

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

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

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢

王晓玲^{1,2}, 员东丹^{1,2}, 白莉^{1,2*}, 李紫棋², 余勇², 秦旭东², 张晓旭², 赵可¹

(1. 吉林建筑大学松辽流域水环境教育部重点实验室, 长春 130118; 2. 吉林建筑大学市政与环境工程学院, 长春 130118)

摘要: 根据试验结果和物料平衡分析, 揭示了连续流单污泥污水处理系统在不同主要缺氧段硝酸盐氮质量浓度 $[c(\text{NO}_3)]$ 条件下运行时的 PHA、TP 代谢规律, 从反应机制方面评价以 $c(\text{NO}_3)$ 作为连续流单污泥污水处理系统运行控制参数的有效性. 采用 PLC 自动控制系统, 以硝化液内循环流量作为被控变量, 基于反馈控制结构, 在 $c(\text{NO}_3)$ 设定值分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 以及 4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下进行试验研究, 进水水质及其他运行设计参数保持不变. 结果表明, 当 $c(\text{NO}_3)$ 设定值为 2.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 厌氧段和预缺氧段 PHA 合成并贮存量、主要缺氧段 PHA 降解量、厌氧段和预缺氧段磷释放量、系统总吸磷量以及主要缺氧段磷吸收量等均达到最大值, 分别为 35.32、1.71、20.44、6.16、0.32、8.04、3.67 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$. 这从 PHA 和 TP 代谢机制角度进一步证实了 $c(\text{NO}_3)$ 可作为连续流单污泥污水处理系统的运行控制参数, 其最佳设定值为 2.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

关键词: 连续流; 主要缺氧段硝酸盐质量浓度; PHA; 磷; 物料平衡

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3906-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.10.032

Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow

WANG Xiao-ling^{1,2}, YUAN Dong-dan^{1,2}, BAI Li^{1,2*}, LI Zi-qi², YU Yong², QIN Xu-dong², ZHANG Xiao-xu², ZHAO Ke¹

(1. Key Laboratory of Songliao Aquatic Environment, Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: Based on test results and mass balance, PHA, TP metabolic regularity was revealed under different nitrate nitrogen concentrations in main anoxic stage $[c(\text{NO}_3)]$ for nitrogen and phosphorus removal in single sludge system with continuous flow, then the effectiveness of using $c(\text{NO}_3)$ as control parameter was proved from the perspective of the reaction mechanism. During experiment period, the influent COD, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) concentrations were stabilized at (285.78 ± 18.19) , (58.13 ± 3.79) , and $(7.14 \pm 0.51) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The experiment was carried out under the condition that the $c(\text{NO}_3)$ values were 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 and 4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ based on the feedback control structure using PLC automatic control system to control the nitrifying liquid flow with the water quality. The sludge load of COD was $(0.253 \pm 0.071) \text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, the sludge load of TP in anaerobic stage was $(0.006 \pm 0.001) \text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, the sludge load of TN in aerobic stage was $(0.049 \pm 0.006) \text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, the hydraulic retention time (HRT) in bioreactor was 9h, the sludge recycle flow was 0.5, and the mixed liquor recycle was 1.0. The results showed that effect of $c(\text{NO}_3)$ value on PHA synthesis and storage rate in the ANS was conspicuous, and the percentage of PHA storage occupied 74% of COD removal when $c(\text{NO}_3)$ value was 2.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The impact of $c(\text{NO}_3)$ value on PHA degraded in the main anoxic stage was great, and the percentage of PHA degradation in the main anoxic stage occupied 55% of total PHA degradation when $c(\text{NO}_3)$ value was 2.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The phosphorus released in anaerobic stage changed along with increasing $c(\text{NO}_3)$, and the amount of phosphorus released obtained the maximum value 6.16 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ when $c(\text{NO}_3)$ value was 2.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. In addition, under $c(\text{NO}_3)$ value of 2.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the amount of total phosphorus uptake and anoxic phosphorus uptake obtained the maximum values of 8.04 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ and 3.67 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. Then it was confirmed that $c(\text{NO}_3)$ could serve as a run controlling parameter with the best value of 2.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ from the perspective of PHA and TP metabolic mechanism.

Key words: continuous flow; nitrate nitrogen in main anoxic stage; PHA; phosphorus; mass balance

随着人们生活水平的提高, 城市污水排放量越来越大, 污水水质也发生了改变, 有机污染物质含量逐渐减少, 氮磷等物质含量逐渐升高, 即目前的城市污水碳氮比和碳磷比逐渐降低^[1,2]. 众所周知, 污水生物脱氮除磷过程很复杂, 涉及释磷、吸磷、硝化、

收稿日期: 2016-03-03; 修订日期: 2016-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308253)

作者简介: 王晓玲(1977~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水同步脱氮除磷技术及污水处理过程控制系统, E-mail: smile_gyb@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: baili0308@163.com

反硝化等多个生化反应过程。上述各过程分别由聚磷菌、硝化菌、反硝化菌完成,但各菌种的生长环境差别较大,导致在连续流单污泥污水处理系统中,脱氮和除磷过程存在矛盾关系^[3,4]。大量的研究和实际运行结果表明,污水处理系统活性污泥中反硝化聚磷菌的存在及其代谢过程的发生,可在一定程度上缓解上述矛盾关系,这往往成为保证连续流单污泥污水处理系统脱氮除磷效果的关键^[5~12]。

反硝化聚磷菌的电子受体是硝酸盐氮,代谢特征与普通聚磷菌基本相同^[13~15]。但已有研究和实际运行结果也表明,在连续流单污泥污水处理系统中,反硝化吸磷性能及其对系统脱氮除磷的贡献并不稳定,因此即使存在反硝化聚磷菌也不能保证低碳氮比污水处理厂氮磷达标率,分析其主要原因可能为:进水水质、水量波动较大而污水厂的运行参数不能立即响应和生化处理过程未处于最佳运行状态等^[16]。在污水处理厂中构建反硝化吸磷过程控制系统,开发控制参数及最佳控制策略,则可在一定程度上解决该问题。在前期研究工作中,笔者针对主要缺氧段硝酸盐氮质量浓度作为连续流单污泥污水处理系统控制参数的可行性进行了研究,并已确定调控该质量浓度可改变系统出水 TP、TN 质量浓度,以其为控制变量建立过程控制系统可促进并稳定维持系统的反硝化吸磷性能^[17]。基于物料平衡分析,本研究探讨并揭示连续流单污泥污水处理系统在不同主要缺氧段硝酸盐氮质量浓度条件下运行时的 PHA、TP 代谢规律,旨在评价 $c(\text{NO}_3^-)$ 作为连续流单污泥污水处理系统的运行控制参数的有效性。

1 材料与方法

1.1 污水水质特性

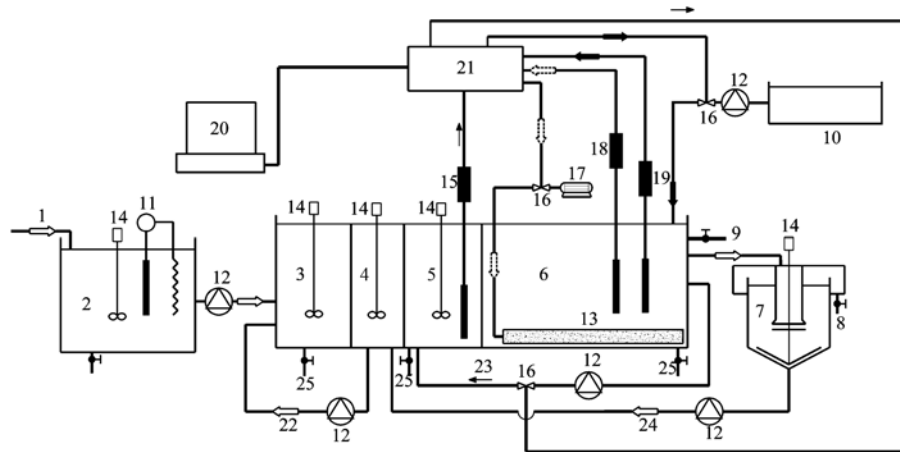
连续流单污泥污水处理系统待处理污水为人工配制的模拟污水。该污水污染物质组分及其指标质量浓度参考城市污水处理厂(生活污水体积百分比占 50% 以上)一级处理系统出水水质^[1,2,18~21]确定:碳源为全脂奶粉(约占污水总 COD 的 30%),投加质量浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,另一碳源为啤酒污水(约占污水总 COD 的 70%),投加含量为 $0.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$;氮源为氯化铵,投加质量浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;磷源为磷酸二氢钾,投加质量浓度为 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。碱度由碳酸氢钠提供,投加量根据好氧段 pH 值自动调控;为满足微生物的磷代谢需求,分别投加氯化钙 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和硫酸镁 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;为促进活性污泥生长

繁殖,投加微量营养元素液 $0.6 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$,该元素液中包括:氯化铁 $0.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、硼酸 $0.15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、七水氯化钴 $0.15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、五水硫酸铜 $0.03 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、碘化钾 $0.18 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、四水氯化钴 $0.06 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、二水钼酸钠 $0.06 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、七水硫酸锌 $0.12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。配制后废水水质特性如下:污水 COD 质量浓度为 $(285.78 \pm 18.19) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,污水总氮质量浓度为 $(58.13 \pm 3.79) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,污水总磷质量浓度为 $(7.14 \pm 0.51) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进水 COD/TN 值为 4.981 ± 0.552 ,进水 COD/TP 为 40.036 ± 5.431 。

1.2 连续流单污泥污水处理系统及其主要运行参数

连续流单污泥污水处理试验系统见图 1。处理水量为 $240 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$,污水每日配制 1 次,贮存于 280 L 污水箱内,该箱尺寸 $L \times B \times H = 80 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 。生化池 COD 污泥负荷为 $(0.253 \pm 0.071) \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,污泥质量浓度 MLSS(好氧段)为 $(3.54 \pm 0.825) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,厌氧段污泥 TP 负荷为 $(0.006 \pm 0.001) \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,好氧段污泥 TN 负荷为 $(0.049 \pm 0.006) \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,反应池总水力停留时间为 9 h,污泥回流比 0.5,混合液内循环(预缺氧段混合液循环至厌氧段)比为 1。经计算,反应器有效容积为 90 L, $L \times B \times H = 150 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$,反应器超高 5 cm。反应器由厌氧段、预缺氧段、主缺氧段以及好氧段等组成,各段水力停留时间比为 2:1:2:5,因此各段容积及尺寸分别为:厌氧段(anaerobic stage, ANS)有效容积为 18 L, $L \times B \times H = 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$;预缺氧段(pre-anoxic stage, PAnS)有效容积为 9 L, $L \times B \times H = 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$;主缺氧段(main anoxic stage, MAnS)有效容积为 18 L, $L \times B \times H = 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$;好氧段(aerobic stage, AS)有效容积为 45 L, $L \times B \times H = 75 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 。反应器设计为双廊道,每廊道内用隔板分为 5 个格室,共 10 个格室。

污水箱、厌氧段、预缺氧段、主缺氧段中均装有搅拌器,以保证污水或混合液混合均匀。好氧段中安装空气扩散器,既提供溶解氧,又保证活性污泥处于悬浮状态。好氧段 DO 质量浓度控制为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,pH 值控制为 7.0 左右。污泥龄控制为 12 d,采用水力学方法控制,从反应器内连续排泥 $7.50 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[22]。借助安装于污水箱中的温度自动调节装置将污水温度控制为 $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。反应器混合液流入澄清器进行固液分离。该澄清器表面负荷 $0.5 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,其中设有旋转速度为 $0.083 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的刮泥板。



1. 模拟城市污水; 2. 污水箱; 3. 厌氧段; 4. 预缺氧段; 5. 主缺氧段; 6. 好氧段; 7. 澄清器; 8. 出水; 9. 剩余污泥; 10. NaHCO_3 溶液贮箱; 11. 温度自动调节装置; 12. 蠕动泵; 13. 空气扩散器; 14. 电动磁力搅拌器; 15. 硝酸盐在线测定仪; 16. 电动调节阀; 17. 空气压缩机; 18. DO 在线测定仪; 19. pH 在线测定仪; 20. 计算机; 21. 可编程逻辑控制器; 22. 混合液内循环; 23. 硝化液内循环; 24. 污泥回流; 25. 放空管

图1 试验系统流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

1.3 试验方案

为揭示连续流单污泥污水处理系统在不同的 $c(\text{NO}_3^-)$ 条件下运行时 PHA 和磷的代谢规律, 分别在不同的 $c(\text{NO}_3^-)$ 设定值条件下进行试验研究. 试验期间, $c(\text{NO}_3^-)$ 采用自动控制系统调控. 该控制系统采用反馈控制结构, 控制参数为 $c(\text{NO}_3^-)$, 现场检测器为安装于主缺氧段末格室的硝酸盐在线测定仪; 测定值输入、转换及其与设定值的比例、积分、微分计算、数值输出等由安装于计算机内的可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 完成; 硝化液内循环流量 (硝化液由好氧段循环至主缺氧段) 为被控变量, 其值由电动阀调节. 本套自动控制系统还包括好氧段 DO、pH 值的调控过程, 现场检测器分别为安装于好氧段的 DO 和 pH 值在线测定仪, 执行器分别为供气量和碳酸氢钠投加量电动调节阀. 试验共进行 300 d 左右, 分为 8 个阶段, 每阶段 $c(\text{NO}_3^-)$ 设定值分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 以及 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其他运行参数保持不变. 每阶段运行 2 ~ 3 个污泥龄 (solid retention time, SRT).

1.4 检测指标与检测方法

试验过程中, 检测的污水指标包括 COD、TP、TN、 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 等, 水样离心后, 采用国家规定的标准方法检测. 因水样经离心机离心后测定, 所以将好氧段出水作为系统出水.

检测的污泥指标为 MLSS、PHA 质量浓度. MLSS 采用国家规定的标准方法测定, PHA 采用改

良的气相色谱法^[23]测定.

采用稳定运行期间的 20 ~ 30 个试验数据进行统计学分析, 试验结果表示为平均值 $\pm$ 误差棒. 统计分析时, 置信区间为 68.3%, 所以误差棒长度为:

$$\text{误差棒} = 1.03 \times \frac{\delta}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

式中, δ 为标准方差, n 为分析用试验数据个数.

为揭示 $c(\text{NO}_3^-)$ 作为运行控制参数时的 PHA 和磷代谢规律, 分别以 ANS、PAnS、MAnS 以及 AS 为系统边界, 基于物料平衡原理, 利用各段检测的有机物、氮、磷以及 PHA 等的质量浓度计算各段物质合成或降解量, 计算原理及公式见文献[24].

2 结果与分析

2.1 $c(\text{NO}_3^-)$ 与系统性能

试验期间, 系统各反应段 COD、氮、磷等污染指标及 PHA 质量浓度的变化规律见表 1. 从中可以看出, 改变设定值 $c(\text{NO}_3^-)$ 对 COD 和氨氮去除效果影响较小, 出水 COD 质量浓度均低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水氨氮质量浓度在 $2.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 但设定值的改变对 TP、TN 以及好氧段 PHA 质量浓度影响较大. 随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 设定值从 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TN 质量浓度由 $21.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $13.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TP 质量浓度由 $3.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 好氧段 PHA 质量浓度由 $5.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $12.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其后, 随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 的升高, 出水 TN、TP 质量浓度增加, 好氧段 PHA 质量

浓度降低。试验结果表明,当设定值为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,系统具有最佳的性能,即 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 是 $c(\text{NO}_3^-)$ 最佳设定值。

但是,从表 1 中也可以看出,系统对氮和磷的去

除效果尚不够理想,分析原因主要与进水 COD 浓度较低有关,虽然缺氧段存在的反硝化吸磷作用可在一定程度上解决该问题,但总氮和总磷的去除效果终因碳源不足而不够理想。

表 1 各反应段 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、PHA 质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Effluent COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TP, PHA concentration at different reaction stages/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

指标	反应段	$c(\text{NO}_3^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$							
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
COD	ANS	66.70 ± 4.11	72.32 ± 5.43	66.47 ± 4.21	67.02 ± 2.93	68.52 ± 5.02	70.20 ± 2.31	65.87 ± 5.37	67.46 ± 3.48
	PAnS	42.26 ± 4.14	47.40 ± 3.53	42.08 ± 2.27	43.21 ± 3.11	43.25 ± 4.79	45.93 ± 4.46	42.08 ± 4.91	42.96 ± 3.56
	MAnS	18.38 ± 2.41	21.40 ± 3.87	18.04 ± 5.94	20.48 ± 5.24	15.52 ± 4.39	20.84 ± 4.56	19.27 ± 5.19	17.65 ± 5.98
	AS	16.05 ± 4.19	17.55 ± 5.08	16.06 ± 4.43	18.55 ± 5.01	13.56 ± 4.17	19.05 ± 3.20	17.05 ± 3.47	15.55 ± 2.43
PHA	ANS	58.87 ± 1.20	64.52 ± 1.05	69.34 ± 1.08	78.01 ± 0.66	81.34 ± 1.81	78.21 ± 0.56	77.01 ± 1.52	74.26 ± 1.23
	PAnS	50.36 ± 0.75	55.50 ± 1.46	60.37 ± 0.99	70.39 ± 0.91	74.00 ± 0.78	70.59 ± 1.49	69.19 ± 0.96	66.85 ± 0.88
	MAnS	26.88 ± 1.36	24.12 ± 0.88	22.50 ± 1.87	22.87 ± 0.82	21.07 ± 1.06	19.58 ± 1.02	18.28 ± 0.89	18.09 ± 1.51
	AS	5.54 ± 1.04	6.57 ± 1.01	8.32 ± 1.59	11.38 ± 1.08	12.22 ± 0.95	11.27 ± 1.59	10.83 ± 1.15	10.58 ± 1.76
TP	ANS	24.17 ± 0.36	25.28 ± 0.57	26.09 ± 0.54	27.78 ± 0.68	27.78 ± 0.91	27.89 ± 0.94	27.89 ± 0.81	27.86 ± 0.49
	PAnS	19.96 ± 0.41	20.69 ± 0.86	21.13 ± 0.63	22.79 ± 0.48	22.87 ± 1.03	22.86 ± 0.56	22.85 ± 0.49	22.88 ± 0.71
	MAnS	11.46 ± 0.66	9.40 ± 0.64	7.53 ± 0.85	5.73 ± 0.44	4.39 ± 0.77	4.52 ± 0.71	4.48 ± 0.63	4.65 ± 0.70
	AS	3.15 ± 0.45	2.30 ± 0.52	1.29 ± 0.42	0.64 ± 0.21	0.53 ± 0.51	0.65 ± 0.44	0.69 ± 0.36	0.86 ± 0.27
TN	ANS	46.66 ± 1.37	45.96 ± 1.18	46.63 ± 1.08	47.67 ± 1.96	45.66 ± 2.64	47.65 ± 1.48	48.67 ± 1.53	45.96 ± 1.41
	PAnS	36.90 ± 1.32	36.90 ± 1.06	36.87 ± 2.51	36.91 ± 1.29	36.90 ± 1.12	36.89 ± 1.07	36.91 ± 1.89	36.90 ± 1.65
	MAnS	22.19 ± 1.07	20.52 ± 1.53	19.42 ± 1.47	17.06 ± 1.86	15.86 ± 1.27	16.23 ± 2.43	16.45 ± 2.19	16.70 ± 1.51
	AS	21.37 ± 2.03	19.54 ± 2.15	18.26 ± 2.08	14.97 ± 1.44	13.70 ± 1.08	14.21 ± 1.43	14.56 ± 2.13	14.71 ± 1.07
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	ANS	45.56 ± 0.25	45.56 ± 0.31	45.53 ± 0.75	45.57 ± 0.67	45.56 ± 0.45	45.55 ± 0.81	45.57 ± 0.58	45.56 ± 0.65
	PAnS	35.26 ± 0.32	35.6 ± 0.61	35.70 ± 0.48	36.70 ± 0.55	36.68 ± 0.93	36.67 ± 0.39	36.69 ± 0.49	36.68 ± 0.73
	MAnS	21.26 ± 0.44	19.08 ± 0.36	17.49 ± 0.55	14.63 ± 0.23	12.93 ± 0.71	12.78 ± 0.67	12.52 ± 1.07	12.27 ± 1.05
	AS	2.33 ± 0.11	2.31 ± 0.33	2.31 ± 0.62	2.31 ± 0.45	2.32 ± 0.83	2.28 ± 0.56	2.33 ± 0.62	2.29 ± 0.55
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	PAnS	0.80 ± 0.31	0.50 ± 0.27	0.10 ± 0.18	0	0	0	0	0
	AS	18.91 ± 0.51	17.07 ± 0.47	15.85 ± 0.63	12.51 ± 0.41	11.27 ± 0.25	11.77 ± 0.36	12.09 ± 0.63	12.30 ± 0.56

2.2 $c(\text{NO}_3^-)$ 与 PHA 代谢

2.2.1 $c(\text{NO}_3^-)$ 与 PHA 合成

基于物料平衡分析,按照文献[24]的公式,利用各段 COD 质量浓度测定结果,计算了 ANS、PAnS、MAnS 以及 AS 的 COD 去除率,结果见图 2。从中可以看出,约 80% 的 COD 在 ANS 和 PAnS 内去除,而 MAnS 和 AS 的去除率较低,且 $c(\text{NO}_3^-)$ 的改变对各段 COD 去除率影响较小。

以 ANS、PAnS 为系统边界,基于测定的 PHA 质量浓度平均值进行物料平衡分析,计算 ANS 和 PAnS 贮存的 PHA 量(以 COD 表示,PHA 的 COD 化学计量学常数取 $1.67 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ [25]),结果见图 3、4。其中数字表示以 PHA 形式贮存的 COD 量占该段 COD 总消耗量的质量分数。

从图 3 中可以看出,随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 从 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,PHA 的合成及贮存量从 $27.01 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 升高至 $35.32 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$,PHA 贮存率从 54% 增加至 71%,其后,随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 的升高,PHA 合成率基本维持稳定或稍有降低,即,厌氧段 PHA 合成及贮

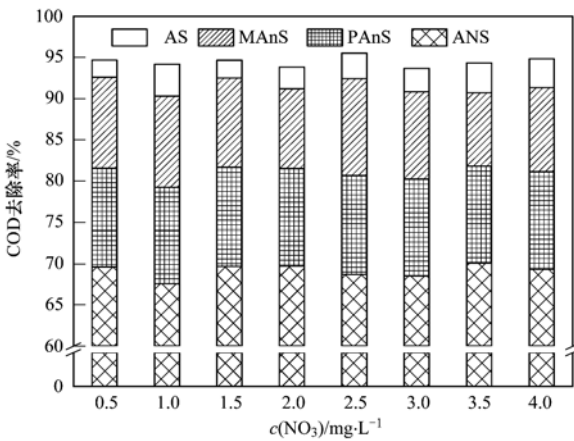


图 2 各反应段 COD 去除率

Fig. 2 Removal efficiency of COD at each stage

存率受 $c(\text{NO}_3^-)$ 影响。从图 4 中可以看出,当 $c(\text{NO}_3^-)$ 设定值为 0.5 、 1.0 以及 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,PAnS 内 PHA 贮存量为 0。其后,随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 的升高,PHA 贮存量增加,当 $c(\text{NO}_3^-)$ 设定值为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,PHA 合成与贮存量达到最高值 $1.71 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$,占该段 COD 去除量的 20%。

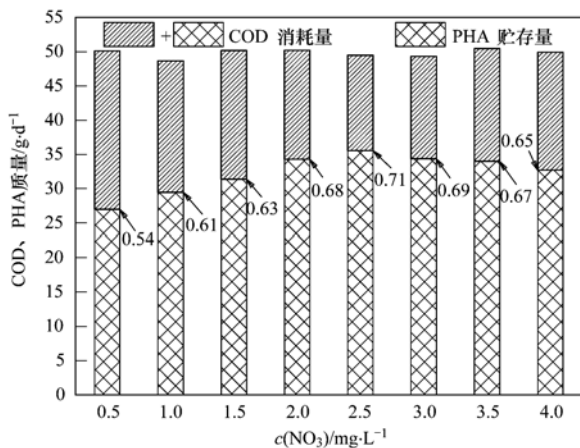


图3 试验期间 ANS 内 COD、PHA 的反应量

Fig. 3 Relation amount of COD and PHA during experiment in ANS

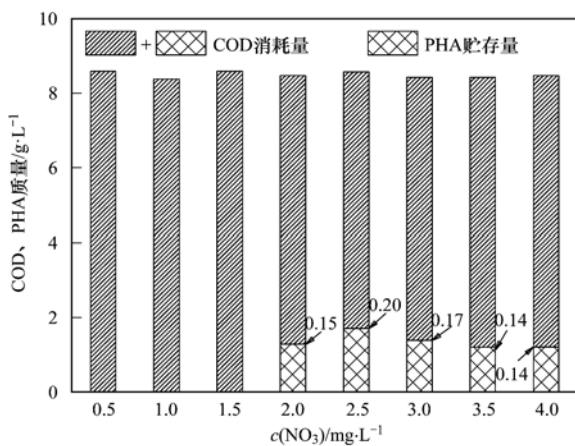


图4 试验期间 PAnS 内 COD、PHA 的反应量

Fig. 4 Relation amount of COD and PHA during experiment in PAnS

2.2.2 $c(\text{NO}_3)$ 与 PHA 降解

以 MAnS 和 AS 为系统边界,基于测定的 PHA 质量浓度,按照文献[24]的公式进行了物料平衡分析计算,结果见图 5,其中数字表示 PHA 缺氧消耗量占总消耗量的质量分数. 从中可以看出,在 MAnS 和 AS 内,PHA 被消耗,但 MAnS 消耗量占 PHA 总消耗量的百分比随着 $c(\text{NO}_3)$ 的变化而变化. 当 $c(\text{NO}_3)$ 从 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MANs 消耗量从 $4.10 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加至 $20.44 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,占 PHA 总消耗量的百分比从 15% 升高至 55%,其后,随着 $c(\text{NO}_3)$ 的升高,MANs 消耗量所占百分比稳定在 55% 左右.

2.3 $c(\text{NO}_3)$ 与 TP 代谢

2.3.1 $c(\text{NO}_3)$ 与 TP 释放

分别以 ANS、PAnS、MAnS 和 AS 为系统边界,基于各段测定的 TP 质量浓度,按照文献[24]的公

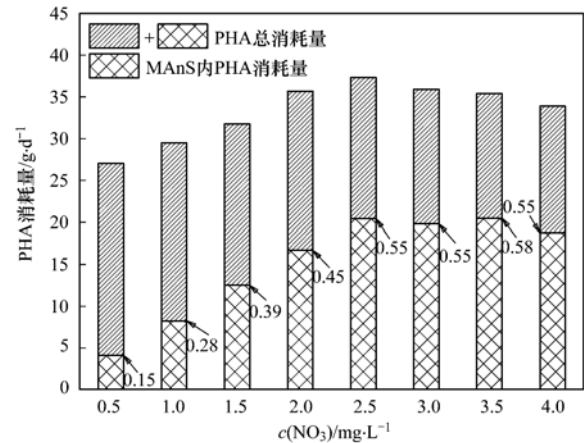
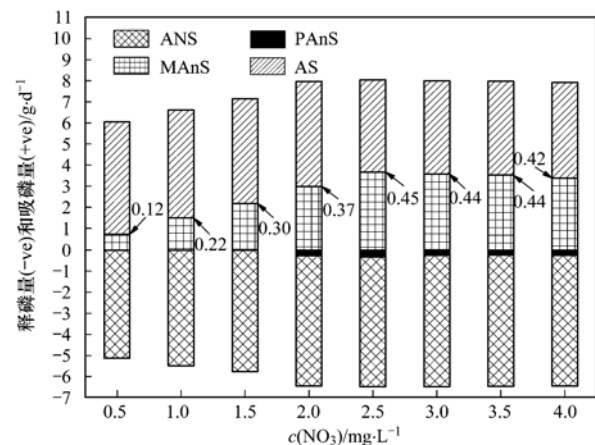


图5 试验期间 PHA 的消耗量

Fig. 5 Consumption of PHA during experiment

式进行了物料平衡分析计算,结果见图 6,其中数字表示缺氧吸磷量占总吸磷量的质量分数. 根据活性污泥微生物细胞物质的经验分子式 $\text{C}_{60}\text{H}_{87}\text{N}_{12}\text{O}_{23}\text{P}$ 计算可知,细胞物质含磷量为 2.3% [25],因此与释、吸磷量相比,同化的磷量较低,所以在物料平衡分析过程中将其忽略.



负数表示磷释放量,正数表示磷吸收量

图6 各反应段的吸磷量和释磷量

Fig. 6 Amount of P release (-) and amount of P uptake (+) at each stage

从图 6 中可以看出,试验期间随着的 $c(\text{NO}_3)$ 升高,ANS 内释磷量逐渐增加. 当 $c(\text{NO}_3)$ 从 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,ANS 内释磷量从 $5.13 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加至 $6.16 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,其后,随着 $c(\text{NO}_3)$ 的升高,ANS 释磷量基本维持不变. 从中还可以看出,当 $c(\text{NO}_3)$ 控制为 0.5、1.0 以及 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,PAnS 内无磷酸盐释放,而当 $c(\text{NO}_3)$ 控制为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,PAnS 的释磷量 $0.26 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$. 当 $c(\text{NO}_3)$ 控制为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,PAnS 的释磷量达到最大值

$0.32 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$. 其后,随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 的增加,PAoS 释磷量也基本维持稳定.

2.3.2 $c(\text{NO}_3^-)$ 与 TP 吸收

从图 6 中可以看出,试验期间,系统总吸磷量从 $c(\text{NO}_3^-)$ 为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 $6.05 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加至 $c(\text{NO}_3^-)$ 为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 $8.04 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,其后随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 的升高,总吸磷量基本维持不变.

此外,从图 6 中还可以看出,MAoS 吸磷量及其在总吸磷量中的百分含量随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 的升高而增加. 当 $c(\text{NO}_3^-)$ 从 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MAoS 吸磷量分别为 0.73 、 1.49 、 2.18 、 2.98 、 3.67 、 3.57 、 3.52 以及 $3.37 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,MAoS 吸磷百分比分别为 12% 、 22% 、 30% 、 37% 、 43% 、 44% 、 44% 以及 42% .

3 讨论

3.1 $c(\text{NO}_3^-)$ 与 PHA 的代谢

3.1.1 $c(\text{NO}_3^-)$ 与 PHA 的合成

从图 2 中可以看出,COD 降解主要发生在 ANS 和 PAoS 内,这有利于后续反硝化吸磷和硝化反应的进行,同时也减少好氧段供氧量. 厌氧段 COD 的去除主要由以下可能原因导致:生物体吸附、聚磷菌吸收并将其合成为 PHA 贮存、混合液内循环流量稀释、厌氧菌水解酸化等. 结合图 3 可知,ANS 内 COD 合成为 PHA 贮存于聚磷菌体内是 ANS 内 COD 质量浓度降低的主要原因. 但其合成贮存率受 $c(\text{NO}_3^-)$ 的影响. 因为当 $c(\text{NO}_3^-)$ 较低时,出水中硝酸盐氮质量浓度较高,随回流污泥进入 PAoS 内的硝酸盐氮量较高,甚至超过该段的反硝化潜力,导致硝酸盐氮随混合液循环流至 ANS. 有研究报道表明,连续流单污泥污水处理系统厌氧段若存在硝酸盐氮,将引发反硝化菌与聚磷菌竞争 COD 的矛盾,且在此竞争过程中反硝化菌占据优势,所以进水 COD 优先被反硝化菌吸收利用,致使聚磷菌吸收合成的 PHA 量降低. 试验期间 ANS、PAoS、MAoS 硝酸盐氮的反应量见图 7.

从图 7 中可以看出,随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 升高,ANS 内反硝化硝酸盐氮量降低. 当其 $c(\text{NO}_3^-)$ 设定值为 0.5 、 1.0 以及 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,ANS 内硝酸盐氮反应量分别为 0.19 、 0.12 以及 $0.02 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$; 当其设定值大于或等于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,ANS 内的硝酸盐氮反应量均为 0 ,说明该段内无反硝化过程发生,此时降解的 COD 大部分为聚磷菌所吸收并合成 PHA,使得 PHA 合成率达到最高并保持稳定.

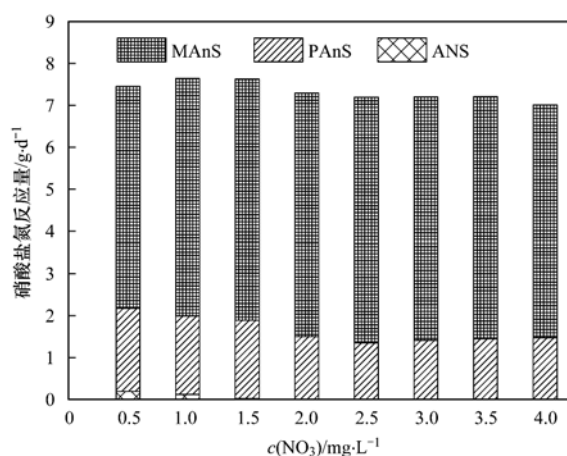


图 7 试验期间 ANS、PAoS、MAoS 硝酸盐氮的反应量

Fig. 7 Reaction amount of nitrate-N during experiment in ANS, PAoS, MAoS

连续流单污泥污水处理系统的 PAoS 内进行的反应过程可能包括:聚磷菌厌氧代谢、反硝化菌硝酸盐还原等过程,所以 PAoS 内 COD 的去除、PHA 合成率等与硝酸盐氮反应量有关. PAoS 内的硝酸盐氮来自于回流污泥,其反应量的高低与出水硝酸盐氮质量浓度直接相关,即硝酸盐氮反应量随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 的升高而降低,当 $c(\text{NO}_3^-)$ 设定值为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水硝酸盐氮质量浓度最低,PAoS 内的硝酸盐氮反应量最小,该条件下的 PHA 合成率最高.

3.1.2 $c(\text{NO}_3^-)$ 与 PHA 的降解

根据生物除磷基本原理,在好氧或缺氧条件下,聚磷菌降解贮存的 PHA,并利用此过程产生的能量完成从污水中吸收磷的过程,且 PHA 贮存量越高,其消耗量及相应的吸磷量越大,也就是说,PHA 总降解量与 PHA 贮存量相关关系密切,变化趋势也相同,即随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 的增加而增加. 当 $c(\text{NO}_3^-)$ 从 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,PHA 总消耗量分别为 27.40 、 29.51 、 31.74 、 35.68 、 37.32 、 35.92 、 35.41 以及 $33.90 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$.

大量的试验研究证明,当进水碳氮比较低时,在连续流单污泥污水活性污泥处理系统的缺氧环境中也可进行明显的吸磷反应,因此 PHA 的降解主要发生在 MAoS 和 AS 内^[5~12]. 结合图 2 可知,污水中大量 COD 在 ANS 和 PAoS 内被去除或转化,只剩余少量 COD 进入 MAoS 内. 根据物料平衡计算结果,当 $c(\text{NO}_3^-)$ 从 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MAoS 内的硝酸盐氮反应量分别为 5.28 、 5.65 、 5.74 、 5.79 、 5.85 、 5.79 、 5.75 以及 5.54 ,COD 去除量分别为: 7.94 、 7.96 、 7.79 、 6.98 、 8.47 、 7.63 、 6.39

以及 $7.34 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$. 计算可知, COD 去除量/硝酸盐氮反应量分别为: 1.50、1.41、1.36、1.21、1.45、1.32、1.11、1.33, 该值远小于 2.86, 据此可推测, 在 MAnS 内发生了反硝化吸磷反应过程, 且为优势反应过程, 即反硝化菌的主要供氢体是 PHA. 所以 MAnS 内 PHA 被大量消耗, 且其消耗量随硝酸盐氮反应量的增加而增加, 当 $c(\text{NO}_3^-)$ 从 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 该值分别为 4.10、8.23、12.49、16.70、20.44、19.83、20.47 以及 $18.77 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 占 PHA 总消耗量的百分比分别为 15、28、39、45、55、55、58 以及 55%. PHA 在 MAnS 内降解有利于节省好氧段曝气所需能耗.

3.2 $c(\text{NO}_3^-)$ 与 TP 代谢

3.2.1 $c(\text{NO}_3^-)$ 与 TP 释放

有研究报道表明, 连续流单污泥污水脱氮除磷系统中, 厌氧释磷反应及释磷量主要受回流污泥携带的硝酸盐氮的影响^[26~29]. 本系统中, 污泥回流至 PAnS 内, 回流污泥中的硝酸盐氮首先在该段内被反硝化. 若该段反硝化完全, 则无硝酸盐进入厌氧段, 反硝化菌将不与聚磷菌竞争碳源; 但进入的硝酸盐量若超过 PAnS 的反硝化潜力, 剩余的硝酸盐氮则将进入厌氧段, 影响聚磷菌的厌氧代谢过程. 结合图 7 可知, 当 $c(\text{NO}_3^-)$ 设定值大于或等于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 厌氧段内的硝酸盐氮反应量为 0, 即该段内无反硝化过程发生, 所以此时磷的释放量达到最大值并保持稳定.

根据物料平衡计算结果, 当 $c(\text{NO}_3^-)$ 较低时, 由于出水硝酸盐氮质量浓度较高, 随回流污泥进入 PAnS 内的硝酸盐氮量较大, 超过该段反硝化潜力, 该段内的 COD 全部用于反硝化过程, 而没有释磷反应的发生. 随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 升高, 出水硝酸盐氮质量浓度降低, 进入 PAnS 内的硝酸盐氮量低于该段的反硝化潜力. 因此, 当硝酸盐氮反应完成后, 剩余的 COD 将被聚磷菌吸收合成 PHA 贮存于聚磷菌体内, 该合成过程所需能量来自于聚磷的水解, 即当 $c(\text{NO}_3^-)$ 较高时, 在 PAnS 内将发生释磷反应, 但释磷量仅占总释磷量的 4% 左右, 远远低于 ANS.

3.2.2 $c(\text{NO}_3^-)$ 与 TP 的吸收

根据生物除磷基本原理, 厌氧释磷过程是生物除磷系统的关键, 释磷量的高低直接影响吸磷量, 二者具有较好的相关关系, 相关关系曲线见文献[30]. 从图 6 中也可以看出, 吸磷量与释磷量的变化趋势相同.

在连续流单污泥污水脱氮除磷系统的 MAnS

内, 由于可利用的外碳源 COD 量较少, 所以反硝化菌的主要供氢体是内碳源 PHA, 反硝化聚磷菌的反硝化作用占有优势, 即在还原硝酸盐氮的同时, 大量的磷被吸收. Hu 等指出^[31], 在同步脱氮除磷活性污泥系统中, 影响反硝化吸磷量的主要因素是主要缺氧段硝酸盐氮的反应量. 结合图 6 和图 7 分析, 随着 $c(\text{NO}_3^-)$ 的升高, MAnS 内硝酸盐氮反应量和吸磷量均增加, 且两者均在 $c(\text{NO}_3^-)$ 设定值为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的环境条件下达到峰值. 从中还可以看出, 当 $c(\text{NO}_3^-)$ 大于 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, 吸磷量反而降低, 这是因为, 为维持较高的 $c(\text{NO}_3^-)$ 需要较大的硝化液内循环流量, 这导致该段实际水力停留时间减少以及随硝化液进入 MAnS 的 DO 量升高, 影响反硝化聚磷菌的新陈代谢过程, 导致缺氧吸磷量和缺氧吸磷质量分数均降低.

4 结论

(1) $c(\text{NO}_3^-)$ 对聚磷菌厌氧代谢过程有显著影响, 当其设定值为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PHA 合成贮存量和磷释放量均为最高值.

(2) $c(\text{NO}_3^-)$ 对聚磷菌缺氧代谢过程存在较大影响, 当其设定值为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PHA 降解量和磷吸收量也均为最高值.

(3) 基于 PHA 和 TP 代谢机制分析, 确认 $c(\text{NO}_3^-)$ 作为连续流单污泥污水处理系统的运行控制参数的有效性.

(4) 由于本试验采用定量配制的污水, 且试验条件较严格, 水质水量的波动性较小, 所以得出的结论应用到更复杂的污水处理过程时可能有些限制.

参考文献:

- [1] 孙迎雪, 吴光学, 胡洪营, 等. 昆明市分流制排水区域污水厂进水水质特征的统计学分析[J]. 环境工程学报, 2013, 7(8): 2885-2891.
- [2] 张玲玲, 陈立, 郭兴芳, 等. 南北方污水处理厂进水水质特性分析[J]. 给水排水, 2012, 38(1): 45-49.
- [3] Guerrero J, Guisasola A, Baeza J A. The nature of the carbon source rules the competition between PAO and denitrifiers in systems for simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal[J]. Water Research, 2011, 45(16): 4793-4802.
- [4] 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.
- [5] Wang Y Y, Zhou S, Wang H, et al. Comparison of endogenous metabolism during long-term anaerobic starvation of nitrite/nitrate cultivated denitrifying phosphorus removal sludges[J]. Water Research, 2015, 68: 374-386.
- [6] Xie E, Ding A Z, Zheng L, et al. Screening and characterising a denitrifying phosphorus-accumulating bacterium isolated from a

- circular plug-flow reactor[J]. *Environmental Technology*, 2016; 1-30.
- [7] 冷璐, 信欣, 鲁航, 等. 同步硝化反硝化耦合除磷工艺的启动及其运行特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4180-4188.
- [8] 何秋来, 王弘宇, 杨小俊, 等. SBR 不同进水中反硝化除磷颗粒污泥的培养[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 134-141.
- [9] 张为堂, 薛晓飞, 庞洪涛, 等. 碳氮比对 AAO-BAF 工艺运行性能的影响[J]. *化工学报*, 2015, **66**(5): 1925-1930.
- [10] 马娟, 李璐, 俞小军, 等. 低温低溶解氧 EBPR 系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 597-603.
- [11] Wang Y Y, Zhou S, Ye L, *et al.* Nitrite survival and nitrous oxide production of denitrifying phosphorus removal sludges in long-term nitrite/nitrate-fed sequencing batch reactors[J]. *Water Research*, 2014, **67**: 33-45.
- [12] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge model NO. 2D, ASM2D [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(1): 165-182.
- [13] 余鸿婷, 李敏. 反硝化聚磷菌的脱氮除磷机制及其在废水处理中的应用[J]. *微生物学报*, 2015, **55**(3): 264-272.
- [14] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Water Research*, 1997, **31**(3): 471-478.
- [15] Mino T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process[J]. *Water Research*, 1998, **32**(11): 3193-3207.
- [16] Musvoto E V, Casey T G, Ekama G A, *et al.* The effect of a large anoxic mass fraction and concentrations of nitrate and nitrite in the primary anoxic zone on low F/M filament bulking in nutrient removal activated sludge systems[R]. Research Report W77, Cape, South Africa; Department of Civil Engineering, University of Cape Town, 1992.
- [17] 王晓玲, 尹军, 高尚. 利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 175-180.
- [18] 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.
- [19] Soares A, Kampas P, Maillard S, *et al.* Comparison between disintegrated and fermented sewage sludge for production of a carbon source suitable for biological nutrient removal[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 733-739.
- [20] Huang M H, Li Y M, Gu G W. Chemical composition of organic matters in domestic wastewater[J]. *Desalination*, 2010, **262**(1-3): 36-42.
- [21] Chuang S H, Ouyang C F. The biomass fractions of heterotrophs and phosphate-accumulating organisms in a nitrogen and phosphorus removal system[J]. *Water Research*, 2000, **34**(8): 2283-2290.
- [22] Grady C P L Jr, Daigger G T, Lim H C 著. 张锡辉, 刘勇弟, 译. 废水生物处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 585.
- [23] Oehmen A, Keller-Lehmann B, Zeng R J, *et al.* Optimisation of poly-beta-hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems[J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, **1070**(1-2): 131-136.
- [24] 王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 等. 利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2617-2625.
- [25] Wang X L, Song T H, Yu X D. The biomass fraction of phosphorus-accumulating organisms grown in anoxic environment in an enhanced biological phosphorus removal (EBPR) system [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, **56**(7): 1877-1887.
- [26] Boontian N. A calibration approach towards reducing ASM2d parameter subsets in phosphorus removal processes [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, **6**(4): 194-200.
- [27] Bi D S, Guo X P, Chen D H. Phosphorus release mechanisms during digestion of EBPR sludge under anaerobic, anoxic and aerobic conditions[J]. *Water Science and Technology*, 2013, **67**(9): 1953-1959.
- [28] Kim M G, Nakhla G. Comparative performance of A²/O and a novel membrane-bioreactor-based process for biological nitrogen and phosphorus removal [J]. *Water Environment Research*, 2010, **82**(1): 69-76.
- [29] Qi R, Yu T, Li Z, *et al.* Comparison of conventional and inverted A²/O processes; phosphorus release and uptake behaviors [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(4): 571-578.
- [30] Yin J, Wang X L, Zhu G B, *et al.* Effects of nitrate concentration in main anoxic zone on denitrifying dephosphatation [J]. *Journal of Donghua University (English Edition)*, 2009, **26**(4): 443-449.
- [31] Hu Z R, Wentzel M C, Ekama G A. Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems [J]. *Water Research*, 2002, **36**(19): 4927-4737.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfohalobium</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《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10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 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