

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO_x 总量控制中的应用 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估 王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析 吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征 施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM_{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析 赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲珍, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评价 张静, 张衍杰, 方小珍, 李风华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM₁₀ 及部分化学组成的季节变化 魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征 李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析 石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例 卢晓漩, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例 梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征 苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系 罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险 于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征 左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估 董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露 李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价 佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变 刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能 张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响 李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水 熊晓敏, 吴夏芈, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态 宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响 涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除 刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A²-MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比 朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷 周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 王丽莎 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升 朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征 阎刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响 王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建 周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例 王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价 陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH₄ 排放的变化特征及影响因素 柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N₂O 排放的影响 冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响 向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉 陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化 温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用 吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响 安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估 徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展 周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则(4261) 《环境科学》征订启事(4270) 信息(4186, 4404, 4446)

基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行

孙延芳¹, 韩晓宇^{2,3,4}, 张树军^{3,4}, 李星^{1*}, 曹相生¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心, 北京 100022; 4. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 为保证出水水质稳定并提高氨氮去除率, 实现 CANON 工艺的优化, 利用 SBR 反应器进行了基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性研究. 试验过程中, 温度控制在 $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, pH 7~8, 通过反应过程中氨氮、硝态氮、亚硝态氮和 pH、DO、ORP 的变化规律, 制定了可行的实时控制策略. 结果表明, 进水氨氮浓度为 $917 \sim 1540 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 以 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的剩余氨氮浓度作为控制参数可以满足工艺稳定性的要求, 但氨氮传感器存在费用昂贵和误差较大等问题. 采用 pH、DO 和 ORP 曲线的平台和特征点作为自控参数, 可以维持 CANON 工艺的长期稳定运行, 保证氨氮去除率平均维持在 99% 以上且出水水质稳定.

关键词: 全程自养脱氮; 实时控制; 溶解氧; 酸碱度; 氧化还原电位

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4302-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704088

Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies

SUN Yan-fang¹, HAN Xiao-yu^{2,3,4}, ZHANG Shun-jun^{3,4}, LI Xing^{1*}, CAO Xiang-sheng¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Research and Development Center of Beijing Drainage Group Technology, Beijing 100022, China; 4. Beijing Engineering Research Center for Wastewater Reuse, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to achieve the optimization of the CANON process, ensuring the stability of water quality and increasing the removal rate of ammonia nitrogen, the stability of CANON process water quality under real-time control was studied in the SBR reactor. During the experiment, the temperature was controlled at $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ and the pH was 7-8, based on the corresponding relationship between indirect parameters and nitrogen pollutants, the real-time control strategy was formulated. The results showed that when the influent ammonia nitrogen concentration was $917 \sim 1540 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the residual ammonia nitrogen concentration of $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ can be used as the control parameter to meet the requirements of process stability but the ammonia nitrogen sensor had many problems such as high costs and large errors. The characteristic points and platforms of pH, DO, and ORP value can be the automatic control parameters, which can maintain the long-term stable operation of the CANON process and ensure that the average ammonia nitrogen removal rate is above 99% and the effluent quality is stable.

Key words: completely autotrophic nitrogen removal over nitrite; real-time control; dissolved oxygen; pH; oxidation reduction potential

我国污水处理在自动化控制上起步较晚, 大部分的水厂运行仍处于人工操作的状态, 实时控制系统未被应用, 降低了水厂的处理效率, 增加了水厂的能耗^[1-3]. 针对污水量的增加, 应用实时控制技术可以在污水厂不升级改造的前提下保证水厂的处理能力与出水水质的稳定, 大大节省了基建费用和运行费用^[4].

常用的实时控制策略有直接参数法和间接参数法. 直接参数法是应用常规污染物传感器, 普遍应用的有氨氮传感器、磷酸盐传感器、COD 传感器和硝酸盐传感器这 4 种^[5], 但污染物检测仪表价格昂贵、维护繁琐、精准性较差而且反馈具有滞后性. 间接参数法是用 DO、pH 和氧化还原电位 (oxidation reduction potential, ORP) 等参数的变化规律或特征

点指示反应进程. 与直接参数传感器相比, 间接参数传感器相对廉价且性能更稳定. 在 SBR 工艺脱氮的反应过程中, 国内外学者采用间接参数如 DO、pH 和 ORP 等的变化规律和特征点作为脱氮过程中的控制参数^[6-8].

在 CANON 工艺的研究中^[9], 虽然完成了较短时间的启动并能运行稳定, 但是出水氨氮浓度范围波动较大, 而国内对 CANON 工艺实时控制的研究较少. 本文以人工配制的高氨氮废水为研究对象, 采用 SBR 反应器进行了多重间接参数 (pH、DO 和 ORP) 联合优化 CANON 工艺的研究, 保证出

收稿日期: 2017-04-10; 修订日期: 2017-04-26

作者简介: 孙延芳 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理技术, E-mail: f507051500@126.com

* 通信作者, E-mail: lixing@bjut.edu.cn

水水质稳定并提高氨氮去除率, 以期建立 SBR 法 CANON 工艺生物脱氮的模糊控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用 SBR 反应器, 如图 1 所示, 由有机玻璃制成, 内径 300 mm, 高 1 400 mm, 总容积为 100 L, 有效容积为 90 L。曝气器采用穿孔管, 激光开孔孔径为 0.1 mm, 孔间隔为 10 mm, 曝气量通过转子流量计控制。试验温度通过恒温加热棒控制。反应器内设有传感器, 用以监测工艺运行工程中的 pH、DO、ORP 和温度 (T)。

1.2 试验用水

试验用水为人工配制的高氨氮废水。即通过向北京市高碑店污水处理厂初沉池出水中投加 NH_4HCO_3 和 NaHCO_3 调节进水氨氮浓度和 pH 值。

进水水质如表 1 所示。

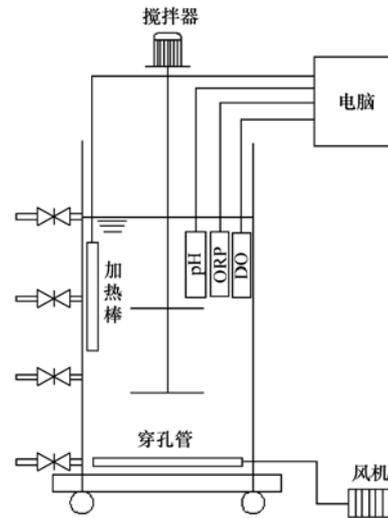


图 1 SBR 试验装置示意

Fig. 1 Experimental apparatus of SBR

表 1 反应器进水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Water quality of influent for reactor/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

| 项目 | NH_4^+-N | NO_2^--N | NO_3^--N | COD | TP | pH |
|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|-------|-------|
| 范围 | 600 ~ 1 600 | 0 ~ 10 | 0 ~ 20 | 150 ~ 300 | 5 ~ 8 | 7 ~ 8 |

1.3 试验方案

试验是在稳定运行的 CANON 工艺^[9]基础上进行的。每个周期运行结束后直接进入下一周期。每个周期排水时用孔径为 0.2 mm 的筛网过滤, 截留的颗粒再返回至反应器, 以减少颗粒的流失。试验温度通过恒温加热棒控制在 $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 。

在本次试验中, 用 pH、DO 和 ORP 在线仪表记录曝气阶段 pH、DO 和 ORP 数值变化, 并在一定间隔内取样测定氨氮、硝态氮和亚硝态氮等指标, 得到 pH、DO 和 ORP 与污染物浓度的变化规律及对应关系, 在此基础上设定曝气阶段的控制参数。

1.4 分析方法

水质指标检测方法按照文献[10]规定的方法测量, 总氮采用过硫酸钾氧化, 紫外分光光度法; 氨氮采用纳氏试剂光度法; 硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和总磷采用离子色谱法; 化学需氧量采用重铬酸钾法; 污泥浓度采用称重法; 不同粒径质量分析采用湿式筛分法; DO、pH 和 T 采用 WTW 的在线仪表测定。

2 结果与讨论

2.1 定时控制策略下 CANON 工艺的运行特性

CANON 工艺每个周期的运行参数为: 进水 10 min, 曝气 1 440 min, 沉淀 30 min, 排水 2 min, 静置

1 min, 每天运行 1 个周期。时间控制条件下, 反应器进水氨氮、出水氨氮、出水硝态氮、出水亚硝态氮和氨氮去除率分别如图 2 所示。

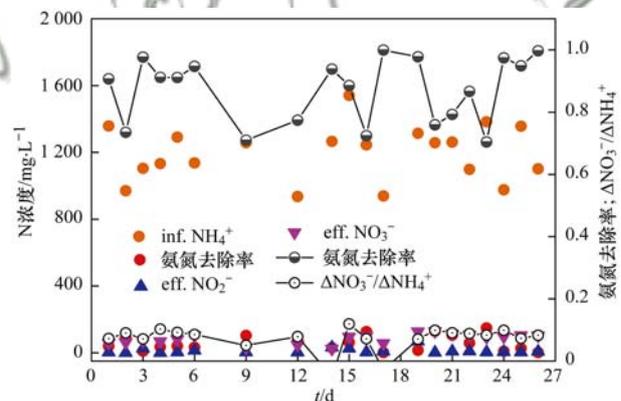


图 2 SBR 反应器运行期间出水水质变化情况

Fig. 2 Effluent quality in the SBR reactor

反应器在稳定运行期间, 曝气量平均维持在 $220 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, DO 平均维持在 $0.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 进水氨氮浓度波动较大, 为 $917 \sim 1\,540 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $1\,188 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 出水氨氮浓度不稳定, 最高浓度为 $148 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最低浓度为 $0.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮浓度平均为 $56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 氨氮去除率范围较大, 为 $70\% \sim 99\%$, 平均值为 87% ; 出水亚硝态氮浓度平均为 $10.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 出水硝态氮浓度平均为 $84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;

硝态氮的生产量/氨氮的消耗量比例平均为 0.08, 小于 CANON 工艺的理论值 0.11, 说明系统内同时存在反硝化作用. 反应初始 C/N 比为 0.2, 说明系统内主要进行的是自养脱氮过程, ANAMMOX 菌具有较好的脱氮效果.

当进水氨氮浓度波动较大时, 以时间作为控制反应条件的参数均不能得到较为稳定的出水水质, 氨氮去除率波动较大, 为 70% ~ 99%. 值得注意的是, 当反应器内初始氨氮浓度较低时, 因系统属于定时控制, 在曝气时间结束前, 大部分氨氮通过短程硝化-厌氧氨氧化的途径去除, 亚硝化过程因氨氮浓度的降低而减慢, 所需溶解氧也随之减小, 因此在曝气结束时反应器内的 DO 浓度较高, 出现跃升的现象, 有时高达 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (反应器运行的第 17 d 和第 24 d), 出现过曝气的情况. 研究表明, 在 $\text{DO} < 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, AOB 对氧的亲合力大于 NOB, AOB 的增值速率是 NOB 的 2.6 倍, 因此 NOB 的活性更容易被抑制, 可实现短程硝化^[11-13]. 高溶解氧的条件下, 系统内很难出现缺氧环境, 有利于 NOB 活性的恢复和增长. 文献[14]的研究表明, 在过度曝气 12 周后, 硝化类型由短程硝化转变为全程硝化, 曝气时间的合理调控才能维持短程硝化的稳定. ANAMMOX 菌是厌氧菌, 氧的存在会对 ANAMMOX 菌产生抑制作用. Strous 等^[15]的研究发现, ANAMMOX 菌在溶解氧浓度为 0.5% ~ 2.0% 空气饱和度的条件下, 活性被完全抑制, 即使在 0.5% 空气饱和度的微氧条件下, 活性仍受到抑制. 但 ANAMMOX 菌对氧有一定的适应性, 且抑制作用是可逆的^[16], 实时曝气控制是维持短程硝化-厌氧氨氧化稳定的关键.

2.2 典型周期内底物浓度的变化规律

为方便实时控制参数的选取, 首先考察了 CANON 工艺在典型周期内的污染物浓度变化情况, 试验结果如图 3 所示.

取样过程中, 曝气量保持不变, 通过监测系统内的溶解氧, 在 DO 浓度升高至 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 前的 5 h 内, 每隔 20 min 在同一取样口取样, 并用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤纸过滤后测定总氮、氨氮、硝态氮和亚硝酸态氮等指标. 图 3 显示, 总氮浓度随着时间增长呈下降趋势, 下降速率先增大后减小, 与氨氮、硝态氮和亚硝酸态氮的变化趋势有直接的关系. 氨氮降解曲线较为明显地分为两段: 第一段, 快速期 (0 ~ 180 min), 氨氮浓度由 $36.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $5.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 降解速率为 $6.06 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$; 第二段, 缓慢期 (180 ~ 280

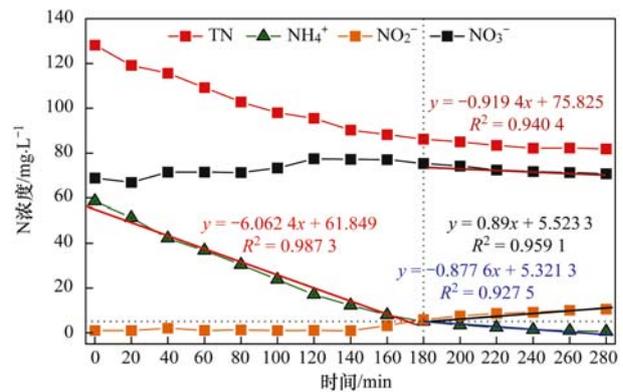


图 3 SBR 反应器典型周期内污染物浓度变化情况

Fig. 3 Pollutant concentrations during a typical SBR cycle

min), 氨氮浓度由 $5.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 降解速率为 $0.89 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 仅是第一阶段的 1/7. 亚硝态氮的浓度变化趋势是先平稳, 然后在第 180 min 氨氮降解速率减慢后, 亚硝态氮的浓度呈上升趋势. 根据 CANON 工艺的反应方程, 在氨氮不断降解的过程中, 会有 0.11 倍硝态氮产生. 因此, 系统内硝态氮浓度缓慢升高. 第 180 min 是图 3 中各污染物浓度变化的分界点, 根据各污染物降解 (生成) 的速率可知, 180 min 前, 反应器氨氮降解速率恒定, 亚硝态浓度维持稳定, 说明 CANON 工艺稳定运行; 180 min 后, 因为氨氮浓度的不足, AOB 消耗氧的速率减慢, 系统内溶解氧浓度超过 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 且持续升高, ANAMMOX 菌在持续增高的溶解氧环境和基质不足条件下, 活性受到抑制, 氨氮的降解速率与亚硝态氮的生成速率基本吻合, 说明 AOB 将剩余的氨氮全部转化为亚硝态氮. 因此可以通过控制出水氨氮浓度的方式优化 CANON 工艺. Laureni 等^[17]和 Gilbert 等^[18]分别通过控制出水氨氮浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 实现了 MBBR 反应器短程硝化-厌氧氨氧化工艺的稳定性; Isanta 等^[19]通过控制反应器出水氨氮浓度为 $10 \sim 32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 实现了 PN/A 工艺的稳定性. 基于以上分析可以选取 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的剩余氨氮浓度为作为实时控制的参数, 在优化出水水质的同时保证 CANON 工艺的稳定运行, 但是氨氮传感器费用较为昂贵, 误差较大, 维护繁琐且存在一定的滞后性. 因此探究相对廉价可靠的间接传感器做为运行参数对 CANON 工艺出水优化及稳定性具有重大意义.

2.3 典型周期内 pH、DO 和 ORP 变化规律

很多研究报道指出, 基于多种间接参数的控制策略要优于单一控制参数, 因此本节通过 pH、DO 和 ORP 在线仪表每隔 5 min 记录全周期内数值变

化,得到 pH、DO 和 ORP 随时间的变化曲线与上一节中剩余氨氮浓度前后各曲线变化规律的对应关系,在此基础上设定曝气条件的控制参数. 试验结果如图 4 所示.

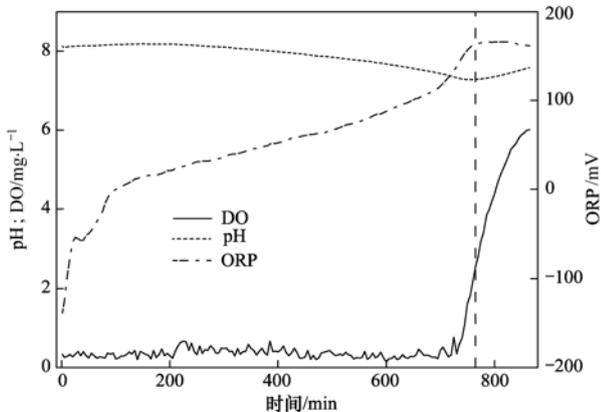


图 4 SBR 反应器典型周期内 pH、DO 和 ORP 随时间变化曲线

Fig. 4 Time series for pH, DO, and ORP during a typical SBR cycle

唐晓雪等^[20]的试验说明有机物在达到难降解程度前,硝化作用不明显. 因此在曝气开始一段时间内,测得反应器内 pH 呈不断升高,DO 浓度较低和 ORP 呈快速增长的趋势. 具体原因是异养菌合成和分解有机物时产生的 CO_2 被吹脱出去,造成系统内 pH 升高. 同时微生物在利用有机物时需要消耗大量氧气,好氧量大于供氧量,DO 浓度较低. 进水中含有较高浓度还原性物质(氨氮),因此反应初期 ORP 为负值,在有机物被微生物利用合成细胞物质过程中,系统内氧化物质增加,ORP 上升速率加快. 在有机物去除阶段,氨氮的去除主要是通过同化作用去除的. 有机物达到难降解程度后,短程硝化-厌氧氨氧化过程是系统内的主要脱氮途径,因此 pH 呈下降趋势. 有研究表明,硝化菌的好氧速率会随着氨氮浓度的降低而减小,好氧速率逐渐小于供养速率^[21~23]. 因此,随着氨氮的不断降解,两反应器内 DO 浓度出现不断上升的现象. 随着反应的进行,氨氮不断被氧化为亚硝态氮和氮气,并产生一定比例的硝态氮,系统内还原性物质减少,氧化性物质增多,因 AOB 和 ANAMMOX 菌的生长速率明显小于厌氧菌,所以 ORP 呈缓慢上升趋势. 当系统内氨氮基本被去除时,AOB 缺少充足的基质,好氧速率也随之减慢小于供养速率,DO 曲线出现突跃点,当氨氮被完全去除时,AOB 基本不消耗氧气,自养菌和异养菌内源呼吸消耗的氧气远远小于供养速率,DO 浓度上升速率加快,直到达到饱和. 李祥等^[24]的研究表明,DO 浓度对 ORP 值具有较强的线性影响. 因

此当系统内氨氮被完全去除时,随着 DO 浓度突跃,ORP 曲线也出现突跃性上升. 当氨氮被完全去除时,预示着 CANON 工艺基本结束, pH 曲线出现凹点,由于持续曝气的原因,水体中的 CO_2 被吹脱, pH 曲线又呈上升的趋势. 由于 pH 值的升高导致了 ORP 值降低,同时系统内不再有其它物质产生,氧化态物质和还原态物质基本恒定, ORP 曲线逐渐缓和,出现平台. 文献^[23, 25, 26]的试验证明了应用 pH、DO 和 ORP 特征点作为生物脱氮工艺控制参数的可行性. 基于以上分析,利用 pH、DO 和 ORP 的变化规律和特征点,可以反映 CANON 工艺的进程,作为稳定和优化工艺的控制参数.

2.4 典型周期内 pH、DO 和 ORP 一阶导数变化规律

为了使 pH、DO 和 ORP 以更直观地方式应用于控制系统,分别对 pH、DO 和 ORP 进行求导分析, pH、DO 和 ORP 的一阶导数随时间的变化如图 5~7 所示.

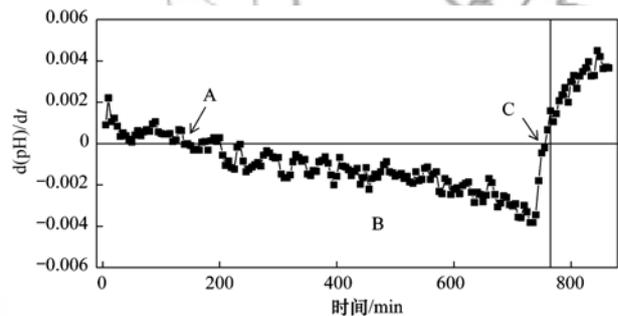


图 5 SBR 反应器典型周期内 pH 随时间变化的一阶导数

Fig. 5 First derivative curve of pH with time series during a typical SBR cycle

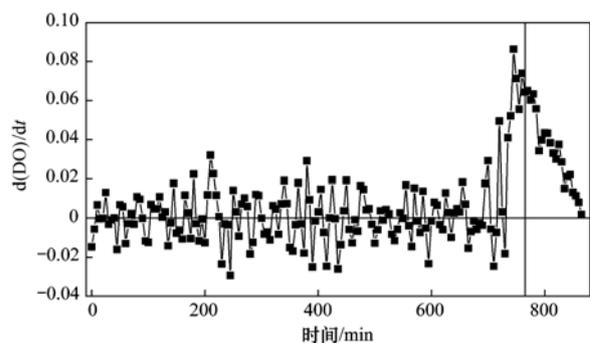


图 6 SBR 反应器典型周期内 DO 随时间变化的一阶导数

Fig. 6 First derivative curve of DO with time series during a typical SBR cycle

由图 5 可以看出,忽略系统误差, pH 的一阶导数曲线在周期内出现了 3 个特征点:由正值变负值点(A)、连续为负值点(B)和由负值转为正值点(C). 这 3 个点分别对应有机物降解阶段、CANON 反应阶段和氨氮降解完全 CANON 工艺反应结束阶

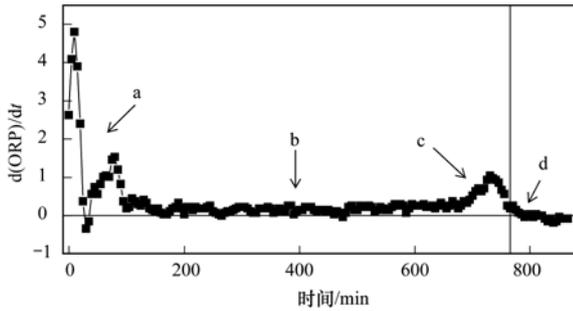


图 7 SBR 反应器典型周期内 ORP 随时间变化的一阶导数

Fig. 7 First derivative curve of ORP with time series during a typical SBR cycle

段. 在反应周期内, 若 pH 的一阶导数曲线连续大于零, 则预示着 CANON 反应的结束.

由图 6 可以看出, DO 的一阶导数曲线相比于 DO 浓度随时间变化的曲线, 很难确定特征点, 利用 DO 的一阶导数作为过程控制点比较困难, 反而利用 DO 浓度值作为控制参数更加直观.

由图 7 可以看出, ORP 的一阶导数曲线在周期内出现了 4 个特征点: 第一凸点(a)、连续为正值点(b)、第二凸点(c)和正值变负值点(d). 这 4 个点分别对应有机物降解阶段、CANON 反应阶段、氨氮基本被去除和氨氮被完全去除阶段. 忽略系统误差, ORP 的一阶导数曲线出现一次导数为零的情况, 当导数为零时, 预示系统内氨氮已经被完全去除.

由以上分析可知, 可以采用 pH 的一阶导数、DO 突跃点和 ORP 的一阶导数作为指示 CANON 工艺反应结束的控制参数. 因有机物去除阶段与反应结束时, pH 和 ORP 的一阶导数规律相似, 且反应过程中先进行有机物的去除, 为避免反应阶段的混淆, 通过设置工艺最低反应时间的方式进行区分. 高大文等^[27] 在温度为 $29^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 曝气量为 $0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 进水 COD 为 $650 \sim 660 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 运行了 120 min 后, 达到了 COD 难降解的程度. 本试验中温度为 $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 曝气量为 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 进水 COD 浓度为 $196 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 保守选取工艺最低反应时间为 200 min. 为减小 pH、DO 和 ORP 的检测误差, 对控制参数达到特征点后进行延时, 并设定至少满足两个参数点时, 曝气阶段才可以结束, CANON 工艺的具体实时控制策略如图 8 所示.

2.5 实时控制策略下 CANON 工艺的运行特性

采用实时控制策略运行 40 d 后的试验结果如图 9 所示.

应用实时控制方法后, 反应器的出水水质有了

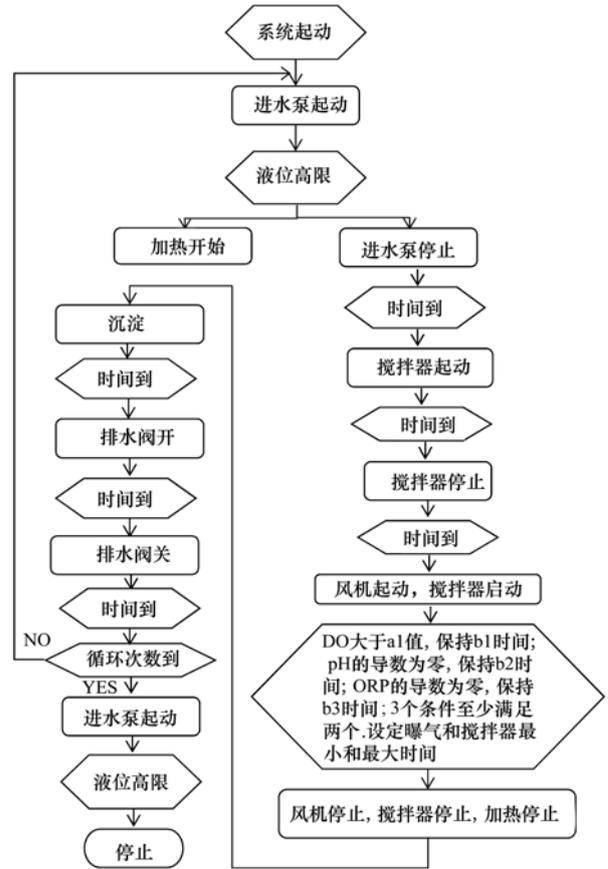


图 8 CANON 工艺实时控制策略的流程

Fig. 8 Flow chart of the real-time control strategy in CANON process

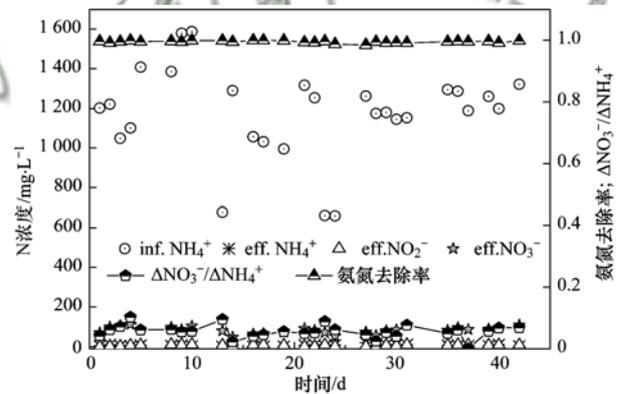


图 9 应用实时控制方法的出水水质变化情况

Fig. 9 Effluent quality using the real-time control strategy

明显的改善. 在进水氨氮浓度波动较大 ($660 \sim 1588 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $1178 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的情况下, 出水氨氮浓度基本维持稳定, 平均为 $6.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 氨氮去除率较高, 均达到 99%; 出水亚硝态氮浓度平均为 $5.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 出水硝态氮浓度平均为 $84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 硝态氮的生产量/氨氮的消耗量比例平均为 0.06 小于 CANON 工艺的理论值 0.11.

以上研究表明, 在进水氨氮浓度波动较大的情况下, 应用实时控制策略, 在保证短程硝化-厌氧氨

氧化反应是系统的主要脱氮途径前提下,可以达到 99% 的氨氮去除率且出水水质稳定。

3 结论

(1) 运行良好的 CANON 工艺,在进水氨氮浓度为 $917 \sim 1\,540 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,采用时间作为控制反应阶段参数时,出水氨氮浓度平均值高于 $56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 且出水水质不稳定。

(2) 在温度控制在 $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, pH 为 $7 \sim 8$, 进水氨氮浓度平均为 $1\,100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,选取 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的剩余氨氮浓度作为控制参数时,氨氮去除率可达到 99%。

(3) 在 CANON 工艺过程中, DO、pH 和 ORP 值的变化对反应器内污染物浓度变化具有很好的指示作用。应用自控系统,在进水氨氮浓度波动较大时,氨氮去除率能平均维持在 99% 以上,达到了优化 CANON 工艺的目的。

参考文献:

- [1] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(2): 116-120.
Zhang L P, Xia J, Hu Z F. Situation and problem analysis of water resource security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, **18**(2): 116-120.
- [2] 陈中颖, 刘爱萍, 刘永, 等. 中国城镇污水处理厂运行状况调查分析[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(9): 99-102.
Chen Z Y, Liu A P, Liu Y, *et al.* Investigation and analysis on operating status of municipal sewage treatment plants in China [J]. Environmental Pollution and Control, 2009, **31**(9): 99-102.
- [3] 王秀衡, 李楠, 任南琪, 等. 中国城市污水处理厂脱氮除磷工艺的应用与运行现状[A]. 见: 2005 年首届中国城镇水务发展战略国际研讨会论文集[C]. 北京: 国家环境保护总局, 2005. 481-489.
- [4] Nielsen, Marinus K. Control of wastewater systems in practice [R]. Instrumentation Control and Automation Conference. Malmö, Sweden; IWA, 2001.
- [5] 高大文. 污水生物脱氮新技术研究现状与发展方向[J]. 现代化工, 2004, **24**(S1): 202-206.
Gao D W. Status and development trends of new biological nitrogen removal technologies for wastewater treatment [J]. Modern Chemical Industry, 2004, **24**(S1): 202-206.
- [6] Wareham D G, Hall K J, Mavinic D S. Real-time control of wastewater treatment systems using ORP[J]. Water Science and Technology, 1993, **28**(11-12): 273-282.
- [7] 王淑莹, 彭永臻, 周利, 等. 用溶解氧浓度作为 SBR 法过程和反应时间控制参数[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(5): 415-418.
Wang S Y, Peng Y Z, Zhou L, *et al.* The control parameter of SBR process and its reaction time using DO [J]. China Environmental Science, 1998, **18**(5): 415-418.
- [8] 高大文, 彭永臻, 杨庆, 等. 应用实时控制实现和稳定短程硝化反硝化[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(12): 1-5.
Gao D W, Peng Y Z, Yang Q, *et al.* Application of real time control for achieving and stabilizing short-cut nitrification and denitrification[J]. China Water & Wastewater, 2003, **19**(12): 1-5.
- [9] 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 等. 颗粒 + 絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 672-678.
Sun Y F, Han X Y, Zhang S J, *et al.* Start-up of combined flocculant CANON process and the effects of SRT on reactor performance[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 672-678.
- [10] 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.
- [11] 张昭, 李冬, 仲航, 等. 常温下低氨氮污水的短程硝化启动研究[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(9): 35-39.
Zhang Z, Li D, Zhong H, *et al.* Start-up experiment of shortcut nitrification for low ammonia nitrogen wastewater at room temperature[J]. China Water & Wastewater, 2012, **28**(9): 35-39.
- [12] Bernet N, Dangcong P, Delgenès J P, *et al.* Nitrification at low oxygen concentration in biofilm reactor [J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, **127**(3): 266-271.
- [13] Tokutomi T. Operation of a nitrite-type airlift reactor at low DO concentration[J]. Water Science & Technology, 2004, **49**(5-6): 81-88.
- [14] Rosenwinkel K H, Cornelius A. Deammonification in the moving-bed process for the treatment of wastewater with high ammonia content[J]. Chemical Engineering Technology, 2005, **28**(1): 49-52.
- [15] Strous M, Van Gerven E, Kuenen J G, *et al.* Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) sludge [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(6): 2446-2448.
- [16] Zhang X J, Li D, Liang Y H, *et al.* Autotrophic nitrogen removal from domestic sewage in MBR-CANON system and the biodiversity of functional microbes[J]. Bioresource technology, 2013, **150**: 113-120.
- [17] Laurenzi M, Falås P, Robin O, *et al.* Mainstream partial nitritation and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures[J]. Water Research, 2016, **101**: 628-639.
- [18] Gilbert E M, Agrawal S, Karst S M, *et al.* Low temperature partial nitritation/anammox in a moving bed biofilm reactor treating low strength wastewater[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(15): 8784-8792.
- [19] Isanta E, Reino C, Carrera J, *et al.* Stable partial nitritation for low-strength wastewater at low temperature in an aerobic granular reactor[J]. Water Research, 2015, **80**: 149-158.
- [20] 唐晓雪, 马斌, 徐竹兵, 等. 自养脱氮工艺有机物去除段与硝化段精确分离的实现与实时控制[J]. 化工学报, 2012, **63**(11): 3666-3672.
Tang X X, Ma B, Xu Z B, *et al.* Precise separation of organic removal and nitrification process and real-time control method of autotrophic nitrogen removal process[J]. CIESC Journal, 2012, **63**(11): 3666-3672.
- [21] 王淑莹, 曾薇, 董文艺, 等. SBR 法短程硝化及过程控制研究[J]. 中国给水排水, 2002, **18**(10): 1-5.

- Wang S Y, Zeng W, Dong W Y, *et al.* Study on short-cut nitrification by using SBR process and its process control [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, **18**(10): 1-5.
- [22] 高大文, 彭永臻, 郑庆柱. SBR 工艺中短程硝化反硝化的过程控制[J]. *中国给水排水*, 2002, **18**(11): 13-18.
- Gao D W, Peng Y Z, Zheng Q Z. Process control of shortcut nitrification-denitrification in sequencing batch reactor process [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, **18**(11): 13-18.
- [23] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹, 等. 以 DO、ORP、pH 控制 SBR 法的脱氮过程[J]. *中国给水排水*, 2001, **17**(4): 6-11.
- Gao J F, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Using dissolved oxygen, oxidation reduction potential and pH value for control nitrogen removal in SBR process[J]. *China Water & Wastewater*, 2001, **17**(4): 6-11.
- [24] 李祥, 陈宗姮, 黄勇, 等. 控制 ORP 实现连续流反应器部分亚硝化稳定运行[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3086-3092.
- Li X, Chen Z H, Huang Y, *et al.* Stable operation of partial nitritation by controlling ORP in continuous flow reactor [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3086-3092.
- [25] 刘秀红, 王淑莹, 高大文, 等. 短程硝化的实现、维持与过程控制的研究现状[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, **5**(12): 7-10.
- Liu X H, Wang S Y, Gao D W, *et al.* On-line monitoring of DO, ORP and pH to achieve and maintain shortcut nitrification and denitrification [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, **5**(12): 7-10.
- [26] 曾薇, 彭永臻, 王淑莹. 以 DO、ORP、pH 作为两段 SBR 工艺的实时控制参数[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(2): 252-256.
- Zeng W, Peng Y Z, Wang S Y. Application of DO, ORP and pH as on-line control parameters in a two-stage SBR process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(2): 252-256.
- [27] 高大文, 王淑莹, 彭永臻, 等. 温度变化对 DO 和 ORP 作为过程控制参数的影响[J]. *环境科学*, 2003, **24**(1): 63-69.
- Gao D W, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Temperature effects on DO and ORP in the wastewater treatment [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(1): 63-69.



CONTENTS

| | | |
|--|--|--------|
| Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China | CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> | (3987) |
| Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control | WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> | (3998) |
| Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration | WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> | (4005) |
| Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing | WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> | (4015) |
| Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter | SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> | (4024) |
| Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu | TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> | (4034) |
| Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City | ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> | (4044) |
| Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012 | ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> | (4054) |
| Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China | ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> | (4061) |
| Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust | ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> | (4071) |
| Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province | WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qiong-hua, <i>et al.</i> | (4077) |
| Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area | LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> | (4084) |
| Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016 | SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> | (4092) |
| Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer | LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> | (4100) |
| Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River | ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> | (4108) |
| Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province | LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> | (4120) |
| Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan | LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> | (4130) |
| Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir | GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> | (4141) |
| Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir | LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> | (4151) |
| Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China | SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> | (4160) |
| Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake | YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> | (4169) |
| Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions | ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> | (4178) |
| Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir | YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> | (4187) |
| Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River | WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> | (4194) |
| Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area | DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> | (4212) |
| Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City | LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> | (4220) |
| Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities | TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> | (4228) |
| Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation | LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> | (4236) |
| Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance | ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun | (4245) |
| Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters | LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> | (4253) |
| Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells | XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> | (4262) |
| Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater | SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> | (4271) |
| Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater | TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> | (4279) |
| Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies | LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> | (4286) |
| Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes | ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun | (4293) |
| Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies | SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> | (4302) |
| Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler | ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> | (4309) |
| Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow | ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> | (4316) |
| Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types | LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> | (4324) |
| Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge | WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> | (4332) |
| Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue | ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> | (4340) |
| Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province | WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> | (4348) |
| Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter | CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> | (4360) |
| Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir | CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> | (4370) |
| Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field | FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> | (4380) |
| Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process | XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> | (4390) |
| Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture | CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> | (4398) |
| Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process | WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang | (4405) |
| Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique | WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> | (4412) |
| Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization | AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> | (4420) |
| Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways | XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> | (4427) |
| Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China | ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> | (4438) |