

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化

邹宗森¹, 施汉昌^{1*}, 陈向强², 谢小青²

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 厦门水务集团有限公司, 厦门 361008)

摘要:以筼筹污水处理厂生物滤池工艺(DNBF + BAF)为研究对象,应用 BioWin 软件,构建该工艺的 BioWin 模型,基于 2013 年 9 月和 10 月的实际运行数据,结合两种灵敏度分析方法,对 BioWin 模型进行校正.结果表明,校正模型可对 DNBF + BAF 工艺进行有效模拟,且对该工艺的 BioWin 模拟结果影响最为显著的 3 类参数为:与生物膜有关的参数、与异养菌(OHOs)有关的参数和曝气参数.然后应用校正模型模拟该工艺在不同工况条件下的运行结果,对其进行工艺优化.结果表明:①一级 B 排放标准的最佳运行条件为:回流比 = 50%,取消甲醇投加,此时进水 C/N = 4.43;②一级 A 排放标准的最佳运行条件为:回流比 = 50%,投加甲醇后的进水 COD = 155 mg·L⁻¹,此时进水 C/N = 5.10.

关键词:生物滤池;数值模拟;灵敏度分析;模型校正;模型验证;运行优化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4627-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.12.028

Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter

ZOU Zong-sen¹, SHI Han-chang¹, CHEN Xiang-qiang², XIE Xiao-qing²

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Xiamen Water Company Limited, Xiamen 361008, China)

Abstract: BioWin software and two sensitivity analysis methods were used to simulate the Denitrification Biological Filter (DNBF) + Biological Aerated Filter (BAF) process in Yuandang Wastewater Treatment Plant. Based on the BioWin model of DNBF + BAF process, the operation data of September 2013 were used for sensitivity analysis and model calibration, and the operation data of October 2013 were used for model validation. The results indicated that the calibrated model could accurately simulate practical DNBF + BAF processes, and the most sensitive parameters were the parameters related to biofilm, OHOs and aeration. After the validation and calibration of model, it was used for process optimization with simulating operation results under different conditions. The results showed that, the best operation condition for discharge standard B was: reflux ratio = 50%, ceasing methanol addition, influent C/N = 4.43; while the best operation condition for discharge standard A was: reflux ratio = 50%, influent COD = 155 mg·L⁻¹ after methanol addition, influent C/N = 5.10.

Key words: biological filter; numerical simulation; sensitivity analysis; model calibration; model validation; operation optimization

相比于微生物悬浮生长的传统污水处理工艺,如活性污泥法,生物膜法工艺具有单位体积生物量大、脱膜沉降性能良好,无污泥膨胀、运行管理方便等优点^[1].生物滤池是典型的生物膜反应器,其中应用最广泛的是两种固定床生物膜反应器:曝气生物滤池(BAF)^[2,3]和反硝化滤池(DNBF)^[4].BAF进行曝气发生硝化反应,在好氧条件下将NH₄⁺-N氧化成NO₂⁻-N和NO₃⁻-N^[5,6];DNBF不曝气发生反硝化反应,在缺氧条件下将NO₂⁻-N和NO₃⁻-N还原成N₂或N₂O、NO^[7,8].国内外研究人员从滤料^[9~12]、运行条件^[13~16]、工艺组合^[17,18]等各个方面对两种滤池进行了深入的研究.其中,将两种生物滤池组合在一起的DNBF + BAF工艺可实现污水脱氮处理,目前已得到较为广泛的应用.

当前污水处理工艺的调整大多依靠工程经验,但污水处理过程非常复杂,不确定性因素较多,因此

可能导致调整不准确、运行成本增加等问题,甚至存在一定的风险,即无法达到最优工况.数值模拟方法是应用数学模型经数值计算对各种实际问题进行研究的方法,在污水处理工艺的模拟方面,同样得到了广泛的应用^[19,20].BioWin软件是一种以IWA模型为基础的污水处理厂全流程数值模拟软件,可描述污水处理过程中的50种组分和80个物理、化学和生物反应过程,目前已在北美和澳大利亚等地得到了广泛的应用^[21~24].

本研究以筼筹污水处理厂DNBF + BAF工艺为对象,探讨该工艺BioWin模型的构建及模型校正的

收稿日期: 2014-05-20; 修订日期: 2014-07-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063404-03); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07305001)

作者简介: 邹宗森(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为污水处理、数值模拟与工艺运行优化, E-mail: zouzs5001@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hanchang@tsinghua.edu.cn

方法,实现对实际 DNBF + BAF 工艺的有效模拟,并进行工艺运行优化.

1 材料与方法

1.1 筴筴污水处理厂

1.1.1 工艺流程与原理

筴筴污水处理厂位于福建省厦门市,设计规模为 $3 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,处理工艺采用法国得利满公司的 Sedipac 3D 组合式高效沉淀池/前置反硝化滤池 + 曝气生物滤池 (DNBF + BAF) 工艺. 处理污水大部分为生活污水和雨水,不含工业废水,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 的一级 B 标准^[25]. 筴筴污水处理厂的工艺流程如图 1 所示. 污水首先经过 Sedipac 3D 高效沉淀池进行一级强化处理后,进入生物滤池段 (DNBF + BAF) 进行二级生物处理, DNBF 不曝气,进行反硝化反应,水力停留时间约为 20 min, BAF 曝气,进行硝化反应,水力停留时间约为 40 min,硝化出水回流至反硝化滤池段,二者共同完成污水脱氮处理. 以生物滤池段 (DNBF + BAF) 为对象进行相关研究.

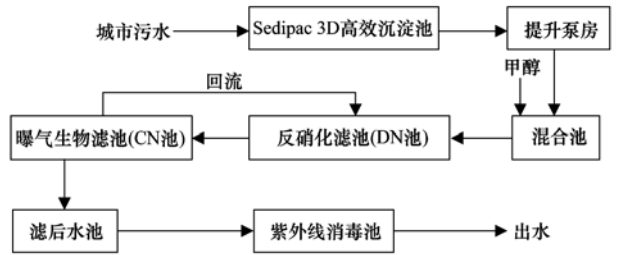


图 1 筴筴污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process flowchart of Yuandang WWTP

1.1.2 运行数据

筴筴污水处理厂生物滤池段 (DNBF + BAF) 的进水为经 Sedipac 3D 高效沉淀池处理后并在混合池进行混合后的污水,通过实地取样检测,获取其 2013 年 9 月和 10 月的实际运行数据,检测的水质/水量指标包括: COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TKN、TN、TP、SS、pH、DO、碱度、进水流量,所有水质指标均按照文献[26]中的标准方法进行检测. 2013 年 9 月和 10 月的运行数据分别如表 1、表 2 所示.

1.2 BioWin 模型

筴筴污水处理厂生物滤池段有 14 个反硝化滤池和 28 个曝气生物滤池,共 14 条工艺线路,每条线路包括 1 个反硝化滤池和 2 个曝气生物滤池. 14 条线路的运行条件相同,因此其处理结果也是一样的. 本研究中应用 BioWin 软件,对其中一条工艺线路,

即:1 个 DNBF + 2 个 BAF,构建其 BioWin 模型,如图 2 所示.

表 1 DNBF + BAF 工艺运行数据 (2013-09)¹⁾

Table 1 Operation data of DNBF + BAF process (2013-09)

水质/水量指标	进水	出水
COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	134.72 ± 24.86	45.44 ± 9.11
$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	24.44 ± 5.86	3.28 ± 1.72
$\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3.24 ± 2.69	10.80 ± 2.65
TKN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	27.15 ± 6.51	—
TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	30.39 ± 7.16	15.02 ± 3.01
TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2.12 ± 0.67	1.14 ± 0.42
TSS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	50.94 ± 29.10	7.50 ± 7.16
pH	7.44 ± 0.17	—
DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.71	—
碱度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	204.75	—
进水流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	$20\,540.79 \pm 2\,067.48$	—

1) 所有数据都经过标准统计分析,显著性水平为 95%

表 2 DNBF + BAF 工艺运行数据 (2013-10)¹⁾

Table 2 Operation data of DNBF + BAF process (2013-10)

水质/水量指标	进水	出水
COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	139.42 ± 24.61	44.74 ± 6.29
$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	28.80 ± 8.11	1.78 ± 1.55
$\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3.21 ± 3.03	13.57 ± 3.27
TKN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	32.00 ± 9.02	—
TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	35.21 ± 8.17	16.36 ± 3.53
TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2.41 ± 0.61	1.01 ± 0.34
TSS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	64.68 ± 37.24	7.05 ± 4.74
pH	7.57 ± 0.18	—
DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.71	—
碱度/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	204.75	—
进水流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	$18\,651.47 \pm 2\,632.02$	—

1) 所有数据都经过标准统计分析,显著性水平为 95%

BioWin 模型采用多个生物反应器串联的方式模拟 DNBF 和 BAF 中流体的推流状态,从前向后依次为: DNBF 段,包括水层 1 (DNBF1-1)、滤料层 (DNBF1-2、DNBF1-3、DNBF1-4) 以及水层 2 (DNBF1-5); BAF 段,为两条并列且相同的工艺线路,以其中一条为例,包括水层 1 (BAF1-1)、缓冲层 1 (BAF1-2)、缓冲层 2 (BAF1-3)、滤料层 (BAF1-4、BAF1-5、BAF1-6) 以及水层 2 (BAF1-7). 甲醇作为外加碳源于滤池进水前投加,与来自混合池的出水混合后,共同进入滤池. 此外,通过在 DNBF 和 BAF 后面增加点沉淀池和反冲洗出水组合的方式来模拟滤池反冲洗过程,去除进水中及滤池内生物膜脱落产生的 TSS. 在反应模型上,选择 ASDM 模型、pH 平衡模型和气体传输模型的组合作为生物反应单元的数学模型,选择 Vesilind 修正模型作为二沉池的数学模型.

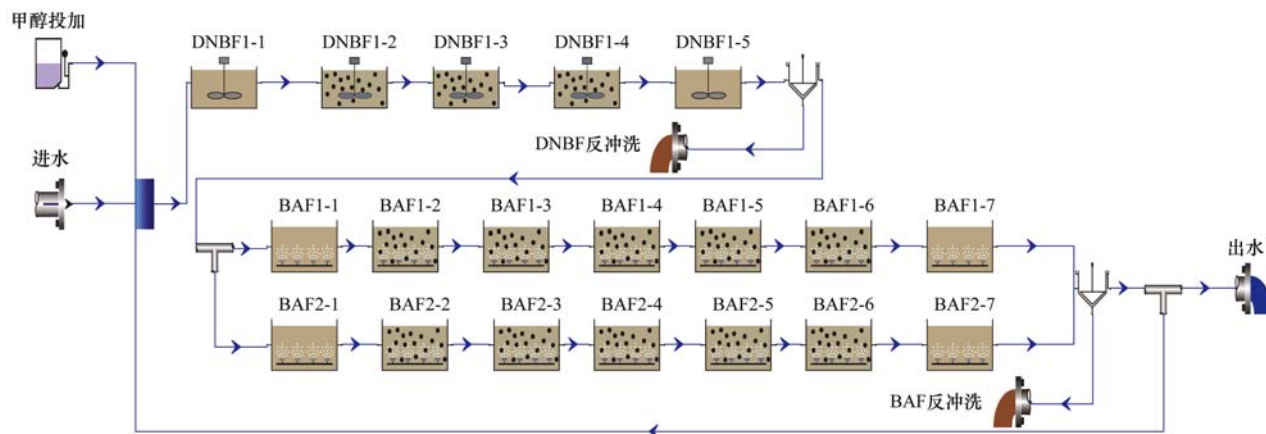


图2 笕簋污水处理厂 DNBF + BAF 工艺 BioWin 模型

Fig. 2 BioWin model of DNBF + BAF process at Yuandang WWTP

1.3 灵敏度分析

基于 DNBF + BAF 工艺的 BioWin 模型和 2013 年 9 月的实际运行数据(如表 1),应用常规灵敏度分析法($S_{i,j}$)和均方根灵敏度分析法(δ_j^{msqr}),考察了 8 项水质指标的模拟出水值(y_i)随参数值(x_j)的变化情况,对 BioWin 中的 412 个参数进行灵敏度分析,找出对模拟结果影响较大,即灵敏度较高的参数.考察的 8 项水质指标为: $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TKN、TN、TP、TSS、COD.

常规灵敏度分析法($S_{i,j}$)用于指示特定参数(x_j)对特定水质指标(y_i)的影响情况,如公式(1)所示,式中 x_j 值增大 10%. 其灵敏度判定准则为: ① $S_{i,j} < 0.25$, 参数对模拟结果没有显著影响; ② $0.25 \leq S_{i,j} < 1$, 参数对模拟结果有影响; ③ $1 \leq S_{i,j} < 2$, 参数对模拟结果有较大影响; ④ $S_{i,j} \geq 2$, 参数对模拟结果影响非常大^[27].

$$S_{i,j} = \left| \frac{\Delta y_i / y_i}{\Delta x_j / x_j} \right| \quad (1)$$

均方根灵敏度分析法(δ_j^{msqr})用于指示特定参数(x_j)对于出水水质指标整体的影响情况,如公式(2)所示.其灵敏度判定准则为: δ_j^{msqr} 值越大,参数对整体模拟结果影响越大^[28].

$$\delta_j^{\text{msqr}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{i,j}^2} \quad (2)$$

1.4 工艺运行优化

应用 BioWin 校正模型和 2013 年 9 月的运行数据,对生物滤池段(DNBF + BAF)在不同外加碳源(甲醇)投加量和不同回流比条件下的运行结果进行模拟,对比不同运行条件下的模拟出水结果,寻找最佳的外加碳源投加量和回流比,对其进行运行优

化,并为污水处理厂实际运行提供有效建议.

2 结果与讨论

2.1 灵敏度分析结果

2.1.1 常规灵敏度分析($S_{i,j}$)

根据常规灵敏度分析($S_{i,j}$)结果,将 412 个参数中所有 $S_{i,j} \geq 0.25$ 的参数及其 $S_{i,j}$ 值列出,共有 14 个参数可认定为对输出结果有影响,即灵敏度较高的参数,具体如表 3 所示.

由表 3 可知,在 14 个参数中,对 DNBF + BAF 工艺模拟出水结果影响最为显著的 3 类参数为:与生物膜有关的参数、与异养菌(OHOs)有关的参数和曝气参数. DNBF 和 BAF 都是生物膜反应器,生物膜是发生生物反应去除污染物的主要场所,其特性对处理效果的影响至关重要,因此与生物膜有关的参数,如扩散常数、介质表面的生物膜覆盖率等对处理效果影响显著. DNBF 中主要进行反硝化反应,其优势菌落为反硝化细菌,BAF 中主要进行硝化反应和各种氧化反应,其优势菌落为各种好氧菌,除硝化细菌为自养菌外,其余大部分为异养菌(OHOs),因此在整个工艺系统中,其优势菌落为异养菌,所以与异养菌特性有关的参数,如产率系数,对处理效果的影响也较为显著.同时,由于反硝化反应与硝化反应受溶解氧浓度的影响较大,而曝气作用可使水中的 DO 浓度升高,且 DNBF 与 BAF 间存在回流,因此曝气参数对整体的处理效果,尤其是脱氮处理效果的影响也较为显著.

2.1.2 均方根灵敏度分析(δ_j^{msqr})

根据均方根灵敏度分析(δ_j^{msqr})结果,将 412 个参数中 δ_j^{msqr} 值最大的 10 个参数及其 δ_j^{msqr} 值降序列

出(表4).由表4可知,在10个 δ_j^{msqr} 值最大的参数中,有4个是与生物膜有关的参数,2个是与异养菌

有关的参数,还有4个是曝气参数,这与常规灵敏度分析($S_{i,j}$)的结果相一致.

表3 常规灵敏度分析($S_{i,j}$)结果

Table 3 Sensitivity analysis results of normalized sensitivity coefficient measurement($S_{i,j}$)									
参数	指标	$S_{i,j}$							
		NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TKN	TN	TP	TSS	COD
计量学参数 (异养菌)	产率系数(好氧)	-0.429 2	0.473 4	0.734 1	-0.391 2				
	内源残留分数						-0.459 8	0.344 8	
	产率系数(缺氧)		0.591 7	0.293 6		0.147 1	-0.344 8		
生物膜参数 (常规参数)	吸附速率			-0.342 6					
	TSS 吸附半饱和常数			0.261 0					
	解吸速率			0.310 0					
	扩散常数	-0.751 2	0.295 9	1.598 7	-0.684 6				-0.245 5
	传质表面生物膜最大覆盖率	-0.643 9		1.288 7	-0.592 9				-0.245 5
有效扩散系数	易生物降解 COD		-0.295 9	-0.277 3					
	溶解氧	-0.811 5	-0.342 6	1.973 9	-0.733 5				
其它参数 (曝气参数)	工艺水 DO 浓度/纯水 DO 浓度	-0.831 7	0.532 5	1.9250	-0.757 9				
	表面压力	-1.321 3	0.769 2	3.066 9	-1.204 2				
	气体有效饱和深度	-0.603 6			-0.550 1	-0.318 8			
	氧气供应(气态)	-1.126 8	0.473 4	1.925 0	-1.026 9				

表4 均方根灵敏度分析(δ_j^{msqr})结果

Table 4 Sensitivity analysis results of mean square sensitivity measurement(δ_j^{msqr})	
参数	δ_j^{msqr}
曝气参数:表面压力	1.284 9
曝气参数:氧气供应(气态)	0.886 2
有效扩散系数:溶解氧	0.836 6
曝气参数:工艺水 DO 浓度/纯水 DO 浓度	0.810 5
生物膜常规参数:扩散常数	0.684 7
生物膜常规参数:传质表面生物膜最大覆盖率	0.562 9
异养菌:产率系数(好氧)	0.423 7
曝气参数:气体有效饱和深度	0.318 0
异养菌:产率系数(缺氧)	0.244 0
有效扩散系数:易生物降解 COD	0.164 4

2.2 模型校正

综合考虑常规灵敏度分析($S_{i,j}$)和均方根灵敏度分析(δ_j^{msqr})的结果,选取对筭筭污水处理厂 DNBf + BAF 模拟出水结果影响最为显著的参数,基于该工艺在2013年9月的实际运行数据(如表1),应用所构建的 BioWin 概化模型对实际运行结果进行模拟,通过不断调整选定的灵敏度最高参数的数值,最终使模拟结果与实测结果相一致,从而实现模型校正.选定的校正参数及其校正结果如表5所示.

应用校正模型对 DNBf + BAF 工艺在2013年9月每一天的运行结果进行模拟,对比模拟结果与实测结果是否一致,如表6和图3所示,从而进一步验证该校正模型的有效性.

表5 BioWin 模型校正参数及校正结果

Table 5 Calibrated values of the most sensitive parameters in BioWin model		
参数	缺省值	校正值
异养菌:产率系数(缺氧)	0.54	0.054
生物膜常规参数:扩散常数	0.8	1.2
有效扩散系数:溶解氧	2.50×10^{-9}	3.75×10^{-9}

由表6可知,对于各项水质指标,校正模型对 DNBf + BAF 工艺在2013年9月的实际运行结果的整体模拟效果较好,模拟结果可较为准确地反映实测结果.由图3可知,除去个别天模拟值与实测值有所偏差外,各项水质指标出水浓度每天的模拟值与实测值均达到较好的吻合.对于个别偏差产生的原因,由于实测数据来自实际污水处理厂的运行数据,一方面由于污水处理厂运行过程不确定性因素太多,因此其出水水质可能存在一定的波动,另一方面

表6 校正模型整体模拟结果与实测结果对比(2013-09)¹⁾

Table 6 Comparison of overall simulation and experiment results (2013-09)		
水质指标	出水	
	实测值	模拟值
COD/mg·L ⁻¹	45.44 ± 9.11	39.56 ± 7.24
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	3.28 ± 1.72	2.38 ± 0.90
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	10.80 ± 2.65	11.06 ± 4.13
TN/mg·L ⁻¹	15.02 ± 3.01	17.20 ± 5.33
TP/mg·L ⁻¹	1.14 ± 0.42	1.00 ± 0.39
TSS/mg·L ⁻¹	7.50 ± 7.16	7.84 ± 2.40

1) 所有数据都经过标准统计分析,显著性水平为95%

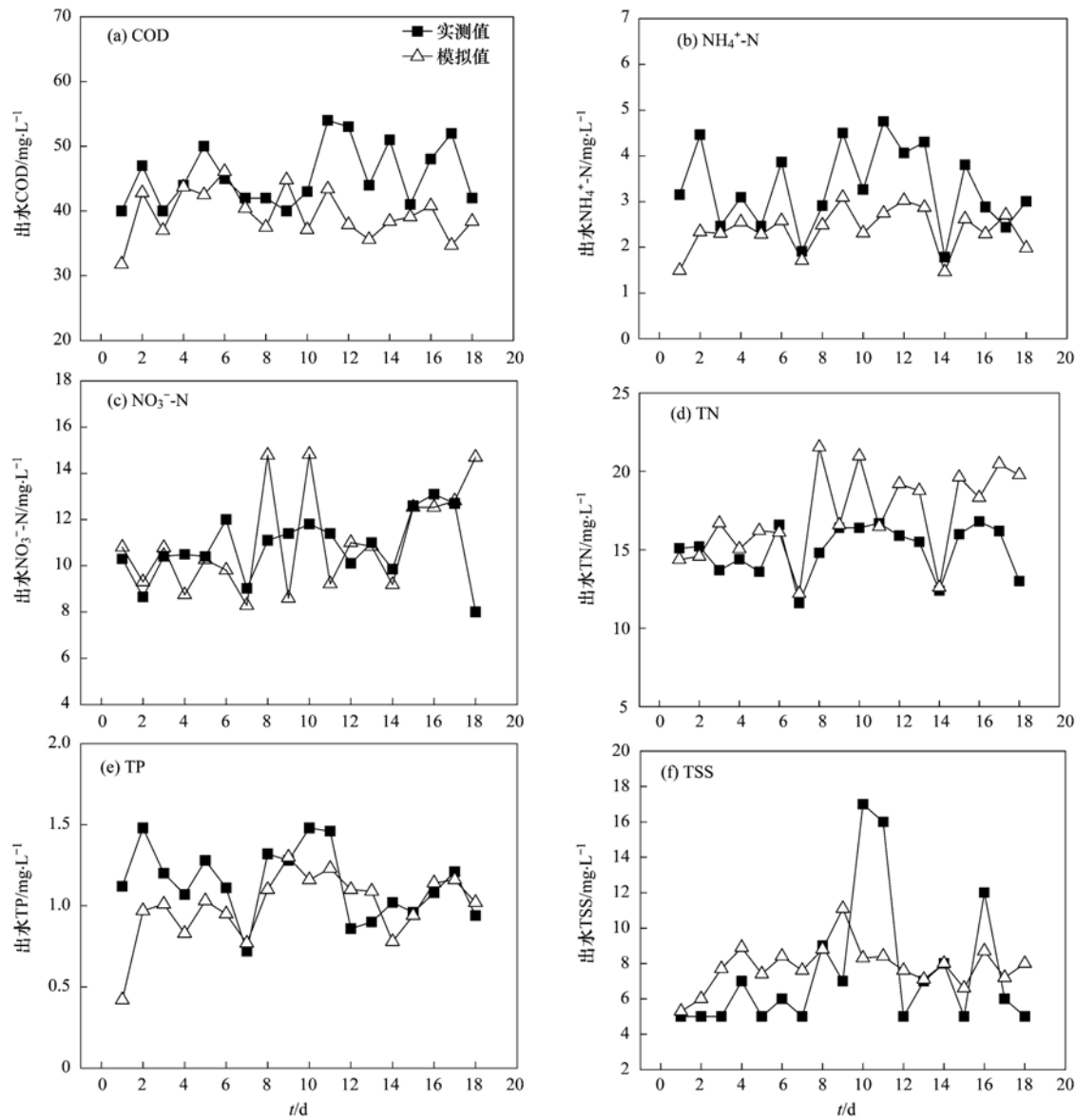


图3 校正模型每天模拟结果与实测结果对比(2013-09)

Fig. 3 Comparison of daily simulation and experiment results (2013-09)

面,水质指标的检测本身存在一定的误差,在误差允许的范围内有所偏差是可以的.

综上可以得出,校正模型是有效的,可以对筲箕污水处理厂DNBF+BAF工艺2013年9月的实际运行结果进行有效模拟.

2.3 模型验证

模型验证是指将校正模型应用于除初始校正工况以外的其它工况的模拟,且模拟效果良好. 本研究中,选用筲箕污水处理厂DNBF+BAF工艺2013年10月的实际运行数据(如表2)进行模型验证,验证结果如表7和图4所示. 从中可知,模拟结果与实测结果的整体对比及每天对比的吻合度均较好,说明校正模型同样可对筲箕污水处理厂DNBF+BAF工

艺2013年10月的实际运行结果进行有效模拟,即模型验证成功.

表7 校正模型整体模拟结果与实测结果对比(2013-10)¹⁾

Table 7 Comparison of overall simulation and experiment results (2013-10)

水质指标	出水	
	实测值	模拟值
COD/mg·L ⁻¹	44.74 ± 6.29	39.88 ± 6.73
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	1.78 ± 1.55	2.79 ± 1.07
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	13.57 ± 3.27	11.41 ± 3.85
TN/mg·L ⁻¹	16.36 ± 3.53	19.40 ± 5.61
TP/mg·L ⁻¹	1.01 ± 0.34	1.16 ± 0.33
TSS/mg·L ⁻¹	7.05 ± 4.74	9.16 ± 2.98

1) 所有数据都经过标准统计分析,显著性水平为95%

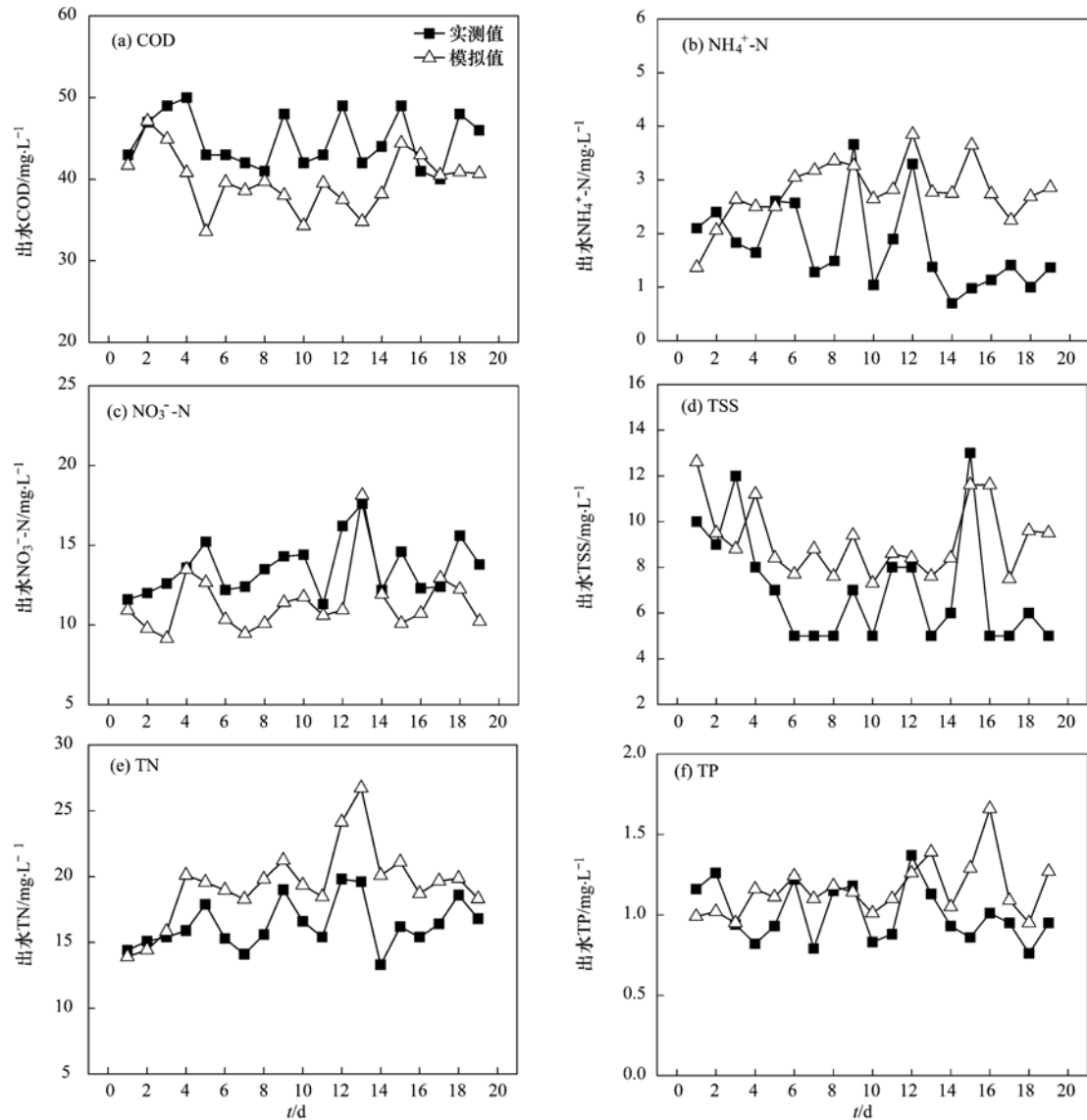


图 4 校正模型每天模拟结果与实测结果对比(2013-10)

Fig. 4 Comparison of daily simulation and experiment results (2013-10)

3 工艺运行优化结果

3.1 一级 B 标准

箕筭污水处理厂出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)的一级 B 标准^[24],当前运行条件可以满足排放标准,但处理效果及运行成本仍未达到最佳,本研究针对外加碳源投加量和回流比对其进行工艺运行优化。

3.1.1 外加碳源投加量

箕筭污水处理厂的外加碳源为甲醇,其投加量很少,以 2013 年 9 月的实际运行数据为例,投加甲醇后滤池段进水 COD 浓度由 $134.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $140.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,改变很小,且进水 BOD_5/COD 约为

0.40,可生化性较强,因此,投加甲醇只能起到较小的调节作用.为研究投加甲醇对污染物去除效果的影响,应用 BioWin 校正模型对投加甲醇和不投加甲醇两种情况进行模拟,模拟结果如表 8 所示.从中可知,对比投加甲醇和不投加甲醇的模拟出水结果,二者并没有太大差别,且出水水质可满足一级 B 标准,即投加甲醇对于生物处理的调节作用并不明显,即没有显著提高生物滤池段的处理效果.原因在于,滤池段进水为高效沉淀池出水,其中含有足够的 COD,可以满足 DNB 和 BAF 中生物反应所需.因此,根据优化结果,建议不再对箕筭污水处理厂生物滤池段投加甲醇,此时进水 $\text{C}/\text{N}=4.43$,可节约运行成本,且处理效果较好。

表 8 外加碳源投加量优化结果(一级 B 标准)/mg·L⁻¹

Table 8 Optimization result of methanol adding (discharge standard B)/mg·L⁻¹

外加碳源	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TN	TP	TSS	COD
投加	2.87	9.53	3.53	17.75	0.95	8.10	39.70
不投加	2.72	10.72	3.28	18.55	0.97	7.90	39.40

3.1.2 回流比

回流比是 DMBF + BAF 工艺脱氮处理效果的一个重要影响因素,应用 BioWin 校正模型,模拟回流比为 50%、100%、150%、200%、250%、300% 条件下的污染物去除效果,结果如表 9 所示,综合考虑各项污染物的去除效果和工艺运行成本,可知筲箕污水处

理厂生物滤池段的最佳回流比为 50%。小回流比脱氮效果好是因为溶解氧(DO)和水力停留时间(HRT)是 DMBF 段反硝化反应的重要影响因素,回流比越高,由硝化段带来的 DO 越多,且造成 HRT 越短,因此反硝化处理效果越差,这表明该工艺脱氮处理效果的控制因素是 DMBF 段的 DO 浓度和 HRT。

表 9 回流比优化结果(一级 B 标准)/mg·L⁻¹

Table 9 Optimization result of reflux ratio(discharge standard B)/mg·L⁻¹

回流比/%	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TN	TP	TSS	COD
50	2.89	8.58	3.06	16.30	1.00	10.40	40.60
100	2.87	9.53	3.28	17.75	0.95	8.10	39.70
150	2.88	10.65	3.03	18.80	0.92	6.70	39.10
200	2.90	11.72	2.80	19.59	0.89	5.70	38.70
250	2.92	12.59	2.63	20.26	0.87	5.00	38.40
300	2.95	13.28	2.50	20.83	0.85	4.40	38.20

3.2 一级 A 标准

当前,污水处理厂排放标准日益提高,本研究假设筲箕污水处理厂执行一级 A 排放标准,通过对回流比和外加碳源投加量进行工艺优化,使其达到最佳运行状态,并使出水达标。

艺脱氮处理效果的控制因素是回流比决定的 DMBF 段的 DO 浓度和 HRT,因此首先对回流比进行运行优化。应用 BioWin 校正模型,分别模拟回流比为 50%、100%、150%、200%、250%、300% 条件下该工艺的污染物出水去除效果,结果如表 10 所示,综合考虑各项污染物的去除效果和工艺运行成本,可知筲箕污水处理厂生物滤池段的最佳回流比为 50%。

3.2.1 回流比

以上分析可知,筲箕污水处理厂 DMBF + BAF 工

表 10 回流比优化结果(一级 A 标准)/mg·L⁻¹

Table 10 Optimization result of reflux ratio(discharge standard A)/mg·L⁻¹

回流比/%	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TN	TP	TSS	COD
50	2.71	9.57	3.06	17.19	1.00	10.20	40.3
100	2.72	10.72	3.28	18.55	0.97	7.90	39.4
150	2.75	11.94	3.03	19.52	0.94	6.50	38.8
200	2.78	12.93	2.80	20.29	0.91	5.60	38.4
250	2.81	13.72	2.63	20.93	0.89	4.90	38.1
300	2.85	14.37	2.50	21.48	0.87	4.30	37.8

3.2.2 外加碳源投加量

应用 BioWin 校正模型,模拟筲箕污水处理厂 DMBF + BAF 工艺,在不投加甲醇(COD = 134.72 mg·L⁻¹)和投加甲醇后 COD 分别为 140、145、150、155、160、165、170 mg·L⁻¹,且回流比均为 50% 条件下的污染物出水去除效果,结果如表 11 所示。综合考虑各项污染物的去除效果和工艺运行成本,可知筲

箕污水处理厂生物滤池段的最佳碳源投加水平为 155 mg·L⁻¹,此时进水 C/N = 5.10。由 COD = 155 mg·L⁻¹ 模拟结果可知,除出水 TSS = 11.10 mg·L⁻¹,略高于一级 A 排放标准 10 mg·L⁻¹外,其余出水指标均可达到一级 A 标准,对于增强 TSS 的去除效果,可由调整一级处理 Sedipac 3D 组合式高效沉淀池的运行来达到,如增加高效沉淀池的水力停留时间。

表 11 外加碳源投加量优化结果(一级 A 标准)/mg·L⁻¹
Table 11 Optimization result of methanol adding (discharge standard A)/mg·L⁻¹

进水 COD	出水浓度						
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TN	TP	TSS	COD
不投加	2.71	9.57	3.06	17.19	1.00	10.20	40.3
140	2.90	8.55	2.96	16.28	1.00	10.40	40.6
145	3.05	7.72	2.92	15.57	0.97	10.60	40.9
150	3.18	7.02	2.89	14.97	0.94	10.80	41.2
155	3.31	6.36	2.96	14.54	0.91	11.10	41.6
160	3.45	5.72	3.11	14.21	0.88	11.40	42.0
165	3.60	5.03	3.36	13.95	0.85	11.70	42.4
170	3.73	4.46	3.59	13.76	0.83	12.00	42.7

4 结 论

(1)基于筲筴污水处理厂 DNBF + BAF 工艺的 BioWin 模型及 2013 年 9 月的实际运行数据,应用常规灵敏度分析($S_{i,j}$)和均方根灵敏度分析(δ_j^{msqr})两种灵敏度分析方法,对 BioWin 中所有 412 个参数进行灵敏度分析.综合考虑两种灵敏度分析的结果可知,对该工艺的 BioWin 模拟结果影响最为显著,即灵敏度最高的 3 类参数为:与生物膜有关的参数、与异养菌(OHOs)有关的参数和曝气参数.

(2)根据灵敏度分析结果,选取对 DNBF + BAF 工艺 BioWin 模拟结果影响最为显著的参数,应用 BioWin 模型对 2013 年 9 月的运行结果进行模拟,通过调整选定参数值对模型进行校正;然后应用校正模型对 2013 年 10 月的运行结果进行模拟,实现模型验证.结果表明,校正模型对 2013 年 9 月和 10 月的运行结果均可进行有效模拟.所以,本研究构建的 DNBF 池 + BAF 池工艺 BioWin 模型和基于灵敏度分析的模型校正方法是可行的,可用于实际生物滤池工艺的模拟.

(3)应用 BioWin 校正模型,模拟筲筴污水处理厂 DNBF + BAF 工艺在不同进水碳源投加量和回流比条件下的运行结果,对其进行工艺优化,结果表明:①一级 B 排放标准的最佳运行条件为:回流比 = 50%,取消甲醇投加,进水 C/N = 4.43;②一级 A 排放标准的最佳运行条件为:回流比 = 50%,投加甲醇后的进水 COD = 155 mg·L⁻¹,进水 C/N = 5.10.

参考文献:

[1] 许保玖,龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. (第二版). 北京:高等教育出版社,2000.
[2] Kim K S, Cho K M, Choi H, *et al.* A pilot study on nitrogen and phosphorus removal by a modified photostrip process [J]. Water Science Technology, 2000, **42**(3-4): 199-206.
[3] 张红晶. 侧向流曝气生物滤池处理生活污水的特性及其除磷脱氮效能研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.6-7.

[4] Wang J D, Wu C Q, Chen J M, *et al.* Denitrification removal of nitric oxide in a rotating drum biofilter [J]. Chemical Engineering Journal, 2006, **121**(1): 45-49.
[5] Laanbroek H J, Bodelier P L E, Gerards S. Oxygen consumption kinetics of nitrosomonas europaea and nitrobacter hamburgensis grown in mixed continuous cultures at different oxygen concentrations[J]. Archives of Microbiology, 1994, **161**(2): 156-162.
[6] Wrage N, Velthof G L, van Beusichem M L, *et al.* Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(12-13): 1723-1732.
[7] Zhang P, Zhou Q. Simultaneous nitrification and denitrification in activated sludge system under low oxygen concentration[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2007, **1**(1): 49-52.
[8] 曾林慧,徐国勋,张强,等. 二级曝气生物滤池中碳、氮代谢特性的研究[J]. 中国给水排水,2009, **25**(5): 66-69.
[9] Shen Y J, Wu G X, Fan Y B, *et al.* Performances of biological aerated filter employing hollow fiber membrane segments of surface-improved poly (sulfone) as biofilm carriers[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(7): 811-817.
[10] Singer A, Parnes S, Gross A, *et al.* A novel approach to denitrification processes in a zero-discharge recirculating system for small-scale urban aquaculture[J]. Aquacultural Engineering, 2008, **39**(2-3): 72-77.
[11] Sailing W J B, Westerman P W, Losordo T M. Wood chips and wheat straw as alternative biofilter media for denitrification reactors treating aquaculture and other wastewaters with high nitrate concentrations[J]. Aquacultural Engineering, 2007, **37**(3): 222-233.
[12] 李斌,郝瑞霞. 固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选[J]. 环境科学,2013, **34**(4): 1428-1434.
[13] Ryu H D, Kim D, Lim H E, *et al.* Nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater in four-stage biological aerated filter system[J]. Process Biochemistry, 2008, **43**(7): 729-735.
[14] 郭俊元,杨春平,曾龙云,等. 回流比水力负荷对前置反硝化生物滤池工艺处理污水的影响研究[J]. 环境科学学报,2010, **30**(8): 1615-1621.
[15] 赵海霞,石恺,付林,等. 生物滤池脱氧除磷的强化及其对含

- 盐废水的处理[J]. 山东大学学报(工学版), 2012, **2**: 83-89.
- [16] Wang X J, Gu X Y, Lin D X, *et al.* Treatment of acid rose dye containing wastewater by ozonizing-biological aerated filter [J]. *Dyes and Pigments*, 2007, **74**(3): 736-740.
- [17] 刘明国, 吴昌永, 周岳溪, 等. 臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 651-656.
- [18] 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 等. AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2216-2222.
- [19] 余彬, 刘锐, 程家迪, 等. O₃-BAF 深度处理制革废水中沿程污染物降解规律[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 974-978.
- [20] 李伟, 赵晶, 余健, 等. 模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 943-949.
- [21] 胡志荣, 周军, 甘一萍, 等. 基于 BioWin 的污水处理工艺数学模拟与工程应用[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(4): 19-23.
- [22] 沈童刚, 邱勇, 应启锋, 等. 污水处理厂模拟软件 BioWIN 的应用[J]. 给水排水, 2009, **35**(增刊): 459-462.
- [23] Eldyasti A, Nakhla G, Zhu J. Development of a calibration protocol and identification of the most sensitive parameters for the particulate biofilm models used in biological wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **111**: 111-121.
- [24] Liwarska-Bizukojc E, Biernacki R. Identification of the most sensitive parameters in the activated sludge model implemented in BioWin software[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(19): 7278-7285.
- [25] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [26] 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.
- [27] Alberto O, Catarina S. O, Joel A, *et al.* Determination of apparent kinetic and stoichiometric parameters in a nitrifying fixed-bed reactor by in situ pulse respirometry[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **55**: 123-130.
- [28] Petersen B, Gernaey K, Henze M, *et al.* Calibration of activated sludge models: a critical review of experimental designs[A]. In: *Biotechnology for the Environment: Wastewater Treatment and Modeling, Waste Gas Handling* [M]. Netherlands: Springer, 2003, **3C**: 101-186.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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

国内外公开发行人