

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

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

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000~2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评估与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评估	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性

丁佳丽^{1,4}, 刘锐^{1*}, 郑炜¹, 宋小燕¹, 余卫娟³, 叶朝霞³, 陈吕军^{1,2*}, 张永明⁴

(1. 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; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 嘉兴市环境保护监测站, 嘉兴 314000; 4. 上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234)

摘要: 研究了间歇式膜生物反应器在不同进水碳氮比和有机负荷下对养猪沼液中11种兽用抗生素的去除特性, 以及污泥中抗生素的含量变化。结果表明, 水力停留时间(HRT) ≥ 5 d、化学需氧量(COD)/总氮(TN) = 2.1时, 该膜生物反应器对抗生素和COD的去除率均较高, 分别达到(79.1 $\pm$ 0.7)%和(88.4 $\pm$ 1.4)%; 当HRT缩短至3 d时, 虽然COD去除率不受影响, 但抗生素的去除率明显下降; COD/TN从2.1降至0.7后, 抗生素去除效率不受影响, 但COD去除率明显降低。长污泥龄(SRT)下污泥中出现四环素类和喹诺酮类抗生素的持续积累, 积累量随污泥龄的缩短而降低。污泥中的抗生素含量与组成受进水影响较大。

关键词: 抗生素; 膜生物反应器; 猪场沼液; 污泥吸附; 生物降解

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4148-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.11.027

Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater

DING Jia-li^{1,4}, LIU Rui^{1*}, ZHENG Wei¹, SONG Xiao-yan¹, YU Wei-juan³, YE Zhao-xia³, CHEN Lü-jun^{1,2*}, ZHANG Yong-ming⁴

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University in Zhejiang, Jiaxing 314006, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Jiaxing Environmental Protection Monitoring Station, Jiaxing 314000, China; 4. College of Life and Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: The removal performance of 11 veterinary antibiotics in piggery wastewater and their accumulation in the activated sludge were studied in an intermittent aeration membrane bioreactor (IAMBR) at different COD/TN ratios and organic loads. The results showed that both antibiotics and chemical oxygen demand (COD) were efficiently removed at hydraulic retention time (HRT) of no less than five days and COD/TN ratio of 2.1, the removal rate was (79.1 $\pm$ 0.7)% for total antibiotics and was (88.4 $\pm$ 1.4)% for COD. As HRT was shortened to three days, the removal rate of COD was little changed but the removal rate of total antibiotics was significantly decreased. As COD/TN decreased from 2.1 to 0.7, the removal rate of total antibiotics was little changed, but the COD removal rate was significantly decreased. Antibiotics of tetracycline and quinolone species kept accumulating in the sludge at long SRT, and the accumulation amount was decreased with shorter SRT. The concentration and composition of antibiotic in the sludge were influenced by the raw wastewater.

Key words: antibiotics; membrane bioreactor; piggery wastewater; sludge adsorption; biodegradation

规模化养猪过程中为预防疾病、促进生长往往使用大量的抗生素。虽然与浓度高达成百上千 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的化学需氧量(COD)、氨氮等常规污染物相比, 养猪沼液中的抗生素含量只有 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平^[1,2], 但是抗生素的生物危害性大^[2,3]。出于生态安全的考虑, 有必要研究养猪沼液生物处理过程中抗生素的去除特性。

养猪沼液通常使用普通活性污泥法(conventional activated sludge, CAS)、序批式反应器、缺氧-好氧组合技术或者厌氧-缺氧-好氧组合技术处理^[4,5]。近年来为了提高容积负荷、加强硝化

效果、克服污泥膨胀并彻底解决病原菌污染等问题, 膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)技术逐渐得到应用。CAS对抗生素的去除效果有限, 而相比之下MBR对抗生素有更好的去除效果^[6]。例如, Sahar等^[7]研究发现膜生物反应器(MBR)对甲

收稿日期: 2015-03-26; 修订日期: 2015-06-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)重大项目(2012AA06A304); 嘉兴市科技计划项目(2012AZ1013); 南湖区科技计划项目(2013QS01)

作者简介: 丁佳丽(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为养猪废水中抗生素的污染去除, E-mail: wdoxssy@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: liuruitsinghua@163.com, chenlj@mail.tsinghua.edu.cn

氧苄啶、磺胺二甲嘧啶、罗红霉素、红霉素和克拉霉素的去除率分别高达 99%、70%、68%、61% 和 86%, 比 CAS 的去除率提高了 15% ~ 42%。Radjenovic 等^[8]报道 MBR 对氧氟沙星、磺胺甲噁唑和红霉素的去除率分别为 60.5%、67.5% 和 94.0%, 而相应的 CAS 去除率仅为 23.8%、55.6% 和 23.8%。

本试验采用间歇曝气式膜生物反应器 (intermittent aeration membrane bioreactor, IAMBR) 处理养猪沼液, 通过一个运行周期内缺氧、好氧环境的多次交替, 在反应器内造成亚硝酸盐的积累, 从而实现短程分步硝化和反硝化。与传统的 AO 工艺相比, 短程分步硝化和反硝化可以节约 25% 的曝气能耗和 40% 的有机碳源, 且节约大量碱度消耗^[9~11]。因此, IAMBR 对于养猪沼液等碳氮比低、氨氮浓度高的废水, 比传统的 AO 工艺更有适用性^[12]。本研究在高效去除 COD 和总氮的缺氧-好氧交替运行模式下^[12], 考察了不同的水力停留时间 (HRT)、污泥龄 (SRT) 和进水 COD/TN 条件下水相和污泥相中 11 种兽用抗生素的含量变化, 探讨了上述 3 个因素对水中抗生素去除效率和污泥中吸附量的影响。研究结果旨在为综合把握 MBR 去除抗生素的机制, 科学确定既能高效去除常规水质污染物、又能有效去除微量抗生素污染的最佳工艺条件提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原水水质

嘉兴市某大型养猪场废水经过厌氧发酵后生成的养猪沼液, 用聚合氯化铝和聚丙烯酰胺混凝沉淀后冷藏储存, 作为试验进水。试验期间共采集了两批水样, 第一批水样供运行 1 ~ 80 d 使用, 常规水质如下: COD 为 $(1\,210 \pm 391)$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮为 $(1\,022 \pm 268)$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总氮为 $(1\,529 \pm 175)$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7.8 ~ 8.1, 碱度 (以 CaCO_3 计) 为 $4\,200 \sim 6\,000$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。第二批水样供运行 81 ~ 193 d 使用, 常规水质如下: COD 为 $(1\,060 \pm 278)$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮为 (977 ± 312) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总氮为 $(1\,336 \pm 292)$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7.8 ~ 8.3, 碱度 (以 CaCO_3 计) 为 $5\,600 \sim 6\,500$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2 试验装置和条件

试验用 IAMBR 为不锈钢圆柱体结构, Φ 25 cm $\times$ 40 cm, 有效容积 15 L。内置 1 片聚偏氟乙烯 (PVDF) 平板膜 (日本三菱丽阳株式会社, 有效膜面积 0.1 m^2 , 膜孔径 $0.1\text{ }\mu\text{m}$)。采用可编程逻辑控制

器控制间歇进出水、间歇曝气。每天 2 个运行周期, 每个运行周期为 12 h, 具体运行模式为: 进水 10 min $\rightarrow$ 无曝气 55 min $\rightarrow$ 曝气 90 min $\rightarrow$ 进水 4 min $\rightarrow$ 无曝气 45 min $\rightarrow$ 曝气 100 min $\rightarrow$ 进水 4 min $\rightarrow$ 无曝气 50 min $\rightarrow$ 曝气 95 min $\rightarrow$ 进水 2 min $\rightarrow$ 无曝气 55 min $\rightarrow$ 曝气 40 min $\rightarrow$ 曝气、膜过滤出水 120 min。上述缺氧-好氧交替运行条件是针对 COD 和总氮的高效去除而设计的^[12], 未针对抗生素的去除进行优化探讨。不过有报道指出, 缺氧与好氧交替的条件, 由于提供交替的氧化还原条件, 可能会比单纯的好氧处理取得更高的抗生素去除率^[13]。

进出水输送采用蠕动泵 (BT100-2J 精密蠕动泵, 保定兰格恒流泵有限公司); 曝气阶段维持溶解氧浓度为 $0.5 \sim 2.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 不曝气阶段增加叶轮搅拌 (JJ-1 精密增力搅拌器, 上海华科实验器材有限公司), 转速 $2\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。使用加热棒保持水温为 $29 \sim 32^\circ\text{C}$ 。

接种污泥取自嘉兴市联合污水厂, 接种后 MLSS 为 $6\,300\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。共运行 193 d, 分为 3 个工况, 运行条件如表 1 所示。工况 1 (1 ~ 62 d), HRT = 7 d, SRT = 62 d, 进水使用养猪沼液原水, 因此进水 COD/TN 较低, 仅为 0.7。此时, COD、氨氮和总氮的容积负荷均较低, 分别为 0.15 、 0.13 和 $0.21\text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。工况 2 (63 ~ 93 d), HRT = 5 d, SRT = 93 d, 在进水中外加乙酸钠, 使进水 COD/TN 提高至 2.1, 以此来解决工况 1 中因碳源不足而导致的污泥浓度不增加、污泥解体的问题。此时, COD 的容积负荷升高到工况 1 的 4 倍左右, 为 $0.63\text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 而氨氮和总氮的容积负荷分别为 $0.11\text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $0.28\text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。工况 3 (94 ~ 193 d), HRT 为 3 d, SRT 为 30 ~ 40 d, 在进水中继续添加乙酸钠使 COD/TN 为 2.1。此时, COD 的容积负荷、氨氮和总氮的容积负荷有不同幅度的增长, 分别为 1.07 、 0.19 和 $0.44\text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。分别在第 34、54、62、70、93、176、184 d 取样测试废水和污泥中的抗生素浓度。

1.3 抗生素分析项目与分析方法

根据前期研究结果^[2], 选取了 11 种兽用抗生素作为研究对象, 分别为四环素 (TC)、金霉素 (CTC)、土霉素 (OTC)、强力霉素 (DC)、磺胺甲噁唑 (SMX)、磺胺二甲嘧啶 (SMD)、环丙沙星 (CIP)、诺氟沙星 (NOR)、恩诺沙星 (ENR)、泰乐菌素 (TYL)、罗红霉素 (RTM)。所有抗生素标准品均购自德国 Dr. Ehrenstorfer GmbH 公司。

表1 试验条件
Table 1 Operational conditions

项目	工况 1	工况 2	工况 3
运行天数/d	1 ~ 62	63 ~ 93	94 ~ 193
HRT/d	7	5	3
SRT/d	62	93	30 ~ 40
进水 COD/TN	0.7	2.1	2.1
进水 COD/mg·L ⁻¹	1 101 ± 216	3 152 ± 159	3 326 ± 313
进水氨氮/mg·L ⁻¹	920 ± 159	530 ± 219	578 ± 188
进水总氮/mg·L ⁻¹	1 483 ± 114	1 388 ± 194	1 317 ± 308
COD 容积负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹	0.15	0.63	1.07
氨氮容积负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹	0.13	0.11	0.19
总氮容积负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹	0.21	0.28	0.44
排泥情况	不排泥,但有泡沫引起的少量污泥流失	不排泥,液位失灵引起污泥流失	间歇排泥

废水和污泥中各抗生素浓度的测试方法参考文献[14, 15],使用固相萃取-高效液相色谱串联质谱法(SPE-HPLC-MS/MS). 取 20 mL 废水稀释 10 倍,加入 0.2 g EDTA 钠,使用 10% 的盐酸调节 pH 为 4.0. 水样中抗生素使用 Oasis HLB 柱(6 cc/200 mg,美国 Waters 科技公司)富集浓缩,流速为 2 ~ 3 mL·min⁻¹. 上完水样,HLB 柱真空干燥 10 min,随后用 5 mL 甲醇缓慢洗脱. 取 0.2 g 冻干的污泥样品,添加 4 种替代标浓度均为 1 mg·L⁻¹ 的替代标混合液(thiabendazole-d₄、sulfamethoxazole-d₄、ciprofloxacin-d₈、erythromycin-¹³C-d₃,加拿大 Toronto Research Chemicals 公司) 200 μL. 添加 5 mL 提取缓冲液(甲醇、0.1 M 的 EDTA 钠溶液、柠檬酸盐缓冲液(pH = 4)体积比分别为 3:1:2),通过辅助超声提取法[涡旋混合 1 min,超声 15 min,离心 5 min (3 500 r·min⁻¹)]收集上清液,重复 3 次. 合并的上清液稀释至 200 mL,加入 0.2 g EDTA 钠及使用 10% 的盐酸调节 pH 为 4.0. 提取液使用 SAX-HLB 串联柱体系先去除腐殖质等杂质,再富集抗生素,流速为 2 ~ 3 mL·min⁻¹. 上完水样,拆除 SAX 柱(3 mL/200 mg,美国 Thermo Fisher Scientific 公司). HLB 柱真空干燥 10 min 后,用 5 mL 甲醇缓慢洗脱. 废水和污泥的固相萃取洗脱液均氮吹至 0.1 mL 左右,添加内标物 Simatone(美国 Accustandard 公司)后,添加甲醇定容. 最终样品均保存于 2 mL 棕色小瓶,通过 HPLC-MS/MS(Waters e2695 型液相色谱仪、Waters TQ Detector 型串联三重四级杆质谱仪)进行定性和定量分析,色谱和质谱的分析条件参照文献[15].

1.4 常规水质指标分析方法

常规水质指标 COD、氨氮、总氮、碱度的分析参照文献中的标准方法^[16]. MLSS 依据重量法测

定. pH 采用便携式 pH 计(HM-30P,日本 DKK-TOC 公司);温度和 DO 值采用便携式 DO 仪(DO-31P,日本 DKK-TOC 公司). 甲醇、乙腈为色谱纯,EDTA 钠、柠檬酸、柠檬酸钠均为分析纯,乙酸钠为化学纯,试验用水为 Milli-Q 水.

2 结果与讨论

2.1 IAMBR 中污泥浓度变化及其对常规污染物的去除情况

工况 1 和工况 2,由于污泥有机负荷很低,因此即使污泥龄很长,但是反应器中的污泥浓度仍然不增长,污泥浓度波动于 5.8 ~ 8.0 g·L⁻¹之间. 工况 3 在提高有机负荷后,污泥浓度增长较快,排泥使 SRT 缩短至 30 ~ 40 d,MLSS 维持在(7.6 ± 2.1)g·L⁻¹.

3 种工况下 IAMBR 对 COD 的去除效率及容积负荷如图 1 所示. 工况 1 的 COD 去除率低且不稳定,为(61.0 ± 20.3)%,工况 2 的 COD 去除率稳定在(88.4 ± 1.4)%,工况 3 的 COD 去除率进一步上升至(91.7 ± 1.5)%. 氨氮和总氮的去除率在工况 1 也比较低,分别为(79.6 ± 16.4)%和(28.0 ± 20.0)%;工况 2 时上升至(87.7 ± 9.8)%和(86.5 ± 8.6)%;工况 3 时则下降至(57.9 ± 26.2)%和(61.4 ± 21.0)%. 工况 2 条件下实现了对 COD、氨

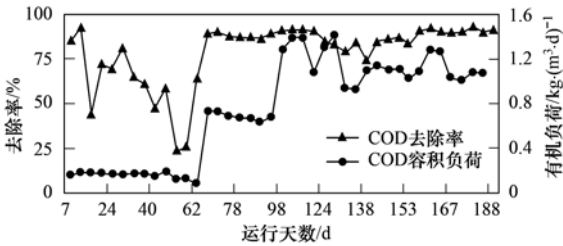


图1 IAMBR 中 COD 的容积负荷及去除率

Fig. 1 Volumetric loads and removal rates of COD in IAMBR

氮和总氮这 3 种常规水质指标的同步高效去除。

2.2 废水中抗生素的去除

2.2.1 抗生素的去除率

3 种工况下废水中抗生素的浓度变化如图 2 所示。其中工况 1 取样测试 3 次, 工况 2 和工况 3 分别取样测试两次。80 d 前使用第一批次采集的原水, 因此 34、54、62、70 d 检测得到的抗生素总浓度均较高且差异不大, 为 $42.9 \sim 46.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 80 ~ 184 d 使用第二批次采集的原水, 抗生素总浓度较低且差别不大, 为 $21.3 \sim 29.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。所有抗生素中, 四环素类含量最高, 占抗生素总量的 34% ~ 75%。工况 1 和工况 2 进水以 DC 和 TC 为主, 占四环素类总含量的 89% ~ 94%; 而工况 3 进水则以 OTC 和 CTC 为主, 占四环素类总含量的 61% ~ 62%。进水中磺胺类抗生素的含量仅次于四环素, 以 SMD 为主, 占抗生素总量的 17% ~ 33%。喹诺酮类抗生素含量排第三, ENR、CIP、NOR 的含量接

近, 单个抗生素浓度在 $1.0 \sim 4.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。大环内酯类抗生素含量最少, TYL 检出浓度很低, 而 RTM 在全程测试中均未检出。

工况 1 ~ 3 上清液中抗生素的总浓度分别为 $5.9 \sim 7.1$ 、 $8.9 \sim 10.9$ 和 $12.0 \sim 18.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 膜过滤出水的抗生素总浓度比上清液略低但数值接近, 分别在 $5.1 \sim 9.0$ 、 $4.9 \sim 9.3$ 和 $10.6 \sim 20.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。膜截留作用对抗生素去除的贡献很小。

3 种工况下抗生素的容积负荷变化不大, 在 $6.3 \sim 7.8 \text{ mg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 之间。工况 1 和工况 2 下抗生素的去除率较高, 分别为 $(85.2 \pm 4.0)\%$ 和 $(79.1 \pm 0.7)\%$; 工况 3 抗生素的去除率很低, 只有 $(28.4 \pm 24.6)\%$ 。总体来说, 无论是抗生素总量还是四环素类或磺胺类抗生素, 工况 1 和工况 2 下水相中的去除效率都较高。喹诺酮类和大环内酯类抗生素由于原水含量较低, 因此去除率相对较低且波动较大。

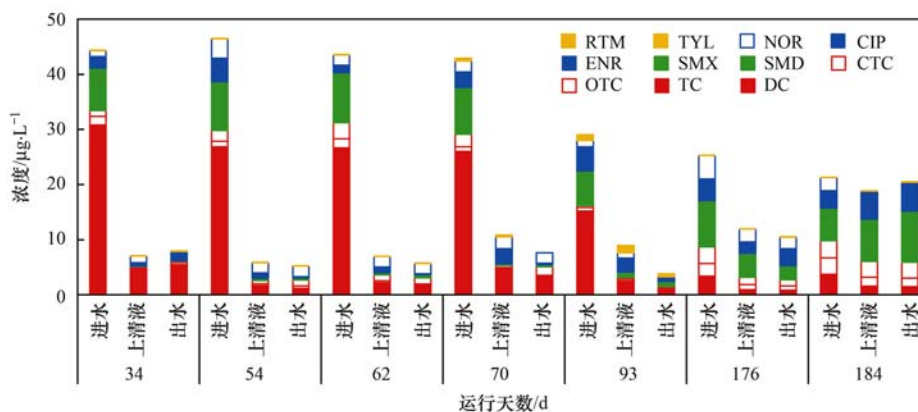


图 2 进水、出水和上清液中抗生素的浓度

Fig. 2 Variations of antibiotic concentrations in the influent, effluent and supernatant

2.2.2 影响抗生素去除的因素

比较工况 2 与工况 3, 工况 3 具有较短的 HRT 和较高的 COD 容积负荷。此时工况 2 ~ 3 下的 COD 去除率虽然很高, 但是工况 3 抗生素去除率较工况 2 时明显下降。这意味着 HRT 可能通过改变有机物的容积负荷来影响抗生素的去除效果。已有研究发现, 较高的有机负荷会降低微量有机物的去除效率。McAdam 等^[17] 研究发现采用活性污泥法处理烷基酚类微量污染物时, 较高的有机物负荷条件不利于烷基酚类物质的去除。Carranza-Diaz 等^[18] 研究发现人工湿地处理城市污水时, 较高的有机物负荷条件会降低双氯芬酸、布洛芬、萘普生、双酚 A 等 11 种微量有机污染物的去除率。在生物处理体系内, 污泥吸附和生物降解都是抗生素及常规有机物去除的

主要途径^[19, 20]。包括抗生素在内的有机物一般都表现为先污泥吸附后生物降解的去除过程^[21]。有机物负荷较高时, 抗生素及与其他有机物可能存在竞争吸附、竞争生物降解行为, 进而对抗生素的去除过程产生不利影响。Conkle 等^[22] 研究发现废水中的 3 种喹诺酮类抗生素 (环丙沙星、氧氟沙星和诺氟沙星) 在人工湿地处理中存在着吸附竞争行为。Khanal 等^[19] 发现雌激素吸附到活性炭上时, 与其他有机物 (TOC) 发生了竞争吸附行为。

比较工况 1 和工况 2, 发现进水碳氮比对 COD 的去除影响很大, 在极低碳氮比的工况 1 下, 由于污泥有机负荷过低, 微生物活性下降, COD 去除率仅为 $(61.0 \pm 20.3)\%$, 远远低于提高碳氮比后工况 2 的 $(88.4 \pm 1.4)\%$ 。但是, 进水碳氮比的变化未对本

研究的抗生素去除产生明显影响. 无论极低碳氮比的工况 1, 还是提高碳氮比后的工况 2, 抗生素都能保持在 79.1% 以上的较高去除率.

上述针对抗生素去除影响因素的探讨是依据实际废水的连续生物处理试验, 通过投加乙酸钠来提高进水 COD 浓度和进水碳氮比, 同时缩短 HRT 来提高有机物负荷获得的, 在此过程中进水 COD 浓度、进水碳氮比、进水 COD 负荷以及其它污染物的负荷同时发生了变化. 今后的研究中, 有必要采取单因素变量方法, 对各因素的影响进一步加以确认.

2.2.3 单类抗生素去除率与初始浓度的关系

IAMBR 在进水抗生素浓度较高时显示了较高的去除率. 把废水中各类抗生素的去除率与其进水浓度的关系进行回归, 如图 3 所示, 发现进水浓度大于 $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 单类抗生素的去除率稳定且绝大多数高于 80%; 而进水浓度低于 $5.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 抗生素去除率波动很大. 此结果与文献报道一致, McAdam 等^[17]研究发现采用活性污泥法处理烷基酚类微量污染物, 高浓度条件较低浓度时的去除率更高.

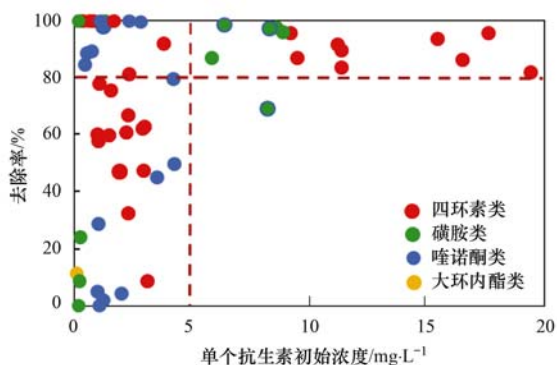


图 3 抗生素的去除率与初始浓度的关系

Fig. 3 Dependence of the antibiotic removal rates on the initial concentrations

2.3 污泥中抗生素的累积

废水中抗生素容易发生相转移, 从而吸附积累到污泥中. 在检测水中抗生素浓度变化的同时, 测试了 3 种运行工况下污泥中兽用抗生素的浓度, 如图 4 所示. 工况 1 ~ 2 污泥龄较长, 污泥中抗生素浓度持续增加, 第 34 d 为 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 至第 62 d 时持续增加至 $13.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 第 65 d 由于液位控制失灵, 发生污泥流失, 70 d 时污泥中抗生素浓度比 62 d 略微减少; 此后至第 93 d 又有少量增加. 工况 3 污泥中抗生素含量大幅减少, 第 176 d 抗生素浓度降低至 $10.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 在污泥吸附的抗生素中, 主要以四环素类为主, 占抗生素总吸附量的 90.9% ~

97.3%. 污泥中四环素在工况 1 ~ 2 时以 DC 为主; 工况 3 时则以 OTC 为主. Zhou 等^[23]在研究中指出, 污水处理厂进水中四环素、强力霉素等抗生素的浓度在 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1} \sim \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 水平, 检出污泥中积累的抗生素总浓度为 $5.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与本试验水平相当.

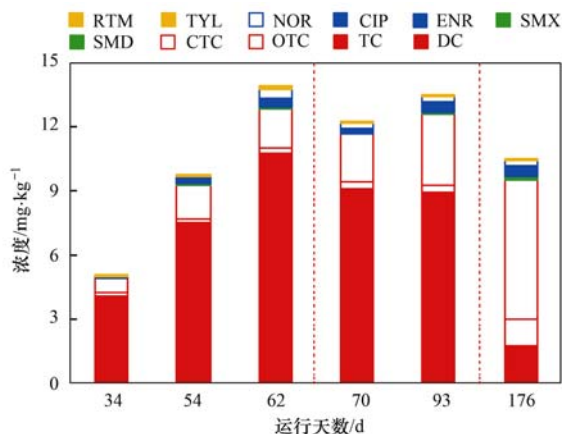


图 4 污泥中抗生素的积累浓度

Fig. 4 Concentrations of antibiotics in sludge

排泥情况似乎是影响污泥中抗生素积累的主要因素. 工况 1 中 SRT 很长, 不排泥, 抗生素总量、特别是四环素类和喹诺酮类抗生素在污泥中发生了显著积累; 工况 2 出现漏泥情况后, 以及工况 3 增加排泥量后, 污泥中抗生素浓度都有所降低. Li 等^[24]的研究也表明, 污泥中抗生素浓度随着 SRT 增加而逐渐增加.

污泥中积累的抗生素含量和组成受进水影响大. 工况 1, 进水以 DC、TC、SMD 为主, 污泥吸附也以 DC、TC 为主, 且呈现逐渐积累趋势. 工况 2, 进水以 DC、TC、SMD、CTC 为主, 污泥吸附也以 DC、TC、CTC 为主. 工况 3, 进水以 SMD、CTC、OTC 为主, 污泥吸附也以 CTC、OTC 为主. 其中, 四环素类是相对容易吸附的抗生素, 故进水浓度高而污泥吸附量也高. 磺胺类(SMD)是相对容易生物降解的抗生素, 故进水浓度高, 但出水浓度和污泥吸附量都很低. Wu 等^[25]在抗生素的吸附与降解试验中发现, 四环素、强力霉素的吸附能力最强, 磺胺嘧啶、磺胺甲噁唑的吸附最弱, 并且发现磺胺甲噁唑未在污泥中积累. Xia 等^[26]研究同样指出四环素类抗生素在活性污泥中主要通过污泥吸附途径去除, 磺胺类主要通过生物降解而非污泥吸附的途径去除.

3 结论

HRT 较短时, 虽然 COD 能保持较高的去除率, 但是抗生素去除率有可能显著下降. 通过优化污染物

负荷和 SRT, 有可能实现 IAMBR 对抗生素和 COD 的同步高效去除。SRT 较长时四环素和喹诺酮类抗生素容易在污泥中积累, 积累浓度和成分受 SRT、进水浓度和组成影响。磺胺类抗生素容易生物降解, 吸附力差, 很少在污泥中随着 SRT 的延长而积累。

参考文献:

- [1] 卫丹, 万梅, 刘锐, 等. 嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2650-2657.
- [2] Cabello F C. Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(7): 1137-1144.
- [3] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 725-759.
- [4] Kornboonraksa T, Lee S H. Factors affecting the performance of membrane bioreactor for piggery wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(12): 2926-2932.
- [5] Daumer M L, Béline F, Guizieu F, *et al.* Influence of pH and biological metabolism on dissolved phosphorus during biological treatment of piggery wastewater [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, **96**(3): 379-386.
- [6] Göbel A, McArdell C S, Joss A, *et al.* Fate of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in different wastewater treatment technologies [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **372**(2-3): 361-371.
- [7] Sahar E, Messalem R, Cikurel H, *et al.* Fate of antibiotics in activated sludge followed by ultrafiltration (CAS-UF) and in a membrane bioreactor (MBR) [J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 4827-4836.
- [8] Radjenovic J, Petrovic M, Barceló D. Analysis of pharmaceuticals in wastewater and removal using a membrane bioreactor [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2007, **387**(4): 1365-1377.
- [9] Zhang M C, Lawlor P G, Wu G X, *et al.* Partial nitrification and nutrient removal in intermittently aerated sequencing batch reactors treating separated digestate liquid after anaerobic digestion of pig manure [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2011, **34**(9): 1049-1056.
- [10] Pan M, Henry L G, Liu R, *et al.* Nitrogen removal from slaughterhouse wastewater through partial nitrification followed by denitrification in intermittently aerated sequencing batch reactors at 11°C [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(4): 470-477.
- [11] Pan M, Hu Z H, Liu R, *et al.* Effects of loading rate and aeration on nitrogen removal and N₂O emissions in intermittently aerated sequencing batch reactors treating slaughterhouse wastewater at 11°C [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2015, **38**(4): 681-689.
- [12] 税勇. 膜生物反应器处理养猪沼液的试验研究[D]. 常州: 常州大学, 2015.
- [13] Dorival-García N, Zafra-Gómez A, Navalón A, *et al.* Removal and degradation characteristics of quinolone antibiotics in laboratory-scale activated sludge reactors under aerobic, nitrifying and anoxic conditions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **120**(15): 75-83.
- [14] Luo Y, Xu L, Rysz M, *et al.* Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River Basin, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(5): 1827-1833.
- [15] 阎幸, 余卫娟, 兰亚琼, 等. 嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3368-3373.
- [16] 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. 120-124, 211-213, 257-261, 279-281.
- [17] McAdam E J, Bagnall J P, Soares A, *et al.* Fate of Alkylphenolic Compounds during activated sludge treatment: impact of loading and organic composition [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(1): 248-254.
- [18] Carranza-Diaz O, Schultze-Nobre L, Moeder M, *et al.* Removal of selected organic micropollutants in planted and unplanted pilot-scale horizontal flow constructed wetlands under conditions of high organic load [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **71**: 234-245.
- [19] Khanal S K, Xie B, Thompson M L, *et al.* Fate, transport, and biodegradation of natural estrogens in the environment and engineered systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(21): 6537-6546.
- [20] Yang S F, Lin C F, Wu C J, *et al.* Fate of sulfonamide antibiotics in contact with activated sludge-Sorption and biodegradation [J]. *Water Research*, 2012, **46**(4): 1301-1308.
- [21] Yang S F, Lin C F, Lin A Y C, *et al.* Sorption and biodegradation of sulfonamide antibiotics by activated sludge: experimental assessment using batch data obtained under aerobic conditions [J]. *Water Research*, 2011, **45**(11): 3389-3397.
- [22] Conkle J L, Lattao C, White J R, *et al.* Competitive sorption and desorption behavior for three fluoroquinolone antibiotics in a wastewater treatment wetland soil [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(11): 1353-1359.
- [23] Zhou L J, Ying G G, Liu S, *et al.* Occurrence and fate of eleven classes of antibiotics in two typical wastewater treatment plants in South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **452-453**: 365-376.
- [24] Li W H, Shi Y L, Gao L H, *et al.* Occurrence, distribution and potential affecting factors of antibiotics in sewage sludge of wastewater treatment plants in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **445-446**: 306-313.
- [25] Wu C X, Spongberg A L, Witter J D. Sorption and biodegradation of selected antibiotics in biosolids [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2009, **44**(5): 454-461.
- [26] Xia S Q, Jia R Y, Feng F, *et al.* Effect of solids retention time on antibiotics removal performance and microbial communities in an A/O-MBR process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **106**: 36-43.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 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