

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫酸脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析

李嫣¹, 王浙明², 宋爽¹, 徐志荣^{2*}, 许明珠², 徐威力³

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310014; 2. 浙江省环境保护科学设计研究院, 杭州 310007; 3. 台州市环境监测中心站, 台州 318000)

摘要:以浙江台州 6 家典型化学合成类制药企业为代表,对其排放工艺废气中的 18 项挥发性有机物(VOCs)特征污染物(如甲苯、甲醛、二氯甲烷等)进行监测和分析,并采用臭氧产生潜力(OPP)和健康风险评价指标对 VOCs 所产生的环境与健康危害进行初步的评价.结果表明,化学合成类制药企业排放的总 VOCs 浓度为 $14.9 \sim 308.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其产生环境危害的 OPP 值为 $3.1 \sim 315.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,主要贡献物质为甲苯、四氢呋喃、乙酸乙酯等 6 种物质,存在较大的潜在环境危害.另外,健康危害中的非致癌风险指数和总致癌风险指数介于 $9.48 \times 10^{-7} \sim 4.98 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 和 $3.17 \times 10^{-5} \sim 6.33 \times 10^{-3}$ 之间,主要是苯、甲醛和二氯甲烷这 3 种致癌物.

关键词:化学合成类制药;挥发性有机物(VOCs);排放特征;臭氧产生潜力;健康风险评价

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3663-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.10.004

Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry

LI Yan¹, WANG Zhe-ming², SONG Shuang¹, XU Zhi-rong², XU Ming-zhu², XU Wei-li³

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Province Academy of Environmental Science, Hangzhou 310007, China; 3. Taizhou Environmental Monitoring Centre, Taizhou 318000, China)

Abstract: In this study, volatile organic compounds (VOCs) released from chemical synthesis pharmaceutical industry in Taizhou, Zhejiang province were analyzed quantitatively and qualitatively. The total volatile organic compounds (TVOCs) was in the range of $14.9 \sim 308.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Evaluation models of ozone formation potentials (OPP) and health risk assessment were adopted to preliminarily assess the environmental impact and health risk of VOCs. The results showed that the values of OPP of VOCs were in the range of $3.1 \sim 315.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, based on the maximum incremental reactivity, the main principal contribution was toluene, tetrahydrofuran (THF), acetic ether etc. The non-carcinogenic risk and the carcinogen risk fell in the ranges of $9.48 \times 10^{-7} \sim 4.98 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ and $3.17 \times 10^{-5} \sim 6.33 \times 10^{-3}$. The principal contribution of VOCs was benzene, formaldehyde and methylene chloride.

Key words: chemical synthesis pharmaceutical; volatile organic compounds (VOCs); emission characteristics; ozone formation potentials (OPP); health risk assessment

挥发性有机物(VOCs)的大量排放不仅影响了空气环境质量而且直接或间接地影响人体健康.一些具有较强活性的 VOCs 在一定条件下与氮氧化物发生光化学反应,引起大气中臭氧浓度增加^[1,2];或与大气中的自由基反应形成二次气溶胶污染,对大气中 O₃ 和灰霾等空气污染的形成功起到非常重要的作用,从而间接地影响了人体健康^[3-5].另外,部分 VOCs 本身具有毒性和致癌性,属于有害空气污染物,对人体的健康造成直接的危害^[6,7].

化学合成类制药工业是重要的工业 VOCs 排放源.根据文献[8]的调研统计,2009 年以 VOCs 为原料的工艺过程中,化学合成类制药工业排放 VOCs

达到 22 万 t,占排放估算总量的 7.4%.另外,化学合成制药生产过程中使用到大量的原辅料,大部分为有机溶剂,且含有一些“三致物质”^[9].作为化学原料药生产大省的浙江,化学合成类制药企业排放的 VOCs 在全省 VOCs 排放总量中占举足轻重的作用,也是需重点治理的 VOCs 排放行业.在《浙江省环境保护地方标准建设“十二五”规划》中,将其列为浙江省“十二五”期间标准工作的重点项目^[10].为此,本研究选取浙江台州具代表性的 6 家企业作为

收稿日期: 2014-03-11; 修订日期: 2014-04-24

基金项目: 工业企业 VOCs 排放标准研究项目(2013A003); 浙江省医化行业污染物排放标准前期研究项目(2010A03)

作者简介: 李嫣(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境政策与标准,E-mail: leeyan90@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zhirong_x@gmail.com

对象,结合其原辅料使用情况,对其所释放的工艺废气 VOCs 进行监测,并分析其排放特征、环境和健康风险等,旨在为化学制药类行业 VOCs 减排、合理选择排放控制技术及后续地方标准的制订提供基础信息.

所谓的化学合成类制药是指以化学原料为主要起始反应物,通过化学反应合成生产药物中间体或对中间体结构进行改造和修饰,得到目标产物,然后

经脱保护基、提取分离、精制和干燥等工序得到最终产品.其生产工艺及产排污节点如图 1 所示.从中可大致反映出化学合成类制药行业废气主要来源于以下 3 个方面:①合成反应过程中有机溶剂挥发;②提取和精制过程中有机溶剂挥发;③干燥过程中粉尘和有机溶剂挥发.除此之外还包括企业污水处理厂和固废堆场产生的一些恶臭气体及挥发的残留有机溶剂.

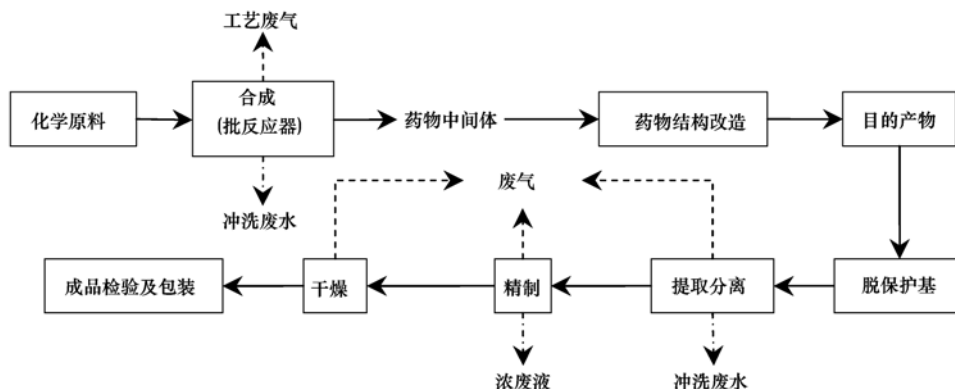


图 1 化学合成类制药生产工艺及排污节点

Fig. 1 Production processes and pollution discharge nodes in chemical synthetic pharmacy

1 材料与方法

1.1 监测对象与监测指标

采样区域选择了浙江省化学合成类制药产业高度集中的台州,选取了其中 6 家具有典型代表性企业为研究对象.以下分别简称为 A、B、C、D、E 和 F.在废气处理工艺上,所选的企业采用了目前较为先进废气处理工艺,其中 A 和 B 采用蓄热式催化燃烧工艺(regenerative catalytic oxidizer, RCO),C、D 和 E 采用蓄热式燃烧工艺(regenerative thermal oxidizer, RTO),F 则采用了等离子体+催化氧化处理工艺(双氧水+浓硫酸).

根据前期对浙江省化学合成类制药原辅料的调查统计,结合 6 家企业的实际原料使用情况,筛选了苯、甲苯、二甲苯、甲醛、二氯甲烷、三氯甲烷、乙酸乙酯、甲醇、乙醇、乙酸、四氢呋喃(THF)、乙腈、二甲基甲酰胺(DMF)、异丙醇、丙酮、丙烯腈、吡啶和乙酸丁酯这 18 项有机物进行监测分析.

1.2 样品采集与分析

VOCs 的采样点均设置在 6 家企业废气处理系统总排放口,并在企业正常运行的情况下,每隔 15 min 取一个样,连续取样 6 次.样品的采集及测定分析均委托于台州市环境监测站.采用过程中记录排

气筒高度,气体温度和湿度,并参考相关的监测和分析方法采样,其中除甲醛参考国家已发布环境保护标准测定外^[11],其余均参考文献^[12].废气中 VOCs 的浓度通过温度和湿度换算后,以标准状态下干气浓度表示.

1.3 VOCs 风险评价

对流层中的臭氧是大气发生光化学烟雾的标志性产物,而大气中 VOCs 是参与光化学污染的重要物种^[13].因此可通过 VOCs 对臭氧产生潜力分析来评价 VOCs 对大气环境的影响.目前,评估 VOCs 对臭氧产生的贡献情况常用最大反应活性因子(maximum incremental reactivity, MIR),MIR 反映出某种 VOCs 能产生的最大臭氧浓度^[14-16].VOCs 不仅会增加环境大气氧化性,还可能引发环境大气的毒性,直接或间接的威胁人体健康安全.目前,VOCs 对人体产生的健康风险评价采用美国联邦政府的危险评价管理体系^[17],基于各种 VOCs 本身性质的差异性,参照国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)编制的分类系统将 VOCs 分为非致癌性物质与致癌性物质^[18],并建立相应的评估风险.以上三者的计算方法分别如下公式所示.

(1) 最大反应活性因子

$$c_j^{MIR} = MIR \times c_j \times \mu_j / \mu_{ozone} \tag{1}$$

$$OFP_{MIR} = \sum c_j^{MIR} \tag{2}$$

式中, c_j^{MIR} 为某种 VOCs 能够产生的最大臭氧浓度; MIR 为某种 VOCs 的最大反应活性因子 (O_3/j , $g \cdot g^{-1}$), 取值参考文献[19]; c_j 为某种 VOCs 的质量浓度 ($mg \cdot m^{-3}$); μ_j 和 μ_{ozone} 分别表示某种 VOCs 和臭氧的相对分子质量, OFP_{MIR} 为总 VOCs 能产生的最大臭氧浓度。

(2) 非致癌风险评价

非致癌风险通常以危害指数 (hazard index, HI) 表征, 定义由于暴露造成的长期摄入量与参考剂量的比值. 计算公式如下:

$$HI_j = CDI_j / RfD_j \times 10^{-6} \tag{3}$$

式中, HI 表征 CDI_j 为某种 VOCs 的长期日摄入量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; $\times 10^{-6}$ 为与 RfD 相对应的假设可接受的危险度水平; RfD_j 为某种 VOCs 的参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; 取值参考美国 EPA 综合风险信息系统 (IRIS) 数据库中推荐值^[20], 详见表 1 所示。

考虑到 VOCs 主要通过呼吸途径进入人体, 因此 CDI 的计算公式如下^[21,22]:

$$CDI_j = \frac{c_j \times IR \times ED \times EF}{BW \times AL} \tag{4}$$

式中, c_j 为某种 VOCs 的质量浓度, $mg \cdot m^{-3}$; IR 为吸入空气量, $m^3 \cdot d^{-1}$; ED 为暴露时间, $d \cdot a^{-1}$; EF 为暴

露频率, a; BW 为平均体重, kg; AL 为平均寿命, a.

根据实际情况, 主要接触 VOCs 的人群为企业员工, 因此老人和小孩不在考虑范围内; 并作如下假设: 暴露频率为 30 a; 暴露时间为除去法定节假日的正常工作时间 (250 d), 按 $8 h \cdot d^{-1}$; 吸入空气量为 $19 m^3 \cdot d^{-1}$ ^[23]; 平均体重为 $62.7 kg$ ^[24]; 平均寿命为 70 a^[25]; 人对 VOCs 的吸收率取值 0.63^[25].

(3) 致癌风险评价

致癌风险评价由风险值 (Risk) 表征, 通过人体长期实际暴露浓度与致癌斜率因子的乘积来表示. 计算公式如下:

$$Risk_j = CDI_j \times SF_j \quad (Risk_j \leq 0.01) \tag{5}$$

$$Risk_j = 1 - \exp(-CDI_j \times SF_j) \tag{6}$$

($Risk_j > 0.01$)

式中, SF_j 为某种 VOCs 致癌斜率因子, $(kg \cdot d) \cdot mg^{-1}$, 取值参考 IRIS 数据库中推荐值^[20], 详见表 2 所示. 此外, IRIS 数据库中并未给出甲醛的 SF 推荐值, 本研究参考文献[26]取值为 $4.6 \times 10^{-2} (kg \cdot d) \cdot mg^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 废气排放特征

6 家化学合成类制药企业废气排放监测结果如表 1 所示. 由于 6 家企业目标产品不同故原辅料的使

表 1 废气排放浓度及其反应活性、致癌毒性和毒性因子¹⁾

Table 1 Concentrations of exhaust gas and their reactivity, carcinogenicity and toxic factor										
污染物	IARC	MIR	RfD	SF	A	B	C	D	E	F
苯	1 类	0.72	4.0×10^{-3}	3.5×10^{-2}	<0.036	<0.036	<0.036	<0.036	—	<0.036
甲苯	3 类	4.00	8×10^{-2}		<0.036	18.6	2.09	38.8	0.814	<0.036
二甲苯	3 类	7.74	2×10^{-1}		<0.036	2.61	<0.036	<0.036	—	<0.036
甲醛	1 类	9.46	2×10^{-1}	4.6×10^{-2}	—	0.481	—	—	—	0.666
二氯甲烷	2B 类	0.041	6×10^{-3}	2×10^{-3}	0.594	158.0	14.7	49.8	0.849	0.033
三氯甲烷	2B 类	0.022	1×10^{-2}		41.5	—	—	—	5.1	—
甲醇		0.67	5×10^{-1}		0.28	12.4	0.42	25.3	1.27	5.97
乙醇	1 类	1.53			—	47.5	—	—	12.2	—
乙酸		0.68			—	8.76	—	—	1.83	—
THF		4.31	9×10^{-1}		0.023	—	0.885	—	14.1	3.45
乙腈			6×10^{-2}		<0.102	—	<0.102	—	—	1.277
DMF	3 类		3×10^{-2}		0.421	0.010	—	0.038	$<7.62 \times 10^{-3}$	—
乙酸乙酯		0.63	9×10^{-1}		<0.073	31.9	12.45	1.64	9.16	<0.073
异丙醇	3 类	0.61			—	<0.15	—	—	—	3.93
丙酮		0.36	9×10^{-1}		—	28.1	—	—	3.67	—
丙烯腈	2B 类	2.24			—	<0.2	—	—	—	—
吡啶	3 类		1×10^{-3}		—	—	—	—	<0.254	—
乙酸丁酯		0.83			—	—	—	—	<0.152	—
总 VOCs					42.9	308.6	30.6	115.6	49.2	14.9

1) 废气排放浓度单位: $mg \cdot m^{-3}$; “—”: 企业未用原料, 不监测; IARC: 国际癌症研究中心; 1 类: 对人类致癌; 2B 类: 可能对人体致癌; 3 类: 对人体致癌性尚未归类的物质或混合物; MIR: 最大增量活性因子 (以 $O_3/VOCs$ 计算), 单位为 $g \cdot g^{-1}$; RfD: 参考剂量, $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; SF: 致癌斜率因子, $(kg \cdot d) \cdot mg^{-1}$; 浓度低于最低检出线的物质在计算时均取检出线半值进行计算; 加框数值表示 6 家企业的最大监测浓度; 总 VOCs 为企业各 VOCs 浓度相加

用情况也有明显差异,在监测的 18 项指标中仅有甲苯、甲醇、二氯甲烷和乙酸乙酯这 4 项物质 6 家企业全部使用,而丙烯腈、吡啶和乙酸乙酯均只有 1 家企业使用. 另外,18 种 VOCs 中含有 3 种致癌物和 3 种可能致癌物. 从表 1 中还可知不同化学合成类制药企业所排放的废气中 VOCs 差异明显,总浓度介于 $14.9 \sim 308.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,均值浓度为 $93.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 此外,表 1 中还反映出了部分指标值浓度偏高,如甲苯 $38.8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、二氯甲烷 $158.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、三氯甲烷 $41.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、乙醇 $47.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、乙酸乙酯 $31.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和丙酮 $28.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 更为重要的是,目前上述指标项目中,除甲苯外均没有相应的排放标准,存在较大的环境危害.

2.2 VOCs 的臭氧产生潜力分析

6 家企业废气排放中 VOCs 产生总 OFP 情况如表 2 所示. 从中可见,按最大反应活性因子法计算得 6 家企业的 OFP 值介于 $3.1 \sim 315.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,A 企业最低,D 企业最高,且差异明显. 造成这种差异的原因主要是由于企业使用的原辅料及排放浓度的差异. 图 2 列举了 6 家企业废气 OFP 贡献率排名前 3 的物质,主要为甲苯、四氢呋喃、三氯甲烷和乙酸

乙酯等. 其中,甲苯在 B、C 和 D 企业中均排名第一,各占 56.0%、42.5% 和 94.6%; 四氢呋喃则在企业 E 和 F 中排名第一,各占 82.2% 和 69.7%; A 企业中三氯甲烷排名第一,为 73.5%.

表 2 排放 VOCs 产生的总 OFP 值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 OFP of each company's VOCs on MIR scales

企业	A	B	C	D	E	F
OFP _{MIR}	3.1	255.2	37.8	315.1	111.1	32.1

2.3 VOCs 的健康风险评价

表 3 为 6 家企业产生 VOCs 的非致癌风险总评估值. 从中可以看出 6 家企业非致癌风险指数介于 $9.48 \times 10^{-7} \sim 4.98 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 之间. 虽然除了 F 企业,其余非致癌风险值均高于瑞典环境保护局、荷兰建设和环境部推荐的最大可接受水平 $1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ [27],但是该结果是在排放口 VOCs 的风险评价价值,而实际的风险值远低于该计算值. 其中 A 和 E 企业三氯甲烷占 VOCs 产生总 HI 的第一; B、C 和 D 企业排名第一的均为二氯甲烷. 6 家企业总 VOCs 产生 HI 值贡献排名前 3 依次为二氯甲烷、三氯甲烷和甲苯.

表 3 排放 VOCs 产生的总 HI 值/ a^{-1}

Table 3 HI of each company's VOCs/ a^{-1}

企业	A	B	C	D	E	F
HI 值	7.97×10^{-5}	4.98×10^{-4}	4.66×10^{-5}	1.65×10^{-4}	1.53×10^{-5}	9.48×10^{-7}

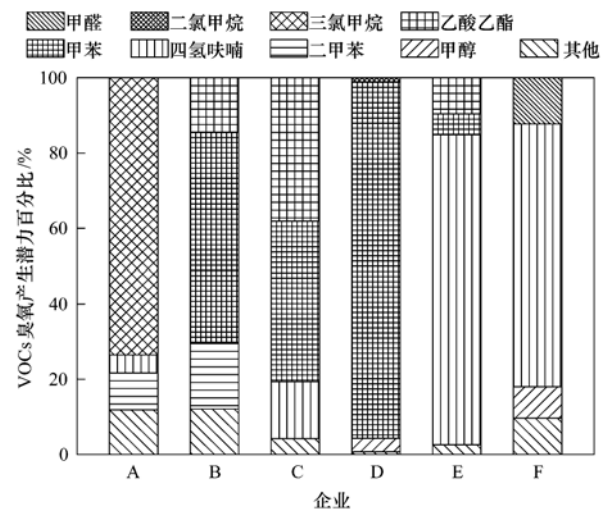


图 2 6 家企业废气 VOCs 臭氧产生潜力

Fig. 2 Top 3 VOCs species in exhaust gas of the 4 factories based on MIR scales

致癌风险评价结果如表 4 所示,6 家企业总 VOCs 致癌风险值为 $3.17 \times 10^{-5} \sim 6.33 \times 10^{-3}$. 单

项致癌物的致癌风险值为 $1.18 \times 10^{-5} \sim 5.90 \times 10^{-3}$,单项和综合均高于欧美的致癌风险标准值 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 之间 [28]. 鉴于排放口浓度的致癌风险评估值,实际致癌风险值远低于该计算值. 结合 HI 指数(图 3),可以看出苯、甲醛、二氯甲烷这 3 种致癌物的大量排放会对人体产生较为严重的健康安全隐患,理应在排放过程中加以严格控制.

3 讨论

我国对 VOCs 的控制相较发达国家还落后较多,现今对制药行业 VOCs 的控制主要还是援用《大气污染综合排放标准》(GB 16297-1996),虽 6 家企业 VOCs 单项监测数据无一超标,但总 VOCs 排放浓度最高值可达 $308.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,远超过世界银行《药品和生物技术制造业环境、健康与安全指南》中 VOCs 推荐限值 [29]. 以 B 企业为例,其废气排放速率为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$,年生产时间按 250 d 计,每天运行 24 h 计,以此计算出其年总 VOCs 排放量为 37.0

表 4 6 家企业 VOCs 致癌风险值

Table 4 Carcinogen risk of VOCs in 6 factories

企业	苯	甲醛	二氯甲烷	总
A	1.18×10^{-5}		2.22×10^{-4}	3.40×10^{-5}
B	1.18×10^{-5}	4.13×10^{-4}	5.90×10^{-3}	6.33×10^{-3}
C	1.18×10^{-5}		5.49×10^{-4}	5.61×10^{-4}
D	1.18×10^{-5}		1.86×10^{-3}	1.87×10^{-3}
E			3.17×10^{-5}	3.17×10^{-5}
F	1.18×10^{-5}	5.72×10^{-4}	1.26×10^{-6}	5.85×10^{-5}

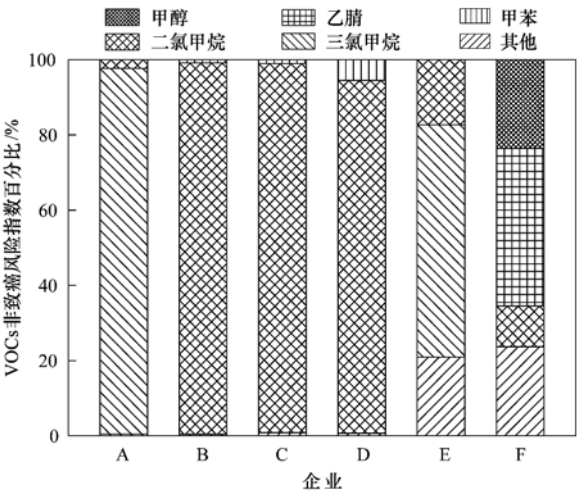


图 3 6 家企业排放 VOCs 的 HI 值百分比

Fig. 3 Variation of HI of the 4 factories and the top two for each

t. 另外,根据浙江省对企业有机废气收集率不低于 90% 的要求(按 90% 计算),估算企业无组织总 VOCs 排放量约为 $4.1 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。以最大活性因子估算其产生的 OFP 值为 $34.0 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,由此可见其对环境有较大的危害。本研究监测过程所得总 VOCs 浓度为企业废气排放各项 VOCs 浓度相加,以此方法操作在日后监测中较为不便,应建立在统一的 VOCs 监测分析方法,因此,现阶段明确我国 VOCs 的定义及涵盖范围、监测规范、分析方法、排放量核算方法显得极为重要。

化学合成类制药废气 VOCs 成分复杂、差异性显著。如在 6 家监测企业中废气 VOCs 的 OFP 值介于 $3.1 \sim 315.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,高低值相差百倍。如 B 企业虽然总 VOCs 以 $308.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 排名第一,但其总 OFP 值 $255.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 低于 D 企业的 $315.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。另外,F 企业总 VOCs 浓度为 $14.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 于 6 家企业中最低,但其 VOCs 总致癌风险值却均高于 A 和 E 企业,这是由于 F 企业使用了甲醛原辅料,使得废气含有一定的甲醛。因此,在 VOCs 总量控制的同时,更要特定地针对部分能引起环境和健康危害较大的指示物单独进行筛选控制。从而形成

了既控制了 VOCs 的排放总量,又控制了行业中一些高毒高害的 VOCs,从而达到最大限度地降低 VOCs 产生的环境和人体健康危害。

此外,对于企业而言,在生产过程中,溶剂的选择是程序开发的一个重点考虑事项,如与苯、三氯甲烷等毒性较高的溶剂相比,最好使用乙酸乙酯、乙醇和丙酮;应多从源头和过程控制,尽量减少高毒高害溶剂的使用,并加强清洁生产、原辅料替代和工艺改进。在末端处理技术,采用适宜、合理、先进的处理技术,保证企业能达到排放标准的要求。在选择焚烧处理技术时,应更加注重含氯物质的分质处理,以便减少环境的二次污染和对设备的腐蚀。

4 结论

(1)所选的 6 家化学制药行业企业废气排放中总 VOCs 浓度介于 $14.9 \sim 308.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间。其中部分指标浓度偏高,如甲苯、二氯甲烷、三氯甲烷、乙醇、乙酸乙酯和丙酮,亟需制定该行业大气污染物排放标准。

(2)6 家企业的 OFP 风险指数介于 $3.1 \sim 315.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 能对环境产生较大的危害,产生的主要物质为甲苯、四氢呋喃、三氯甲烷、乙酸乙酯、二甲苯和甲醇。非致癌风险指数致癌风险指数分别介于 $9.48 \times 10^{-7} \sim 4.98 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 和 $3.17 \times 10^{-5} \sim 6.33 \times 10^{-3}$ 之间,具有较大的潜在人体健康危害,产生的主要物质为苯、甲醛和二氯甲烷这 3 种致癌物。

参考文献:

[1] Liu C M, Xu Z L, Du Y G, et al. Analyses of volatile organic compounds concentrations and variation trends in the air of Changchun, the northeast of China [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(26): 4459-4466.

[2] Wang X S, Li J L, Zhang Y H. et al. Ozone source attribution during a severe photochemical smog episode in Beijing, China [J]. Science in China Series B: Chemistry, 2009, 52(8): 1270-1280.

[3] 邵敏, 董东. 我国大气挥发性有机物污染与控制[J]. 环境保护, 2013, 45(5): 25-28.

- [4] Zhang Y H, Zhu X L, Slanina S, *et al.* Aerosol pollution in some Chinese cities[J]. Pure and Applied Chemistry, 2004, **76** (6): 1227-1239.
- [5] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5}持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 1-8.
- [6] Huss-Marp J, Eberlein-Koenig B, Darsow U, *et al.* Short term exposure to volatile organic compounds enhances atopy patch test reaction[J]. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2004, **113**(2): S56-S57.
- [7] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(12): 2063-2101.
- [8] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 48-55.
- [9] 王效山. 制药工业三废处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010. 115, 210.
- [10] 浙江省环境保护厅. 浙江省环境保护厅关于印发浙江省环境保护地方标准建设“十二五”规划, 浙环函(2011)478号[Z].
- [11] GB/T 15516-1995, 空气质量 甲醛的测定 乙酰丙酮分光光度法[S].
- [12] 国家环境保护总局. 空气和废气监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [13] 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 等. 上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3537-3542.
- [14] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 1994, **44**(7): 881-899.
- [15] Chameides W L, Fehsenfeld F, Rodgers M O, *et al.* Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, **97** (D5): 6037-6055.
- [16] 卢学强, 韩萌, 冉靓, 等. 天津中心城区夏季非甲烷有机化合物组成特征及其臭氧产生潜力分析[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(2): 373-380.
- [17] National Research Council. Risk assessment in the federal government: managing the process [M]. Washington: National Academy Press, 1983.
- [18] Carter W P L. Development of the SAPRC- 07 chemical mechanism and updated ozone reactivity Scales[R]. California: University of California, 2010. 178-205.
- [19] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [R]. California: University of California, 2009. A1-A26.
- [20] USEPA, Integrated risk information system (IRIS) [EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/>, 2003.
- [21] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3566-3570.
- [22] Guo H, Lee S C, Chan L Y, *et al.* Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments [J]. Environmental Research, 2004, **94**(1): 57-66.
- [23] 王叶晴, 段小丽, 李天昕, 等. 空气污染健康风险评价中暴露参数的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(2): 104-108.
- [24] 段小丽, 聂静, 王宗爽, 等. 健康风险评价中人体暴露参数的国内外研究概况[J]. 环境与健康杂志, 2009, **26**(4): 370-373.
- [25] 段小丽, 黄楠, 王贝贝, 等. 国内外环境健康风险评价中的暴露参数比较[J]. 环境与健康杂志, 2012, **9**(2): 99-104.
- [26] 冯文如, 于鸿, 郑睦锐, 等. 广州市室内环境中苯和甲醛的健康风险评价[J]. 环境卫生学杂志, 2010, **1**(6): 7-10.
- [27] 孟宪林, 王晓红, 姜曼曼. 某煤炭资源型城市大气污染物健康风险评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, **44** (6): 41-44.
- [28] 王海林, 聂磊, 李靖, 等. 重点行业挥发性有机物排放特征与评估分析[J]. 科学通报, 2012, **57**(19): 1739-1746.
- [29] 世界银行. 药品和生物技术制造业环境、健康与安全指南 [S].

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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