

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究

申洋洋^{1,2}, 刘锐^{2*}, 徐灿灿², 舒小铭², 许江军⁴, 兰亚琼², 陈吕军^{2,3*}

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084; 4. 上虞市水处理发展有限责任公司, 绍兴 312300)

摘要: 在印染和染料行业发达的长三角地区选取了 6 家大型印染企业和 4 家大型染料生产企业, 研究了废水和生物处理污泥中 AOX 的污染水平, 并使用气相色谱质谱分析了 AOX 的物质结构特征。结果表明, 6 家印染企业的废水原水 AOX 质量浓度较低, 为 $0.15 \sim 1.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处理出水 AOX 质量浓度为 $0.06 \sim 1.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 满足《纺织染整工业水污染物排放标准》的特别排放限值 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 活性污泥中 AOX 含量一般都低于 $621 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但个别企业含量很高, 达到 $3280 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。染料生产企业废水原水的 AOX 质量浓度差异较大, 为 $1.70 \sim 78.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 AOX 质量浓度为 $1.88 \sim 33.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远高于印染企业出水; 污泥中 AOX 含量也普遍较高, 为 $960 \sim 2297 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。染料废水中的有机卤代物主要包括氯苯类、氯硝基苯类、氯苯胺类、氯硝基苯胺类及卤代苯酚类物质。卤代苯酚类和氯硝基苯胺类较易被生物去除; 单氯苯胺、单氯硝基苯类比多氯苯胺、氯硝基苯类易被生物去除; 而多氯苯类物质较易被生物去除从而产生较难生物去除的氯苯。

关键词: 印染; 染料; 废水; 污泥; 可吸附性有机卤化物(AOX)

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3304-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.024

AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries

SHEN Yang-yang^{1,2}, LIU Rui^{2*}, XU Can-can², SHU Xiao-ming², XU Jiang-jun⁴, LAN Ya-qiong², CHEN Lü-jun^{2,3*}

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University in Zhejiang, Jiaxing 314006, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Shangyu Wastewater Treatment Co., Ltd., Shaoxing 312300, China)

Abstract: Selecting six large-scale dyeing factories and four large-scale dyestuff chemical factories in the well-developed Yangtze River Delta region, this study aimed to investigate the AOX pollution status in the raw wastewater as well as in the activated sludge treatment system. The components of AOX were characterized by GC-MS. Results showed that AOX concentration was low in wastewater from the six dyeing enterprises, ranging $0.15 \sim 1.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the raw wastewater and $0.06 \sim 1.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the biologically treated effluent. All the biologically treated effluent met the emission limits of $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the Discharge Standard of Water Pollutants for Dyeing and Finishing of Textile Industry. Sludge in five factories with AOX was below $621 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, only one factory was with high AOX concentration of $3280 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. By comparison, AOX concentration greatly varied between the wastewater from dyestuff chemical factories, was $1.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $78.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the raw wastewater and was $1.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $33.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the biologically treated effluent. AOX concentration in the activated sludge was as high as $960 \sim 2297 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Chlorobenzenes, chloronitrobenzenes, chloroanilines, chlorine nitroanilines and halophenols were typical TOX components detectable in the dyestuff chemical wastewater. Halophenols and chlorine nitroanilines could be efficiently removed. Single chloroanilines and single chloronitrobenzenes seemed to be easier removable than polychlorinated anilines and polychlorinated nitrobenzenes. Polychlorinated benzenes were also easily removal but the products chlorobenzene was hard to remove.

Key words: dyeing industry; dyestuff chemical industry; wastewater; sludge; absorbable organic halogens (AOX)

可吸附性有机卤化物 (absorbable organic halogens, AOX) 在工业中作为原料、溶剂等大量使用。AOX 包括氯化物、溴化物和碘化物, 不包括氟化物。该类物质具有高毒性、持久性和生物累积性, 排放到环境中会影响人类健康并危害生态安全。美国环保局提出的 129 种优先污染物中, 卤代有机物约占 60%。以 AOX 表征的有机卤化物已成为一项国际性水质指标^[1~3]。1987 年德国首先在联邦废

水法中规定了 AOX 的排放限值, 英国、瑞典、荷兰、比利时、挪威、澳大利亚等国家也相继规定了废水中 AOX 的排放标准^[4]。中国在 1996 年的《污

收稿日期: 2015-01-14; 修订日期: 2015-04-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA062705-1); 嘉兴市科技计划项目(2014AY21018)

作者简介: 申洋洋(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为有机卤化物的监测和控制, E-mail: 1356614682@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: liuruitsinghuazj@gmail.com, chenlj@tsinghua.edu.cn

水综合排放标准》(GB 8978-1996)中首次规定了综合排放废水中 AOX 的排放限值,此后 AOX 的环境排放标准迅速完善,2008 年至今已先后在制浆造纸、纺织印染、麻纺等行业规定了废水中 AOX 的排放限值^[5~9]。然而,由于 AOX 测试难、费用高,目前除了对制浆造纸行业废水中 AOX 污染情况有些研究报道外^[10~12],其它行业排放的 AOX 污染报道很少,现状不明。

纺织印染业是我国重要的轻工业之一,全国每年产生印染废水量约为 $1.6 \times 10^9 \text{ t}$ ^[13]。印染废水中的 AOX 主要来自印染过程中所使用的染料^[14],活性基团中含有卤素的活性染料以及发色基团中含卤素原子的其它类染料都会带来 AOX 的污染问题^[3]。同样,染料生产行业由于原料与产品中存在含卤素的物质,排放物中也应该存在 AOX 污染。

本研究在印染和染料行业十分发达的长三角地区,选择 6 家大型印染企业和 4 家大型染料生产企业,检测了废水原水和污水生物处理各单元出水 AOX 质量浓度以及活性污泥中的 AOX 含量,分析了 AOX 的特征物质组成,探讨了现行水处理工艺对各种 AOX 组分的去除效果,以期为我国加强印染和染料废水中 AOX 的排放管理提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 采样地点和采样时间

浙江省是全国印染布的主要产区,2013 年其印染布产量达到 325.08 亿 m,占全国总产量的 59.97%^[15]。选取省内 6 家大型印染企业(JY、BLD、DC、YX、LB 和 KL)进行调研。这 6 家印染企业生产的产品包含棉、麻、丝、化纤及羊绒等不同材质,年产量均在百万米布匹以上。2013 年 11 月对 6 家印染企业进行第 1 次采样,2014 年 9 月对其中 3 家印染企业(JY、BLD 和 DC)进行第 2 次采样。

浙江省也是染料主要生产区^[16],选取省内 4 家大型染料生产企业(C、Y、L 和 R),染料企业产品包括分散染料、活性染料、靛蓝和硫化黑,年产量均在万吨以上。分别于 2014 年 3 月对染料企业 L 进行采样,2014 年 11 月对染料企业 L、C、Y 和 R 进行采样,2015 年 3 月对染料企业 C、Y 和 R 进行采样。

每次采样时进行企业问询,确定该企业产量和产品与往年同期相似,无异常调整;该企业废水处理系统运行正常,常规指标未发现异常变化。因此认为,所采取样品基本能够代表所调查企业一般

情况下的 AOX 含量与变化。

1.2 分析方法

1.2.1 废水和污泥的 AOX 分析

AOX 的检测采用微库仑法^[17],使用仪器为 Multi X 2500 总有机卤素分析仪(德国耶拿分析仪器股份公司)。测试水样时,量取 100 mL 水样至 250 mL 磨口带塞锥形瓶中,加入 5 mL 浓度为 $17 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝酸钠储备液,并用浓硝酸调节 pH 值至 2.0 以下,加入 50 mg 活性炭。在大约 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 速度下振摇 1 h,使活性炭充分吸附水样中的 AOX。振摇后的水样转移到 AFU3 过滤系统(德国耶拿分析仪器股份公司),排出废水,活性炭收集到 AFU3 系统配套的石英柱中,用 25 mL 浓度为 $0.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝酸钠洗脱液冲洗,去除活性炭表面的无机卤化物,再用微库仑法测定活性炭上吸附的 AOX。以上方法适用于 AOX 浓度为 $0.01 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水样。当浓度高于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时需预先稀释。

测试污泥样品时,污泥经冷冻干燥、100 目研磨过筛后,称取 1~20 mg 放入 25 mL 磨口带塞锥形瓶中,加入 20 mg 活性炭和 10 mL 硝酸钠储备液,在大约 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下振荡 1 h^[18]。后续处理步骤同废水。

1.2.2 AOX 分析方法的质量控制

每次测试时取 1~3 个样品平行测试 5 次,计算该样品的相对标准偏差(RSD),确认测试重现性;选取部分样品进行加标回收实验,保证测试准确性。加标回收实验方法如下:样品分成两份,一份样品(废水 100 mL,冷冻干燥污泥 2~20 mg)中加入 $50 \mu\text{L}$ $725.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 对氯苯酚溶液,即加入 $10 \mu\text{g}$ 有机氯,另一份则不加标。同时检测两份样品中的 AOX,加标样品与未加标样品中 AOX 含量的差值与加标量 $10 \mu\text{g}$ 之比即为样品加标回收率。

1.2.3 废水中有机组分的 GC-MS 分析

GC-MS 的分析参照标准方法^[19],使用仪器为 890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS,美国安捷伦科技有限公司)。水样用 $0.22 \mu\text{m}$ 玻璃纤维膜抽滤后取 200~300 mL 至分液漏斗中,用(1:3)浓硫酸调节 pH 至 2.0 以下,加入 15 mL 二氯甲烷,振荡 5 min 后静置 10 min,将有机相收集在锥形瓶中。重复萃取 3 次,合并有机相。然后用 25% 氢氧化钠调节水样 pH 值大于 11,用 15 mL 的二氯甲烷萃取 3 次,合并有机相。有机相经无水硫酸钠干燥后用 $0.22 \mu\text{m}$ 玻璃纤维膜过滤,氮吹浓缩并定容至 1 mL,再用 $0.22 \mu\text{m}$ 有机相针式滤器过滤至干净的进样

瓶中,进行 GC-MS 分析.

2 结果与分析

2.1 废水及污泥的相对标准偏差 (RSD) 和平均加标回收率

废水样品和污泥样品的 RSD 及平均加标回收率数据如表 1 和表 2 所示. 印染和染料废水测试的相对标准偏差 (RSD) 在 0.90% ~ 9.78% 之间,污泥 RSD 在 1.21% ~ 4.32% 之间; 印染和染料废水平均加标回收率为 80.00% ~ 98.00%; 污泥平均加标回收率为 78.20% ~ 93.00%. 这与其他研究人员的

实验结果相似. 苏州市环境监测中心站使用同类型仪器检测地下水、污水处理厂废水、造纸废水及印染废水中 AOX,得到 RSD 为 0.69% ~ 3.57%,对氯苯酚加标回收率为 89% ~ 102%^[20]. 上海市环境监测中心使用 Multi X 2000 总有机卤素分析仪测试自来水和造纸废水中 AOX,得到 RSD 为 2.44% ~ 10.71%^[21],取不同浓度的对氯苯酚标准溶液测定回收率,结果为 79.2% ~ 123.5%; 对上海市黄浦江西渡断面沉积物样品和上海市闵行区自然农田土壤进行检测,得到 RSD 分别为 6.60% 和 3.68%,加标回收率分别为 90.02% 和 97.17%^[18].

表 1 废水和污泥 AOX 值的相对标准偏差 (RSD)

Table 1 Relative standard deviation (RSD) of AOX concentration in wastewater and sludge					
废水样品	AOX/mg·L ⁻¹	RSD/% (n = 5) ¹⁾	污泥样品	AOX/mg·kg ⁻¹	RSD/% (n = 5) ¹⁾
印染厂 KL 出水	0.05 ~ 0.06	9.78	印染厂 JY 好氧泥	425 ~ 478	4.32
印染厂 BLD 好氧出水	0.46 ~ 0.54	6.15	印染厂 BLD 好氧泥	1 307 ~ 1 382	2.50
染料厂 L 废水原水	12.59 ~ 12.89	0.90	染料厂 L 好氧泥	2 215 ~ 2 285	1.21
染料厂 C 水解酸化出水	34.71 ~ 35.66	1.07	染料厂 C 好氧泥	1 012 ~ 1 067	2.07
染料厂 Y 水解酸化出水	7.02 ~ 7.58	3.32	染料厂 Y 好氧泥	1 332 ~ 1 410	2.40
染料厂 R 废水原水	4.03 ~ 4.64	5.30	染料厂 R 好氧泥	1 330 ~ 1 393	4.32

1) 表示样品平行测试 5 次

表 2 废水和污泥 AOX 值的平均加标回收率

Table 2 Average spike recovery of AOX concentration in wastewater and sludge			
废水样品	平均加标回收率/%	污泥样品	平均加标回收率/%
印染厂 KL 废水原水	80.00 (n = 1)	印染厂 JY 好氧泥	83.00 (n = 1)
印染厂 BLD 出水	85.00 (n = 1)	印染厂 BLD 好氧泥	93.00 (n = 1)
染料厂 L 废水原水	98.00 (n = 1)	染料厂 L 好氧泥	90.00 (n = 1)
染料厂 C 水解酸化出水	90.60 (n = 5)	染料厂 C 好氧泥	78.20 (n = 5)
染料厂 Y 水解酸化出水	86.40 (n = 5)	染料厂 Y 好氧泥	82.80 (n = 5)
染料厂 R 废水原水	92.00 (n = 5)	染料厂 R 好氧泥	85.80 (n = 5)

2.2 印染企业排水和污泥中的 AOX 污染

6 家印染企业废水 AOX 质量浓度和污泥 AOX 含量如表 3 所示. 其中 4 家企业 (DC、YX、LB 和 KL) 废水原水的 AOX 低于 0.5 mg·L⁻¹,这 4 家企业印染的产品材质分别为棉、羊绒、真丝等; 2 家较高,最高的 1 家为印染亚麻产品的企业 JY,两次采样废水原水 AOX 分别为 1.27 mg·L⁻¹ 和 1.62 mg·L⁻¹. 有关资料显示麻纤维由于其结晶度、取向度较高,纤维细胞间较密实,纤维的延展性小,染料难以渗透其中,着色率差,因此推测印染亚麻的企业染料较易扩散到废水中,带来较严重的 AOX 污染^[22].

废水的 AOX 质量浓度水平与现有文献报道相似. 刘晓剑等^[3]调研的 6 家印染企业的进水 AOX 均低于 0.5 mg·L⁻¹; Gunasekaran 等^[23]调查的漂白印染废水出水为 0.4 mg·L⁻¹. 总体来看,印染企业

废水中 AOX 质量浓度不高,5 家印染企业好氧处理出水 AOX 在 0.5 mg·L⁻¹ 以下,远远低于现行《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287-2012) 中 AOX 特别排放限值 8 mg·L⁻¹^[7]. 1 家亚麻类企业出水 AOX 质量浓度略高于 1.0 mg·L⁻¹,但也低于现行《亚麻工业水污染物排放标准》(GB 28938-2012) 的特别排放限值 8 mg·L⁻¹^[8].

在废水 AOX 质量浓度不高的情况下,本研究发现个别印染企业污泥中 AOX 含量高. 5 家印染企业的活性污泥 AOX 含量在 36 ~ 621 mg·kg⁻¹ 之间,1 家企业污泥 AOX 含量超过 1 300 mg·kg⁻¹. 陈元彩等^[24]的实验发现污泥对 AOX 的生物吸附是一不可逆过程,并且污泥对 AOX 的吸附基本上是与生物代谢无关的简单物理吸附. 这些情况表明部分 AOX 从废水中转移到污泥中并被累积起来,意味着废水中 AOX 减少的同时有可能加重污泥中的 AOX 污染.

表 3 印染企业废水及污泥中的 AOX 质量浓度
Table 3 AOX concentration in wastewater and sludge
from dyeing factories

企业	产品	采样时间 (年-月)	废水原水 AOX/mg·L ⁻¹	好氧处理出水 AOX/mg·L ⁻¹	活性污泥 AOX/mg·kg ⁻¹
JY	亚麻	2013-11	1.27	1.08	446
		2014-09	1.62	1.30	621
BLD	化纤	2013-11	0.73	0.49	3 280
		2014-09	0.21	0.51	1 322
DC	真丝	2013-11	0.31	0.14	302
		2014-09	0.44	0.23	132
YX	棉	2013-11	0.46	0.18	432
LB	羊绒	2013-11	0.21	0.15	614
KL	棉	2013-11	0.15	0.06	36

2.3 染料生产企业排水和污泥中的 AOX 污染

4 家染料企业排水 AOX 质量浓度和污泥 AOX 含量如表 4 所示. 4 家染料企业排水原水中 AOX 质量浓度差异较大,最低的 1 家 AOX 质量浓度低于 5 mg·L⁻¹,最高的 1 家超过 60 mg·L⁻¹,其余两家 AOX 质量浓度保持在 12 mg·L⁻¹和 9 mg·L⁻¹左右.

上述 4 家企业均采用水解酸化-好氧工艺处理废水,染料厂 C 废水中 AOX 较易被处理,两次采样的废水经过水解酸化池处理后 AOX 大约减少了一

半,但再经过好氧池处理时 AOX 质量浓度仅略有减少; L 和 Y 两次采样的废水经过水解酸化池处理后 AOX 大约减少了三分之一,经过好氧池处理后 AOX 质量浓度均略有减少; R 废水中的 AOX 较难被生物处理, 2014 年 11 月采集的废水经过水解酸化-好氧工艺处理后不仅没有减少,反而略有增加; 2015 年 3 月采集的废水经过水解酸化池后 AOX 大约减少三分之一,经过好氧池后几乎保持不变. 值得注意的是,染料厂 L 和 R 污泥中的 AOX 含量分别高达 2 000 mg·kg⁻¹和 1 300 mg·kg⁻¹以上,甚至高于废水 AOX 质量浓度最高的 C 染料厂. 上述现象说明难降解的 AOX 污染物易被累积到污泥中; 废水 AOX 质量浓度与污泥 AOX 含量不一定构成正比关系.

总体而言,本研究中的染料废水中 AOX 质量浓度要高出表 3 中印染废水 AOX 质量浓度几倍到上百倍,这说明染料行业可能存在比印染行业更为严重的 AOX 污染问题. 我国是染料生产大国, 2010 年我国染料产量达到 75.6 万 t^[25]. 染料行业已然成为 AOX 的一个重要污染源,但目前国内还几乎没有关于染料废水 AOX 污染的研究,相关的排放法规也没有出现,这给染料生产集中地区的水环境带来极大的安全隐患.

表 4 染料企业废水及污泥中的 AOX 质量浓度¹⁾

Table 4 AOX concentration in wastewater and sludge from dyestuff chemical factories

企业	产品	采样时间 (年-月)	废水原水 AOX/mg·L ⁻¹	水解酸化出水 AOX/mg·L ⁻¹	好氧出水 AOX/mg·L ⁻¹	污泥(水解酸化/好氧) AOX/mg·kg ⁻¹
L	分散染料、活性染料	2014-03	12.35	8.43	7.85	2 055/2 297
		2014-11	12.95	8.79	8.49	1 927/2 055
C	靛蓝、硫化黑	2014-11	78.72	30.65	24.31	1 340/1 230
		2015-03	63.16	34.71	33.11	1 067/1 026
Y	活性染料	2014-11	9.16	4.14	3.74	*/960
		2015-03	9.63	7.03	4.59	*/1 406
R	分散染料	2014-11	1.70	1.74	1.88	*/1 630
		2015-03	4.03	2.89	2.55	*/1 300

1) * 表示企业 Y 和 R 水解酸化池中没有活性污泥,所以未取得样品

2.4 染料废水中 AOX 的特征组分分析

为了解有机卤代物的物质结构特征并找出主要污染物质,对 4 家染料厂排水和污泥中的有机组分用 GC-MS 方法进行检测,并对丰度在 20 000 以上、匹配度大于 75% 的检出化合物进行统计分析,结果分别如表 5~8 所示.

AOX 排放质量浓度最高的染料厂 C 排水原水中检出的有机卤代物包括氯硝基苯类、氯苯类、氯硝基苯胺类和卤代(含氯、含溴)苯酚类物质(表

5). 氯硝基苯类物质中,单氯硝基苯经过水解酸化池处理后峰面积减少了 94%,经过好氧池处理后峰面积略有增加;多氯硝基苯在水解酸化池中峰面积减少了 46%,经过好氧池处理后峰面积也有所增加. 上述现象说明,处理氯硝基苯类物质时水解酸化比好氧处理有效,而单氯硝基苯比多氯硝基苯更容易通过水解酸化去除. 多氯代苯类经过水解酸化池后峰面积减少 98%,但在多氯代苯类降解的同时产生了一定的氯苯;经过好氧池后多氯代苯类

进一步降解,峰面积减少约一半,而氯苯的峰面积仅略有减少,说明产生的氯苯较难被生物处理. 氯硝基苯胺类和卤代苯酚类基本都被去除,生物处理出水中峰面积低于检测限. 值得注意的是在有机卤代物大量被去除的同时,水解酸化出水中检测到了少

量氯代苯并呋喃类物质,这种物质在好氧处理后浓度基本不变. 文献[26]表明氯代苯并呋喃类物质具有剧毒性,会导致内分泌系统和体内荷尔蒙平衡紊乱,还能对机体新陈代谢、免疫力和生殖系统造成长久的损伤.

表 5 通过 GC-MS 检测的染料厂 C 排水中化合物的种类和峰面积

物质类别	废水原水		水解酸化池出水		好氧池出水	
	种类数	峰面积 $\times 10^6$	种类数	峰面积 $\times 10^6$	种类数	峰面积 $\times 10^6$
单氯硝基苯类	2	210.20	2	11.85		12.62
多氯硝基苯	1	0.46	1	0.25	1	2.01
多氯代苯类	2	145.62	4	3.09	3	1.68
氯苯	0	0	1	2.82	1	2.39
氯硝基苯胺类	1	8.32	1	0.05	0	0
卤代苯酚类	3	6.20	0	0	0	0
氯代苯并呋喃类	0	0	1	0.17	1	0.18
其他卤代物	1	2.24	0	0	0	0
非有机卤化物	20	263.61	28	43.04	17	53.10
总计	31	636.65	38	61.27	25	71.95

染料厂 L 排水的 AOX 质量浓度位于第二位,原水 AOX 质量浓度平均为 $12.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 AOX 质量浓度平均为 $8.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. GC-MS 检出的有机卤代物主要有卤代苯胺类、卤代硝基苯类和卤代硝基苯胺类物质,占总有机卤代物峰面积的 80% (表 6). 上述卤代物中,以含氯物质为主,另外含有少量含溴物质. 经过水解酸化池后单氯代苯胺类物质峰面积低于检测限,单氯代苯二胺和多氯代苯胺峰面积略有增加,说明单氯代苯胺类物质被水解酸化处理的同时部分转化成难生物降解的其他氯苯胺类形式,刘伟京等^[27]的研究也表明,经过厌氧水解

后水中检测出更多的 2,6-二氯对苯二胺;经过好氧池后单氯代苯二胺和多氯代苯胺峰面积分别减少 84% 和 35%,说明单氯代苯二胺类物质较易在好氧池中处理,少部分多氯代苯胺也能在好氧处理中得以去除. 不过在氯苯胺类物质去除的同时产生了一定量的溴苯胺类物质. 氯、溴硝基苯类和氯、溴硝基苯胺类物质大部分被去除,峰面积在检出限以下,其他卤代物也有一定程度的减少. 值得注意的是好氧生物处理出水中产生了一定量的溴吡啶类物质,卤代吡啶类物质具有明显的致畸性并对胚胎有毒性作用^[28].

表 6 通过 GC-MS 检测的染料厂 L 排水中化合物的种类和峰面积

物质类别	废水原水		水解酸化池出水		好氧池出水	
	种类数	峰面积 $\times 10^6$	种类数	峰面积 $\times 10^6$	种类数	峰面积 $\times 10^6$
单氯代苯胺类	2	0.63	0	0	0	0
单氯代苯二胺类	1	0.77	2	1.98	1	0.32
多氯代苯胺类	3	1.41	3	1.56	3	1.01
溴苯胺类	0	0	2	0.32	1	0.14
氯、溴硝基苯类	2	0.81	0	0	0	0
氯、溴硝基苯胺类	1	1.97	0	0	1	0.79
溴吡啶类	0	0	0	0	1	0.33
其他卤代物	1	1.69	1	0.98	1	0.16
非有机卤化物	63	621.28	30	20.39	21	21.07
总计	76	628.57	38	25.23	29	23.82

染料厂 Y 排水原水 AOX 质量浓度平均为 $9.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 AOX 质量浓度为 $4.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, GC-MS 检出的有机卤代物主要包括卤代烃类、氯苯类及氯苯胺类(表 7). 1-氯-27 烷经过水解酸化-好氧

处理后峰面积略有增加,说明该物质极难被生物处理;多氯代苯类经过水解酸化池后峰面积减少 67%,经过好氧池后几乎没有减少,说明水解酸化处理对去除多氯代苯类物质更有效. 单氯代苯胺

表 7 通过 GC-MS 检测的染料厂 Y 排水中化合物的种类和峰面积

Table 7 Numbers and peak areas of the compounds in the wastewater from dyestuff chemical factories Y by GC-MS

物质类别	废水原水		水解酸化池出水		好氧池出水	
	种类数	峰面积 × 10 ⁶	种类数	峰面积 × 10 ⁶	种类数	峰面积 × 10 ⁶
1-氯-27 烷	3	8.98	2	8.64	2	9.60
多氯代苯类	1	4.96	2	1.65	1	1.58
单氯代苯胺	1	2.33	0	0	0	0
对氯苯甲磺	0	0	0	0	1	1.32
非有机卤化物	9	89.86	16	51.01	17	113.97
总计	14	106.13	20	61.3	19	126.47

经过水解酸化池后被大部分去除,峰面积在检出限以下,说明水解酸化对去除单氯代苯胺类物质效果显著。

染料厂 R 排水 AOX 质量浓度是最低的,原水 AOX 质量浓度为 2.87 mg·L⁻¹,出水 AOX 质量浓度为 2.22 mg·L⁻¹。GC-MS 检出的有机卤代物主要包括氯苯胺类和卤代苯酚类物质(表 8)。废水原水中的氯苯胺类物质均是单氯代苯胺,经过水解酸化池后峰面积减少 81%,并且水解酸化池出水中检测到的氯苯胺类物质均是多氯代苯胺,说明单氯代苯胺

在水解酸化池中得到较大程度的去除,但也产生了部分多氯代苯胺类物质;经过好氧处理后多氯代苯胺也被大部分去除,峰面积在检测限以下。结合染料厂 L 和 Y 的测试结果可以发现,3 家染料厂排水中的单氯代苯胺类物质经过水解酸化池后均能被去除,但易产生多氯代苯胺。卤代苯酚类物质经过水解酸化池后基本被去除,峰面积在检测限以下。结合染料厂 C 可以发现,2 家染料厂排水中的卤代苯酚类物质经水解酸化处理后均被有效去除,其峰面积均在检测限以下。

表 8 通过 GC-MS 检测的染料厂 R 排水中化合物的种类和峰面积

Table 8 Numbers and peak areas of the compounds in the wastewater from dyestuff chemical factories R by GC-MS

物质类别	废水原水		水解酸化池出水		好氧池出水	
	种类数	峰面积 × 10 ⁶	种类数	峰面积 × 10 ⁶	种类数	峰面积 × 10 ⁶
单代氯苯胺	1	10.67	0	0	0	0
多氯代苯胺	0	0	1	2.07	0	0
卤代苯酚类	2	2.00	0	0	0	0
其他卤代物	0	0	0	0	2	4.14
非有机卤化物	28	355.02	25	335.74	24	280.40
总计	31	367.69	26	337.81	29	284.54

3 结论

(1)调研的浙江省 6 家印染企业废水中 AOX 的质量浓度不高,处理出水均能满足现行 AOX 的排放标准,个别印染企业的污泥中 AOX 含量很高。

(2)调研的浙江省 4 家染料企业废水 AOX 质量浓度和污泥中 AOX 含量很高,但目前还没有针对染料行业的 AOX 排放标准。染料企业普遍使用的水解酸化-好氧生物处理工艺对 AOX 的去除率差别较大,难生物降解的 AOX 极易累积到污泥中。

(3)染料废水的 AOX 特征性组分主要包括氯苯类、氯硝基苯类、氯苯胺类、氯硝基苯胺类及卤代苯酚类等物质。卤代苯酚类和氯代硝基苯胺类较易被去除;氯代苯胺和氯代硝基苯类物质中的单氯代苯胺和单氯代硝基苯类较易被生物处理,但在处理过程中会产生较难降解的多氯代苯胺和多氯代硝

基苯类物质;与上述 2 种物质相反,氯苯类物质中的多氯代苯类较易被生物处理,但在降解过程中会产生较难处理的氯苯。

(4)个别企业的生物处理出水中产生了少量剧毒性卤代物,如氯代苯并呋喃类、溴吡啶类物质。

参考文献:

[1] Aepli C, Bastviken D T, Andersson P, *et al.* Chlorine isotope effects and composition of naturally produced organochlorines from chloroperoxidases, flavin-dependent halogenases, and in forest soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(13): 6864-6871.

[2] Neale P A, Antony A, Bartkow M E, *et al.* Bioanalytical assessment of the formation of disinfection byproducts in a drinking water treatment plant[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(18): 10317-10325.

[3] 刘晓剑,常丽春,林秀军,等. 纺织染整行业中 AOX 污染现状及来源分析[J]. *纺织导报*, 2012, (6): 127-129.

[4] 袁瑞霞. 基于自由基反应的高盐染料废水降解动力学及有机

- 卤代物(AOX)生成机制研究[D]. 上海: 东华大学, 2012. 15.
- [5] GB 8978-1996, 污水综合排放标准[S].
- [6] GB 3544-2008, 制浆造纸工业水污染物排放标准[S].
- [7] GB 4287-2012, 纺织染整工业水污染物排放标准[S].
- [8] GB 28938-2012, 麻纺工业水污染物排放标准[S].
- [9] DB 33/923-2014, 生物制药工业污染物排放标准[S].
- [10] Osman W H W, Abdullah S R S, Mohamad A B, *et al.* Simultaneous removal of AOX and COD from real recycled paper wastewater using GAC-SBBR [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **121**: 80-86.
- [11] Welker A, Schmitt T G. A basic investigation in origins of AOX-substances in paper sludges [J]. *Water Research*, 1997, **31** (4): 805-815.
- [12] Meyer T, Edwards E A. Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastewater and sludge [J]. *Water Research*, 2014, **65**: 321-349.
- [13] 郭莉, 刘薇, 金一和. 印染废水处理过程及排放水对草履虫遗传毒性评价[J]. *生态毒理学报*, 2013, **8**(6): 903-908.
- [14] 吴勇民, 陈新才, 楼洪梅, 等. 印染废水中可吸附有机卤素(AOX)处理的研究进展[J]. *工业水处理*, 2014, **34**(9): 6-9.
- [15] 马知方. 印染行业整治与产业升级[A]. 见: 中国纺织工程学会. 2014 全国染整可持续发展技术交流会论文集[C]. 北京. 2014. 78-81.
- [16] 康宝祥, 王丽娜. 全国染/颜料行业经济运行分析[J]. *精细与专用化学品*, 2012, **20**(6): 8-14.
- [17] Barroca M J M C, Seco I M, Fernandes P M M, *et al.* Reduction of AOX in the bleach plant of a pulp mill [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(21): 4390-4393.
- [18] 胡雄星, 王文华. 固体样品中可吸附有机卤化物(AOX)的测定[A]. 见: 中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2006 年学术年会优秀论文集(下卷)[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 2915-2917.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 566-574.
- [20] 朱月芳, 朱剑禾, 顾海东. 微库仑法测定水质中可吸附有机卤素(AOX)[J]. *污染防治技术*, 2014, **27**(3): 76-79.
- [21] 胡雄星, 张文英, 韩中豪, 等. 水样中可吸附有机卤化物(AOX)的测定[J]. *中国环境监测*, 2006, **22**(3): 15-17.
- [22] 张林生, 张胜林, 夏明芳. 印染废水处理技术及典型工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 14.
- [23] Gunasekaran R, Kanmani S. Performance of gas chlorination in decolourization of textile dyeing wastewater: a pilot study [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2014, **16**(3): 601-607.
- [24] 陈元彩, 肖锦, 詹怀宇. 生物吸附作用对漂白废水中 AOX 去除作用的研究[J]. *环境科学研究*, 1999, **12**(6): 28-31.
- [25] 任南琪, 周显娇, 郭婉茜, 等. 染料废水处理技术研究进展[J]. *化工学报*, 2013, **64**(1): 84-94.
- [26] 星炯浩, 张运陶. 氯代二苯并呋喃(PCDFs)毒性的 QSAR 研究[J]. *化学研究与应用*, 2008, **20**(1): 62-66.
- [27] 刘伟京, 张龙, 吴伟, 等. GC-MS 用于分析印染废水处理中有机污染物的降解及迁移的研究[J]. *环境科学*, 2010, **31** (4): 1008-1013.
- [28] 姜中其, 包鸿俊, 史晓丽. 氯羟吡啶的特殊毒性-致畸作用[J]. *中国兽医学报*, 1999, **19**(4): 390-392.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行