

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
嗜酸降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

河道曝气提升河流水质的 WASP 模型研究

朱文博¹, 王洪秀¹, 柳翠², 张建¹, 梁爽^{1*}

(1. 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100; 2. 德克萨斯理工大学数学与统计系, 拉伯克 79409-1042)

摘要: 曝气充氧是修复受污染河道的重要技术, 数学模型是预测、评估环境污染状况的重要方法. 本研究应用 WASP 水质模型评价不同时段河道曝气对河流水质的提升作用. 初期模型验证结果表明, WASP 水质模型拟合结果与实际监测结果基本吻合, 可为水污染治理工程提供参考依据. 在此基础上, 对不同曝气条件进行模拟分析, 结果表明, 河道曝气能够有效降低河水中的化学需氧量(COD)和氨氮(NH_4^+-N)浓度, 改善水质; 随着曝气河段内溶解氧(DO)水平的提升, 水质虽不断改善, 但改善幅度逐渐减小; 全年不同月份曝气效果差异显著, 5~9 月曝气效果较好. 结合经济投入和环境效益, 最终确定夏季提升 DO 水平达到 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为河道曝气最优条件.

关键词: 河道曝气; 水质模型; WASP; 溶解氧; 经济成本

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1326-06 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.04.025

Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study

ZHU Wen-bo¹, WANG Hong-xiu¹, LIU Cui², ZHANG Jian¹, LIANG Shuang^{1*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 2. Department of Mathematics and Statistics, Texas Tech University, Broadway and Boston, Lubbock 79409-1042, USA)

Abstract: Aeration is one of the main technical methods to remediate polluted rivers, and mathematical models are the main ways to predict and assess the environmental pollution. WASP model was used to study the effect of aeration on improving the water quality of a small river over a time span. The preliminary results showed that the simulation values were consistent with practical monitoring data, which could be useful for the management and control of polluted water. Furthermore, simulations under different aeration conditions suggested that aeration technology could significantly lower the levels of chemical oxygen demand (COD) and ammonia-nitrogen (NH_4^+-N) of river water, thus improving the water quality. With the improvement of dissolved oxygen (DO), the water quality could be further improved. However, the increase in the removal rate of pollutants would slow down. Also, there were remarkable differences among various months throughout the whole year, and aeration from May to September had better results. Considering economic costs and environmental benefits, river aeration with a $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ DO standard in summer was determined as the best condition.

Key words: river aeration; water quality model; WASP; DO; economic cost

随着经济的快速发展、城市化水平的提高以及人口的不断增加, 过量污染物排入水体中, 致使河流受到严重污染. 在改善河流水质的诸多方法中, 河道曝气由于投资少、见效快、无二次污染, 已成为一种普遍使用的河道治理手段^[1]. 河道曝气技术的原理是根据河流受到污染后缺氧的特点, 人工向水体中充入空气或氧气, 加速水体复氧过程, 以提高水体的溶解氧水平, 恢复和增强水体中好氧微生物的活力, 使水体中的污染物质得以净化, 从而改善河流的水质^[2].

美国 Homewood 运河曝气结果证明, 即使很小的曝气装置也能使水体的溶解氧增加^[3]. 国内外桃花溪、泰晤士河、密西西比河、塞纳河等的实践表明, 河道曝气可以改善水质、消除黑臭, 促进水生态环境系统的恢复^[4~7]. 但河道曝气的研究尚处于初期阶段, 侧重于以工程应用为导向的实验研究, 如刘波等^[8]利用实验方法研究了不同曝气方式对水

体氮素迁移与转化的影响, 卢翠云等^[9]基于模拟河道反应器考察了曝气充氧及人工造流技术对污染水体的修复效果, 缺乏定量的理论分析探索.

利用数学模型对水环境治理工程进行精细化的模拟和效果预测是重要的定量理论分析手段. WASP 水质数学模型由美国国家环保署(EPA)开发, 具有高效的溶解氧、富营养化和有机污染物处理模块, 在模拟河流水质方面表现突出, 在国内外有着广泛的应用. 廖振良等^[10]利用 WASP 模型建立了苏州河水质模型, 并运用该模型对苏州河环境综合整治一期工程有关工程和方案进行了模拟计算. 于顺东^[11]利用 Brandywine 河的实测结果, 研究了

收稿日期: 2014-09-15; 修订日期: 2014-11-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-004)

作者简介: 朱文博(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水质模拟及水污染处理技术, E-mail: sincerezwb1990@sina.cn

* 通讯联系人, E-mail: liangshuang@sdu.edu.cn

WASP 模型主要参数的灵敏性. Ernst 等^[12] 利用 WASP 模型的开发与应用评价德克萨斯州一个大型水库的水体富营养化情况. 上述研究均取得了较好的效果.

然而,运用河流水质数学模型,对采取河道曝气手段后污染物浓度在时间跨度上的变化规律进行模拟预测的研究尚未见报道. 本研究利用 WASP 河流水质数学模型,对河道曝气提升 DO 至不同水平下的河流污染物变化趋势进行不同时段模拟研究,分析河道曝气技术提升水质的影响因素,结合环境效益和经济投入确定最优曝气条件,以期对河流水质改善提供决策参考.

1 材料与方法

1.1 研究对象概况

研究对象为北方某小型城镇河流,流向自南向北,全长约 15.57 km,是所在县城工业及生活污水最主要的排泄河道. 该河水深约 2.5 m,平均坡度为 0.000 2,流速较缓慢,最大流量为 $26.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 所在区域属于暖温带半湿润季风气候区,年平均气温 13.9°C ,冬冷夏热;年降水量约 604 mm,降水季节分布不均匀. 虽然近年来该区域水环境状况持续得以改善,但是常年的工业及居民废水排放及生态破坏使其水生态系统脆弱,自然修复功能差,污染问题尚未得到根本解决.

1.2 WASP 模型

WASP(water quality analysis simulation program)模型是美国国家环保署(EPA)开发并推荐使用的地表水水质模拟软件,能够分析、预测自然和人为因素造成的各种水质污染状况以及污染物在水中的迁移、转化规律^[13]. WASP 模型具备不同功能、不同复杂程度的多个模块,用户可根据需求选用相应模块进行繁简不一的模拟研究.

WASP 水质模块的基本方程是一个平移-扩散质量迁移方程,它能描述任一水质指标的时间与空间变化^[14]. 方程中除平移和扩散项之外,还包括由生物、化学和物理作用引起的负荷项和动力转换项^[15]. 在实际模拟河流时,简化为一维形式,即假定模拟水体的横向和垂向是均匀的,得到一维的水质组分质量平衡方程见式(1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(Ac) = \frac{\partial}{\partial x} \left(-U_x Ac + E_x A \frac{\partial c}{\partial x} \right) + A(S_L + S_B) + AS_K \quad (1)$$

式中, t 为时间,d; A 为模拟水体的横截面积, m^2 ; c

为某一种或多种水质指标的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; U_x 为河流流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; E_x 为河流扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; S_L 为点源和非点源负荷, $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; S_B 为边界负荷,包括上游、下游、底部和大气环境, $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; S_K 为动力转换项, $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

WASP 模型中 8 个水质状态变量可以相互转化,其中 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的控制方程分别见式(2)和(3):

$$\frac{\partial c_5}{\partial t} = a_{oc} D_{pl} c_4 - K_D \theta_D^{T-20} \left(\frac{c_6}{K_{\text{COD}} + c_6} \right) c_5 - \frac{7}{20} K_{2D} \theta_{2D}^{T-20} \left(\frac{K_{\text{NO}_3}}{K_{\text{NO}_3} + c_6} \right) c_2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = D_{pl} a_{nc} (1 - f_{on}) c_4 + k_{71} \theta_{71}^{T-20} \cdot \left(\frac{c_4}{K_{\text{mNc}} + c_4} \right) c_7 - G_{pl} a_{nc} P_{\text{NH}_3} c_4 + k_{12} \theta_{12}^{T-20} \left(\frac{c_6}{K_{\text{NIT}} + c_6} \right) c_1 \quad (3)$$

式中, c_5 为 COD 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; a_{oc} 为氧碳比, $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$; D_{pl} 为浮游植物死亡速率, d^{-1} ; c_4 为浮游植物碳浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_D 为 20°C COD 衰减系数, d^{-1} ; θ_D 为 K_D 温度系数; c_6 为 DO 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_{COD} 、 K_{mNc} 、 K_{NO_3} 、 K_{NIT} 为氧气限制的半饱和常数, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K_{2D} 为 20°C 反硝化速率常数, d^{-1} ; θ_{2D} 为 K_{2D} 的温度系数; T 为水体温度, $^\circ\text{C}$; c_2 为 NO_3 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_1 为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; a_{nc} 为氮碳比, $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$; f_{on} 为呼吸和死亡的浮游植物循环到有机氮的百分比; k_{71} 为 20°C 有机氮矿化速率, d^{-1} ; θ_{71} 为 k_{71} 的温度系数; c_7 为有机氮浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; G_{pl} 为浮游植物生长速率, d^{-1} ; P_{NH_3} 为氨的优先选择系数; k_{12} 为 20°C 硝化速率, d^{-1} ; θ_{12} 为 k_{12} 的温度系数.

1.3 河流水质数学模型的构建

在实地调研收集该小型城镇河流水力条件、水文特征、气象资料、水质数据的基础上,对河流现状进行简要分析;调查明确河流水质模型模拟的影响因素,建立河流水质数学模型;进行模型研究所需的参数率定,对模型进行校正,优化模拟结果.

1.3.1 模型概化

河流模型概化是为提高模拟精度,把河流分为一系列相互关联的河段. 河流概化的原则是:依据水力特性(如流速、流量、流态)及水质参数(如 BOD、COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等)的变化划分河段. 根据本研究对象各区域的不同特性,把河道从上游到下游分

成四段:第1段长度约3.39 km;第2段长度约9.33 km;第3段长度约2.14 km;第4段长度约0.71 km.第1、4段的水质指标在模型内部作为边界条件.该河第1段有县污水处理厂的排污管道,在模型中设置为点源负荷,主要污染指标为COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$.通过模拟河流水质,结合实测数据,可验证WASP的模拟效果.

1.3.2 模型参数选取及率定

本研究选用WASP模型7.3版本的水动力学模块和氮循环的富营养化模块.在WASP程序中,水动力学模块利用初始流量、节点间的距离和体积计

算某时刻的流量,需输入每一单元体的初始体积、流量等水力学参数和特定渠道断面(如矩形、梯形)的水力几何系数,这部分数据大多是基于当地环境保护局协调相关部门所获取的资料.富营养化模块需要输入水质指标的边界条件和初始条件以及相应的动力学参数,水质指标由当地环保局提供或自行监测,动力学参数则参考WASP用户手册说明和国内外相关文献的常用取值^[16~19].输入初始条件后,选取实测数据较为完整的第3段断面作为模型率定和验证断面,经反复调整后,率定所得模型主要动力学参数取值见表1,其中速率常数均为20℃时取值.

表1 WASP模型主要动力学参数取值

Table 1 Main kinetic parameter values of WASP model

参数名称	符号	单位	常用取值范围	本次模拟取值
流速指数	b	—	依据资料	0.34~0.43
水深指数	d	—	依据资料	0.36~0.60
氧碳比	a_{oc}	$\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$	0~2.67	2.67
浮游植物死亡速率	D_{pl}	d^{-1}	0~0.25	0.05
COD衰减速率	K_D	d^{-1}	0.08~0.5	0.2
K_D 的温度系数	θ_D	—	1.02~1.08	1.05
氧化作用氧气限制的半饱和和常数	K_{COD}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0~0.5	0.5
反硝化速率常数	K_{2D}	d^{-1}	0~0.09	0.045
K_{2D} 的温度系数	θ_{2D}	—	1.02~1.09	1.04
反硝化作用氧气限制的半饱和和常数	K_{NO_3}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0~2	2
氮碳比	a_{nc}	$\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$	0~0.25	0.25
呼吸和死亡的浮游植物循环到有机氮的百分比	f_{on}	—	0.5	0.5
有机氮矿化速率常数	k_{71}	d^{-1}	0.02~0.075	0.05
k_{71} 的温度系数	θ_{71}	—	1~1.08	1.08
有机氮矿化时氧气限制的半饱和和常数	K_{mNc}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0~1	1
浮游植物生长速率	G_{pl}	d^{-1}	0.1~0.5	0.4
硝化速率常数	k_{12}	d^{-1}	0~1	0.2
k_{12} 的温度系数	θ_{12}	—	1.02~1.08	1.07
硝化作用氧气限制的半饱和和常数	K_{NIT}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0~0.5	0.5

2 结果与讨论

2.1 模型验证结果

该流域“十二五”期间要求的河流污染物治理重点是COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$.研究中对河水进行取样、监测,以2012年的实测COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 数据为研究内容,而DO等则是作为已知条件输入.把2012年全年的模拟数据与第3段在该时间段内的实测值作对比,结果见图1和图2.

图1的结果表明,COD模拟值与实测值的平均相对误差为19.9%,其中相对误差小于20%的数据占总数据的67.6%;图2的结果表明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 模拟值与实测值的平均相对误差为29.5%,其中相对误差小于20%的数据占总数据的48.6%.除个别值误差较大以外,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的模拟值与实测数据吻

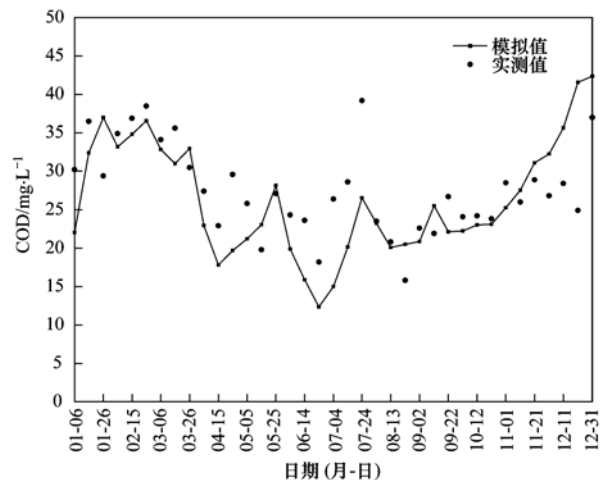


图1 COD模拟值与实测值对比

Fig. 1 Comparison of the simulated and the measured values of COD

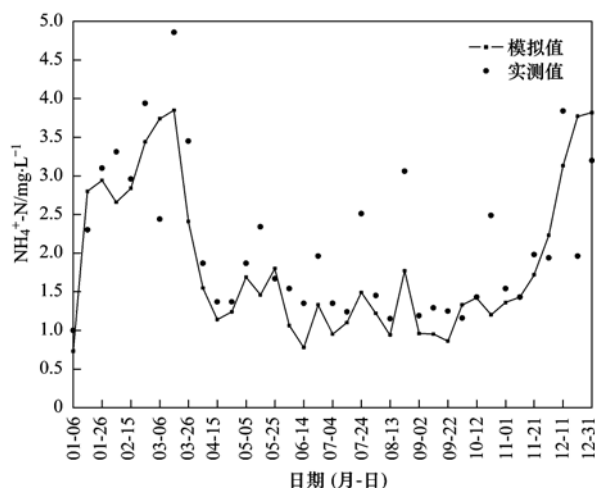
图2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of the simulated and measured values of $\text{NH}_4^+\text{-N}$

合较好,符合水质模型模拟的要求.这说明经过率定的河流水质数学模型能够满足工程分析的精度需要.模拟结果与实测值出现偏差可能是因为真实水体中的各种反应过程机制更加复杂,并不是严格按照模型方程组所描述的公式进行的,且在此次模拟中,河道底泥、藻类生长等资料相对匮乏,因此采用近似值进行估算.

2.2 河道曝气对水质影响的模拟

在已建立的 WASP 河流水质模型基础上,把 DO 作为自变量,把 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为参变量,通过调整 DO 的输入值,进一步分析河道曝气对污染物浓度变化的影响.假设同期其它基本条件无显著变化,对不同曝气情形(在模型内部设置为不同 DO 水平)下 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随时间的变化进行模拟,定量分析河道曝气对水质改善的影响,为河道曝气技术的工程应用提供理论指导.

该河流上游有点源污染物排放,河段 1 水质较下游差,且河道较窄,未来规划无航运功能,适合安装曝气设备.因此,河道曝气模拟以河流上游第 1 段为例,其余河段的理论研究亦可采用本文提供的方法.未曝气原始情形下该河段 DO 年平均值约为 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,一般认为,若要有效增强曝气效果,消除河流黑臭,应使曝气段的 DO 水平稳定在不低于 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [20,21],通过改变曝气设备的运行功率,可以控制其向水体传递的氧气量,从而使曝气量增加.设定采用曝气手段使河段内 DO 值达到 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为曝气情形 1,河段内 DO 值达到 $6.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为曝气情形 2;河段内 DO 达到 $8.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为曝气情形 3.通过 WASP 模型模拟 2012 年该曝气河段在原始情

形以及 3 种曝气情形下 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化,结果见图 3 和图 4.

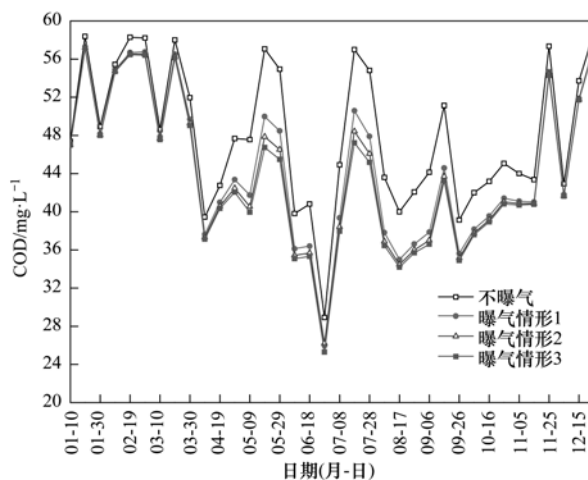


图3 曝气河段 COD 变化模拟

Fig. 3 Simulation of COD changes in the aerated segment of the river

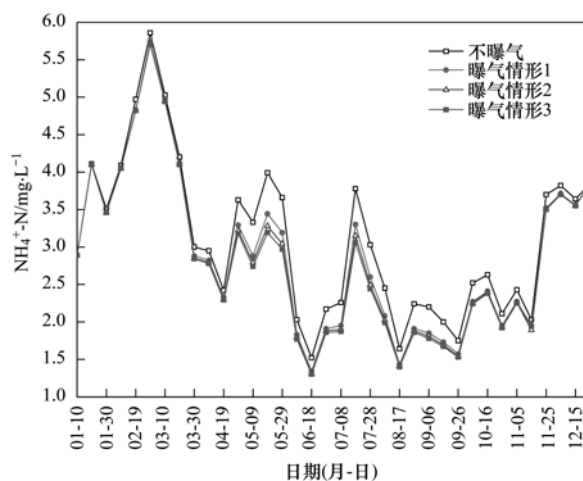
图4 曝气河段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化模拟

Fig. 4 Simulation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ changes in the aerated segment of the river

图 3 模拟结果显示,在不曝气的情形下,该河段 2012 年 COD 平均值为 $48.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在曝气情形 1 的条件下,COD 平均值为 $44.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在曝气情形 2 的条件下,COD 平均值为 $44.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在曝气情形 3 的条件下,COD 的平均值为 $43.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.图 4 的模拟结果显示,在不曝气的情形下,该河段 2012 年 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均值为 $3.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在曝气情形 1 的条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均值为 $2.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在曝气情形 2 的条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均值为 $2.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在曝气情形 3 的条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均值为 $2.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.图 3、图 4 表明,在全年各时间段内,进行河道曝气

均能够降低河流水体中 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度,且增加曝气量可以使 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率进一步提升.

在 2012 年全年的时间跨度内,与未曝气情形相比,曝气情形 1 时 COD 平均去除率为 7.1%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率为 6.8%; 曝气情形 2 时 COD 平均去除率为 8.3%, 去除率比曝气情形 1 增加 1.2 个百分点, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率为 8.1%, 去除率比曝气情形 1 增加个 1.3 百分点; 曝气情形 3 时 COD 平均去除率为 8.9%, 去除率比曝气情形 2 仅增加个 0.6 百分点, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率为 8.7%, 去除率比曝气情形 2 仅增加个 0.6 百分点. 可见,当曝气充氧使河道水体 DO 达到 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对曝气河段 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果较为明显,随着 DO 水平的进一步提升,水体污染物去除率仍然增加,但增加幅度减小. 推测污染物去除率提升幅度减缓的原因可能是适当提升 DO 水平能够促进微生物的好氧呼吸,有利于有机物的去除和硝化作用的进行,过高的 DO 浓度虽然使电子受体显著增加,使微生物代谢活动增强,但在基质相对不足的情况下,微生物对有机物和氨氮的去除率增加幅度变小^[22].

图 3、图 4 模拟结果显示,5~9 月期间,河道曝气对于污染物的去除效果较好:在曝气情形 1 的条件下, COD 浓度下降 12.0%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降 13.2%; 在曝气情形 2 的条件下, COD 浓度下降 14.4%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降 16.0%; 在曝气情形 3 的条件下, COD 浓度下降 15.6%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降 17.5%. 1~4 月及 10~12 月期间,河道曝气对于污染物的去除效果较差:在曝气情形 1 的条件下, COD 浓度下降 3.9%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降 3.4%; 在曝气情形 2 的条件下, COD 浓度下降 4.4%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降 3.7%; 在曝气情形 3 的条件下, COD 浓度下降 4.7%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降 4.0%. 可能的原因是 5~9 月温度较高而 1~4 月及 10~12 月温度较低,温度高时微生物活性增强,温度低时微生物活性弱,

反映在 WASP 模型里即污染物的降解速率随温度升高而增加. 可见,在进行河道曝气时,需要考虑季节因素,每年春末至秋初时间段内曝气效果较好.

2.3 不同曝气组合情形的效益计算及分析

增加曝气量可以提升水体 DO 水平,增加 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染指标的去除率,但也会带来经济成本的提升. 在工程实践中,应根据水体污染现状及水质治理目标计算曝气量,同时考虑环境效益和经济成本,对曝气条件进行最优组合. 曝气设备充氧量是影响河道曝气成本的关键因素^[23],本研究以曝气河段总充氧量比较不同曝气条件下的经济成本. 曝气设备充氧量的计算,首先要确定水体的需氧量,进而根据设备的充氧动力效率确定设备充氧量. 本研究所选取的北方小型城镇河流流速缓慢,流量较小,水深较浅,且外界输入的污染负荷较少,因此可采用王瑟澜等^[24]提出的基于一级反应的箱式模型计算水体需氧量.

曝气设备标称的充氧动力效率均是通过清水实验获得,因此受污染水体的需氧量和设备充氧量并不相等,设备充氧量采用式(4)^[25]进行计算:

$$R_0 = \frac{R_1 O_{s(20)}}{\alpha(\beta O_{s(T)} - O) \times 1.024^{(T-20)}} \quad (4)$$

式中, R_0 为曝气设备标称充氧量,是设备选型的主要依据, $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$; R_1 为河道需氧量, $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$; $O_{s(20)}$ 为水温 20°C 下的饱和溶解氧浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; α 为修正系数,本文取 0.85; β 为修正系数,本研究取 0.97; $O_{s(T)}$ 为水温 $T^\circ\text{C}$ 下的饱和溶解氧浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; O 为水体中实际溶解氧浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; T 为设计水温, $^\circ\text{C}$.

运用模型进行经济效益分析时,设定不同的温度,分别以 5、15、 25°C 代表冬季(1~2 月及 12 月)、春秋季节(3~5 月及 9~11 月)、夏季(6~8 月)的水温. 假设每天连续曝气 12 h,分别估算在不同曝气情形、不同季节组合下的曝气设备充氧量. 模拟结果见表 2.

表 2 不同组合情形下所需充氧量模拟

Table 2 Simulation of oxygen loads under different combined conditions

曝气情形	水温		
	冬季(5°C)	春秋季节(15°C)	夏季(25°C)
曝气情形 1(DO 达到 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$23.6\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$	$25.2\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$	$26.6\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$
曝气情形 2(DO 达到 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$32.8\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$	$39.7\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$	$55.5\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$
曝气情形 3(DO 达到 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$50.3\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$	$72.0\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$	$169.0\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$

从表 2 中可以看出,在同一河道曝气情形下,曝气设备充氧量随着水温升高而增加;在同一水温的

情形下,曝气设备充氧量随着设定达到的 DO 目标上升而增加. 结合图 3、图 4 和表 2 可知,在曝气情

形 1 时,河道水体污染物 COD、 NH_4^+ -N 浓度下降明显,若继续提升水体中 DO 水平,在曝气情形 2、3 时,污染物浓度进一步下降的幅度很小,而所需设备充氧量迅速增加,也即曝气经济成本迅速增加;在曝气情形 1 时,夏季(水温 25°C)设备充氧量仅比其余时间段略高,而对于 COD、 NH_4^+ -N 去除率比其余时间段高出 10 个百分点以上.因此,结合经济和环境效益,该河段在夏季曝气情形 1 时效果最好,也即设定夏季提升 DO 水平达到 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为最优河道曝气方案.

3 结论

(1)在模拟时段内,该小型城镇河流 COD 的模拟值与实测值平均相对误差是 19.9%, NH_4^+ -N 的模拟值与实测值的平均相对误差是 29.5%,除个别值误差较大外,水质指标模拟值与实测值能够较好吻合.说明 WASP 模型可以用来模拟河水中污染物的降解过程,预测河流水质变化情况,为水污染治理工程提供参考依据.

(2)WASP 模型模拟河道曝气结果显示:在全年时段内,向河流水体进行人工曝气均能够降低河水中的 COD、 NH_4^+ -N 浓度,改善水质,且随着曝气河段内 DO 水平的提升,污染物浓度会有进一步的下降.但是,随着 DO 水平的提升,水体中污染物浓度进一步下降的幅度减小.

(3)全年不同时段曝气效果有明显差异,5~9 月期间水温较高,河道曝气对 COD 和 NH_4^+ -N 的去除效果明显优于 1~4 月及 10~12 月.

(4)计算为使曝气河段达到不同 DO 水平所需的充氧量,结合不同季节河道曝气对污染物的去除效果,得出夏季(6~8 月)提升水体 DO 水平达到 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为河道曝气最优化条件.

参考文献:

- [1] 李伟杰. 曝气充氧技术在上海新港河道污染治理中的应用[D]. 上海: 东华大学, 2006.
- [2] 李伟杰, 汪永辉. 曝气充氧技术在我国城市中小河道污染治理中的应用[J]. 能源与环境, 2007, (2): 36-38.
- [3] Rogers G R. Water quality management at Santa Cruz Harbor[J]. Aire- O_2 News, 1990, 7(1): 4-5, 8.
- [4] 王诚信, 凌晖, 史可红. 污染河流的纯氧曝气复氧[J]. 上海环境科学, 1999, 18(9): 411-413.
- [5] 谢海文, 沈乐. 河流曝气技术简介[J]. 水文, 2009, 29(3): 59-62.
- [6] Vallé B L, Pasternack J B. TDR measurements of hydraulic jump aeration in the South Fork of the American River, California[J]. Geomorphology, 2002, 42(1-2): 153-165.
- [7] Thibodeaux L, Poulin M, Even S. A model for enhanced aeration of streams by motor vessels with application to the Seine river[J]. Journal of Hazardous Materials, 1994, 37(3): 459-473.
- [8] 刘波, 王国祥, 王风贺, 等. 不同曝气方式对城市重污染河道水体氮素迁移与转化的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 2971-2978.
- [9] 卢翠云, 庞志华, 林方敏, 等. 曝气充氧和人工造流技术修复河道污染水体[J]. 环境工程学报, 2012, 6(4): 1135-1141.
- [10] 廖振良, 徐祖信, 高廷耀. 苏州河环境综合整治一期工程水质模型分析[J]. 同济大学学报, 2004, 32(4): 499-502.
- [11] 于顺东. WASP 水质模型应用与 DO 模型评价[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [12] Ernst M R, Owens J. Development and application of a WASP model on a large Texas reservoir to assess eutrophication control[J]. Lake and Reservoir Management, 2009, 25(2): 136-148.
- [13] Wool T A, Ambrose R B, Martin J L, et al. Water quality analysis and simulation program (WASP) Version 6.0, Draft user's manual[M]. Atlanta, GA: US Environmental Protection Agency, 2003. 3-5.
- [14] 郝芳华, 李春辉, 赵彦伟, 等. 流域水质模型与模拟[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2008. 7-10.
- [15] 杨家宽, 肖波, 刘年丰, 等. WASP6 水质模型应用于汉江襄樊段水质模拟研究[J]. 水资源保护, 2005, 21(4): 8-10.
- [16] 郭丽君, 庞莹莹. 水质分析模拟程序 6 (WASP6) 专题[J/OL]. 水科学研究, 2009, (3,4): 33-41.
- [17] 路成刚. 基于 WASP7.3 的南四湖水水质模拟分析研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010. 26-27.
- [18] 史铁锤, 王飞儿, 方晓波, 等. 基于 WASP 的湖州市环太湖河网区水质管理模式[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 631-640.
- [19] Zhang W T, Rao R Y. Application of a eutrophication model for assessing water quality in Lake Winnipeg [J]. Journal of Great Lakes Research, 2012, 38(Supplement 3): 158-173.
- [20] Cokgor S, Kucukali S. Oxygen transfer in flow around and over stones placed in a laboratory flume[J]. Ecological Engineering, 2004, 23(3): 205-212.
- [21] 薛罡, 刘亚男, 汪永辉, 等. 曝气充氧条件下受污染河道的水质模型建立及应用[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 653-659.
- [22] 顾俊. 城市内河生态修复及其对氮素转化影响的实验研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2008. 27-29.
- [23] 孙从军, 张明旭. 组合推流反应器模型用于河道需氧量计算[J]. 中国给水排水, 2002, 18(9): 16-19.
- [24] 王瑟澜, 孙从军, 张明旭. 水体曝气复氧工程充氧量计算与设备选型[J]. 中国给水排水, 2004, 20(3): 63-66.
- [25] 高廷耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制工程[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2010. 130-134.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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