

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

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

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	崔海, 张亚红 (1507)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究

杨伟强, 王冬波, 李小明*, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

摘要: 在低碳源废水条件下, 通过对改良后的双污泥处理工艺与传统厌氧-好氧-缺氧工艺效果进行比较分析, 探究解决城市生活污水碳源不足的方法. 实验组反应器为改良型双污泥系统, 即在原双污泥系统缺氧段增加两个阶段的微曝气(曝气量 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), 对照组反应器为多级厌氧-好氧-缺氧 SBR. 结果表明, 进水 COD、氨氮、SOP 浓度分别为 200 、 35 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 实验组比对照组脱氮除磷效果好(去除率分别为: TN 94.8% 与 60.9%; TP 96.5% 与 75%), 出水 SOP 浓度 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 浓度 $1.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 完全满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准. 采用优化后的工艺, 单位碳源(以 COD 计)可实现的最大的氮、磷的去除量分别为 $0.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.048 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 可以最大程度地解决当前城市废水碳源浓度较低的问题.

关键词: 低碳源; 改良双污泥系统; 微曝气; 脱氮除磷; 反硝化聚磷菌

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1492-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.04.039

Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source

YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming*, YANG Qi, XU Qiu-xiang, ZHANG Zhi-bei, LI Zhi-jun, XIANG Hai-hong, WANG Ya-li, SUN Jian

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper explored the method of resolving insufficient carbon source in urban sewage by comparing and analyzing denitrification and phosphorus removal (NPR) effect between modified two-sludge system and traditional anaerobic-aerobic-anoxic process under the condition of low carbon source wastewater. The modified two-sludge system was the experimental reactor, which was optimized by adding two stages of micro-aeration (aeration rate $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) in the anoxic period of the original two-sludge system, and multi-stage anaerobic-aerobic-anoxic SBR was the control reactor. When the influent COD, ammonia nitrogen, SOP concentration were respectively 200 , 35 , $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the NPR effect of the experimental reactor was better than that of the control reactor with the removal efficiency of TN being 94.8% vs 60.9%, and TP removal being 96.5% vs 75%, respectively. The effluent SOP, ammonia, TN concentration of the experimental reactor were 0.35 , 0.50 , $1.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, which could fully meet the first class of A standard of the Pollutants Emission Standard of Urban Wastewater Treatment Firm (GB 18918-2002). Using the optimized treatment process, the largest amounts of nitrogen and phosphorus removal per unit carbon source (as COD) were $0.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.048 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ respectively, which could furthest solve the lower carbon concentration in current municipal wastewater.

Key words: low carbon source; modified two-sludge system; micro-aeration; nitrogen and phosphorus removal (NPR); denitrifying phosphate-accumulating organisms (DPAOs)

近年来, 由于生活污水和工业废水中氮磷的排放, 水体富营养化现象依然呈现出不断加剧的趋势, 因而如何控制水中氮磷的含量仍然是当前水环境研究的重点. 现行的污水处理厂大都采用传统的生物脱氮除磷处理工艺, 基本原理都是厌氧-好氧-缺氧工艺, 或者其改进后的工艺, 如 UCT、MUCT、VIP 及 JHB 工艺等^[1]. 碳源充足的条件下, 这些工艺都可以达到很好的脱氮除磷效果. 然而我国大多数地区城市污水中碳源比较缺乏^[2~5], 尤其是氨氮含量比较高^[6]时, 这一现象更为明显. 因而污水厂需要另外添加碳源来实现氮磷的更好去除, 如甲醇、乙酸钠等^[7,8], 但这进一步提高了污水厂的运行费用. 最

近有研究者提出把剩余污泥厌氧发酵液作为外加碳源用于补充污水中碳源的不足^[9~14]. 虽然污泥厌氧发酵液可以改善污水中碳源情况, 但是目前只限于实验室实验研究阶段, 大规模应用仍然存在很大难度, 同时污泥中可能含有的有毒有害物质会破坏污水处理的微生物系统, 实际应用之前应慎重考虑. 因而如何通过工艺改进提高碳源的有效利用率, 从

收稿日期: 2015-10-17; 修订日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278175, 51378188, 51478170); 国际科技合作项目(2012DFB30030-03)

作者简介: 杨伟强(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: wqy4290@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xmli@hnu.edu.cn

而实现氮磷的高效去除仍然是处理低浓度碳源废水的重中之重。

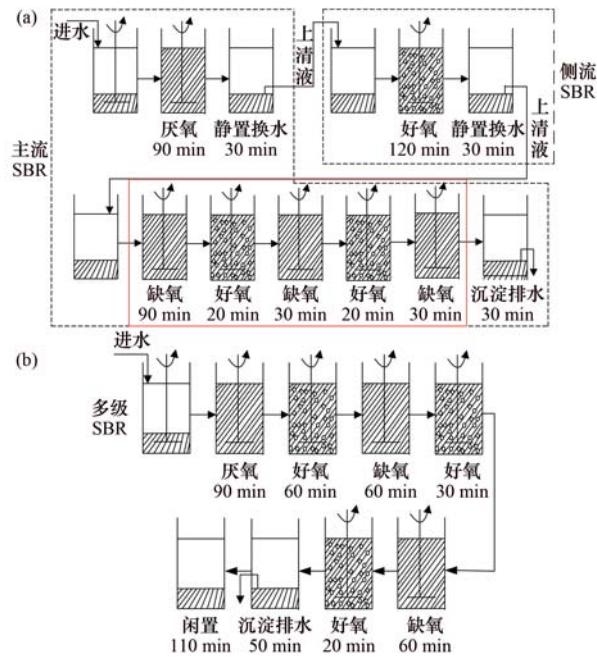
Kuba 等^[15]在 1996 年提出的双污泥脱氮除磷系统 (A₂NSBR), 近年来有不少学者进行了研究^[2, 3, 16~18]。和传统的好氧脱氮除磷系统相比, 该工艺可以节约 50% 的 COD, 并且氧气的消耗和污泥的产量也有一定程度的减少; 但是该工艺存在一定的缺陷, 即出水中会残留部分氨氮而无法达到排放标准。因此, 本研究在双污泥系统的基础上, 进一步改良该工艺, 使反应器中残留的氨氮发生硝化反应, 并且生成的硝酸盐或者亚硝酸盐可进一步作为电子受体进行反硝化除磷, 从而提高系统的脱氮除磷效率。通过与传统的多级厌氧-好氧-缺氧系统 (多级 SBR) 进行对比, 探究改良后的工艺对氮磷去除效率, 最大程度地提高碳源的利用效率, 以期为低碳源废水的处理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行方法

整个实验分为实验组和对照组, 具体的工艺流程见图 1。实验组由主流 SBR 和侧流 SBR 两个反应器组成, 对照组由单个反应器组成, 图 1 中的多个反应器只是一个反应器不同的运行阶段。反应器由有机玻璃制成, 有效容积为 4 L, 每次进水、排水均为 3 L。反应器底部安装曝气盘进行微孔曝气, 由曝气泵及气体流量计控制曝气量。每个反应器配有强力搅拌器, 保证泥水的均匀混合。每天运行 3 个周期, 并采用微电脑时控开关自动控制曝气和搅拌。实验组为改良型双污泥系统, 两个反应器的污泥是各自独立的, 不存在污泥之间的回流交换, 只是在上清液之间存在回流交换。改良之处是在原来的缺氧

段之间增加了两段微曝气阶段 (如图 1 红色框内所示), 控制曝气量 0.50 L·min⁻¹, 侧流 SBR 控制曝气量 1.5 L·min⁻¹; 对照组采用控制曝气量 1.5 L·min⁻¹。搅拌速度控制在 250 r·min⁻¹, 污泥停留时间 (SRT) 控制在 15 d, 整个过程中不控制 pH 值。



(a) 实验组 (红色框内为改良部分); (b) 对照组

图 1 实验组和对照组工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagrams of experimental and control reactors

1.2 接种污泥与实验用水

接种污泥取自长沙市第二污水处理厂二沉池活性污泥, 接种后反应器中污泥浓度 3 000 mg·L⁻¹ 左右。

实验用水采用人工配水, 进水水质指标见表 1。碳源用无水乙酸钠, 氨氮采用氯化铵, 溶解性正磷酸盐 (SOP) 采用磷酸二氢钾和磷酸氢二钾混合使用。微量元素组分及浓度详见文献 [19]。

表 1 进水水质情况

Table 1 Influent quality

COD/mg·L ⁻¹	SOP/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	CaCl ₂ /mg·L ⁻¹	MgSO ₄ /mg·L ⁻¹	微量元素/mg·L ⁻¹
200	10	35	5	10	0.5

1.3 分析方法

溶解性正磷酸盐 (SOP): 钼锑抗分光光度法; 氨氮 (NH₄⁺-N): 纳氏试剂分光光度法; 亚硝酸盐氮 (NO₂⁻-N): N-(1-萘基)-乙二胺光度法; 硝酸盐氮 (NO₃⁻-N): 紫外分光光度法; 总氮 (TN): 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; 混合液悬浮固体 (MLSS)、混合液挥发性悬浮固体 (MLVSS): 重量法; 总磷 (TP): 同 SOP; 以上指标的测定方法详见文献

[20]。聚羟基烷酸 (PHA): 气相色谱法^[19]; 糖原 (Glycogen): 硫酸-苯酚法^[21]。

2 结果与讨论

2.1 长期运行中脱氮除磷效果

实验组和对照组反应器经过 130 d 长期运行后, 脱氮除磷效果已基本稳定, 如图 2 所示。TN、TP 的平均去除率见表 2。从中可知, 同一进水条件下,

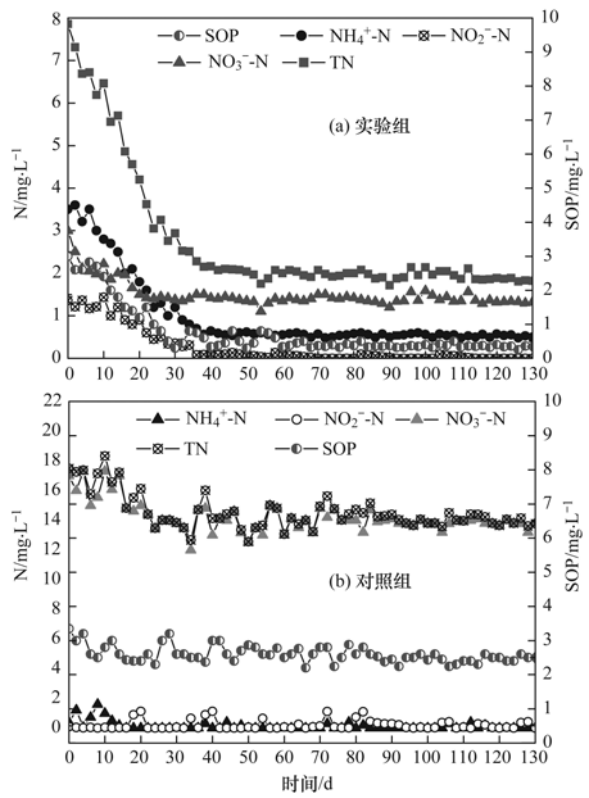


图2 长期驯化过程中实验组和对照组出水中氮磷的浓度

Fig. 2 Phosphorus and nitrogen concentrations in experimental and control reactors during long-term operation

表2 实验组和对照组出水 N、P 的去除情况

Table 2 Effluent N, P removal in experimental and control reactors

项目	进水水质 /mg·L ⁻¹	实验组			对照组		
		出水水质 /mg·L ⁻¹	去除率 /%	单位 COD 氮磷去除量 /g·g ⁻¹	出水水质 /mg·L ⁻¹	去除率 /%	单位 COD 氮磷去除量 /g·g ⁻¹
COD	200	0	100		0	100	
TN	35	1.82	94.8	0.17	13.70	60.9	0.11
TP	10	0.35	96.5	0.048	2.50	75	0.038

段无法发生吸磷现象. 之后上清液回流至主流 SBR,利用反硝化除磷菌^[22]同步去除氮磷. 实验组最终出水 SOP 浓度为 0.35 mg·L⁻¹,可见增加的微曝气阶段,并没有增加有机碳源的过度消耗,反而可以达到很好的效果. 从图 3(a)可知,吸磷作用主要发生在第一段缺氧段,吸磷量达到 49.40 mg·L⁻¹. 随后,SOP 的浓度继续降低,但是吸磷速率下降,这是因为聚磷菌胞内碳源被大量消耗所致(胞内 PHA 在第一个缺氧段消耗量占整个消耗量的 71.8%). 对照组反应器厌氧段结束后 SOP 浓度为 62.00 mg·L⁻¹,与实验组相近,可能的原因是系统中聚磷菌的活性较高,厌氧条件下正常释磷,同时吸收溶液中的有机碳源用于后续的吸磷作用,这也与对照组除磷效果比脱氮好的现象一致. 从图 3(c)可知,第一个好氧段, SOP 的去除量最大,达到 37.70

采用不同的工艺时,脱氮除磷效果存在很大的不同. 对照组出水 SOP 平均值为 2.50 mg·L⁻¹,去除率为 75%;出水中 TN 的平均浓度为 13.70 mg·L⁻¹,去除率为 60.9%. 实验组出水 SOP 平均浓度为 0.35 mg·L⁻¹,去除率为 96.5%;出水中 TN 的平均浓度为 1.82 mg·L⁻¹,去除率为 94.8%. 在低碳源条件下,改良型 A₂NSBR 可以显著提高脱氮除磷效率,氮磷的去除满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准.

2.2 典型周期内 SOP、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、糖原和 PHA 的变化

运行稳定阶段,实验组和对照组反应器典型周期内 SOP、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、糖原和 PHA [聚 β 羟基丁酸(PHB)、聚 β 羟基戊酸(PHV)和聚二甲基三羟基戊酸(PH2MV)的总和]如图 3 和图 4 所示.

2.2.1 典型周期内 SOP 的变化

实验组和对照组 SOP 的变化情况见图 3. 厌氧阶段,两组反应器的变化比较一致,发生快速的释磷现象,90 min 后释磷量达到最大值. 厌氧阶段,COD 的去除率为 100%,进入侧流 SBR 的上清液中不含有机碳源,聚磷菌等异养菌无法生长,从而在侧流阶

mg·L⁻¹,吸磷速率(即每克 VSS 每小时的吸磷量)也最快,为 15.70 mg·(g·h)⁻¹. 之后吸磷速率明显降低,两个缺氧段的吸磷速率分别为 3.60 mg·(g·h)⁻¹和 1.60 mg·(g·h)⁻¹.

2.2.2 典型周期内NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N的变化

从图 3 可知,实验组厌氧阶段氨氮浓度出现轻微下降,是微生物生长吸收了一定量的氨氮的原因^[23-25]. 氨氮的转化主要发生在侧流反应器,由于缺乏有机碳源,异养细菌无法正常生存而从系统中分离出去,系统主要菌群为氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻). 经过 120 min 的曝气,出水中氮只有 NO₂⁻-N (0.23 mg·L⁻¹)、NO₃⁻-N (21.90 mg·L⁻¹). 侧流出水进入主流 SBR,进行进一步的反硝化脱氮. 90 min 缺氧段,NO₃⁻-N的浓度从 17.40

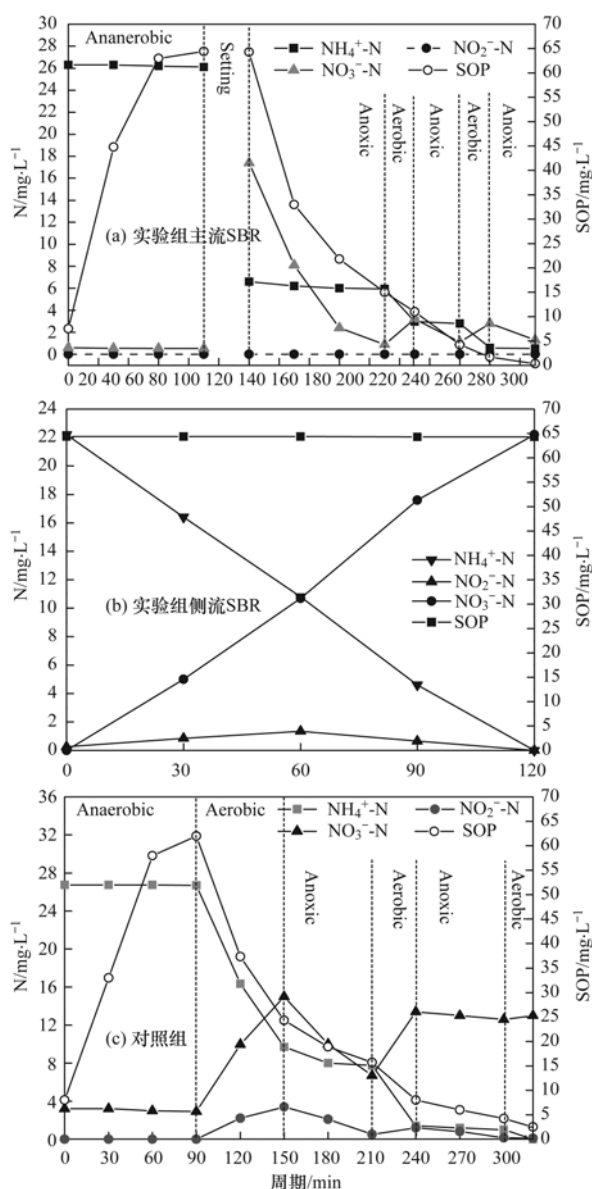


图3 实验组和对照组典型周期内 N、P 的变化

Fig. 3 Variations of N and P in a typical cycle of experimental and control reactors

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $0.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度一直处于 0 左右, 反硝化速率 (即每克 VSS 每小时的脱氮量) 为 $6.33 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 这一阶段反硝化细菌胞内的储能物质比较充足, 反硝化作用发生迅速, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不积累就快速转化为 N_2 . $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度下降 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可能的原因是回流的上清液中残留的溶解氧存在. 20 min 的微曝气阶段, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度降低 $3.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度升高至 $3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的生成量小于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的减少量, 说明此阶段存在轻微的反硝化作用; 之后缺氧段和好氧段, 进一步发生反硝化和氨氮的转化. 最后的 30

min 缺氧段, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度只出现轻微地降低, 反硝化速率为 $1.66 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 说明此时提供反硝化除磷的能量和还原力比较少. 这一过程中, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度一直接近零左右, 说明生成的亚硝氮一部分直接转化成硝态氮, 另一部分作为电子受体参与反硝化除磷菌的代谢.

相同的进水条件下, 对照组厌氧段存在 $3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^- - \text{N}$, 这是由上一周期残留所致. 第一个好氧段, 氨氮发生快速硝化, 转化量略大于硝氮和亚硝氮的生成量, 说明存在轻微的反硝化作用, 这与 Kim 等^[26] 的研究结果相一致. 60min 的缺氧段, 反硝化作用显著, 反硝化速率为 $5.00 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 但是弱于实验组第一缺氧段. 最后的 60 min 缺氧段和 20 min 好氧段, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度并未明显地减少, 说明这一阶段反硝化作用很弱, 可能的原因是系统内反硝化细菌的比例和活性比较低, 致使反硝化过程比较缓慢, 或者系统的储能物质大部分用于除磷和细菌的消耗, 而用于反硝化脱氮的碳源和能量不足, 无法维持正常的反硝化作用.

2.2.3 典型周期内糖原和 PHA 的变化

实验组主流 SBR 中糖原和 PHA 的变化如图 4 (a) 所示. 从中可知, PHA 的主要成分为 PHB, 同时存在少量的 PHV 和 PH2MV. 有报道提出, 当乙酸作为碳源时, PHA 的成分只有 PHB 和少量 PHV, 不含 PH2MV^[27]. 可能的原因是实验反应器中, 聚磷菌能通过丙烯酸途径 (丙酮酸 → 乳酸 → 丙烯酸 → 丙酸) 或者琥珀酸-丙酸途径 (丙酮酸 + CO_2 → 草酰乙酸 → 苹果酸 → 延胡索酸 → 琥珀酸 → 琥珀酰辅酶 A → 甲基丙二酰辅酶 A → 丙酰辅酶 A + CO_2) 生产丙酰辅酶 A, 与通过三羧酸循环 (TCA) 生成的乙酰辅酶 A 结合形式 PHV^[28]. 而 PH2MV 的生成可能有丙酰辅酶 A 的结合作用, 但由于丙酰辅酶 A 的合成量少, 所以 PH2MV 的浓度很低. 在厌氧阶段, 聚磷菌分解体内的聚磷和糖原产生能量, 摄入乙酸, 并以 PHA 等有机颗粒的形式储存于细胞内^[29]. 这一阶段 PHA 的浓度 (以 C 计) 从 $1.90 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $9.80 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 糖原的浓度 (以 C 计) 从 $4.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 减少到 $2.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 之后的缺氧及好氧阶段, PHA 被用于细胞的生长、聚磷的合成以及糖原的重新形成^[30]. 这一过程所需的能量是以 ATP 的形式进行的, 而 ATP 的形成过程涉及氧化磷酸化, 需要氧气、硝酸盐、亚硝酸盐等作为最终的电子受体^[24, 31]. 这一阶段胞内 PHA 的含量不断消耗, 而糖原的含量先以较快的速率升高, 230 min 后速率变慢,

最终浓度为 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 从 PHA 转化糖原的化学计量数可知^[32], 糖原/HAc 为 0.44, $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD 可以产生 $2.70 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的糖原, 而实际的生成量为 $2.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 比理论值小, 说明部分 HAc 并未最终转化成糖原储存于细胞内, 或者胞内的糖原又发生部分分解, 产生能量和还原当量, 用于反硝化吸磷过程. 对照组糖原和 PHA 的变化如图 4(b) 所示, 虽然工艺不同, 但糖原和 PHA 的变化趋势还是相似的, 说明改良后的工艺并未改变微生物代谢途径, 而是更高效地利用碳源实现氮磷的去除.

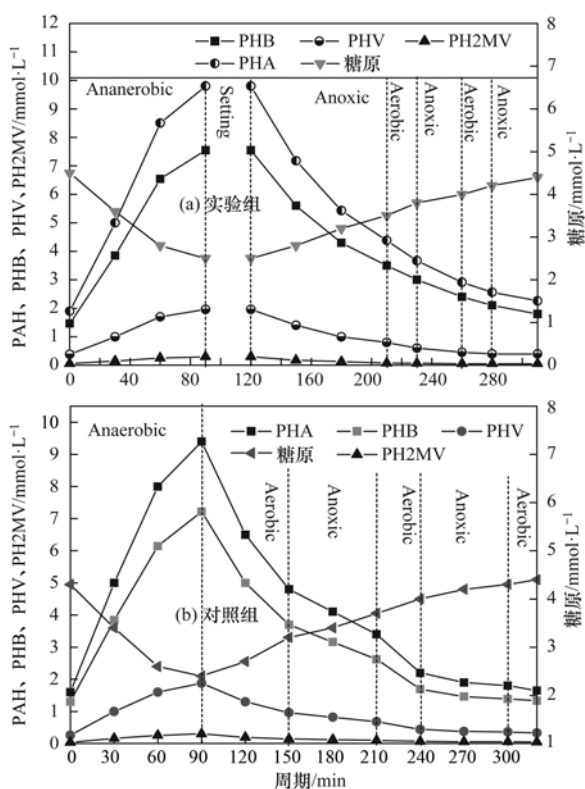


图4 实验组和对照组典型周期内 PHA、糖原的变化

Fig. 4 Variations of PHA and glycogen in a typical cycle of experimental and control reactors

2.3 改良双污泥系统脱氮除磷效果分析

传统的双污泥脱氮除磷系统, 由于工艺操作复杂, 并且出水中会残留氨氮, 从而限制了它的实际应用. 但是随着计算机自动化控制的发展, 可以很好地解决操作复杂的问题. 因而只要解决氨氮的残留问题, 这一工艺还是有很大的应用前景.

本研究采用的在缺氧段增加两段微曝气的技术, 实验证明, 可以很好地解决氨氮残留的问题. 有研究认为, O_2 会影响反硝化细菌的活性^[25], 但是该实验长期运行效果稳定, 可能的原因是采用了微曝气 ($0.50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), 水中的溶解氧浓度较低, 并且很快地被 AOB 利用. 改良型工艺能够很好地脱氮除

磷, 很大的可能是胞内的糖原、PHA 等聚合物得到了充分利用, 产生了较多的能量. 从表 2 可知, 改良型工艺单位碳源的氮、磷去除量分别为 $0.17 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.048 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 明显高于多级 SBR (分别为 $0.11 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.038 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$). 李昂等^[16]利用分点进水技术手段对双污泥系统进行改良, 进水 COD 为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的氮、磷去除量分别为 $51.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $4.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而本实验中氮、磷的去除量分别为 $33.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $9.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷的去除效果较好, 而由于进水 TN 较低, 氮的去除效果无法具体比较. 刘婧^[33]采用在缺氧段末增加曝气的方法, 最终出水水质中 TN 的浓度可以达到 GB 18918-2002 一级 A 标准, 但出水 SOP 的浓度较高, 只能达到一级 B 标准. 可见, 采用本实验的改进工艺, 氮磷的去除效果都比较好, 尤其是磷, 去除效果比相关文献中的好很多. 可能的原因是两阶段微曝气减少了氧气对系统的不利冲击, 对缺氧段微生物生存环境影响较小, 因而保留了较好的反硝化除磷效果.

而采用的传统多级 SBR 工艺, 出水 TN 的浓度为 $13.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明反硝化细菌的数量或者活性不够, 不能发生很好地反硝化除磷, 主要原因可能是同一反应器中曝气影响了反硝化细菌的生长, 而使好氧除磷菌生长占据优势. 残留的硝氮进入下一周期, 会影响缺氧段磷的释放及对碳源的有效吸收^[34], 减少后续脱氮除磷所需的储能物质. 另一方面, 微生物吸收的碳源大部分单纯用于好氧吸磷, 很少一部分可以“一碳两用”, 降低了碳源的有效利用率. 同时相对较大的曝气量会消耗聚磷菌的储能物质, 造成能量的浪费.

3 结论

(1) 实验组通过工艺改良, 在主流 SBR 缺氧段增加两段微曝气 ($0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), 达到了很好的脱氮除磷效果, 并在长期运行过程中维持稳定的去除效果.

(2) 低碳源条件下, 实验组出水水质效果好, 其中 SOP 的浓度为 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 浓度为 $1.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 完全满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918-2002 一级 A 标准. 而对照组脱氮除磷效果较差, 出水中 SOP 的浓度为 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 浓度为 $13.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统的反硝化作用很差.

(3) 改良后的工艺用于低碳源废水处理时, 可以很好地去除水中的氮磷, 因而可以有效解决城市

生活污水中碳源浓度低的问题, 节约因补充碳源等所增加的运营成本。

参考文献:

- [1] 苗志加. 强化生物除磷系统聚磷菌的富集与反硝化除磷特性[D]. 北京: 北京工业大学, 2013. 13-16.
- [2] 王亚宜, 彭永臻, 殷芳芳, 等. 双污泥 SBR 工艺反硝化除磷脱氮特性及影响因素[J]. 环境科学, 2008, **29**(6): 1526-1532.
- [3] Wang Y Y, Peng Y Z, Li T W, *et al.* Phosphorus removal under anoxic conditions in a continuous-flow A_2N two-sludge process[J]. Water Science and Technology, 2004, **50**(6): 37-44.
- [4] Wu C Y, Chen Z Q, Liu X H, *et al.* Nitrification-denitrification via nitrite in SBR using real-time control strategy when treating domestic wastewater[J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, **36**(2): 87-92.
- [5] Zeng W, Wang X D, Li B X, *et al.* Nitritation and denitrifying phosphorus removal via nitrite pathway from domestic wastewater in a continuous MUCT process[J]. Bioresource Technology, 2013, **143**: 187-195.
- [6] 鲁磊, 信欣, 鲁航, 等. 连续流好氧颗粒污泥系统处理低 COD/N 实际生活污水的工艺优化[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3778-3785.
- [7] Nyberg U, Andersson B, Aspegren H. Long-term experiences with external carbon sources for nitrogen removal[J]. Water Science and Technology, 1996, **33**(12): 109-116.
- [8] Zubrowska-Sudol M, Walczak J. Enhancing combined biological nitrogen and phosphorus removal from wastewater by applying mechanically disintegrated excess sludge[J]. Water Research, 2015, **76**: 10-18.
- [9] Lemos P C, Serafim L S, Reis M A M. Synthesis of polyhydroxyalkanoates from different short-chain fatty acids by mixed cultures submitted to aerobic dynamic feeding[J]. Journal of Biotechnology, 2006, **122**(2): 226-238.
- [10] Tong J, Chen Y G. Enhanced biological phosphorus removal driven by short-chain fatty acids produced from waste activated sludge alkaline fermentation[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(20): 7126-7130.
- [11] Jiang Y M, Chen Y G, Zheng X. Efficient polyhydroxyalkanoates production from a waste-activated sludge alkaline fermentation liquid by activated sludge submitted to the aerobic feeding and discharge process[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(20): 7734-7741.
- [12] Zhang C, Chen Y G. Simultaneous nitrogen and phosphorus recovery from sludge-fermentation liquid mixture and application of the fermentation liquid to enhance municipal wastewater biological nutrient removal[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(16): 6164-6170.
- [13] 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 & Technology, 2010, **44**(23): 8957-8963.
- [14] 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 等. 污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1000-1005.
- [15] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system[J]. Water Research, 1996, **30**(7): 1702-1710.
- [16] 李昂, 李燕, 徐玉洁. 改良型双污泥系统处理低碳源城市废水性能研究[J]. 环境科技, 2013, **26**(5): 46-51.
- [17] 张杰, 刘婧, 李相昆, 等. 新型双污泥反硝化除磷工艺的初步研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2008, **25**(1): 1-5.
- [18] Li C, Liang S, Zhang J, *et al.* N_2O reduction during municipal wastewater treatment using a two-sludge SBR system acclimatized with propionate[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **222**: 353-360.
- [19] Wang D B, Li X M, Yang Q, *et al.* Biological phosphorus removal in sequencing batch reactor with single-stage oxic process[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(13): 5466-5473.
- [20] 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.
- [21] Wang D B, Li X M, Yang Q, *et al.* The probable metabolic relation between phosphate uptake and energy storages formations under single-stage oxic condition[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(17): 4005-4011.
- [22] Zhou S Q, Zhang X J, Feng L Y. Effect of different types of electron acceptors on the anoxic phosphorus uptake activity of denitrifying phosphorus removing bacteria[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(6): 1603-1610.
- [23] Pijuan M, Ye L, Yuan Z G. Free nitrous acid inhibition on the aerobic metabolism of poly-phosphate accumulating organisms[J]. Water Research, 2010, **44**(20): 6063-6072.
- [24] Smolders G J, Van der Meij J, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1994, **44**(7): 837-848.
- [25] Oehmen A, Zeng R J, Saunders A M, *et al.* Anaerobic and aerobic metabolism of glycogen-accumulating organisms selected with propionate as the sole carbon source[J]. Microbiology, 2006, **152**(Pt 9): 2767-2778.
- [26] Kim J K, Park K J, Cho K S, *et al.* Aerobic nitrification-denitrification by heterotrophic *Bacillus* strains[J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(17): 1897-1906.
- [27] Filipe C D M, Daigger G T, Grady Jr C P L. Stoichiometry and kinetics of acetate uptake under anaerobic conditions by an enriched culture of phosphorus-accumulating organisms at different pHs[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2001, **76**(1): 32-43.
- [28] Kortstee G J, Appeldoorn K J, Bonting C F, *et al.* Recent developments in the biochemistry and ecology of enhanced biological phosphorus removal[J]. Biochemistry (Moscow), 2000, **65**(3): 332-340.
- [29] Wang X X, Wang S Y, Xue T L, *et al.* Treating low carbon/nitrogen (C/N) wastewater in simultaneous nitrification-

- endogenous denitrification and phosphorous removal (SNDPR) systems by strengthening anaerobic intracellular carbon storage [J]. *Water Research*, 2010, **77**: 191-200.
- [30] Wentzel M C, Ekama G A, Loewenthal R E, *et al.* Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge systems. Part II: Experimental behaviour[J]. *Water SA*, 1989, **15**(2): 71-88.
- [31] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, *et al.* A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors[J]. *Water Research*, 2003, **37**(14): 3463-3471.
- [32] Pereira H, Lemos P C, Reis M A M, *et al.* Model for carbon metabolism in biological phosphorus removal processes based on *in vivo* ^{13}C -NMR labelling experiments [J]. *Water Research*, 1996, **30**(9): 2128-2138.
- [33] 刘婧. 改良型双污泥系统反硝化除磷工艺的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [34] Chen Y Z, Li B K, Ye L, *et al.* The combined effects of COD/N ratio and nitrate recycling ratio on nitrogen and phosphorus removal in anaerobic/anoxic/aerobic (A^2/O)-biological aerated filter (BAF) systems [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, **93**: 235-242.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2015年10月21日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2014年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2014年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分76.00,排名第一,总被引频次7733,影响因子1.294.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2014年度《环境科学》综合评价总分76.00,在被统计的33种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 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	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