

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012 ~ 2013 年间北京市 PM_{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM_{2.5} 重污染过程卫星反演研究 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降水中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌重金属耐性机制研究进展 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究

罗哲¹, 周光杰¹, 刘宏波¹, 聂新宇², 陈宇², 翟丽琴², 刘和^{1*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214000; 2. 无锡市高新水务公司, 无锡 214000)

摘要: 为研究城市污泥厌氧产酸发酵液作为补充碳源强化生活污水脱氮除磷系统的效果和可行性, 建造了一个总有效体积为 4 660 L 的 A²/O 中试反应系统, 以实际城市污水为研究对象, 考察了添加污泥产酸发酵液后的污水脱氮除磷效果并和单纯添加乙酸作碳源的效果进行了比较. 结果表明, 在进水 COD 为 243.7 mg·L⁻¹、NH₄⁺-N 为 30.9 mg·L⁻¹、TN 为 42.9 mg·L⁻¹、TP 为 2.8 mg·L⁻¹、硝化液回流比为 200% 和污泥回流比为 100% 的条件下, 向缺氧池中投加乙酸能增强系统脱氮除磷效果, 反应器的最佳进水流量和投加碳源 SCOD 增量分别为 7 500 L·d⁻¹ 和 50 mg·L⁻¹. 污泥发酵液代替乙酸作为外加碳源时的平均出水 COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 去除率分别为 81.60%、88.91%、64.86% 和 87.61%, 相对应的出水浓度分别为 42.18、2.77、11.92 和 0.19 mg·L⁻¹, 满足我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918-2002 所规定的一级 A 标准. 结果表明, 投加污泥产酸发酵液作为脱氮除磷碳源可达到和乙酸同样的效果, 具有实际可行性, 这为城市污泥处理处置实现资源化提供了一条新的可行途径.

关键词: 中试; 污泥发酵液; 碳源; 脱氮除磷; A²/O 反应器

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1000-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.032

Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System

LUO Zhe¹, ZHOU Guang-jie¹, LIU Hong-bo¹, NIE Xin-yu², CHEN Yu², ZHAI Li-qin², LIU He^{1*}

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214000, China; 2. Wuxi High-tech Water Service Company, Wuxi 214000, China)

Abstract: In order to explore the possibility of enhanced nitrogen and phosphorus removal in wastewater using sludge anaerobic fermentation liquid as external carbon source, the present study proposed an A²/O reactor system with a total effective volume of 4 660 L and real municipal wastewater for treatment. The results showed that under the conditions of the influent COD at 243.7 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N at 30.9 mg·L⁻¹, TN at 42.9 mg·L⁻¹, TP at 2.8 mg·L⁻¹, the backflow ratio of nitrification liquid at 200% and recycle ratio of sludge at 100%, the addition of acetic acid into anoxic tank could enhance the removal efficiency of nitrogen and phosphorus, and the optimal influent quantity and SCOD incremental of carbon were 7 500 L·d⁻¹ and 50 mg·L⁻¹, respectively. When the sludge fermentation liquid was used as external carbon source and the average effluent COD, NH₄⁺-N, TN, TP removal efficiency were 81.60%, 88.91%, 64.86% and 87.61%, the effluent concentrations were 42.18, 2.77, 11.92 and 0.19 mg·L⁻¹, respectively, which met China's first Class (A) criteria specified in the Discharge Standard Urban Sewage Treatment Plant Pollutant (GB 18918-2002). The results of the present study demonstrated that the addition of sludge anaerobic fermented liquid as external carbon source was a feasible way to enhance the removal of nitrogen and phosphorus in municipal wastewater, providing a new feasible strategy for the reuse and recycle of sewage sludge in China.

Key words: pilot-scale; sludge fermentation liquid; carbon resource; nitrogen and phosphorus removal; A²/O reactor system

在传统污水生物脱氮除磷工艺中,反硝化菌和聚磷菌均为异养菌,其生长需要足够的碳源^[1].我国典型城市污水属于低碳源污水(COD < 200 mg·L⁻¹、COD/TN < 5、COD/TP < 25),对保证城市污水处理厂氮、磷达标排放是一大瓶颈^[2],因此应投加外部碳源以满足脱氮除磷的需要^[3-5].污水处理厂常利用乙酸、葡萄糖、甲醇和乙醇作为外加碳源^[6]、投加化学药剂和采用分段进水方式提高脱氮除磷效果^[7-8],但是上述方法将导致污水厂运行成本升高^[9].

城市剩余污泥厌氧发酵产生的挥发性脂肪酸

(VFA)可用作提高污水营养物质去除效果的替代碳源^[10].到目前为止人们已经研究了利用含VFA的污泥水解液或污泥发酵液作为外加碳源强化污水脱氮除磷的效果^[6,11-13].邹胜男等^[14]利用剩余污泥水解酸化液为外加碳源处理低碳氮比污水,在曝气生物滤池(BAF)中NH₄⁺-N和TN的去除率分别超过

收稿日期: 2014-08-30; 修订日期: 2014-10-25

基金项目: 江苏省太湖水环境综合治理科研课题项目(JSZC-G2013-191); 江苏省环境保护厅科研课题项目(2012035); 国家自然科学基金青年基金项目(51208231)

作者简介: 罗哲(1989~),男,硕士,主要研究方向为废物资源化工程, E-mail: luozhel120@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liuhe@jiangnan.edu.cn

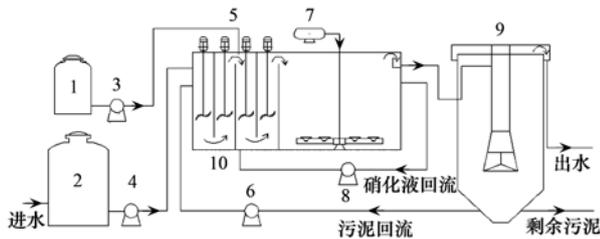
98% 和 75%。Gao 等^[6]搭建了一个包含两步污泥碱性发酵和 A²/O 反应器的连续系统, 最终使 TN 和 TP 的去除率分别高达 80.1% 和 90.0%。

虽然以上研究均获得了较好的结果, 然而, 这些研究大多是在实验室中进行的, 而一旦运用到实际工程之中, 其实际效果可能会大打折扣。为了全面评估污泥产酸发酵液对实际污水的脱氮除磷强化效果, 本研究建造了一个污水处理量为 10 m³·d⁻¹, 总体积为 4 660 L 的 A²/O 反应器系统, 采用污水处理厂的实际污水, 通过添加剩余污泥产酸发酵液, 探讨污泥发酵液作为外加碳源促进污水脱氮除磷的效果和可行性, 以期为污水处理厂的节能降耗、稳定运行和升级改造提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 A²/O 反应器系统

中试装置位于无锡市高新水务公司的新城污水处理厂内, 工艺流程如图 1 所示。



1. 发酵液贮存罐; 2. 缓冲水箱; 3. 发酵液计量泵; 4. 进水计量泵; 5. 搅拌机; 6. 污泥回流泵; 7. 空压机; 8. 硝化液回流泵; 9. 沉淀池; 10. 厌氧/缺氧/好氧反应器

图 1 A²/O 反应器系统工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of A²/O process

A²/O 反应器系统各池的分布顺序为厌氧池、缺氧池和好氧池, 各反应池有效体积分别为 900、900 和 2 800 L, 反应器的总体积为 4 660 L。由时控

开关、蠕动泵、电磁阀及附属电子线路控制运行周期和进水、搅拌、曝气、沉淀及排水等各个操作环节。进水、污泥回流、硝化液回流和营养液投加均使用计量泵, 以使实验参数控制更加精确。采用空气压缩机供气和搅拌, 空压机连接微孔黏砂块曝气头曝气。好氧阶段溶解氧为 1.5~3 mg·L⁻¹ 左右。隔天从沉淀池排放剩余污泥, 使污泥停留时间为 20 d 左右。

1.2 污水进水、乙酸碳源和发酵液的性质

污水全部来自新城污水处理厂细格栅出水, 发酵液来自中试污泥发酵罐, 经过了固液分离处理。发酵污泥取自无锡市太湖新城污水处理厂脱水污泥。A²/O 工艺的种泥来自新城污水处理厂缺氧池污泥驯化而成。乙酸碳源为工业级液态乙酸, 浓度为 98%。进水和污泥发酵液的性质如表 1 所示。

表 1 进水和发酵液性质

Table 1 Characteristics of influent wastewater and fermentation liquid

| 参数 | 进水 | 发酵液 |
|--|---------|----------|
| COD/mg·L ⁻¹ | 243.7 | 13 403.0 |
| NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹ | 30.9 | 965.5 |
| TN/mg·L ⁻¹ | 42.9 | 1 086.2 |
| TP/mg·L ⁻¹ | 2.8 | 161.0 |
| VFA/mg·L ⁻¹ | — | 5 013.7 |
| pH | 6.7~7.2 | 8.74 |
| SS/mg·L ⁻¹ | 150.0 | 238.6 |
| 温度/°C | 6~27 | 15~28 |

1.3 A²/O 反应器运行参数

中试处理系统的设计流量为 10 m³·d⁻¹, 测试了不同进水流量和污泥发酵液投加量条件下的处理效果。乙酸和污泥发酵液均添加到 A²/O 系统的缺氧池。整个实验周期分 5 个阶段, 阶段 I 为未添加碳源的正常运行阶段, 作为系统运行的对照阶段, 阶段 II~IV 为添加乙酸作碳源的运行阶段, 阶段 V 为添加实际污泥产酸发酵液的运行阶段, 其中各阶段的碳源增量(以 COD 计)均基于进水 COD 浓度, 每个阶段的运行参数如表 2 所示。

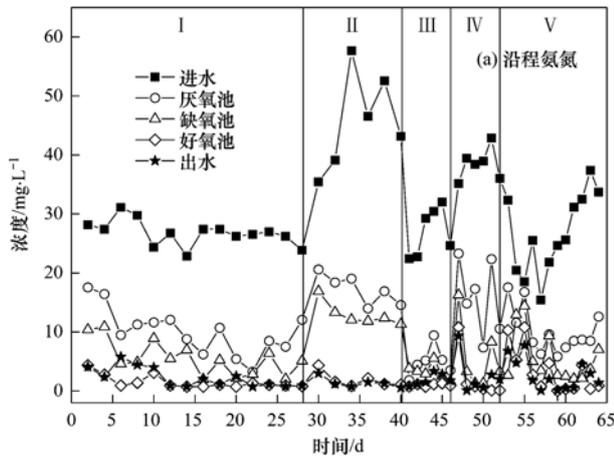
表 2 A²/O 中试处理系统 5 个阶段的运行参数

Table 2 Operating parameters at the 5 stages of the A²/O reactor system

| 项目 | 阶段 I | 阶段 II | 阶段 III | 阶段 IV | 阶段 V |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|---------|
| 进水流量/L·d ⁻¹ | 10 000 | 5 000 | 5 000 | 7 500 | 7 500 |
| MLSS/g·L ⁻¹ | 3.92~5.91 | 5.88~6.01 | 4.79~5.07 | 5.2~5.48 | 4.4~5.1 |
| 污泥回流比/% | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 硝化液回流比/% | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| HRT/h | 11.2 | 22.4 | 22.4 | 14.9 | 14.9 |
| SRT/d | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| 好氧池溶解氧/g·L ⁻¹ | 1.5~3 | 1.5~3 | 1.5~3 | 1.5~3 | 1.5~3 |
| 温度/°C | 14~27 | 5~8 | 17~23 | 19~25 | 19~23 |
| 碳源增量/mg·L ⁻¹ | 0 | 25(乙酸) | 50(乙酸) | 50(乙酸) | 50(发酵液) |
| 运行时间/d | 28 | 12 | 6 | 6 | 12 |

1.4 测试方法

MLSS: 重量法^[15], 氨氮: 纳氏试剂分光光度法^[15], TN: 过硫酸钾消解法^[15], TP: 钼锑抗分光光度法^[15], VFA: 气相色谱法^[15], COD/SCOD: 快速消解分光光度法, DO: 在线溶氧仪, pH: pH 测定仪



(Mettler Toledo).

2 结果与讨论

2.1 各阶段氨氮和总氮的去除

图2为中试反应器对氨氮和总氮的去除情况。

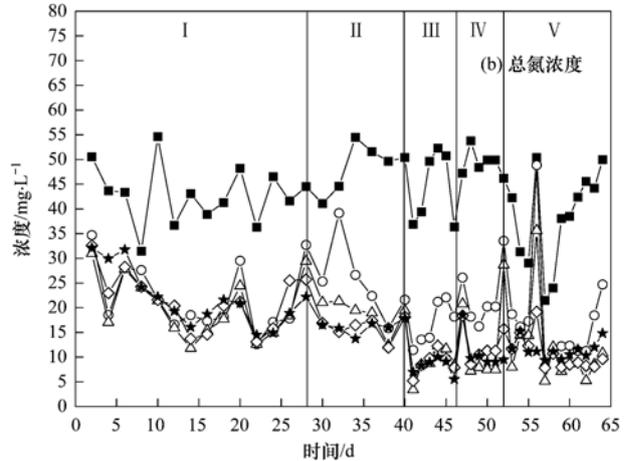


图2 A²/O中试系统各阶段沿程氨氮和总氮浓度变化

Fig. 2 Variations of NH₄⁺-N and TN profiles in each stage of the A²/O reactor system

由图2可知,在阶段I的对照阶段,除了第6d出水氨氮为5.78 mg·L⁻¹外,其余均能达到污水一级A的5 mg·L⁻¹的排放标准,但是出水总氮高于15 mg·L⁻¹的排放标准.说明系统硝化效果正常,但反硝化效果较差.考虑到总氮去除效果不佳及进入冬季气温下降,在阶段II,污水流量从10 000 L·d⁻¹调整为5 000 L·d⁻¹,同时添加乙酸作外加碳源,使进水COD提高25 mg·L⁻¹.从氨氮进水浓度来看,由于进水波动,氨氮浓度大幅升高,但是出水氨氮仍然维持较低水平,低于排放标准,说明系统硝化效果较好.出水总氮虽有所改善,但是仍然稍高于排放标准.在阶段III,进一步增加乙酸添加量,COD提升50 mg·L⁻¹,流量维持不变.从出水氨氮和总氮情况看,二者均低于国家排放标准.这说明由于乙酸碳源量的增加,促进了系统的反硝化效果,使出水总氮达标.由于系统脱氮效果较好,在阶段IV,将进水流量从5 000 L·d⁻¹提升至7 500 L·d⁻¹,乙酸添加量维持不变.出水监测结果表明,由于负荷的增加,第46d氨氮和总氮出水浓度均有所增加,但是在第47d很快恢复正常.总体上出水氨氮和总氮分别在5 mg·L⁻¹和15 mg·L⁻¹以下,说明系统运行稳定.

在阶段V,外加碳源由乙酸转换为污泥发酵液,因发酵液中含有较高的氨氮(965.5 mg·L⁻¹)和总磷(161.0 mg·L⁻¹),使其负荷也随之增加.由于发

酵液直接进入缺氧池,因此缺氧池氨氮和总氮浓度明显上升,氨氮从2.67 mg·L⁻¹上升到14.39 mg·L⁻¹,总氮从7.99 mg·L⁻¹上升到17.30 mg·L⁻¹.在53~55d,系统处于适应期,出水氨氮较之前大幅增加,分别为6.77、4.81和7.72 mg·L⁻¹,总氮也略有升高,分别为11.69、15.23和11.02 mg·L⁻¹.然而经过短暂的适应期,系统出水氨氮和总氮迅速恢复正常.这一结果表明,污泥产酸发酵液作为外加碳源能够很好的促进A²/O系统的反硝化效果,提高出水水质.这是因为污泥发酵液中的碳源以VFA为主,非常容易被微生物利用^[16].另外,虽然发酵液的添加会带来部分氨氮进入系统,但是并不会对污水脱氮效果造成影响.

2.2 各阶段总磷的去除

A²/O系统各运行阶段总磷去除情况如图3所示.

如图3所示,在阶段I,进水总磷在2.5~5.0 mg·L⁻¹之间,而前期出水总磷平均浓度只达到0.6 mg·L⁻¹,到第22d时,出水浓度降为0.34 mg·L⁻¹,能够达到城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)一级A标准TP<0.5 mg·L⁻¹.这是因为阶段I的前期,处于污泥的培养阶段,主要负责在厌氧条件下逆浓度梯度过量吸磷而在好氧条件下过量吸磷的聚磷菌(PAOs)尚未完全适应此代谢环

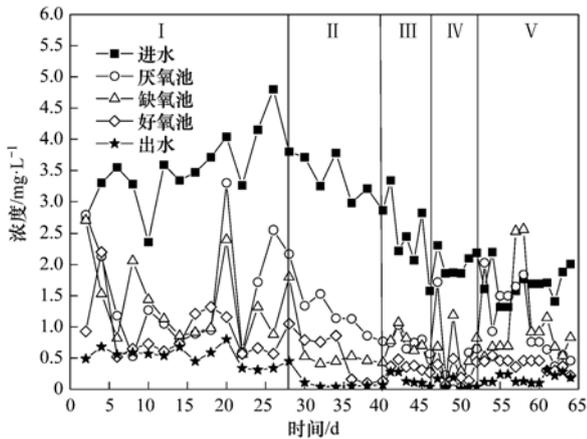


图3 A²/O 中试系统各阶段沿程总磷变化
Fig. 3 Variations of TP profiles in each stage of the A²/O reactor system

境^[17], 因此总磷去除率有一个逐渐改善的过程. 进入阶段 II、III、IV 后, 出水总磷效果较为理想, 总磷平均出水浓度分别为 0.06、0.16 和 0.08 mg·L⁻¹, 相对应的平均去除率分别为 98.13%、93.67% 和 96.13%. 由此可知, 降低进水流量和投加碳源能明显提高 TP 的去除效果, 这与 Zheng 等^[18] 的研究结果相似.

在阶段 V 开始向缺氧池中投加发酵液, 因发酵液中本身含有大量磷, 致使缺氧池中总磷浓度明显升高, 从阶段 IV 的 0.29 mg·L⁻¹ 上升到 0.45 mg·L⁻¹. 但是, 出水总磷浓度仍然较好, 平均浓度和去除率分别为 0.19 mg·L⁻¹ 和 88.61%, 表现略差于阶段 IV 的 0.08 mg·L⁻¹ 和 96.13%. Tong 等^[19] 向 SBR 反应器中投加经鸟粪石沉淀法回收氮磷后的污泥碱性发酵液, 实现了 92.9% 的磷去除效率, 虽然其效果好于本研究, 但本研究并没有在投加前将发酵液中的氮磷去除.

从生物除磷的机制分析可以发现, 第 58 d 时, 因为富含 VFA 的发酵液的加入, 聚磷菌会优先使用 VFA 用于释磷过程^[20], 在厌氧区观察到了明显的磷释放, 而缺氧池中 TP 浓度不降反升, 这是因为发酵液本身所含有的磷酸盐和无氧条件下的磷的释放所导致的. 由缺氧池到好氧池阶段出水 TP 浓度由 2.56 mg·L⁻¹ 减少到 0.46 mg·L⁻¹, 在好氧段污水中的磷酸盐得到较彻底的吸收.

2.3 各阶段 COD 的去除

图 4 是反应器正式运行后五个阶段沿程 COD 的变化.

在阶段 I 的初始阶段, 反应器处于适应期, COD

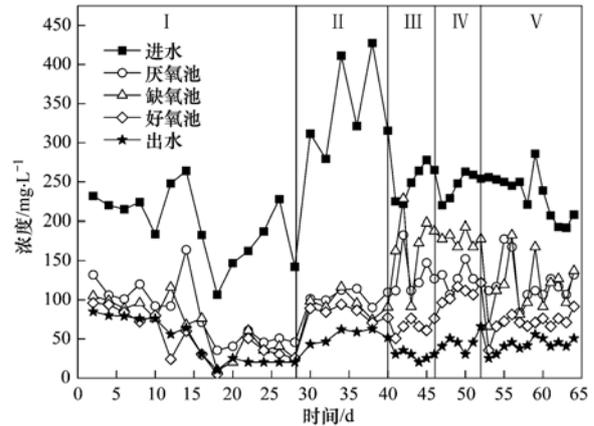


图4 A²/O 中试系统各阶段沿程 COD 变化
Fig. 4 Variations of COD profiles in each stage of the A²/O reactor system

的去除效果不甚理想, 未能达到的出水一级 A 排放标准 (COD ≤ 50 mg·L⁻¹), 在此之后, COD 值均小于 50 mg·L⁻¹. 在阶段 II, 虽然进水流量由 10 000 L·d⁻¹ 降低到 5 000 L·d⁻¹, 但因进水 COD 高于前一阶段, 最高时达到 411.28 mg·L⁻¹. 另外, 从缺氧池 COD 浓度可以看出, 由于外加碳源的输入 (25 mg·L⁻¹), COD 有所升高. 由于本阶段水温较低, 微生物活性降低, 所以 COD 出水值一直在达标线附近徘徊, 效果不是很理想. 进入阶段 III, 进水 COD 略有下降, 基本稳定在 250 mg·L⁻¹ 附近, 同时可能由于气温升高的原因, 尽管添加乙酸导致外加碳源输入, 但出水 COD 值保持在 20 ~ 30 mg·L⁻¹ 之间. 阶段 IV 将进水流量从 5 000 L·d⁻¹ 上升到 7 500 L·d⁻¹, 在进水 COD 浓度和阶段 III 接近的条件下, 出水 COD 值也全部达标, 和阶段 III 相似, 说明系统适应后有一定的抗负荷能力.

阶段 V 将外加碳源改为污泥发酵液, 系统 COD 负荷增加 50 mg·L⁻¹, 虽然缺氧池和厌氧池 COD 值有所升高, 但是系统出水 COD 值在 25.38 ~ 55.85 mg·L⁻¹ 之间, 除个别点外, 全部达标. 说明在实验设定的负荷条件下, 发酵液外加碳源的输入不会对系统 COD 去除效果产生重大影响, 出水满足排放要求.

2.4 乙酸和污泥发酵液作为碳源强化污水脱氮除磷的比较

为了比较乙酸作碳源和污泥发酵液作碳源强化污水脱氮除磷的差异, 表 3 统计了阶段 IV 和 V 两种相同负荷条件下的污水处理效果.

由表 3 可知, 当进水流量为 7 500 L·d⁻¹ 时, 投加 50 mg·L⁻¹ 的乙酸和污泥产酸发酵液均能使污水各

表 3 乙酸和污泥发酵液作碳源脱氮除磷效果的比较

| 项目 | COD/mg·L ⁻¹ | | | NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹ | | | TN/mg·L ⁻¹ | | | TP/mg·L ⁻¹ | | |
|-----|------------------------|-------|-------|--|------|-------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|------|-------|
| | 进水 | 出水 | 去除率/% | 进水 | 出水 | 去除率/% | 进水 | 出水 | 去除率/% | 进水 | 出水 | 去除率/% |
| 乙酸 | 245.50 | 46.54 | 80.96 | 38.49 | 2.62 | 93.19 | 49.21 | 11.01 | 77.63 | 1.99 | 0.08 | 95.98 |
| 发酵液 | 233.33 | 42.18 | 81.60 | 26.59 | 2.77 | 88.92 | 36.32 | 11.92 | 64.86 | 1.68 | 0.19 | 87.61 |

项指标, COD、氨氮、总氮、总磷等均达到国家一级 A 排放标准. 在运行期间, 投加乙酸和发酵液的出水总氮平均浓度分别为 11.01 mg·L⁻¹ 和 11.92 mg·L⁻¹, 相对应的去除率分别为 77.6% 和 64.86%; 出水氨氮平均浓度分别为 2.62 mg·L⁻¹ 和 2.77 mg·L⁻¹, 相对应的去除率分别为 93.19% 和 88.92%; 出水总磷平均浓度分别为 0.08 mg·L⁻¹ 和 0.19 mg·L⁻¹, 相对应的去除率分别为 95.98% 和 87.61%. 和乙酸相比, 虽然投加发酵液对 A²/O 系统营养物质的去除率略有差距, 然而, 系统出水的各项指标能满足排放要求.

相较于前几阶段, 发酵液投加阶段进水 COD 保

持稳定, 而进水氨氮和 TN 有轻微波动, 进水 TP 有较大程度的下降. 如果在正常进水氮、磷浓度情况下, 采用阶段 V 的实验参数, 氨氮、TN 和 TP 也是能够达标的. 因为进水氮浓度波动范围很小, 不会对实验结果造成影响, 而进水磷浓度本身基数并不大, 根据此前各阶段的实验结果, 预期出水 TP 能满足排放要求.

综上所述, 投加污泥厌氧发酵液作为城市污水强化脱氮除磷 A²/O 工艺的补充碳源是可行的.

2.5 碳源投加量的理论分析

表 4 显示了污泥发酵液作为碳源强化污水脱氮除磷的理论分析表.

表 4 碳源投加量理论分析表

| 污水 | TN 负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹ | TP 负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹ | COD 负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹ | COD 负荷/TN 负荷 | COD 负荷/TP 负荷 |
|----------|--|--|---|--------------|--------------|
| 原污水 | 0.092 | 0.008 | 0.420 | 4.565 | 52.5 |
| 污水 + 乙酸 | 0.079 | 0.003 | 0.476 | 6.025 | 158.7 |
| 污水 + 发酵液 | 0.065 | 0.004 | 0.456 | 7.015 | 114.0 |

污泥发酵液的主要成分是 VFA, 本实验所使用的发酵液中乙酸和丙酸浓度分别为 2915.5 mg·L⁻¹ 和 739.4 mg·L⁻¹, 二者共占 VFA 总量的 72.9%, 这两种酸有利于营养物质的去除^[21~23]. 有研究表明, 异养反硝化菌将 1 g NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 转化成氮气分别需要 4.1 g COD 和 2.7 g COD^[23], 聚磷菌去除 1 g TP 需要 6~9 g COD^[25]. 由表 4 可知, 投加乙酸和发酵液后的 COD 负荷/TN 负荷分别为 6.025 和 7.015, 大于理论值 4.1 g·g⁻¹ (以 COD/NO₃⁻-N 计), 因此, 在实际的污水处理中, 碳源的投加量应大于理论值, 这是因为有相当一部分的 COD 被聚磷菌和其他异养型微生物所利用, 同时有部分碳源用于去除污泥发酵液本身所含氮、磷. 然而, 这些随着发酵液进入反应器的氮、磷含量很少, 与进水浓度相比, 氨氮、总氮和总磷增量分别为 3.6、4.1 和 0.6 mg·L⁻¹, 这意味着 50 mg·L⁻¹ 的 SCOD 增量有约 8.6~16.8 mg·L⁻¹ 用于发酵液中氮的去除, 有约 3.6~5.4 mg·L⁻¹ 用于发酵液中磷的去除, 剩余 27.8~37.8 mg·L⁻¹ 用于强化污水脱氮除磷, 碳源的有效利用率约为 55.6%~75.6%. 另外, 值得指出的是, 由

于发酵液投加阶段的进水平均 TN 和 COD 浓度较乙酸投加阶段小, 导致在进水流量相同的情况下前者的 TN 和 COD 负荷也比后者略小.

3 结论

(1) 以实际生活污水为处理对象, 在 A²/O 中试系统的缺氧池中投加污泥发酵液, 将 COD 提升 50 mg·L⁻¹, 出水 COD、氮、磷等各项指标均可达到国家排放标准, 其强化脱氮除磷效果和投加乙酸相同.

(2) 污泥厌氧发酵液作为城市污水强化脱氮除磷的替代碳源是可行的, 发酵液本身的高氨氮和总磷含量并不会对出水效果产生明显的负面影响.

参考文献:

- [1] Ji Z Y, Chen Y G. Using sludge fermentation liquid to improve wastewater short-cut nitrification-denitrification and denitrifying phosphorus removal via nitrite [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(23): 8957-8963.
- [2] Kim D, Kim T S, Ryu H D, et al. Treatment of low carbon-to-nitrogen wastewater using two-stage sequencing batch reactor with independent nitrification [J]. Process Biochemistry, 2008, 43(4): 406-413.

- [3] Kampas P, Parsons S A, Pearce P, *et al.* An internal carbon source for improving biological nutrient removal [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(1): 149-154.
- [4] Lim S J, Kim B J, Jeong C M, *et al.* Anaerobic organic acid production of food waste in once-a-day feeding and drawing-off bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(16): 7866-7874.
- [5] Dytczak M A, Londry K L, Siegrist H, *et al.* Ozonation reduces sludge production and improves denitrification [J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 543-550.
- [6] Gao Y Q, Peng Y Z, Zhang J Y, *et al.* Biological sludge reduction and enhanced nutrient removal in a pilot-scale system with 2-step sludge alkaline fermentation and A²O process [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(5): 4091-4097.
- [7] 汪辉, 马伟芳, 曾凡刚. 几种无机混凝剂除磷优化及污水深度净化研究[J]. *工业水处理*, 2012, **32**(4): 46-48.
- [8] 王伟, 彭永臻, 殷芳芳, 等. 改进分段进水 A/O 生物脱氮工艺强化生物除磷[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2968-2974.
- [9] 刘智晓, Sille B L, Gert P, 等. 污泥作为污水厂内碳源的水解特性及工艺选择[J]. *中国给水排水*, 2008, **27**(22): 30-35.
- [10] Elefsiniotis P, Wareham D G, Smith M O. Use of volatile fatty acids from an acid-phase digester for denitrification [J]. *Journal of Biotechnology*, 2004, **114**(3): 289-297.
- [11] Zhang L, Zhang S J, Wang S Y, *et al.* Enhanced biological nutrient removal in a simultaneous fermentation, denitrification and phosphate removal reactor using primary sludge as internal carbon source [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(5): 635-640.
- [12] Peng Y Z, Zhang L, Zhang S J, *et al.* Enhanced nitrogen removal from sludge dewatering liquor by simultaneous primary sludge fermentation and nitrate reduction in batch and continuous reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **104**: 144-149.
- [13] Banu J R, Uan D K, Yeom I T. Nutrient removal in an A²O-MBR reactor with sludge reduction [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(16): 3820-3824.
- [14] 邹胜男, 梅翔, 谢玥, 等. 以剩余污泥水解酸化液为外加碳源的污水生物脱氮[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(11): 2519-2526.
- [15] 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.
- [16] 高永青, 彭永臻, 王淑莹, 等. 污泥水解酸化液用作 A²/O 系统脱氮除磷碳源的研究[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(17): 23-27.
- [17] 周群英, 王世芬. 环境工程微生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [18] Zheng X, Tong J, Li H J, *et al.* The investigation of effect of organic carbon sources addition in anaerobic-aerobic (low dissolved oxygen) sequencing batch reactor for nutrients removal from wastewaters [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(9): 2515-2520.
- [19] Tong J, Chen Y G. Recovery of nitrogen and phosphorus from alkaline fermentation liquid of waste activated sludge and application of the fermentation liquid to promote biological municipal wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2009, **43**(12): 2969-2976.
- [20] 金鹏康, 常晋, 王先宝, 等. 不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3443-3448.
- [21] Stoop M L M. Water management of production systems optimised by environmentally oriented integral chain management: case study of leather manufacturing in developing countries [J]. *Technovation*, 2003, **23**(3): 265-278.
- [22] Chen Y G, Randall A A, McCue T. The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid [J]. *Water Research*, 2004, **38**(1): 27-36.
- [23] 刘燕, 行智强, 陈银广, 等. 聚羟基烷酸转化对强化生物除磷影响研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1103-1106.
- [24] Mateju V, Cizinska S, Krejci J, *et al.* Biological water denitrification—a review [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 1992, **14**(3): 170-183.
- [25] Deng Y X, Zheng B H, Fu G, *et al.* Study on the total water pollutant load allocation in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent seawater area [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **86**(3): 331-336.

CONTENTS

| | | |
|---|---|----------|
| Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing | WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> | (759) |
| Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013 | YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> | (768) |
| Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing | JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> | (774) |
| Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China | ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> | (780) |
| Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City | LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> | (787) |
| Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China | XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> | (794) |
| Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels | LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> | (801) |
| Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing | QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> | (809) |
| Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan | LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> | (817) |
| Organic and Element Carbon in Foliar Smoke | CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> | (824) |
| Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge | JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> | (831) |
| Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas | MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> | (839) |
| Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors | WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> | (847) |
| Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River | LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> | (855) |
| Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River | LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo, <i>et al.</i> | (862) |
| Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River | YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> | (869) |
| Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region | WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> | (879) |
| Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season | LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> | (888) |
| Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation | CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> | (898) |
| Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors | YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei, <i>et al.</i> | (905) |
| Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu | YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> | (914) |
| Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake | WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> | (922) |
| Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China | HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> | (928) |
| Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu | JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> | (936) |
| Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River | GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> | (946) |
| Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus | SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> | (955) |
| Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation | YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> | (963) |
| Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material | WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> | (969) |
| Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles | HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> | (980) |
| Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst | SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> | (989) |
| Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange | WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> | (995) |
| Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System | LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> | (1000) |
| Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content | ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> | (1006) |
| Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR | GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> | (1013) |
| Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell | TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> | (1021) |
| Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite | HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> | (1027) |
| Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China | LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> | (1037) |
| Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions | QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> | (1045) |
| Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province | ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> | (1053) |
| Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk | JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> | (1060) |
| Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i> | ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> | (1069) |
| Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow | LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> | (1075) |
| Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China | LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> | (1084) |
| Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts | YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> | (1092) |
| Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials | DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> | (1098) |
| Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing | SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> | (1105) |
| Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants | DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> | (1117) |
| Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi | CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> | (1123) |
| Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria | SHEN Li-dong | (1133) |

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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