嘶哑、发烧以及肌肉疼痛等)有较大影响, OR 均在 1.4~1.7 之间; 同时有研究表明工厂附近 VOCs 暴露量高, 增加了人们患喘鸣和上呼吸道疾病的风险^[3]; 卫生调查结果显示职业人群暴露于苯会导致中枢神经系统失调, 甚至神经功能障碍或死亡^[4]。

收稿日期: 2012-12-04

基金项目: 环保公益性行业科研专项经费项目(201009034、201109004); 天津市科技支撑计划重点项目(10ZCGYSF02000)

作者简介: 王秀艳(1969-), 女, 副教授, 主要从事大气污染与控制研究, (E-mail) wangsy@nankai.edu.cn。

恶臭主要是由含硫化合物、醛、丁酸类物质引起的,唐小东等^[5-8]研究了广州一个典型城市污水处理厂挥发性恶臭有机物的组成和含量,苯系物、2-丁酮、乙酸乙酯、乙酸丁酯和甲硫醚等是该污水处理厂重要的分子标志物,污水进水区、污泥处理区是污水处理厂恶臭气体的主要污染源。Cheng等^[9]对费城东北污水处理厂恶臭中有机硫化物进行检测表明二甲基硫醚为主要物质,其平均浓度为419 $\mu\text{g}/\text{L}$;Lasaridi等^[10]探讨了希腊污水处理厂的恶臭问题,共监测了硫化氢、氨、苯、甲苯等10种物质,其中硫化氢为重要组成(0.01~200 mg/m^3),与Cooper等^[11]在佛罗里达州的研究结果相近;Lehtinen等^[5]监测了污水处理厂非甲烷类VOCs和厂内工作人员个体暴露量,结果显示TVOCs浓度为149.8~7 719.0 $\mu\text{g}/\text{L}$,工作人员的个体暴露量不会引起重要的健康问题,但会引发恶心、过敏等症状。笔者选取天津市纪庄子污水处理厂进行研究,实地监测各构筑物及厂界处恶臭气体的浓度,分析恶臭气体排放特征,并通过急性暴露实验探究恶臭气体对人体心脏自主神经活动的影响,同时进行致癌与非致癌风险评估。

1 实验方法

1.1 纪庄子污水处理厂简介

天津市纪庄子污水处理厂总规模为54万 m^3/d ,污水处理采用了脱氮AO工艺、脱氮除磷AAO工艺以及除磷AO工艺,污泥处理采用浓缩-中温厌氧消化-机械脱水处理工艺^[12]。

1.2 样品采集与分析方法

按照纪庄子污水处理厂的工艺流程依次在不同的处理单元设置采样点,设置顺序为:格栅、初沉池、曝气池、二次沉淀池、污泥浓缩池、污泥脱水间及厂界,在采样的同时监测风速、风向。使用8 L聚四氟乙烯采样袋对源进行采样,采样袋在采样前先用现场气体清洗袋子2~3次,再采集样气,采样时间约60 s,密封进气口,带回实验室分析。采样点选取在各处理单元下风向边界线上,采样头高度为1.5 m,即人体呼吸带高度。将采样袋中的气体注入GC-MS自动进样分析仪,分析样品中气体成分及浓度。

研究中实验人员还进行了恶臭强度调查,分别在每个构筑物下风向处进行臭味嗅辨,并将结果进行统计。同时选取24名测试人员(身体健康)佩戴HOLTER,进行急性暴露实验,佩戴人员在休息室静休15 min后,测量血压,记录其5 min心电信号后;在格栅前记录4~5 min的心电信号;回休息室测量血压,静休0.5 h,观察延迟反应。

2 结果与讨论

2.1 组成特征分析

对污水处理厂恶臭气体进行分析,共检测出67种恶臭气体,其中烷烃21种、烯烃5种、芳香烃15种、卤代烃14种、含氧化合物7种、含硫化合物5种,不同处理单元恶臭气体中各物种的浓度(取自然对数值)如图1所示。

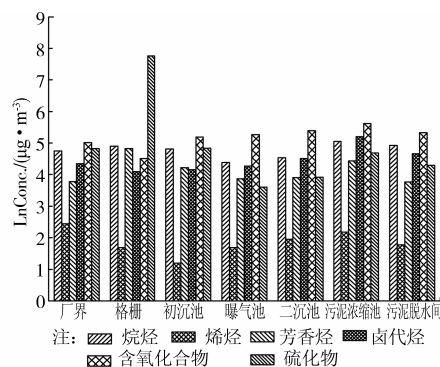


图1 各监测点不同恶臭物种的浓度自然对数值

从图1所示各监测点恶臭气体浓度值可以判断各处理单元恶臭气体以硫化物和含氧化合物为主。各监测点恶臭气体浓度大小为:格栅(2 775.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>污泥浓缩(814.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>污泥脱水间(574.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>初沉池(565.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>厂界处(521.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>二沉池(513.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>曝气池(436.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),格栅处恶臭气体总浓度最大,其中硫化氢的含量为2 286.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,占该处恶臭气体总量的82%,是其嗅阈值的5.6倍。根据城镇污水处理厂污染物排放标准^[13],厂界废气排放最高允许浓度二级标准硫化氢为0.06 mg/m^3 ,实验监测得厂界处硫化氢浓度为0.1 mg/m^3 ,是标准值的近1.7倍。

2.2 污水处理厂恶臭指数评估

恶臭混合气体中,采用阈稀释倍数作为衡量物种对臭气强度贡献指标,阈稀释倍数计算公式为

$$M_i = C_i / u_i \quad (1)$$

式中: M_i 为物种*i*的阈稀释倍数; C_i 为物种*i*的物质浓度, u_i 为物种*i*的嗅阈值。恶臭物质的阈稀释倍数越高,该物质在臭气中的贡献值越大。按照总和模型法,混合物的臭气浓度等于各成分阈稀释倍数的总和^[14]。

根据式(1)计算可知格栅处的恶臭气体浓度远远高出其它点位,恶臭气体总体阈稀释倍数为5 737 141,恶臭气体整体嗅阈值为0.000 484,与硫化氢相近,硫化物对总恶臭强度的贡献率为99.7%。厂界处的臭气浓度为258 067.62,参考城

镇污水处理厂污染物排放标准^[13],厂界废气排放最高允许浓度二级标准恶臭浓度为 20,表明该厂厂界

处远远超出标准值。格栅、厂界处各物种的阈稀释倍数如表 1 所示。

表 1 格栅、厂界处恶臭气体阈稀释倍数

监测点	含氧化合物	卤代烃	芳香烃	硫化物	烷烃
格栅	110.97	4.16	15 377.52	5 721 632.52	15.37
厂界	201.37	12.64	4 135.85	253 696.36	21.40

从表 1 可以看出,硫化物是影响污水处理厂恶臭指数的主要物种,其次是芳香烃类。利用 Spearman 相关分析显示格栅与厂界恶臭气体的阈稀释倍数显著相关,表明格栅处高浓度的恶臭气体加剧了厂界处的恶臭污染。

2.3 健康风险评估

2.3.1 恶臭气体对心脏自主神经活动的影响

对于心脏自主神经活动状态一般采用心率变异性(Heart rate variability, HRV)表征。心率变异性 HRV 的产生主要是由于心脏窦房结自律活动时交感神经和副交感神经不断受中枢神经及压力、化学感受器传入的心血管反射等因素调节^[15-17]。

以 HRV 作为研究指标,选取 24 名 18~30 岁大学生(男 11 名,女 13 名),进行 HOLTER 急性暴露实验,测定的参数包括血压、心率、HRV 时域指标(SDNN、rMSSD)、HRV 频域指标(LF、HF、LF/HF)。图 2 是 19 名被试者现场测试前后的血压值,其中 SBP1、SBP2 分别代表现场测试前、后被试者的收缩压,DBP1、DBP2 分别代表现场测试前、后被试者的舒张压。

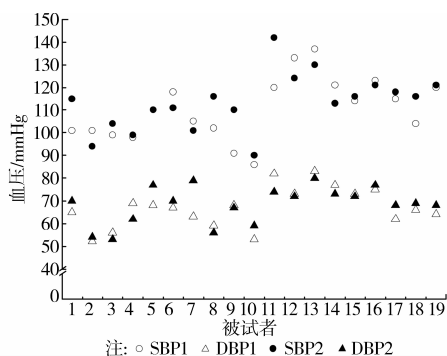


图 2 被试者的血压值

图 2 显示,被试者在现场测试前、后的血压值(SBP/DBP)无显著性差异,对比 SBP、DBP,除了个别试验者略超出正常范围外,其他均在正常范围内,由此可知污水处理厂格栅处的恶臭刺激对被试者的血压值未产生明显影响,即受恶臭刺激人体血压指标反映正常。

由十二导全息动态心电图结果显示了 24 名被

试者在室内安静时间段—现场测试—回到室内安静时间段整个过程的心率变化情况,其最快心率、最慢心率值如图 3 所示。

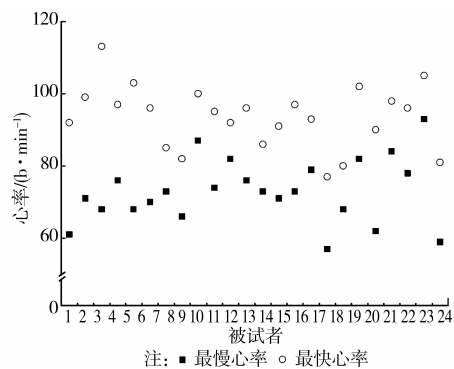


图 3 最快心率、最慢心率值

正常成人安静时的心率在 70 b/min 左右,实验中 24 名被试者心率平均值在正常范围内,最慢心率均出现在室内安静时段,最快心率多出现在现场测试时段,由图 3 可知,最快心率明显偏高,说明在现场测试阶段被试者受恶臭气体刺激心率变化较大。

由 HOLTER 测试所得的心率变异性(HRV)各参数值与参数正常值^[18]的对比,如图 4、5 所示。

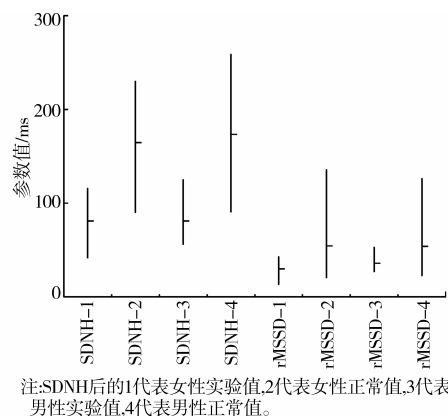
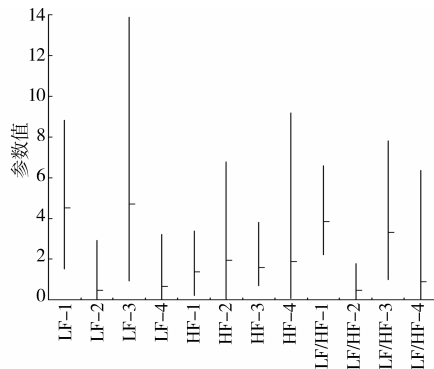


图 4 HRV 时域指数

HRV 时域指数是以 RR 间期的变异为基础,SDNN、rMSSD 参数反映了心脏自主神经系统总的调控情况,即窦性心律不齐的程度,男、女组 SDNN 平均值仅为正常值的 50%,受恶臭气体影响,rMSSD



注:编号后的1代表女性实验值,2代表女性正常值,3代表男性实验值,4代表男性正常值;LF、HF的单位为 10^3ms^2 , LF/HF无量纲。

图 5 HRV 频域指数

明显集中于正常范围的平均值以下。HRV 频域指数中,高频带(HF,0.15~0.40 Hz)成分由迷走神经的张力所决定,主要代表呼吸变异,低频带(LF,0.04~0.15 Hz)成分受交感神经和副交感神经共同影响,其中交感神经占优势,LF/HF 比值代表交感-迷走神经张力的平衡状态^[19-20]。男生组 LF 值为正常值的 7 倍左右,而女生组 LF 值是正常值的近 10 倍;男、女生组 HF 平均值均低于正常范围平均值,表明迷走神经活动减弱;男生组 LF/HF 平均比值高出正常值 2.8 倍,女生组 LF/HF 平均比值高出正常值 7.3 倍,说明被试者交感神经活动增强,可能降低心室活动阈值,严重者将诱发致命性室性心律失常。此外,对比图 4、5 中女性和男性的实验结果可知,同时受到恶臭污染的刺激,女性比男性心脏自

主神经活动所产生的反应更为显著。

2.3.2 致癌与非致癌风险评估 致癌风险评估,一般用终生致癌风险(Lifetime Cancer Risk, LCR)为衡量指标。用慢性摄入量(Chronic Daily Intake, CDI)作为潜在剂量评估职业慢性暴露,公式为:

$$LCR = CDI_{ca} \times S_F \quad (2)$$

式中:LCR 为终生致癌风险(无量纲); S_F 为污染物致癌斜率因子, $\text{mg}/\text{kg}/\text{d}$; CDI_{ca} 为污染物致癌暴露量, $\text{mg}/\text{kg}/\text{d}$;其中

$$CDI = (C \times IR \times ET \times EF \times ED) / 365 \times BW \times AT \quad (3)$$

式中:C 为空气中污染物的浓度, mg/m^3 ; IR 为成人的吸收速率, $0.66 \text{ m}^3/\text{h}$; ET 为每日暴露时间, $8 \text{ h}/\text{d}$; EF 为暴露频率, $300 \text{ d}/\text{a}$; ED 为暴露持续时间, 25 a ; BW 为体重, 65 kg ; AT 为平均寿命, a ,致癌风险评估选用 70 a,非致癌风险评估使用 25 a。非致癌风险评估,用危害指数(Hazard Index, HI)为衡量指标。其计算公式为:

$$HI = CDI_{nc} / RfC \quad (4)$$

式中:HI 为非致癌风险系数(无量纲);RfC 为污染物的非致癌参考剂量, mg/m^3 ; CDI_{nc} 为污染物非致癌暴露量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d}^{-1})$,取值同公式(3)。混合源总非致癌风险值为各物种危害指数之和^[21-23]。

通过对污水处理厂恶臭气体组分及浓度的监测,选取恶臭气体浓度较高且有人值守的采样点——污泥脱水间进行健康风险评估,如表 2 所示。

表 2 污水处理厂污泥脱水间部分恶臭气体致癌风险

化合物	浓度/ ($10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$CDI_{ca}/$ ($10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	$S_F/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	LCR/ 10^{-6}	RfC/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	HI
二氯甲烷	3.060	7.30	0.007 5	5.47	1.040	9.8×10^{-4}
苯	1.027	2.45	0.029 0	7.10	0.003	1.1×10^{-1}
甲苯	1.010	2.41			5.000	6.7×10^{-5}
二硫化碳	1.338	3.19			0.700	6.4×10^{-4}

由表 2 可知,二氯甲烷和苯的终身致癌风险值(LCR)均介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,表明其存在潜在致癌风险;污水处理厂污泥脱水间非致癌危害指数 HI 为 0.11,其值小于 1,表明非致癌健康风险在可接受范围内。

3 结 论

1)各监测点恶臭气体浓度由大到小的顺序依次为格栅、污泥浓缩、污泥脱水、初沉池、厂界处、二次沉淀池、曝气池,恶臭气体以硫化物和含氧化合物为

主。影响污水处理厂恶臭指数的主要物种为硫化物、芳香烃类。

2)急性暴露实验结果表明:被试者血压反应正常;最快心率多出现在现场测试时段,且受恶臭气体刺激在现场测试阶段心率明显偏高。HRV 时域指数中,男、女组 SDNN 平均值只为正常值的 50%,rMSSD 明显低于正常值;HRV 频域指数中,HF 值均低于正常值,LF、LF/HF 值远远高出正常值,说明被试者交感神经活动增强,可能降低心室活动阈值,严重者将诱发致命性室性心律失常。对比男、女生组的实

验结果可知,同时受恶臭污染的刺激,女生组比男生组心脏自主神经活动所产生的反应更为显著。

3)通过对污泥脱水间恶臭气体进行健康风险评估可知,二氯甲烷和苯存在潜在致癌风险。污水处理厂污泥脱水间非致癌危害指数 HI 小于1,其非致癌健康风险在可接受范围内。

参考文献:

- [1] 杨晶. 恶臭污染及防治对策[J]. 环境监测管理与技术, 1995,7(1):18-20.
Yang J. Odor pollution and control measures [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 1995, 7(1):18-20.
- [2] Aatamila M, Verkasalo P K, Korhonen M J, et al. Odour annoyance and physical symptoms among residents living near waste treatment centres [J]. Environmental Research, 2011, 111:164-170.
- [3] Tanyanont W, Vichit-Vadakan N. Exposure to volatile organic compounds and health risks among residents in an area affected by a petrochemical complex in Rayong, Thailand [J]. Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health, 2012, 43(1):201-211.
- [4] Greenberg M M. The central nervous system and exposure to toluene: a risk characterization [J]. Environmental Research, 1997, 72:1-7.
- [5] Lehtinen J, Veijanen A. Determination of odorous VOCs and the risk of occupational exposure to airborne compounds at the waste water treatment plants [J]. Water Science & Technology, 2011, 63(10): 2183-2192.
- [6] 唐小东, 王伯光, 赵德骏, 等. 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, 2011, 31(4):576-583.
Tang X D, Wang B G, Zhao D J, et al. Sources and components of MVOC from a municipal sewage treatment plant in Guangzhou [J]. China Environmental Science, 2011, 31(4):576-583.
- [7] Frechen F B. Odor emission inventory of Germany wastewater treatment plants-odour flow rates and odour emission capacity [J]. Water Science and Technology, 2004, 50(4):139-146.
- [8] 郭静, 梁娟, 匡颖, 等. 污水处理厂恶臭污染状况分析与评价[J]. 中国给水排水, 2002, 18(2):41-42.
Guo J, Liang J, Kuang Y, et al. Analysis and evaluation of odour pollution from sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(2): 41-42.
- [9] Cheng X, Earl P, Burlingame G A. A study on volatile organic sulfide causes of odors at Philadelphia's Northeast Water Pollution Control Plant [J]. Water Research, 2005, 39:3781-3790.
- [10] Lasaridi K, Katsabanis G, Kyriacou A, et al. Assessing odour nuisance from wastewater treatment and composting facilities in Greece [J]. Waste Management & Research, 2010, 28(11):977-984.
- [11] Cooper C D, Godlewski V J, Hanson R, et al. Odor investigation and control at a WWTP in Orange County, Florida [J]. Environmental Progress, 2001, 20(3):133-143.
- [12] 杨国瑞. 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, 2009.
- [13] GB 18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2003.
- [14] 包景岭, 邹克华, 王连生. 恶臭环境管理与污染控制[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2009.
- [15] Poyhonen M, Syvaaja S, Hartikainen J, et al. The effect of carbon dioxide, respiratory rate and tidal volume on human heart rate variability [J]. Acta Anaesthesiol Scand, 2004, 48:93-101.
- [16] Bickel A, Yahalom M, Roguin N, et al. Power spectral analysis of heart rate variability during positive pressure pneumoperitoneum [J]. Surgical Endoscopy, 2002, 16(9):1341-1344.
- [17] 高知义. 大气细颗粒物人群暴露的健康影响及遗传易感性研究[D]. 上海:复旦大学, 2010.
- [18] 全国心率变异性分析多中心研究协作组. 心率变异性正常值及其重复性的多中心研究[J]. 中华心律失常学杂志, 2000, 4(3):165-170.
HRV Co-operation Study Group. Multicenter-study of HRV's normal field and its reproducibility [J]. Chinese Journal of Cardiac Arrhythmias, 2000, 4(3):165-170.
- [19] Atsushi M, Kazukiyo K, Naomichi Y, et al. A novel methodology to evaluate health impacts caused by VOC exposures using real-time VOC and Holter monitors [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2010, 7:4127-4138.
- [20] Malliani A, Lombardi F, Pagani M. Power spectral analysis of heart rate variability: a tool to explore neural regulatory mechanisms [J]. British Heart Journal, 1994, 71:1-2.
- [21] Kim S, Cheong H K, Choi K, et al. Development of Korean exposure factors handbook for exposure assessment [J]. Epidemiology, 2006, 17(6):460.
- [22] 王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评估中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10):1171-1175.
Wang Z S, Wu T, Duan X L, et al. Research on inhalation rate exposure factors of Chinese residents in environmental health risk assessment [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(10):1171-1175.
- [23] 高爽. 恶臭污染源挥发性有机物排放特征和健康风险评估[D]. 天津:南开大学, 2012.