

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

序	郝郑平(4503)
南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征	安俊琳,朱彬,李用宇(4504)
天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析	翟增秀,邹克华,李伟芳,王亘,翟友存(4513)
南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析	杨辉,朱彬,高晋徽,李用宇,夏丽(4519)
上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算	崔虎雄(4529)
四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响	韩丽,王幸锐,何敏,郭卫广(4535)
武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策	黄碧捷(4543)
北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究	段菁春,彭艳春,谭吉华,郝吉明,柴发合(4552)
广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价	李雷,李红,王学中,张新民,温冲(4558)
天津某家具城挥发性有机物健康风险评估	张银,王秀艳,高爽(4565)
废旧有机玻璃再生利用行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究	王浙明,徐志荣,叶红玉,许明珠,王晓星(4571)
农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险	谭冰,王铁宇,庞博,朱朝云,王道涵,吕永龙(4577)
电子产品加工制造企业挥发性有机物(VOCs)排放特征	崔如,马永亮(4585)
汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价	曾培源,李建军,廖东奇,涂翔,许玫英,孙国萍(4592)
载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价	陈小开,程赫明,罗会龙(4599)
基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究	何万清,聂磊,田刚,李靖,邵霞,王敏燕(4605)
VOCs 污染场地挖掘过程的环境健康风险评价	房增强,甘平,杨乐,戴子瑜,祁世鸿,贾建丽,何绪文(4612)
挥发性有机物污染场地挖掘过程中污染扩散特征	甘平,杨乐巍,房增强,郭淑倩,于妍,贾建丽(4619)
土壤中苯向大气挥发过程的影响因素和通量特征研究	杜平,王世杰,赵欢欢,伍斌,韩春媚,房吉敦,李慧颖,细见正明,李发生(4627)
土壤组分对四氯乙烯吸附解吸行为的影响	胡林,邱兆富,何龙,窦颖,吕树光,隋倩,林匡飞(4635)
自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律	陈锡超,罗茜,陈虎,魏孜,王子健,许科文(4642)
杭州市典型企业废水中挥发性有机物排放特征及其评价	陈峰,徐建芬,唐访良,张明,阮东德(4649)
维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性	郭斌,律国黎,任爱玲,杜昭,邢志贤,韩鹏,高博,刘淑娅(4654)
新型生物滴滤填料性能评价	梅瑜,成卓韦,王家德,活泼(4661)
微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究	张超,赵梦升,张丽丽,陈建孟(4669)
BF 和 BTF 工艺去除 DCM 性能比较	潘维龙,於建明,成卓韦,蔡文吉(4675)
改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究	王家德,郑亮巍,朱润晔,俞云锋(4684)
转轮吸附法处理有机废气的研究	朱润晔,郑亮巍,毛玉波,王家德(4689)
活性炭吸附有机蒸气性能的研究	蔡道飞,黄维秋,王丹莉,张琳,杨光(4694)
UV-生物过滤联合降解苯乙炔废气的研究	沙昊雷,杨国靖,夏静芬(4701)
蜂窝状 ZSM-5 型分子筛对丙酮和丁酮吸附性能研究	杜娟,栾志强,解强,叶平伟,李凯,王喜芹(4706)
内浮顶油罐“小呼吸”对环境影响过程的分析	吴宏章,黄维秋,杨光,赵晨露,王英霞,蔡道飞(4712)
基于 Tanks 4.0.9d 模型的石化储罐 VOCs 排放定量方法研究	李靖,王敏燕,张健,何万清,聂磊,邵霞(4718)
铜铈复合氧化物上石化行业典型 VOCs 的氧化行为与动力学	陈长伟,于艳科,陈进生,何焜(4724)
KrBr ⁺ 准分子灯直接光解一甲胺气体	赵洁,刘玉海,韦连梅,叶招莲,张善端(4734)
异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究	颜鲁春,刘杰民,付慧婷,孙媛,林文辉(4743)
挥发性有机污染物排放控制标准制订中的关键技术问题研究	江梅,张国宁,任春,邹兰,魏玉霞(4747)
挥发性有机污染物排放控制标准体系的建立与完善	江梅,张国宁,邹兰,魏玉霞,张明慧(4751)
我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究	王铁宇,李奇锋,吕永龙(4756)
固定源废气 VOCs 排放在线监测技术现状与需求研究	王强,周刚,钟琪,赵金宝,杨凯(4764)
石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估	牟桂芹,隋立华,郭亚逢,马传军,杨文玉,高阳(4771)
植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展	谢军飞,李延明(4779)
基于动态 CGE 的挥发性有机污染物 VOCs 排放预测和控制研究	刘昌新,王宇飞,郝郑平,王铮(4787)
《环境科学》第34卷(2013年)总目录	(4792)
《环境科学》征订启事(4717) 《环境科学》征稿简则(4742) 信息(4528, 4626, 4693, 4700)	

维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性

郭斌¹, 律国黎¹, 任爱玲¹, 杜昭¹, 邢志贤², 韩鹏¹, 高博², 刘淑娅¹

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 河北省环境监测中心站, 石家庄 050021)

摘要: 采用便携式气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 测试了维生素 C 工业废水处理系统各单元环境空气中挥发性有机物 (VOCs) 的污染现状, 分析和总结了挥发性有机物 (VOCs) 的种类特征。结果表明, 废水处理系统中共检测出 32 种物质, 逸散的总挥发性有机物 (TVOCs) 浓度范围为 $0.962\ 9 \sim 32.097\ 0\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。其中, 位于废水处理系统最前端半密闭状态的沉砂池是逸散 VOCs 种类最多、强度最大的单元, 为 25 种, 其总浓度为 $32.097\ 0\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 沉砂池中小分子硫化物所占比例较大, 为 30.02%; 后续处理单元中芳香烃比例较高约占监测总量的 21.06% ~ 31.48%。监测出 VOCs 的主要种类为氯代烃类、酮类, 分别占监测总量的 6.39% ~ 55.80%、10.40% ~ 58.08%, 废水处理系统各单元均监测到丙酮、2-丁酮、正己烷、氯仿、氯苯等 14 种 VOCs, 其中氯乙烯、苯乙烯、1,3-丁二烯 3 种属于高毒性物质, 监测出的氯乙烯浓度超过《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996) 标准, 1,3-丁二烯等多种污染物尚无国家标准限值, 本研究结果可为我国制药废水 VOCs 排放标准的修制提供科学依据。

关键词: 便携式气相色谱-质谱联用仪; 挥发性有机物 (VOCs); 维生素 C; 废水处理系统

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4654-07

Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production

GUO Bin¹, LÜ Guo-li¹, REN Ai-ling¹, DU Zhao¹, XING Zhi-xian², HAN Peng¹, GAO Bo², LIU Shu-ya¹

(1. Institute of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. Hebei Province Environment Monitoring Centre, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Using a portable gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS), the volatile organic compounds (VOCs) pollution in each unit of the wastewater treatment system for vitamin C production was studied, and the species characteristics of volatile organic compounds (VOCs) were analyzed and summarized. The results showed that 32 kinds of volatile organic compounds were identified, and the total mass concentration range of volatilizing VOCs was $0.962\ 9 \sim 32.097\ 0\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. The most species and the largest concentration (25 and $32.097\ 0\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) of volatilizing VOCs were found in grit chamber, which was located in the most front-end of the wastewater treatment system and was in semi-closed state. The proportion of molecular sulfide in the grit chamber was as high as 30.02%; Higher proportions of aromatic hydrocarbons were monitored in the subsequent processing units, with percentages of 21.06% - 31.48%. The main types of VOCs monitored were chlorinated hydrocarbons and ketones, accounting for 6.39% - 55.80% and 10.40% - 58.08% of the total amount, respectively; 14 kinds of VOCs were detected in every unit of the wastewater treatment system; acetone, 2-butanone, n-hexane, chloroform, chlorobenzene etc, among which, vinyl chloride, styrene and 1,3-butadiene belong to the highly toxic substances. The vinyl chloride concentration exceeded the standard of "atmospheric pollutants emission standards" (GB 16297-1996), while 1,3-butadiene and other pollutants have no national standard limits. The results of this study provide a scientific basis for the revision of China's pharmaceutical wastewater VOCs emission standards.

Key words: portable GC/MS; volatile organic compounds (VOCs); vitamin C; wastewater treatment system

挥发性有机物 (VOCs) 是常见的污染物, 它具有成分复杂、多有毒性、部分致癌的特性, VOCs 已成为影响中国大气区域性复合型污染的重要前体物和参与物, 对生态环境和人体健康会造成即时或潜在影响^[1~3]。

制药生产过程中, 原材料投入量大, 产出比小, 其大部分物质最终成为废弃物。产生的“三废”量大、成分复杂、危害严重。尤其制药废水, TOC、COD 浓度高、组成复杂, 酸碱度不稳定, 废水处理流程长, 各单元构筑物结构不同, 且多为局部的无组织排放, 致使整个废水处理系统逸散出的 VOCs 较为

复杂, 由此造成的环境纠纷事件时有发生。随着各国对环境质量要求不断提高, 许多国家都颁布了相应的法令法规来限制 VOCs 的排放。VOCs 的监测分析、污染特性和控制技术成为近年来的研究热点。相关研究有室内外及车内 VOCs 的污染特征^[4,5]、城市环境 VOCs 污染特征^[6~9]、工业区 VOCs 污染特征^[10,11]、行业(半导体、木制家具、印

收稿日期: 2013-02-24; 修订日期: 2013-04-27

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109004)

作者简介: 郭斌(1960~), 男, 教授, 主要研究方向为大气污染控制及废物资源化, E-mail: gbin69@163.com

刷电路板) VOCs 污染特征^[12~14]、城市污水处理厂 VOCs 污染特征^[15~19]等,但还没有形成一种世界公认的 VOCs 评价方法. 针对制药行业维生素 C 废水处理系统中 VOCs 监测与排放特性的研究尚鲜见报道.

随着环境状况现场分析需求的日益增加,虽然实验室台式 GC/MS 能够对 VOCs 进行准确的定性定量分析^[20,21],但由于存在样品的运输、保存等中间环节造成分析结果缺乏即时性,而便携式 GC/MS 将 GC 高分辨能力与 MS 检测器的定性能力相结合,能在现场同时对复杂组分的有机物进行定性定量分析,在环境监测中越来越发挥重要的作用^[22,23]. 研究表明^[24,25],采用内标标准曲线定量法, HAPSITE 便携式 GC/MS 测定结果的准确度和精密度均符合

环境监测分析的要求.

本研究采用便携式 GC-MS 联用仪定性定量监测了某维生素 C 企业污水处理系统各处理单元 VOCs,分析了各单元构筑物环境空气中的 VOCs 种类、浓度、特征污染物等污染特征,以期对制药行业废水处理系统 VOCs 污染的控制技术政策的制订提供依据.

1 材料与方法

1.1 采样点的布设

以河北某维生素 C 企业污水处理系统为研究对象. 该系统采用预处理 + UASB/IC + SBR 工艺(见图 1)处理维生素 C 生产过程产生的发酵提取混合废水,系统污水处理能力为 $22\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.

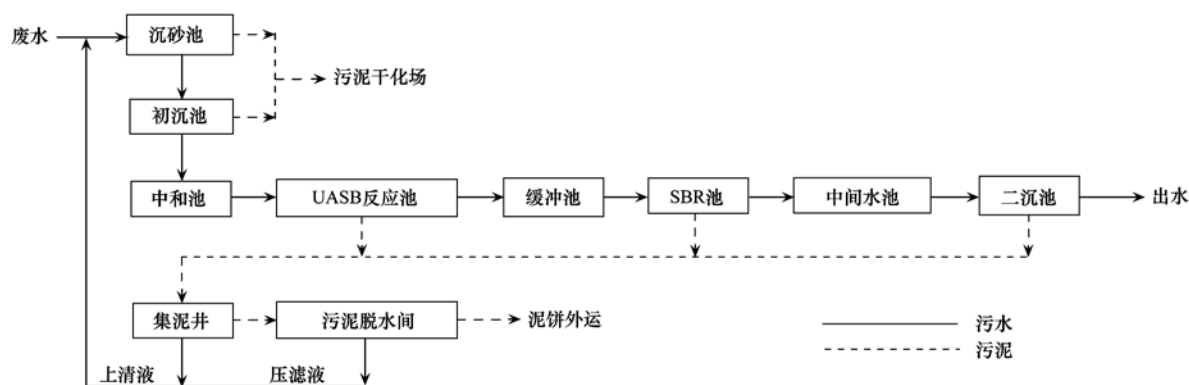


图 1 维生素 C 生产废水处理系统流程示意

Fig. 1 Flow chart of Wastewater treatment system for vitamin C production

为了研究整个废水处理流程中 VOCs 的产生特点,在每个废水处理单元各设一个 VOCs 废气采样点,采样点布置方法按照《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-2006)中无组织排放监测点设置的方法执行,即要求设置采样点于无组织排放源下风向,距排放源 2 ~ 50 m 范围内浓度最高点. 采用 HAPSITE 便携式气相色谱-质谱仪(美国 INFICON 公司)手持探头自动采集大气样品,采样时间 2 min,经浓缩富集后加热解吸导入色谱柱进行分离,采样间隔 4 h,每天各单元采样 3 次,于 2012 年 5 月 15 ~ 21 日连续采样 7 d,共计 189 个样品. 同步记录每次采样时的风向、风速、温度和空气压力等气象参数.

1.2 VOCs 分析方法

采用便携式气相色谱-质谱仪(美国 INFICON 公司)测定废水处理系统环境空气中的 VOCs. GC 色谱柱为 SPB-1 ($30\text{ m}\times0.32\text{ mm}\times1.0\text{ }\mu\text{m}$),内标气溴五氟苯(BPFB, 400×10^{-9}),载气为高纯氮气

(99.999 9%). 初始温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持 7 min,以 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,再以 $15.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持 86 s. MS 为电子电离源(EI);离子化能量 70 eV;四极杆质量分析器;扫描范围 45 ~ 280 u.

2 结果与讨论

2.1 废水处理单元 VOCs 现状监测结果

各废水处理单元逸散的主要 VOCs 及浓度现状监测的平均结果见表 1. 从中可见,维生素 C 废水处理系统环境空气中共检测出 32 种挥发性有机物,各处理单元均监测到 14 种 VOCs:丙酮、2-丁酮、正己烷、氯仿、氯苯、二硫化碳、乙酸乙酯、苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯、间二甲苯(对二甲苯)、苯乙烯、1,3,5-三甲基苯.

半密闭的沉砂池 VOCs 污染较严重,共检出 25 种 VOCs 物质,其周围环境空气中大于 $1.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 VOCs 包括氯乙烯、二硫化碳、2-丁酮、丙酮,质

量浓度在 $1.362\ 1\sim 17.290\ 9\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间; $0.1\sim 1.0\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 VOCs 有乙酸乙酯、1,3,5-三甲基苯、正己烷、苯,其质量浓度在 $0.1110\sim 0.3742\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间;氯仿、邻二甲苯、间二甲苯(对二甲苯)、苯乙烯、氯苯、甲基异丁酮、2-己酮、庚烷、甲苯、乙苯、四氢呋喃、溴甲烷、1,2,4-三氯苯、环己烷等 VOCs 的质量浓度在 $0.01\sim 0.1\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间;1,1,2-三氯乙烷、三氯乙烯、1,2-二氯丙烷等 VOCs 的质量浓度小于 $0.01\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

由结果可知,1,1,2-三氯乙烷、三氯乙烯仅在废水处理系统前期沉沙池环境空气中监测到,溴甲烷在废水处理系统前期沉沙池、初沉池监测到,系统中后期未能监测到;1,3-丁二烯仅在生物处理及二沉池中监测到,废水处理系统前期未检出;二氯甲烷在初沉池、中和池与 UASB 反应池中监测到,

废水处理后期未检出.说明废水处理系统各处理单元沉沙池、初沉池、中和池、UASB 反应池、缓冲池、SBR 池、中间池、二沉池、污泥脱水间等构筑物挥发的 VOCs 种类和浓度存在差异.进一步说明制药废水处理系统中产生的 VOCs 主要两类^[15]:一类是直接从污水中挥发出来的,如直接或间接的来自排入下水道的生产废水、冲洗废水及生活污水中含有的溶剂、石油衍生物及其它可挥发的有机成分直接造成了 VOCs 问题;另一类是来自于污水中有机物由于微生物的生物化学反应而新形成的分解物,主要是大分子有机物在厌氧消化的过程中被微生物分解为新的小分子物质.同时,废水处理系统 TOC 的去除并非完全被微生物去除,而是通过某种方式逸散出来^[16].在废水的收集与处理系统中,VOCs 主要有挥发和吹脱两种逸散方式^[17].

表 1 各单元环境空气中 VOCs 检测结果¹⁾
Table1 Concentrations of VOCs in each unit

序号	VOCs 物质	监测点位浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$							
		沉砂池	初沉池	中和池	UASB 反应池	缓冲池	SBR 池	中间池	二沉池
1	丙酮	1.362 1	0.163 8	0.260 2	0.593 4	0.617 5	0.620 5	0.605 7	0.611 4
2	2-丁酮	1.890 0	0.053 0	0.048 2	0.054 6	0.046 4	0.039 6	0.040 3	0.037 4
3	甲基异丁酮	0.056 0	—	—	—	0.027 0	0.028 8	0.026 7	—
4	2-己酮	0.029 3	—	0.027 2	0.028 3	0.028 6	—	—	0.028 5
5	1,3-丁二烯	—	—	—	0.055 0	0.083 0	0.041 3	—	0.032 1
6	二氯甲烷	—	0.012 3	0.012 6	0.002 2	—	—	—	—
7	正己烷	0.186 5	0.038 7	0.020 1	0.023 1	0.027 1	0.023 4	0.022 5	0.031 9
8	环己烷	0.010 2	0.001 3	0.001 6	0.002 2	0.005 4	0.002 6	0.001 3	0.003 1
9	庚烷	0.010 5	0.005 4	—	0.005 8	0.007 6	—	—	0.007 9
10	氯乙烯	17.720 9	0.077 7	0.050 8	—	0.143 8	0.075 1	0.049 9	—
11	氯仿	0.096 8	0.024 3	0.016 0	0.007 2	0.011 7	0.025 4	0.013 9	0.022 9
12	氯苯	0.047 8	0.048 0	0.047 4	0.047 7	0.047 9	0.047 8	0.047 4	0.048 1
13	1,3-二氯苯	—	0.014 2	0.014 0	—	—	—	—	—
14	1,4-二氯苯	—	0.036 1	0.036 1	0.036 0	—	—	0.036 0	—
15	1,2-二氯苯	—	0.086 4	0.086 2	—	—	—	—	—
16	氯化苯	—	—	—	—	0.000 7	—	—	—
17	1,2,4-三氯苯	0.034 6	0.035 6	0.034 6	0.034 8	—	—	0.034 8	—
18	1,1,2-三氯乙烷	0.005 3	—	—	—	—	—	—	—
19	三氯乙烯	0.002 4	—	—	—	—	—	—	—
20	1,2-二氯丙烷	0.003 5	0.001 4	0.001 4	0.002 9	0.003 3	—	0.004 3	0.003 6
21	二硫化碳	9.634 5	0.012 6	0.005 9	0.014 1	0.022 4	0.017 7	0.010 3	0.014 2
22	四氢呋喃	0.052 7	—	—	0.024 2	0.030 7	0.019 7	—	0.019 3
23	甲基叔丁基醚	—	—	—	—	0.007 3	—	—	—
24	溴甲烷	0.051 1	0.043 0	—	—	—	—	—	—
25	乙酸乙酯	0.374 2	0.008 8	0.007 8	0.008 2	0.007 5	0.004 2	0.006 3	0.005 7
26	苯	0.111 0	0.011 3	0.008 0	0.012 2	0.014 4	0.010 8	0.013 4	0.012 5
27	甲苯	0.042 6	0.025 9	0.019 6	0.016 5	0.021 6	0.019 3	0.014 7	0.020 7
28	乙苯	0.019 6	0.014 0	0.013 1	0.013 5	0.015 1	0.012 9	0.012 5	0.013 1
29	间二甲苯,对二甲苯	0.074 6	0.014 1	0.013 8	0.012 1	0.013 8	0.010 9	0.009 0	0.010 5
30	苯乙烯	0.068 0	0.036 7	0.035 0	0.036 9	0.045 1	0.041 9	0.040 1	0.043 5
31	邻二甲苯	0.085 7	0.075 6	0.075 3	0.075 2	0.075 8	0.075 0	0.074 6	0.074 9
32	1,3,5-三甲基苯	0.127 2	0.126 8	0.127 9	0.127 9	0.127 0	0.126 7	0.126 6	0.126 8
∑	TVOCs	32.097 0	0.967 0	0.962 9	1.234 0	1.430 3	1.243 8	1.190 4	1.167 9

1) “—”为未检出

2.2 各单元总挥发性有机物 (TVOCs) 变化趋势

各单元总挥发性有机物 (TVOCs) 变化趋势见图 2.

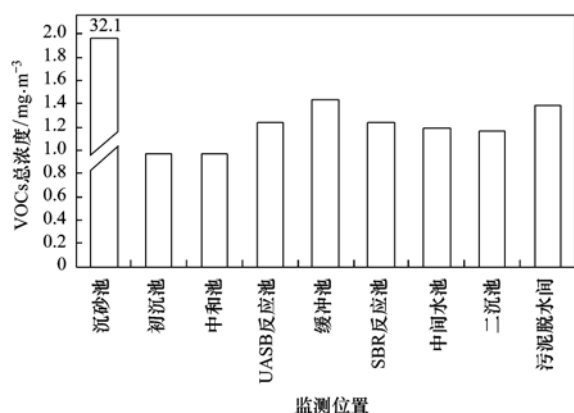


图2 废水处理系统总 VOCs 变化

Fig. 2 Variations of the total VOCs in the wastewater treatment system

从表 1 与图 2 可以看出,沉砂池是整个废水处理系统产生 VOCs 源强最大的处理单元. 车间生产废水、清洗水、集泥井的上清液以及污泥脱水的压滤液,污水中含有大量发酵液中残留的菌丝体、蛋白质,造成沉砂池有机物浓度高,沉砂池为半密闭状态,剧烈的曝气作用以吹脱方式逸散大量的 VOCs,同时伴有表面挥发的方式,废水进入初沉池之前大部分 VOCs 已被吹脱出来,初沉池是由于溢流堰到出水渠水面存在落差致使 VOCs 逸散,因此 $\rho(\text{沉砂池}) > \rho(\text{初沉池})$. 缓冲池因一定程度的鼓风紊流有所增强,加之表面挥发作用致使此单元 VOCs 强度略高,但缓冲池为全密闭状态,因此不是最主要的源强;二级处理系统与深度处理系统主要进行大部分有机物的降解作用,虽然处理单元为敞开状态,产生的 VOCs 强度要小,因此不是主要的源强. 当生物污泥与初沉池污泥一起浓缩时,缺氧条件下处于饥饿状态下的微生物群和大量的营养物质混合会导致高浓度的 VOCs 产生,而用于污泥脱水的压滤机和离心机产生的扰动导致 VOCs 的逸散,另外,压缩污泥脱水的物理过程也会使 VOCs 逸散出来.

2.3 废水处理单元逸散的主要 VOCs 污染物及浓度分布

不同废水处理单元由于运行方式、密闭情况、水面紊流程程度、构筑物面积大小等的不同会对 VOCs 的逸散产生一定的影响. 各处理单元检出的 VOCs 种类、主要污染物及浓度范围见表 2. 氯苯和 2-丁酮在各个监测点均被检出,结合其理化性质,可

能的原因是它们具有较低饱和蒸气压;而氯乙烯在沉砂池的逸散浓度达到了很高的水平,因其还处于整个废水处理系统的最前端,说明该物质在废水中的浓度很高,这与维生素生产过程中使用了大量的这种物质有关.

2.4 主要特征污染物理化特性

在各个处理单元产生浓度较高的 VOCs 物质有:丙酮、1,3,5-三甲基苯、氯乙烯、二硫化碳、2-丁酮、邻二甲苯、苯乙烯、氯苯、1,3-丁二烯. 其物理化学性质见表 3,可见高毒害物质有 3 种,低毒害物质有 6 种,除 1,3-丁二烯无色无臭外,其余均存在各种气味,是造成废水处理系统恶臭/异味的主要原因.

2.5 各处理单元逸散产生的 VOCs 类别分析

从监测结果可以看出,维生素 C 废水处理系统产生的 VOCs 种类主要包括:氯代烃类(二氯丙烷、三氯甲烷、三氯乙烷、氯乙烯、三氯乙烯、氯苯等)、脂肪烃类(正己烷、庚烷、环己烷)、芳香烃类(苯、甲苯、二甲苯、乙苯、1,3,5-三甲基苯、苯乙烯等)、酮类(丙酮、2-丁酮、甲基异丁酮、2-己酮等)、低分子硫代物(二硫化碳)、酯类(乙酸乙酯)、呋喃类、醚类等. 各类 VOCs 浓度及所占的比例见表 4.

由表 4 可知,污染源强最大的沉砂池中氯代烃类、小分子硫化物以及酮类所占比例较大,其余处理单元中,氯代烃类、芳香烃类以及酮类所占比例较大,氯代烃类、酮类、二硫化碳属于易挥发性物质,而芳香烃类物质可生化性较差,导致更多地从废水中逸散出来. 沉砂池中芳香烃类所占比例虽然较小,但其浓度仍大于后续所有单元的排放浓度.

2.6 污染水平分析

结合我国《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996)中涉及的 VOCs 监控浓度、美国、欧洲等相关标准,分析了维生素 C 生产废水处理系统 VOCs 污染物的污染水平见表 5.

通过表 5 可以看出,大部分 VOCs 污染物质的浓度都在国家规定的标准限值以内,但氯乙烯的浓度超出国家规定限制,远远超出了德国 TA-Luft (2002 年版)排放标准限值,且其为高毒害易挥发物质,应重点加以控制并制定针对制药行业的排放限值.

对于废水处理过程中 VOCs 的挥发,当增加废水的流量时,会增加有机物挥发的速度;当增加有机物与废水间的亲和力时,有机物挥发的速度又会

表 2 废水处理单元环境中 VOCs 种类及主要污染物

Table 2 Types and main pollutants of VOCs in the environment of the units

监测位置	构筑物 密闭情况	检测出的 VOCs			主要 VOCs 污染物	浓度范围 /mg·m ⁻³
		总数	均监测出	非共性(单元出现)		
沉砂池	半密闭	25		11(氯乙烯、甲基异丁酮、四氢呋喃、溴甲烷、1,2,4-三氯苯、2-己酮、乙苯、庚烷、环己烷、1,1,2-三氯乙烷、1,2-二氯丙烷、三氯乙烯)	氯乙烯、二硫化碳、2-丁酮、丙酮 乙酸乙酯、1,3,5-三甲基苯、正己烷、苯 氯仿、邻二甲苯、间二甲苯(对二甲苯)、苯乙烯、甲基异丁酮、四氢呋喃、溴甲烷	17.290 9~1.362 1 0.374 2~0.111 0 0.096 8~0.051 1
初沉池	敞开	24		10(环己烷、1,2-二氯丙烷、庚烷、二氯甲烷、1,3-二氯苯、1,2,4-三氯苯、1,4-二氯苯、溴甲烷、氯乙烯、1,2-二氯苯、)	丙酮、1,3,5-三甲基苯 1,2-二氯苯、氯乙烯、邻二甲苯、2-丁酮	0.163 4~0.126 8 0.086 4~0.053 0
中和池	敞开	23		9(环己烷、1,2-二氯丙烷、二氯甲烷、1,3-二氯苯、2-己酮、1,2,4-三氯苯、1,4-二氯苯、氯乙烯、1,2-二氯苯)	丙酮、1,3,5-三甲基苯 1,2-二氯苯、氯乙烯、邻二甲苯、2-丁酮	0.260 2~0.127 9 0.086 2~0.048 2
UASB 反应池	全密闭	23	共 14 种 (丙酮、二硫化碳、2-丁酮、乙酸乙酯、正己烷、氯仿、苯、甲苯、氯苯、乙苯、间二甲苯、苯乙烯、邻二甲苯、1,3,5-三甲基苯)	9(环己烷、二氯甲烷、1,2-二氯丙烷、庚烷、四氢呋喃、2-己酮、1,2,4-三氯苯、1,4-二氯苯、1,3-丁二烯)	丙酮、1,3,5-三甲基苯 邻二甲苯、1,3-丁二烯、2-丁酮	0.593 4~0.127 9 0.075 2~0.054 6
缓冲池	全密闭	24		10(氯化苯、1,2-二氯丙烷、环己烷、甲基叔丁基醚、庚烷、甲基异丁酮、2-己酮、四氢呋喃、1,3-丁二烯、氯乙烯)	丙酮、氯乙烯、1,3,5-三甲基苯 1,3-丁二烯、邻二甲苯、2-丁酮、氯苯、苯乙烯	0.617 5~0.127 0 0.083 0~0.045 1
SBR 池	敞开	19		5(环己烷、四氢呋喃、甲基异丁酮、1,3-丁二烯、氯乙烯)	丙酮、1,3,5-三甲基苯 氯乙烯、邻二甲苯、氯苯、1,3-丁二烯、苯乙烯	0.620 5~0.126 7 0.075 1~0.041 9
中间池	敞开	20		6(环己烷、1,2-二氯丙烷、甲基异丁酮、1,2,4-三氯苯、1,4-二氯苯、氯乙烯)	丙酮、1,3,5-三甲基苯 邻二甲苯、氯乙烯、氯苯、2-丁酮、苯乙烯	0.605 7~0.126 6 0.074 6~0.040 1
二沉池	敞开	20		6(环己烷、1,2-二氯丙烷、庚烷、四氢呋喃、2-己酮、1,3-丁二烯、)	丙酮、1,3,5-三甲基苯 邻二甲苯、氯苯、苯乙烯	0.611 4~0.126 8 0.074 9~0.043 5
污泥脱水间	半密闭	22		8(1,2-二氯丙烷、庚烷、1,3-二氯苯、甲基异丁酮、2-己酮、1,2,4-三氯苯、1,4-二氯苯、1,2-二氯苯)	丙酮、1,3,5-三甲基苯 1,2-二氯苯、邻二甲苯、氯苯、2-丁酮、苯乙烯	0.706 0~0.126 7 0.086 0~0.040 8

表 3 主要特征污染因子的理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of the major characteristic contaminants

中文名称	分子式	相对分子质量	气味特征	沸点 /℃	饱和蒸气压 /kPa	水溶性	毒性 (欧洲标准)
丙酮	C ₃ H ₆ O	58	具有令人愉快的气味 (辛辣甜味)	56.5	53.32/39.5℃	与水混溶	低毒害
1,3,5-三甲基苯	C ₉ H ₁₂	120	有特殊刺激性气味	165	1.33/48.2℃	不溶于水	低毒害
氯乙烯	C ₂ H ₃ Cl	62	有醚样气味	-13.9	346/25℃	微溶于水	高毒害
二硫化碳	CS ₂	76	令人不愉快的烂萝卜味	46.5	53.32/28℃	不溶于水	低毒害
2-丁酮	C ₄ H ₈ O	72	有丙酮的气味	80	9.49/20℃	可溶于水	低毒害
邻二甲苯	C ₈ H ₁₀	106	有类似甲苯的臭味	144	1.33/28℃	不溶于水	低毒害
苯乙烯	C ₈ H ₈	104	有特殊香气	145	1.33/14℃	不溶于水	高毒害
氯苯	C ₆ H ₅ Cl	112	具有不愉快的苦杏仁味	132	1.33/20℃	不溶于水	低毒害
1,3-丁二烯	C ₄ H ₆	54	无色无臭	-4.5	245/21℃	不溶于水	高毒害

表 4 工艺各单元主要 VOCs 种类及质量浓度

Table 4 Kinds and concentrations of the main VOCs in each unit of the combined process

序号	VOCs 种类	项目	监测点位							
			沉砂池	初沉池	中和池	UASB 反应池	缓冲池	SBR 池	中间池	二沉池
1	氯代烃类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	17.911 3	0.323 7	0.286 5	0.128 6	0.207 4	0.148 3	0.186 3	0.074 6
		比例/%	55.80	33.47	29.76	10.42	14.50	11.93	15.65	6.39
2	酮类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	3.337 4	0.216 8	0.335 6	0.676 3	0.719 5	0.688 9	0.672 7	0.677 3
		比例/%	10.40	22.42	34.86	54.81	50.29	55.40	56.52	57.98
3	小分子硫化物	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	9.634 5	0.012 6	0.005 9	0.014 1	0.022 4	0.017 7	0.010 3	0.014 2
		比例/%	30.02	1.30	0.61	1.14	1.57	1.42	0.87	1.22
4	芳香烃类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.528 7	0.304 4	0.292 7	0.294 3	0.312 8	0.297 5	0.290 9	0.302
		比例/%	1.65	31.48	30.40	23.85	21.86	23.92	24.44	25.85
5	酯类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.374 2	0.008 8	0.007 8	0.008 2	0.007 5	0.004 2	0.006 3	0.005 7
		比例/%	1.17	0.91	0.81	0.66	0.52	0.34	0.53	0.49
6	脂肪烃类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.207 2	0.057 7	0.034 3	0.088 3	0.123 1	0.067 3	0.023 8	0.075
		比例/%	0.65	5.97	3.56	7.16	8.60	5.41	2.00	6.42
7	呋喃类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.0527	—	—	0.024 2	0.030 7	0.019 7	—	0.019 3
		比例/%	0.16	—	—	1.96	2.15	1.58	—	1.65
8	醚类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	—	—	—	—	0.007 3	—	—	—
		比例/%	—	—	—	—	0.51	—	—	—
9	溴代烃类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.051 1	0.043	—	—	—	—	—	—
		比例/%	0.16	4.45	—	—	—	—	—	—

表 5 VOCs 监测浓度与相关标准的对比

Table 5 Comparison of the concentrations monitored for VOCs and the relevant standards

VOCs 物质	浓度范围 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	国家标准 (GB 16297-1996)	美国 ¹⁾		德国 TA-Luft ²⁾ (2002 年版)
			适用等级	临界值 具体要求	
TVOC(TC)	0.962 9~32.097 0	5.0(非甲烷总烃)			50
苯	0.008 0~0.111 0	0.5	制药企业废水处 理设施单元所有 测定点总 HAP 排放负荷大于 1 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	HAPs 在监测口 的含量(ω) $\leq$ $1\,300\times 10^{-6}$ HAPs 削减率 $\geq 99\%$	Ⅲ
甲苯	0.014 7~0.042 6	3			Ⅱ
二甲苯	0.083 6~0.160 3	1.5			Ⅱ
氯苯	0.047 4~0.048 1	0.5			Ⅱ
氯乙烯	0.049 9~17.720 9	0.75			Ⅲ
二硫化碳	0.005 9~9.634 5	0.5			Ⅱ
丙酮	0.163 8~1.362 1	—			Ⅲ
2-丁酮	0.037 4~1.890 0	—	废水处理所有设 施的排放负荷大 于 1 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	HAPs 在监测口 的含量(ω) $\leq$ $10\,000\times 10^{-6}$	Ⅲ
苯乙烯	0.035 0~0.068 0	—			Ⅱ
1,3-丁二烯	0.032 1~0.083 0	—			Ⅲ
1,3,5-三甲基苯	0.126 6~0.127 9	—			Ⅱ

1)表中 HAPs 指美国《制药生产点有害气体污染物的最终排放标准和规则》中列出的 57 种有机有毒空气污染物; 2)表中德国标准中级别Ⅱ的物质其排放限值为 0.1 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 级别Ⅲ的物质其排放限值为 0.15 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

降低. 总体来说,影响废水处理系统中 VOCs 挥发的因素主要有废水的温度、流量、废水处理单元的尺寸、挥发性有机物的浓度、沸点及其蒸气压等.

3 结论

(1)制药行业废水处理系统中 VOCs 的产生有静止开放表面的挥发、机械搅动造成的挥发、曝气设备造成的挥发及跌落系统产生的挥发几个方面的原因. 挥发量与挥发速率的大小与制药生产过程中

有机溶剂及其它原料使用量的大小、废水中存在以及废水处理中产生的 VOCs 物质的理化性质有关. 另外,处理构筑物的运行方式、密闭情况也会影响 VOCs 的产生量及产生速率.

(2)从维生素 C 废水处理系统 VOCs 的检测结果来看,检测到的 32 种 VOCs 物质包括氯代烃类、脂肪烃类、芳香烃类、小分子硫代物、酮类、酯类等. 虽然大部分 VOCs 物质浓度都在国家规定的最高允许排放限值以内,但逸散的特征污染因子中,高

毒害的氯乙烯、苯乙烯、1,3-丁二烯 3 种物质具有极高的健康风险,检测到的浓度最高物质氯乙烯,其浓度为 $17.7209\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,浓度远超出国标规定的限值,已经达到了危害人体健康的三级浓度水平,会使人体产生各种不适症状,需要针对个别污染物制订严格的排放限值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Dechapanya W, Eusebi A, Kimura Y, *et al.* Secondary organic aerosol formation from aromatic precursors. 1. Mechanisms for individual hydrocarbons [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(16): 3662-3670.
- [3] Wu B Z, Feng T Z, Sree U, *et al.* Sampling and analysis of volatile organics emitted from wastewater treatment plant and drain system of an industrial science park[J]. Analytica Chimica Acta, 2006, **576**(1): 100-111.
- [4] Parra M A, Elustondo D, Bermejo R, *et al.* Quantification of indoor and outdoor volatile organic compounds (VOCs) in pubs and cafés in Pamplona, Spain[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(27): 6647-6654.
- [5] 余刚,张昌,郑万兵. 汽车内部空气污染成因及控制[J]. 环境科学与管理, 2010, **35**(4): 90-93.
- [6] Xiang Y, Delbarre H, Sauvage S, *et al.* Development of a methodology examining the behaviours of VOCs source apportionment with micro-meteorology analysis in an urban and industrial area[J]. Environmental Pollution, 2012, **162**: 15-28.
- [7] 刘全,王跃思,吴方堃,等. 长沙大气中 VOCs 研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3543-3548.
- [8] 刘雅婷,彭跃,白志鹏,等. 沈阳市大气挥发性有机物 (VOCs) 污染特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2777-2785.
- [9] 朱丽波,徐能斌,应红梅,等. 宁波市环境空气中 VOCs 污染状况及变化趋势分析[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(5): 24-28.
- [10] 徐锋,钱晓曙,孙志刚,等. 绍兴市某工业区大气中挥发性有机物污染状况的研究[J]. 中国环境监测, 2011, **27**(2): 45-47.
- [11] 韩博,吴建会,王凤炜,等. 天津滨海新区工业源 VOCs 及恶臭物质排放特征[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(11): 1776-1781.
- [12] 徐捷,魏海萍,修光利,等. 半导体行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究[J]. 环境科学与管理, 2007, **32**(10): 37-41, 44.
- [13] 谭赞华. 广东省木制家具行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究[J]. 广东化工, 2012, **39**(1): 45-46, 76.
- [14] 马英歌. 印刷电路板 (PCB) 厂挥发性有机物 (VOCs) 排放指示物筛选[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 2967-2972.
- [15] Gostelow P, Parsons S A, Stuetz R M. Odour measurements for sewage treatment works [J]. Water Research, 2001, **35**(3): 579-597.
- [16] 王新明,李顺诚,傅家谟,等. 广州大坦沙污水处理厂挥发有机物的去除及其向空气中的排放[J]. 环境化学, 1999, **18**(2): 157-162.
- [17] Chou M S, Cheng W H. Gaseous emissions and control in wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering Science, 2005, **22**(5): 591-600.
- [18] 王源,杨俊晨,白秀梅. 寒地污水厂曝气池 VOCs 逸散速率研究[J]. 低温建筑技术, 2011, **33**(10): 18-20.
- [19] 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[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3571-3576.
- [20] 梁榕源. 预冷冻浓缩系统与气相色谱-质谱联用测定空气中挥发性有机物[J]. 中国环境监测, 2008, **24**(1): 17-20.
- [21] 李振国. 采样罐采样预冷浓缩气相色谱-质谱法测定环境空气中挥发性有机物[J]. 光谱实验室, 2008, **25**(3): 409-411.
- [22] 吕天峰,许秀艳,梁宵,等. 便携式 GC-MS 在应急监测中的应用[J]. 中国环境监测, 2010, **26**(6): 36-41.
- [23] 吕怡兵,孙晓慧,付强. 便携式气相色谱-质谱仪测定空气中挥发性有机污染物的准确性[J]. 色谱, 2010, **28**(5): 470-475.
- [24] 季蕴佳,吴诗剑,周婷,等. 便携式气相色谱-质谱的特点及与实验室仪器的比较[J]. 环境科学导刊, 2008, **27**(2): 94-96.
- [25] 付强,吕怡兵,吕天峰,等. 北京市车辆管制前后大气中挥发性有机污染物的变化[J]. 环境化学, 2008, **27**(6): 826-829.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (4503)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China	AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu (4504)
Pollution Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Downtown	ZHAI Zeng-xiu, ZOU Ke-hua, LI Wei-fang, <i>et al.</i> (4513)
Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer	YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (4519)
Estimation of the Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Shanghai in Spring	CUI Hu-xiong (4529)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from the Typical Anthropogenic Sources in Sichuan Province	HAN Li, WANG Xing-rui, HE Min, <i>et al.</i> (4535)
Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City	HUANG Bi-jie (4543)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs During Winter Haze in Beijing	DUAN Jing-chun, PENG Yan-chun, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (4552)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China	LI Lei, LI Hong, WANG Xue-zhong, <i>et al.</i> (4558)
Health Risk Assessment of VOCs from a Furniture Mall in Tianjin	ZHANG Yin, WANG Xiu-yan, GAO Shuang (4565)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Recycled Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Industry	WANG Zhe-ming, XU Zhi-rong, YE Hong-yu, <i>et al.</i> (4571)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, PANG Bo, <i>et al.</i> (4577)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory	CUI Ru, MA Yong-liang (4585)
Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings	ZENG Pei-yuan, LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, <i>et al.</i> (4592)
Index Assessment of Airborne VOCs Pollution in Automobile for Transporting Passengers	CHEN Xiao-kai, CHENG He-ming, LUO Hui-long (4599)
Study on the Chemical Compositions of VOCs Emitted by Cooking Oils Based on GC-MS	HE Wan-qing, NIE Lei, TIAN Gang, <i>et al.</i> (4605)
Health-based Risk Assessment in the Excavating Process of VOCs Contaminated Site	FANG Zeng-qiang, GAN Ping, YANG Le, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Gaseous Pollutants Distribution During Remedial Excavation at a Volatile Organic Compound Contaminated Site	GAN Ping, YANG Yue-wei, FANG Zheng-qiang, <i>et al.</i> (4619)
Factors Affecting Benzene Diffusion from Contaminated Soils to the Atmosphere and Flux Characteristics	DU Ping, WANG Shi-jie, ZHAO Huan-huan, <i>et al.</i> (4627)
Effects of Soil Compositions on Sorption and Desorption Behavior of Tetrachloroethylene in Soil	HU Lin, QIU Zhao-fu, HE Long, <i>et al.</i> (4635)
Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes	CHEN Xi-chao, LUO Qian, CHEN Hu, <i>et al.</i> (4642)
Characteristics and Evaluation of Volatile Organic Compounds Discharge in Typical Enterprise Wastewater in Hangzhou City	CHEN Feng, XU Jian-fen, TANG Fang-liang, <i>et al.</i> (4649)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production	GUO Bin, LÜ Guo-li, REN Ai-ling, <i>et al.</i> (4654)
Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4661)
Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation	ZHANG Chao, ZHAO Meng-sheng, ZHANG Li-li, <i>et al.</i> (4669)
Removal Characteristics of DCM by Biotrickling Filter and Biofilter	PAN Wei-long, YU Jian-ming, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (4675)
Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves	WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (4684)
Treatment of Organic Waste Gas by Adsorption Rotor	ZHU Run-ye, ZHENG Liang-wei, MAO Yu-bo, <i>et al.</i> (4689)
Study on Adsorption Properties of Organic Vapor on Activated Carbons	CAI Dao-fei, HUANG Wei-qiu, WANG Dan-li, <i>et al.</i> (4694)
Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration	SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen (4701)
Adsorption Characteristics of Acetone and Butanone onto Honeycomb ZSM-5 Molecular Sieve	DU Juan, LUAN Zhi-qiang, XIE Qiang, <i>et al.</i> (4706)
Analysis of the Distribution of VOCs Concentration Field with Oil Static Breathing Loss in Internal Floating Roof Tank	WU Hong-zhang, HUANG Wei-qiu, YANG Guang, <i>et al.</i> (4712)
Study on the Quantitative Estimation Method for VOCs Emission from Petrochemical Storage Tanks Based on Tanks 4.0.9d Model	LI Jing, WANG Min-yan, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (4718)
Oxidation Behavior and Kinetics of Representative VOCs Emitted from Petrochemical Industry over CuCeO _x Composite Oxides	CHEN Chang-wei, YU Yan-ke, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (4724)
Direct Photolysis of Methylamine Gas by KrBr [*] Excilamp	ZHAO Jie, LIU Yu-hai, WEI Lian-mei, <i>et al.</i> (4734)
Study on the Relationship Between Odor Intensity and Components Concentrations of Odor Mixture	YAN Lu-chun, LIU Jie-min, FU Hui-ting, <i>et al.</i> (4743)
Study on Key Technical Problems in the Development of Volatile Organic Pollutants Emission Standards	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, REN Chun, <i>et al.</i> (4747)
Establishment and Improvement of Emission Control Standard System of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZOU Lan, <i>et al.</i> (4751)
Characteristics and Countermeasures of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China	WANG Tie-yu, LI Qi-feng, LÜ Yong-long (4756)
Status and Needs Research for On-Line Monitoring of VOCs Emissions from Stationary Sources	WANG Qiang, ZHOU Gang, ZHONG Qi, <i>et al.</i> (4764)
Evaluation of Treatment Technology of Odor Pollution Source in Petrochemical Industry	MU Gui-qin, SUI Li-hua, GUO Ya-feng, <i>et al.</i> (4771)
Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants	XIE Jun-fei, LI Yan-ming (4779)
Study of VOCs Emission Prediction and Control Based on Dynamic CGE	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (4787)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行