

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 ..... 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 ..... 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 ..... 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 ..... 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 ..... 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 ..... 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 ..... 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 ..... 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 ..... 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 ..... 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 ..... 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 ..... 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 ..... 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 ..... 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 ..... 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 ..... 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 ..... 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 ..... 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 ..... 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 ..... 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 ..... 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 ..... 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 ..... 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 ..... 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 ..... 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe<sup>0</sup>-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 ..... 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附 ..... 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 ..... 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 ..... 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 ..... 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 ..... 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 ..... 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 ..... 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 ..... 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 ..... 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 ..... 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆冲, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 ..... 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 ..... 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 ..... 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 ..... 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 排放的短期影响 ..... 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因素 ..... 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 ..... 严俊霞, 郝忠, 荆雪镡, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 ..... 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 ..... 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 ..... 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 ..... 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 ..... 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517)      《环境科学》征稿简则 (3561)      信息 (3289, 3321, 3422)

# 多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究

尹子华<sup>1,2</sup>, 盛晓琳<sup>2</sup>, 刘锐<sup>2\*</sup>, 陈吕军<sup>2,3\*</sup>, 张永明<sup>1</sup>

(1. 上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 以宜兴市某城市污水厂多级 A/O 工艺的运行监测数据为依据, 分析了该工艺对宜兴城市污水中主要污染物和遗传毒性的去除效果。结果表明, 多级 A/O 单元对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 的平均去除率分别为: (67.3 ± 7.0)%、(93.7 ± 1.5)%、(65.3 ± 7.9)%、(60.0 ± 18.7)% , 在整个工艺流程中对各常规污染物指标的去除起到了绝对主导作用; 对污水中的烷烃、卤代烃、醇类去除效果较好, 对污水中主要含有的荧光物质(芳香族蛋白质类似物)去除效果不理想; 对污水中 SOS/umu 遗传毒性的去除率为 82.8%。多级 A/O 工艺处理宜兴城市污水的主要问题是有机负荷低、单点进水和碳源单点投加效果不理想, 以致后段 A/O 并没有充分发挥其强化去除优势, 建议改为多点进水, 调整碳源投加点。研究结果可为同类污水厂运行效果评价提供依据, 也为提高该污水厂的运行效率提供技术支持。

**关键词:** 多级 A/O; 城市污水; 脱氮除磷; 三维荧光光谱; 遗传毒性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3460-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.09.026

## Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process

YIN Zi-hua<sup>1,2</sup>, SHENG Xiao-lin<sup>2</sup>, LIU Rui<sup>2\*</sup>, CHEN Lü-jun<sup>2,3\*</sup>, ZHANG Yong-ming<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Removal of conventional pollutants as well as genotoxicity was studied along a multistage A/O process, which was based on the monitoring data in a Municipal Wastewater Treatment Plant (MWWTP) of Yixing City. The results showed that the multistage A/O process removed (67.3 ± 7.0)% of COD, (93.7 ± 1.5)% of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, (65.3 ± 7.9)% of TN and (60.0 ± 18.7)% of TP, respectively, which played a dominant role in the removal performance of the whole wastewater treatment process. The multistage A/O process showed significant ability to reduce alkanes, halogenated hydrocarbons and alcohols in the municipal wastewater, while it failed to remove the aromatic proteins which were the main fluorescent substances of this wastewater. Furthermore, the process removed 82.8% genotoxicity from its influent. Low organic load, single-phase influent and undesirable carbon source feeding pattern, which caused the downstream A/O stages being not fully utilized, were considered as the predominant reasons for the relatively low performance of the multistage A/O process. Multi-phase feeding and adjusting carbon source feeding pattern were thereby proposed. The results were considered to be helpful for improving the operational performance of the MWWTP and useful for performance evaluation of MWWTPs with similar process.

**Key words:** multistage A/O process; municipal wastewater; nitrogen and phosphorus removal; three-dimensional fluorescence spectra; genotoxicity

太湖是重要的集中式饮用水源地,近年来受水体富营养化问题影响较大<sup>[1,2]</sup>。继 2007 年无锡供水危机后,国家对太湖流域城镇污水处理厂工艺处理效率、尾水排放提出更加严格的要求<sup>[3,4]</sup>。宜兴位于太湖的上游,对该市的污水处理厂进行污染物的去除效果评价与优化,对于太湖流域污染物的削减具有重要意义<sup>[5-7]</sup>。

由于多级 A/O 工艺具有有机物去除效果好、脱氮效率高、抗冲击负荷能力强、节省能耗、可根据水质和环境的变化灵活切换进水分布比例和运行模式等优点<sup>[8-16]</sup>,在国内污水厂迎合一级 A 排放标

准的提标改造方向,得到了广泛应用<sup>[16]</sup>。前人大多对多级 A/O 脱碳、脱氮除磷的效果和条件进行研究,对有机污染物成分和毒性变化的报道尚少<sup>[8-17]</sup>。有机物组分与有机物综合指标的分析相结合,能更全面地反映污水中有机污染物的量与质的变化<sup>[18]</sup>;而生物毒性能更直接地表征污水对环境

收稿日期: 2016-03-07; 修订日期: 2016-04-23

基金项目: 国家水污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07305001-04); 嘉兴市科技计划项目(2015AY23003)

作者简介: 尹子华(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制, E-mail: yinzihua1031996689@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: liuruitsinghua@zj@ gmail.com; chenlj@mail.tsinghua.edu.cn

与生物的综合影响,可作为常规水质指标的重要补充<sup>[19~22]</sup>. 综合上述指标评价处理工艺,有利于从多角度阐释工艺对不同污染物的去除效果. 另外,碳源不足往往是我国城市污水脱氮除磷的限制性因素<sup>[23~25]</sup>, 多级 A/O 各段的碳源分布,决定其能否在去除污染物时充分发挥作用.

本文以宜兴市某城市污水厂多级 A/O 处理工艺为研究对象,在考察常规污染物指标处理效果的同时,结合使用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术、三维荧光光谱(excitation-emission matrix, EEM)技术和 SOS/umu 遗传毒性测试技术,考察了多级 A/O 工艺对污水中主要污染物和遗传毒性的去除效果,解析了各段 A/O 对污染物去除作用的发挥情况,在此基础上提出了进水方式调整和碳源投加的优化方案,以期为该污水厂的稳定达标提供技术支持,给同类污水厂工艺的运行效果评价提供依据.

### 1 材料与方 法

#### 1.1 污水厂概况

宜兴市某城市污水厂,进水中生活污水和工业

废水各半,处理规模为  $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,主体多级 A/O 工艺分三组池并联运行,单组池处理规模为  $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . 三组池中两组出水执行一级 A 标准,另外一组出水经过膜过滤后回用于工业. 该污水厂工艺流程如图 1(a)所示,原水经格栅、曝气沉砂池和水解酸化池预处理,然后经过多级 A/O 中活性污泥的分解作用进行脱碳、脱氮除磷,最后经高效沉淀池化学除磷、紫外消毒后排放出水. 由于碳源不足,2015 年 5 月中下旬开始向缺氧 1 池投加纯度为 90% 的乙酸,单组池的投加量为  $840 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ . 化学除磷药剂为聚合氯化铝和聚合氯化铝铁,投加量随进水水质调整,有时可达  $5 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ .

多级 A/O 反应池的结构如图 1(b)所示,水解酸化池出水的 10% ~ 15% 进入反硝化池、85% ~ 90% 进入厌氧池,厌氧池出水流入前段 A/O(前缺氧段由缺氧 1 ~ 4 池构成,前好氧段由好氧 1 池和好氧 2 池构成),好氧 2 池出水经内回流、后兼氧池过渡后流入后段 A/O(后缺氧段由后缺氧 1 ~ 3 池构成,后好氧段只有 1 池). 各池的池容和 HRT 如表 1 所示.

表 1 多级 A/O 各反应池参数

Table 1 Parameters of multistage A/O process

项目	反硝化池	厌氧池	缺氧池	好氧池	内回流区	后兼氧池	后缺氧池	后好氧池
V/m <sup>3</sup>	1 221	1 815	11 550	10 692	990	726	2 178	1 076
HRT/h	1.17	1.74	11.08	10.26	0.95	0.70	2.09	1.03

2015 年 3 ~ 7 月对污水厂各处理单元出水进行了定期采样,每次采样后于 4℃ 保存,3 d 内完成全部测试. 采集加碳源系统稳定运行后的水样用于

GC-MS、EEM 和 SOS/umu 遗传毒性分析.

#### 1.2 分析方法

常规污染物指标分析参照文献[26]. 有机组分

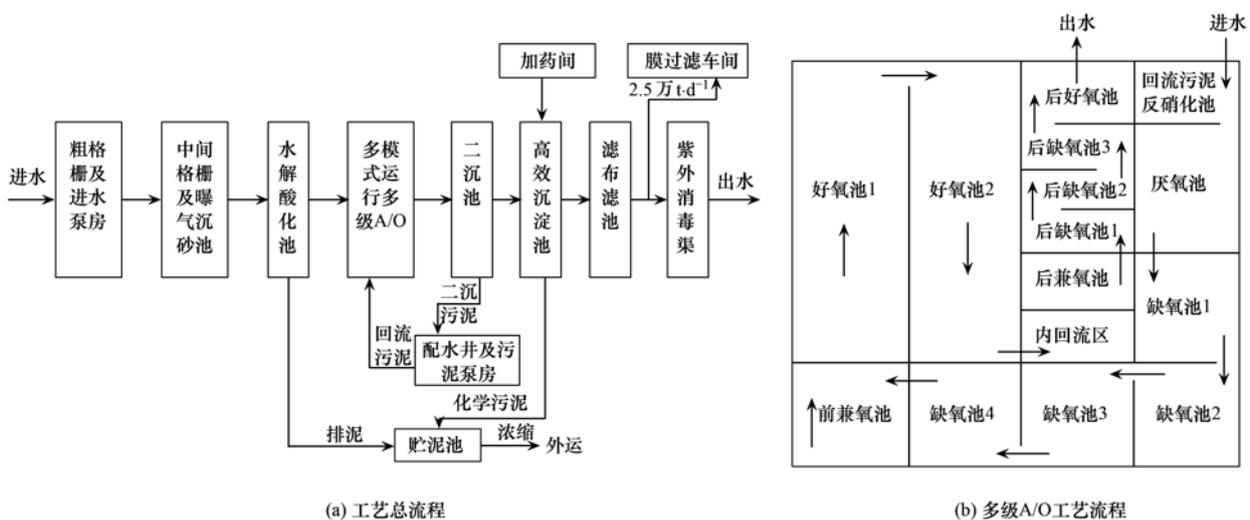


图 1 宜兴市某城市污水厂工艺总流程和多级 A/O 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of a municipal WWTP of Yixing City and multistage A/O process

的定性分析采用 GC-MS (GC、MS 型号分别为美国安捷伦科技有限公司 7890 A 和 5975 C); 样品前处理水样体积均为 400 mL, GC、MS 条件和数据解析方法参照文献[27,28]. 溶解性有机物变化的 EEM 分析采用日立 F-7000 型荧光光度计测定, 分析方法参照文献[29,30].

SOS/umu 遗传毒性测试方法在文献[31,32]的基础上有所改进, 缩短了测试周期. HLB 柱采用沃特世科技(上海)有限公司 Oasis 小柱, 样品前处理时用 5 mL 甲醇、5 mL 超纯水活化; 测试时, 菌液和样品的暴露时间缩短为 4 h. 实验采用的是 *Salmonella typhimurium* TA 1535/PSK 1002 大肠杆菌, 由日本近畿大学小田美光教授提供.

## 2 结果与讨论

### 2.1 多级 A/O 工艺沿程常规污染物指标解析

实验期间污水厂整个系统进水 COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP 浓度分别为:  $(114.1 \pm 12.3)$ 、 $(19.5 \pm 9.6)$ 、 $(34.9 \pm 4.9)$ 、 $(5.0 \pm 3.3)$   $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 系统出水的相应浓度分别为  $(31.4 \pm 6.3)$ 、 $(0.8 \pm 0.2)$ 、 $(10.1 \pm 0.9)$ 、 $(1.0 \pm 0.6)$   $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . COD、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN 浓度在定期检测中均达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准, TP 在达到一级 A 排放标准( $\text{TP} < 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )上有较大难度. 污水厂整个系统对 COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP 的总去除率分别为  $(72.1 \pm 6.2)\%$ 、 $(95.6 \pm 0.6)\%$ 、 $(70.0 \pm 6.4)\%$ 、 $(70 \pm 17.9)\%$ , 其中多级 A/O 段的相应去除率分别为  $(67.3 \pm 7.0)\%$ 、 $(93.7 \pm 1.5)\%$ 、 $(65.3 \pm 7.9)\%$ 、 $(60.0 \pm 18.7)\%$ . 多级 A/O 对于各常规污染物指标的去除了起到了绝对主导作用. 因此, 提高多级 A/O 工艺对污染物的去除率是污水厂各污染物指标稳定达标的关健.

多级 A/O 通过多级“缺氧和好氧”环境的交替, 使污泥处于“饥饿”交替的状态, 从而激发自身的潜能, 加快对污染物的降解, 且交替次数越多, 脱氮效果越好<sup>[33]</sup>. 据报道, 多级 A/O 脱氮率为 75% ~ 85%, 高于传统的前置反硝化工艺(如  $\text{A}^2\text{O}$  工艺及其变形工艺)的 65% ~ 75%<sup>[34~39]</sup>; 与其相比, 本研究中多级 A/O 出水 TN 可以达标, 但 TN 去除率偏低. TN 去除率主要受硝化效率和碳氮比的影响. 本研究中多级 A/O 单元硝化效率较高[多级 A/O 出水  $\text{NH}_4^+$ -N 为  $(1.0 \pm 0.3) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (如图 2)], TN 去除率低主要是碳氮比低所致. 多级 A/O 工艺进水

的  $\text{BOD}_5/\text{TN}$  仅为 2.3 ~ 2.6, 远低于一般污水处理要求的  $\text{BOD}_5/\text{TN} > 3 \sim 5$  的碳氮比<sup>[40]</sup>.

碳源不足导致后端 A/O 不能发挥脱氮优势. 如图 2 所示, 前缺氧段去除了总进水中 58.4% 的 TN, 消耗了总进水中 27.9% 的 COD, 至前兼氧池的进水 COD 为  $66.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 此后, 前好氧段进一步去除了 24.3% 的 COD, 到后缺氧段 COD 浓度仅有  $36.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 虽然表现上看 COD/TN 仍有 3.4, 但 COD 中大部分组分难以生物利用, TN 只去除了 8.5%. 从图 3 多级 A/O 沿程各段氮素的变化上, 也能看出后段 A/O 因缺少碳源而未能发挥脱氮优势. 前缺氧段无机氮占总氮的 50% ~ 60%, 其中硝态氮在无机氮中占比为 20% ~ 26%, 脱氮的限制性因素为硝氮浓度; 随着 TN 的降解, 后缺氧段(后缺 1 池 ~ 后缺 3 池)无机氮占总氮的 90% 以上, 大部分有机氮都转化为了无机氮, 且无机氮中硝氮占 77% 以上, 脱氮的限制性因素为碳源. 因此, 建议多级 A/O 的进水方式由单点进水调整为多点进水, 可以尝试前段 A/O 为 5:3 的进水流量分配比<sup>[41,42]</sup>, 合理利用进水中的有机碳源、增强脱氮效果. 碳源的最优投加应在后缺氧段, 乙酸投加应以后缺氧段为主、反硝化池(TN 的主要去除段)和前缺氧段(考虑污泥回流)为辅的方式, 更好地发挥多级 A/O 特别是后段 A/O 的强化脱氮优势.

多级 A/O 通过“厌氧、缺氧和好氧”环境的交替, 可以刺激聚磷菌释磷和吸磷能力的提高, 属于强化生物除磷(EBPR)工艺<sup>[43]</sup>. 多级 A/O 沿程 TP 变化如图 2 所示. TP 主要在反硝化池去除, 而后面各池 TP 浓度波动较大且没有明显降低, 但投加乙酸对 TP 的去除起到了一定的效果. 5 月中旬(未投加乙酸), 多级 A/O 的进出水 TP 浓度分别为  $3.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 前缺氧段 TP 浓度在  $2.1 \sim 3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  波动; 7 月下旬(连续投加乙酸两个月), 多级 A/O 的进水 TP 浓度为  $3.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 出水 TP 浓度则稳定降至  $0.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 前缺氧段 TP 仅为  $1.0 \sim 1.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . TP 去除效果不理想, 主要考虑与有机负荷低、污泥生长缓慢、污泥龄长有关; 多级 A/O 的  $\text{BOD}_5/\text{TP}$  为 15.2 ~ 17.4, 而一般认为  $\text{BOD}_5/\text{TP} > 20$  时, 才会有较好的生物除磷效果<sup>[43]</sup>. 乙酸的投加一方面促进了污泥生长, 使污泥浓度由 5 月中旬的  $3000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  升至 7 月下旬的  $3800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 污水厂可通过缩短污泥龄, 加大排泥量提高生物除磷效果; 另一方面, 投加乙酸有利于反硝化聚磷菌在前缺氧段对磷的吸收, 增强系统的

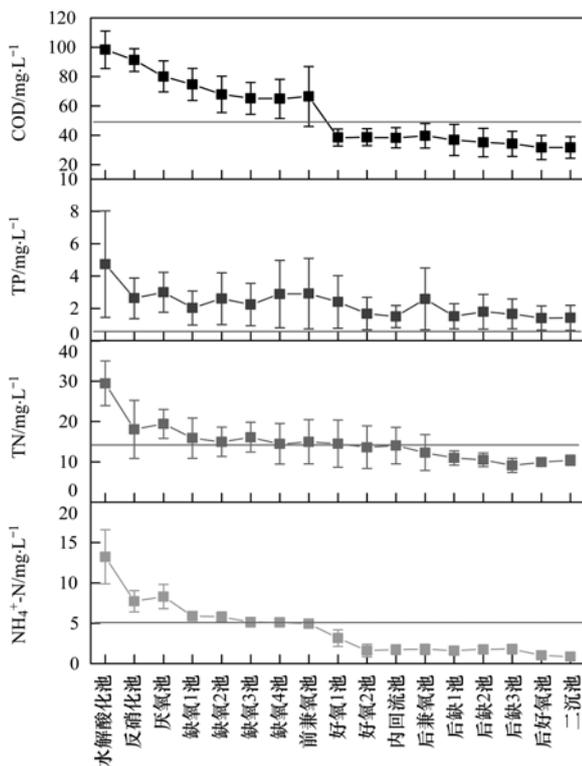


图2 多级 A/O 沿程常规污染物指标变化

Fig. 2 Change of conventional indicators of multistage A/O process

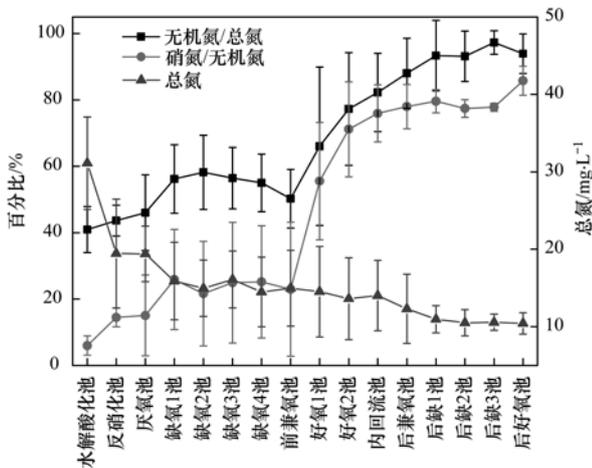


图3 多级 A/O 沿程氮素变化

Fig. 3 Change of nitrogen of multistage A/O process

除磷性能<sup>[44,45]</sup>,所以多级 A/O 的 TP 去除率明显升高. 除此之外,可以采用一定量的富含葡萄糖的工农业副产物(葡萄糖占外加碳源总量的 10% ~ 20%)来替代昂贵的乙酸,刺激聚磷菌的生长、增强其与聚糖菌对碳源的竞争能力<sup>[46]</sup>.

## 2.2 多级 A/O 工艺进出水的有机组分分析

### (1) GC-MS 分析

对多级 A/O 工艺进出水有机组分进行 GC-MS

方法分析,并对匹配度大于 80% 的检出化合物进行统计,结果如表 2 所示. 多级 A/O 进出水中分别检出 27 和 11 种化合物,总峰面积分别为  $10.799 \times 10^7$  和  $0.598 \times 10^7$ . 经过多级 A/O 工艺处理后,大多数物质的种类和峰面积均有削减. 按峰面积和种类数来看,烷烃和酯类为多级 A/O 工艺的主要污染物. 多级 A/O 对烷烃、卤代烃和醇类去除效果较好. 原水中的 13 种烷烃经处理后只剩下 2 种、减少了 84.6%,峰面积由  $3.366 \times 10^7$  减少到  $0.121 \times 10^7$ ,减少了 96.4%; 卤代烃和醇类在原水中较少,出水中未检出. 酯类物质、杂环类化合物、芳香族化合物在处理前后物质种类减少不多,出水仍有检出,但峰面积均大幅削减.

表2 多级 A/O 工艺进出水中各类化合物的种类数及浓度响应值

Table 2 Pollutants of multistage A/O process detected by GC-MS

污染物	进水		出水	
	种类数	峰面积 $\times 10^7$	种类数	峰面积 $\times 10^7$
烷烃	13	3.366	2	0.121
酯类	5	4.107	4	0.385
杂环类化合物	2	0.118	3	0.020
卤代烃	2	0.076	0	0
烯烃	1	0.089	0	0
羧酸类	1	0.013	1	0.058
醇类	2	0.070	0	0
芳香族化合物	1	2.960	1	0.014
总计	27	10.799	11	0.598

### (2) EEM 分析

对多级 A/O 工艺进出水中溶解性有机物进行 EEM 分析,计算类腐殖酸、溶解性微生物副产物、富里酸、芳香蛋白 1 和芳香蛋白 2 五区溶解性有机物的比重<sup>[29]</sup>,结果如图 4 所示. 进出水中两种芳香族蛋白质类似物所占比例之和为 73%,这与傅平青等<sup>[47]</sup>认为“受人类活动污染的水体,其三维荧光光谱以类蛋白类荧光峰为主”的结论一致. 进出水荧光峰数量分别为 89 和 86,荧光峰总强度分别为  $2.85 \times 10^5$  和  $2.78 \times 10^5$ ,荧光峰数量和荧光峰的强度均没有明显降低,表明多级 A/O 工艺对芳香族蛋白质类似物去除效果并不理想. 这与 GC-MS 分析结果中,多级 A/O 对于芳香族化合物和杂环类化合物的去除效果并不理想相吻合.

### 2.3 水质的 SOS/umu 遗传毒性分析

污水厂主体工艺单元的遗传毒性变化如图 5 所示,按从大到小的顺序为:系统总进水 > 多级 A/O 进水 > 多级 A/O 出水 > 系统总出水. 曝气沉砂池、高效沉淀池和滤布滤池对遗传毒性只有少量去除,

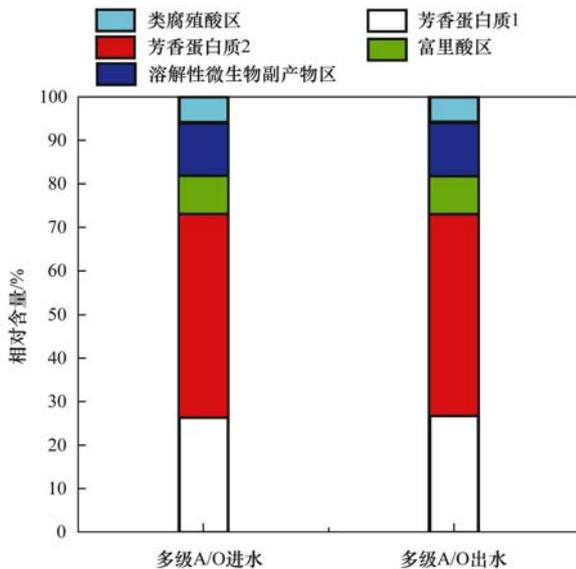


图4 三维荧光光谱各区有机物比重

Fig. 4 Comparison of EEM for organic matter in each area

而多级 A/O 处理后水质遗传毒性有大幅削减. IF = 2 时, 多级 A/O 工艺进水和出水对应的水样体积分别为 0.399 mL 和 2.33 mL, 出水为进水的 5.84 倍; 其对遗传毒性的平均去除率为 82.8%, 高于曹楠等<sup>[48]</sup>研究的 5 个城市 9 个污水厂工艺对遗传毒性的去除率(46.6% ~ 74.7%)的范围. 由此可见, 多级 A/O 工艺对遗传毒性有较好去除效果, 但引起遗传毒性的物质种类以及不同运行条件对于遗传毒性的去除效果的影响仍需进一步研究. 用 SPSS 软件对所测水样的 UV<sub>254</sub> 和遗传毒性进行线性拟合, 得出 Pearson 相关系数为 0.999, 二者具有显著相关性, 表明 UV<sub>254</sub> 所代表的有机物更易引起遗传毒性, 这与邵鹏等<sup>[49]</sup>的研究相符.

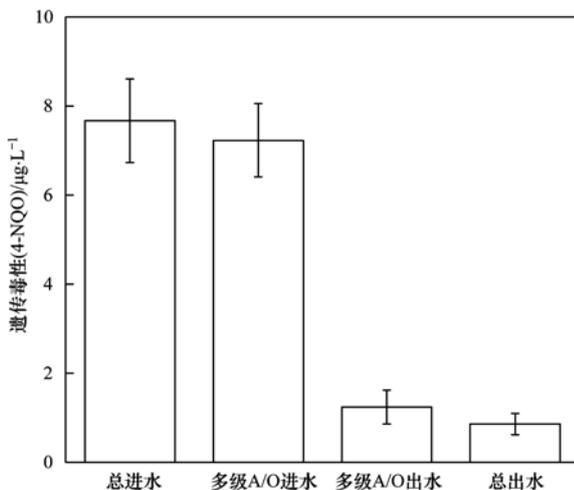


图5 各工艺单元遗传毒性当量变化

Fig. 5 Change of genotoxicity of each unit

### 3 结论

(1) 多级 A/O 工艺对宜兴某城市污水厂 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 的平均去除率分别为: (67.3 ± 7.0)%、(93.7 ± 1.5)%、(65.3 ± 7.9)%、(60.0 ± 18.7)%, 对各常规污染物指标的去除都起到了绝对主导作用. 碳源不足、有机负荷过低和碳源的单点投加效果不理想, 导致后段 A/O 未充分发挥优势, 是系统脱氮除磷效率低的主要原因.

(2) 多级 A/O 工艺对宜兴城市污水中的烷烃、卤代烃、醇类去除效果较好, 对酯类物质、杂环类化合物、芳香族化合物去除效果不明显; 对于主要含有的荧光物质(芳香族蛋白质类似物)去除效果并不理想. 对污水的遗传毒性的去除率为 82.8%, 遗传毒性和 UV<sub>254</sub> 存在显著相关性.

#### 参考文献:

- [1] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. Science, 2007, **317**(5842): 1166.
- [2] 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 等. 太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3862-3871.
- [3] Yang M, Yu J W, Li Z L, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. Science, 2008, **319**(5860): 158.
- [4] 何伶俐, 汪勇, 黄皓, 等. 江苏太湖流域污水处理厂一级 A 提标改造技术总结[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(10): 33-39.
- [5] 范文雪. 宜兴市水环境容量及污染治理研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [6] 郝昊, 王晓昌, 张琼华, 等. 宜兴市城市污水处理厂的水污染特征分析[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(2): 567-571.
- [7] 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 等. 太湖氮素出入湖通量与自净能力研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2309-2314.
- [8] Fujii S. Theoretical analysis on nitrogen removal of the step-feed anoxic-oxic activated sludge process and its application for the optimal operation[J]. Water Science and Technology, 1996, **34**(1-2): 459-466.
- [9] 李常留, 张兴文, 徐鹏飞. 阶段流入式多级 A/O 生物脱氮工艺设计及应用[J]. 环境工程, 2010, **28**(2): 45-48.
- [10] 刘胜军, 杨学, 石凤, 等. 多段多级 AO 除磷脱氮工艺分析与研究[J]. 给水排水, 2012, **38**(S1): 191-194.
- [11] 王姣, 鞠凤, 李国斌. 基于 ATV 标准的分段进水多级 A/O 工艺设计优化[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(20): 39-42.
- [12] Görgün E, Artan N, Orhon D, et al. Evaluation of nitrogen removal by step feeding in large treatment plants[J]. Water Science and Technology, 1996, **34**(1-2): 253-260.
- [13] 王舜和, 郭淑琴, 魏新庆. 分段进水多级 A/O 工艺计算与探讨[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(18): 81-85.
- [14] Zhu G B, Peng Y Z, Zhai L M, et al. Performance and optimization of biological nitrogen removal process enhanced by anoxic/oxic step feeding[J]. Biochemical Engineering Journal, 2009, **43**(3): 280-287.
- [15] Chang H Y, Ouyang C F. Step feeding strategy for enhancing nitrogen and phosphorus removal in A/OAO process[J]. Journal

- of Environmental Science and Health, Part A, 2001, **36**(4): 587-598.
- [16] 黄开, 于春洲, 魏飞, 等. 多级 A/O 工艺在国内的应用现状[J]. 环境科学与管理, 2007, **32**(2): 73-76.
- [17] 单巧利. 分段进水 A/O 工艺中试研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- [18] 黄霞, 张晓健. 城市废水有机物生物降解性评价及难降解有机物治理对策[J]. 环境科学, 1994, **15**(2): 15-19.
- [19] 张晶. A/O、A~2/O 和典型高级氧化技术对污水毒性削减效果研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [20] USEPA. EPA/505/2-90-001, Technical support document for water quality-based toxics control[S]. Washington, DC: U. S. EPA, 1991.
- [21] 郭莉. 综合废水和环境水样遗传毒性评价新方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [22] 刘聪. 焦化废水生物及深度处理工艺的排水生物毒性研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [23] 张冰, 周雪飞, 任南琪. 新型城市污水脱氮除磷工艺的试验研究与优化设计[J]. 环境科学, 2008, **29**(6): 1518-1525.
- [24] 易鹏, 张树军, 甘一萍, 等. 城市污水三污泥系统自养脱氮与强化生物除磷[J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2390-2397.
- [25] Sun S P, Nücher C P, Merkey B, *et al.* Effective biological nitrogen removal treatment processes for domestic wastewaters with low C/N ratios: a review[J]. Environmental Engineering Science, 2010, **27**(2): 111-126.
- [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] 邱松凯, 范举红, 黄开坚, 等. 臭氧-曝气生物滤池深度处理垃圾焚烧渗滤液可行性研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2513-2521.
- [28] 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 等. 印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3304-3310.
- [29] 申颖洁, 廖日红, 战楠, 等. 生物强化组合工艺处理河水的三维荧光及生物多样性分析[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(1): 125-131.
- [30] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [31] 言野, 李娜, 刘楠楠, 等. 利用改进的 SOS/umu 方法检测水处理过程中污染物的遗传毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(6): 909-916.
- [32] 李娜, 骆坚平, 饶凯锋, 等. 用 SOS/umu 生物测试评价北方某自来水厂对遗传毒性物质的去除效果[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(11): 10-16.
- [33] 李常留. 阶段流入式多级 A/O 生物脱氮工艺研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [34] Zhu G B, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, **131**(1-3): 319-328.
- [35] 王敏, 张智, 陈杰云, 等. 不同流量分配比对多级 A/O 工艺去除有机物及脱氮的影响[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(4): 1430-1434.
- [36] 韩光辉. 分段进水 A/O 脱氮工艺中试研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- [37] 吴淑云, 祝贵兵, 彭永臻. 分段进水生物脱氮工艺最高脱氮率的探讨[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, **39**(4): 594-598.
- [38] Hao O J, Huang J. Alternating aerobic-anoxic process for nitrogen removal: process evaluation[J]. Water Environment Research, 1996, **68**(1): 83-93.
- [39] 刘长荣, 李红, 常建一. 分点进水多级 A/O 污水处理工艺设计计算探讨[J]. 给水排水, 2011, **37**(1): 9-13.
- [40] 张自杰. 排水工程: 下册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [41] Chen J Y, Lin Y, Zhang Z, *et al.* Effect of different influent flow distribution ratios on multistage A/O process for removal of carbon and nitrogen[J]. Asian Journal of Chemistry, 2014, **26**(3): 709-713.
- [42] 张国珍, 高小波, 武福平, 等. 流量分配比对改良型多级 A/O 工艺去除污染物的影响[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(3): 1165-1170.
- [43] 夏雪. 反硝化除磷系统中碳源对除磷效果及菌群结构的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [44] 杨敏, 卢龙, 冯涌, 等. 不同碳源对 EBPR 启动期聚磷菌的影响研究[J]. 环境工程, 2013, **31**(1): 39-42.
- [45] Carucci A, Lindrea K, Majone M, *et al.* Different mechanisms for the anaerobic storage of organic substrates and their effect on enhanced biological phosphate removal (EBPR)[J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(6): 21-28.
- [46] Wu G X, Sørensen K B, Rodgers M, *et al.* Microbial community associated with glucose-induced enhanced biological phosphorus removal[J]. Water Science and Technology, 2009, **60**(8): 2105-2113.
- [47] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌. 溶解有机质的三维荧光光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(12): 2024-2028.
- [48] 曹楠, 苗婷婷, 李魁晓, 等. 城市污水中的生物毒性及其臭氧削减效果研究[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(4): 747-753.
- [49] 邵鹏, 刘锐, 袁星, 等. 太湖周边典型区域水体污染的遗传毒性研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(S1): 19-23.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013 .....	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi .....	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang .....	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing .....	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing .....	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai .....	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir .....	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station .....	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter .....	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains .....	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section) .....	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors .....	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake .....	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing .....	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply .....	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release .....	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC .....	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water .....	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir .....	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater .....	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i> .....	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment .....	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou .....	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process .....	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource .....	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe <sup>0</sup> -PRB Systems .....	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd <sup>2+</sup> from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles .....	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPy/AQDS in Microbial Fuel Cells .....	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate .....	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment .....	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR) .....	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin .....	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils .....	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China .....	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile .....	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice .....	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination .....	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil .....	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils .....	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain .....	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary .....	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO <sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment .....	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City .....	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil .....	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i> .....	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin .....	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process .....	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene .....	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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