

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM_{2.5}中碳质组分时空分布特征与来源 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM_{2.5}中有机物的污染特征及来源解析 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM_{2.5}中水溶性有机气溶胶 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董勇(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N₂O产生特性 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺

李冬¹, 刘博¹, 王文琪¹, 张杰^{1,2}

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 以低 C/N 比生活污水为研究对象, 接种成熟除磷颗粒污泥, 通过联合调控好氧时间及曝气强度成功将其诱导成具有同步短程硝化反硝化除磷功能的颗粒污泥, 并分析了此过程中系统脱氮除磷特性变化. 结果表明, 好氧段曝气强度为 $5 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$, 在较短曝气时间下 (140 min) 可实现 AOB 的富集, 但同步硝化反硝化能力难以提高; 降低曝气强度为 $3.5 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$, 延长曝气时间 (200 min), 好氧段氮损增加. 根据 pH 及 DO 曲线进一步优化曝气时长抑制 NO_2^- 向 NO_3^- 转化, 优化后系统出水 $\text{TP} < 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $\text{TN} < 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可实现氮磷的同步去除. 在系统功能由单纯的除磷向同步脱氮除磷转化的过程中, 释磷量下降, PAOs 在内碳源储存过程中的贡献比例有所下降, 但仍占主体地位 (60%). 批次实验表明, 颗粒中可利用 NO_2^- 为电子受体的 DPAOs 占绝大部分达 52.43%, 其富集减轻了系统的碳源压力, 从而改善脱氮除磷效果.

关键词: 除磷颗粒污泥; 反硝化除磷; 脱氮除磷; 曝气强度; 曝气时长

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0867-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.201909108

Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules

LI Dong¹, LIU Bo¹, WANG Wen-qi¹, ZHANG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: This paper investigated domestic sewage with a low C/N ratio. Mature phosphorus removal granules were inoculated to cultivate granules with a simultaneous short-cut nitrification and denitrification function. The characteristics of nitrogen and phosphorus removal of this process were analyzed. Results show that AOB can be enriched by prolonging the sludge age for 30 days with an aeration intensity of $5 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$ and shorter aeration time (140 min), whereas the simultaneous nitrification and denitrification ability could not be improved. The nitrogen loss increased at the aerobic time when aeration intensity was reduced by $3.5 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$ and aeration time was prolonged by 200 min. The aeration time was further optimized to restrain the transformation of NO_2^- to NO_3^- , and finally the effluent of $\text{TP} < 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $\text{TN} < 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. During the process of the system function transformation from phosphorus removal to nitrogen and phosphorus removal, the phosphorus release decreased, however PAOs still played a dominant role (60%) in the process of internal carbon storage. Batch experiments showed that DPAOs that can utilize nitrite as an electron acceptor accounts for 52.43% in the total PAOs, which alleviated the pressure of the carbon source and improved the simultaneous nitrogen and phosphorus removal.

Key words: phosphorus removal granules; denitrifying phosphorus removal; nitrogen and phosphorus removal; aeration intensity; aeration time

传统污水处理工艺中反硝化往往通过硝态氮途径来实现, 无法实现碳源最大化利用, 这是制约低碳氮比生活污水同步脱氮除磷的重要原因. 与传统方式相比, 同步短程硝化反硝化脱氮除磷工艺可节约 25% 能耗与 40% 的碳源, 具有缩短反应时间, 降低污泥产量等优点. 但是, 此工艺目前主要集中于对絮状污泥的研究^[1-5], 由于絮状污泥抵抗冲击负荷能力较弱, 易发生污泥流失, 使其应用受到了限制. 颗粒污泥具有沉降性能良好, 微生物含量丰富, 抗冲击负荷能力强等优点^[6]. 因此在颗粒污泥中, 如何实现同步短程硝化反硝化脱氮除磷值得进一步探索.

对 NOB 的抑制作用正是实现亚硝酸盐途径脱氮的前提, 除磷工艺下 A/O 不断交替运行, 与普通好氧颗粒工艺相比, 其较长的厌氧段不利于 NOB 的

增殖^[7], 除磷颗粒中 NOB 含量少. 此外由于除磷颗粒污泥自身的结构特点以及氧的传质限制, 为氨氧化菌、反硝化菌以及聚磷菌等的协同存在提供了条件, 故在同一反应器中完成氮磷的同步去除是可行的, 因此除磷颗粒适宜作为培养同步短程硝化反硝化除磷颗粒的种泥. 但目前关于颗粒污泥中的除磷与同步短程硝化反硝化耦合并未见报道.

污染物处理性能与反应体系中溶解氧浓度密切相关, 而曝气强度与好氧运行时间是调控溶解氧的

收稿日期: 2019-09-10; 修订日期: 2019-09-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07601-001)

作者简介: 李冬 (1976 ~), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水环境恢复理论及关键技术, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

最关键参数. 因此本实验着手于对好氧运行时间及曝气强度的控制, 通过两个步骤, 先利用短曝气时长实现除磷颗粒中 AOB 富集, 随后再降低曝气强度并优化曝气时长完成脱氮功能的强化, 在 SBR 单一反应器中将除磷颗粒驯化成具有同步短程脱氮除磷功能的颗粒污泥. 同时探讨了在系统功能由单纯的除磷向同步脱氮除磷转化的过程中碳、氮、磷去除特性以及颗粒性状变化情况, 以期在实际工程应用中提供实验数据支撑.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方法

本实验采用有机玻璃制成的 SBR 反应器, 有效

容积为 6 L, 换水比为 2/3. 每天运行 4 个周期, 每周 360 min, 其中进水 5 min, 厌氧时间与好氧时间见表 1, 沉淀 3 min, 排水 5 min, 其余时间闲置, 每周末排出一定体积的泥水混合物, 控制泥龄 30 d, 实验具体参数见表 1.

1.2 接种污泥与实验用水

接种污泥是配水培养的以去除 P 和 COD 为主的除磷颗粒污泥, 污泥浓度为 $3\ 300\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 实验用水取自北京某大学家属区化粪池, 具体水质指标如表 2.

1.3 分析项目与检测方法

NH_4^+-N 采用纳氏试剂光度法; $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法; $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 采用麝香草酚紫外分光光度法; COD 和 TP 的测定采用 5 B-3 B 型

表 1 反应器运行工况

Table 1 Operational conditions of reactor

阶段	时间/d	厌氧时长 /min	好氧时长 /min	$G_s^{(1)}$ /L·(h·L) ⁻¹	周末 DO /mg·L ⁻¹
I	1~35	120	140	5	3.0~4.0
II	36~68	120	200	3.5	2.5~3.5
III	69~101	120	160~180	3.5	1.8~3.0

1) G_s 为单位时间单位体积内的曝气量

表 2 生活污水水质情况

Table 2 Water quality of domestic sewage

项目	COD /mg·L ⁻¹	NH_4^+-N /mg·L ⁻¹	$\text{NO}_2^- -\text{N}$ /mg·L ⁻¹	$\text{NO}_3^- -\text{N}$ /mg·L ⁻¹	$\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$ /mg·L ⁻¹	pH
范围	150~300	40~60	<1	0~2	4~8	7.0~8.0

COD 多参数快速测定仪, 每 2 d 对上述参数进行测量; DO 和 pH 的测定均采用 WTW-pH/Oxi 340i 便携式多参数测定仪监测. MLSS、MLVSS 和 SVI 等指标均采用国家规定的标准方法^[8]. 污泥中 EPS 的提取步骤: 取 30 mL 污泥样品, 4000g 离心 (常温) 10 min, 去掉上清液, 加入磷酸盐缓冲液恢复体积到 30 mL. 再次 4000g 离心 (常温) 15 min, 去掉上清液后用缓冲液恢复体积至 30 mL, 涡旋 1 min 使离心管底部污泥完全散开, 60℃ 水浴加热 30 min. 样品冷却至接近室温时, 20000g 离心 (4℃) 20 min. 多糖测定采用苯酚硫酸法, 蛋白质测定采用考马斯亮蓝法^[9].

三维荧光 E_x (激发光谱) 和 E_m (发射光谱) 扫描范围均为 200~650 nm, 扫描步长为 10 nm, 扫描速度 $15\ 000\ \text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$. 其中 *X* 轴代表发射波长, *Y* 轴代表激发波长, 等高线颜色深浅反映样品的荧光强度.

1.4 COD_{in} 与 PAOs 在厌氧段内碳源 PHA 储存中贡献比例的计算方法

厌氧段 COD 通过异养菌的反硝化作用和 PAOs

和 GAOs 的内碳源储存完成去除. COD_{in} 指内碳源储存占总消耗 COD 的比例, P_{PAOs} 指 PAOs 在内碳源储存过程中的贡献比例. 计算方法如下^[10]:

$$\text{COD}_u = \Delta\text{COD} - 1.71\Delta\text{NO}_2^- - 2.86\Delta\text{NO}_3^-$$

$$\text{COD}_{in} = \text{COD}_u / \Delta\text{cod} \times 100\%$$

$$0.5P_{PAOs} = P_R / \Delta\text{COD}_{in}$$

式中, ΔCOD 、 ΔNO_2^- 和 ΔNO_3^- 为厌氧段 COD、 NO_2^- 和 NO_3^- 的浓度变化量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; COD_u 为内碳源储存量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 1.71 和 2.86 分别为单位质量浓度的 NO_2^- 和 NO_3^- 反硝化消耗的 COD 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$; P_R 为厌氧段释磷量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 0.5 为 PAOs 厌氧条件下每吸收单位质量的有机碳源所释放的磷量, $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 颗粒污泥系统污染物处理性能

2.1.1 COD 去除性能

运行期间 COD 的处理效果如图 1 所示, 系统具有良好的有机物去除性能, 整个过程出水 COD 稳定, 一直小于 $50\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 厌氧段发生聚磷菌

(PAOs) 和聚糖菌 (GAOs) 的内碳源储存以及残留 NO_x^- 的去除, 绝大部分 COD 在厌氧段消耗, 阶段 II 之后兼顾脱氮除磷, 厌氧末 COD 浓度明显降低. 颗粒污泥存在基质传质限制, 微生物会先快速吸附有机物至颗粒表面再进行利用, 且污水中含有慢速生物降解物质和溶解性惰性物质等, 故设置 120 min 的厌氧时间. 阶段 I 氨氧化作用不彻底, 且 NO_x^- 多以 NO_2^- 的形式存在, 故厌氧段碳源消耗用于反硝化的很少, 主要用于 PAOs 的胞内储存. COD_{in} 则从初始的 85.4% 上升至 90% 左右后维持稳定水平, 这说明充足厌氧时间, 有利于强化少量较难降解机物的吸收, 提高了内碳源储存量^[11]. 阶段 II 由于氨氧化作用增强, 用于反硝化的碳源占比增加, 故 COD_{in} 呈下降趋势. 阶段 III 将氨氧化过程控制在亚硝化阶段, 减少了外碳源消耗, COD_{in} 回升并保持稳定在 85% 左右.

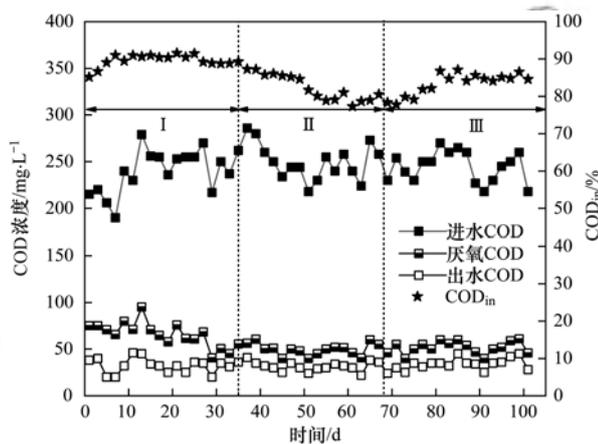


图1 运行过程中 COD 浓度变化

Fig. 1 Variations in COD concentration during the process

2.1.2 TP 去除性能

图2 为运行过程中出水 TP 的变化. 厌氧段聚磷菌吸收 VFA 储存在体内, 以保证后续好氧段 PHAs 氧化分解释放的能量充分摄取水中的 P. 阶段 I 有充足的碳源用以厌氧释磷, 释磷量可达到 $40.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 阶段 II 从第 43 d 起, P 的去除率逐渐下降至 70.8%, 分析原因为随着好氧段硝化过程进行完全, 使得进入下一反应周期厌氧段的 NO_x^- 增加, 厌氧释磷量开始下降, 吸磷动力不足, 致使除磷性能受到影响. 阶段 III 控制出水 NO_3^- 浓度, 节约了碳源, 系统平均释磷量增加至 $35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 P 浓度小于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 纵观整个过程聚磷菌在内碳源 PHA 储存过程中的贡献比例 (P_{PAOs}) 呈先下降再上升趋势, 这也解释了阶段 II 厌氧释磷量下降及阶段 III 释磷量回升的原因. 可见随着系统脱氮功能的强化, 聚磷菌对内碳源的贡献率降低, 部分碳源可能被聚糖菌摄取. 虽然有不少研究^[12,13] 指出聚糖菌与聚磷菌竞争

碳源, 是导致系统除磷崩溃的原因, 但是聚糖菌具有反硝化功能且同时具备内碳源储存的功能, 可实现污水中碳源的有效利用. 且阶段 III 系统性能逐渐稳定后, 聚磷菌仍是内碳源的贡献率的主体, 平均达到 60%, 系统仍能保持较好的除磷性能, 故适量的聚糖菌对同步脱氮除磷并无大碍.

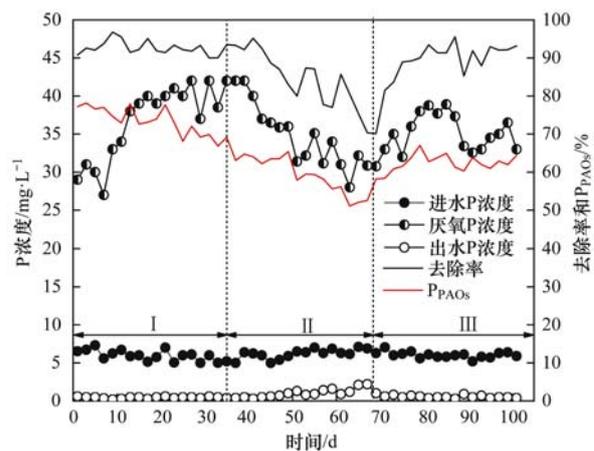


图2 运行过程中 TP 浓度变化

Fig. 2 Variation in TP concentration during the process

2.1.3 脱氮性能

图3 为系统运行期间进出水氮素的变化. 接种的除磷颗粒中无论是 AOB 还是 NOB 含量均较少, 故首先通过延长泥龄为 30 d, 实现硝化菌的富集. 在短曝气时间联合较高曝气量控制策略下, 阶段 I 氨氧化率由初始的 52% 逐渐上升至 70%, NAR 一直维持在 80% 以上. 分析原因主要为: 本实验 A/O 运行模式下, 厌氧段相对较长, AOB 的“饱食饥饿”特性使其更从容地面对环境变化; 颗粒污泥特殊的结构存在氧气的传质限制, 并且 AOB 对溶解氧的亲合力要大于 NOB, 故 AOB 占有优先利用溶解氧的外层, NOB 紧靠 AOB 生长在次外层或外层; NOB 的生长需要利用 AOB 代谢产生的亚硝酸盐, 亚硝酸盐的氧化过程滞后于氨氧化过程. 此外, 出水中 FA 浓度在 $0.15 \sim 0.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对 NOB 的代谢活性也有一定影响. 综上在较短的曝气时间内, NOB 因底物受限和活性抑制, 增殖速度缓慢, 不利于在系统中生存. 但同时短曝气时长也使氨氮反应不完全, 氨氧化率难以进一步提高. 另外较高的曝气强度虽然能提高硝化速率, 但同时却压缩了颗粒污泥的缺氧区域, 抑制反硝化菌体内硝酸盐还原酶的合成, 阻碍了氮去除.

本实验在阶段 II 延长曝气时间的同时降低了曝气强度, 因为反硝化通常是同步硝化反硝化 (SND) 的限速步骤. 在单级反应器内要想获得较高的脱氮效率, 其首要问题在于调控反应体系内的溶解氧浓度, 使两种反应能够均衡进行. 有报道指出^[14],

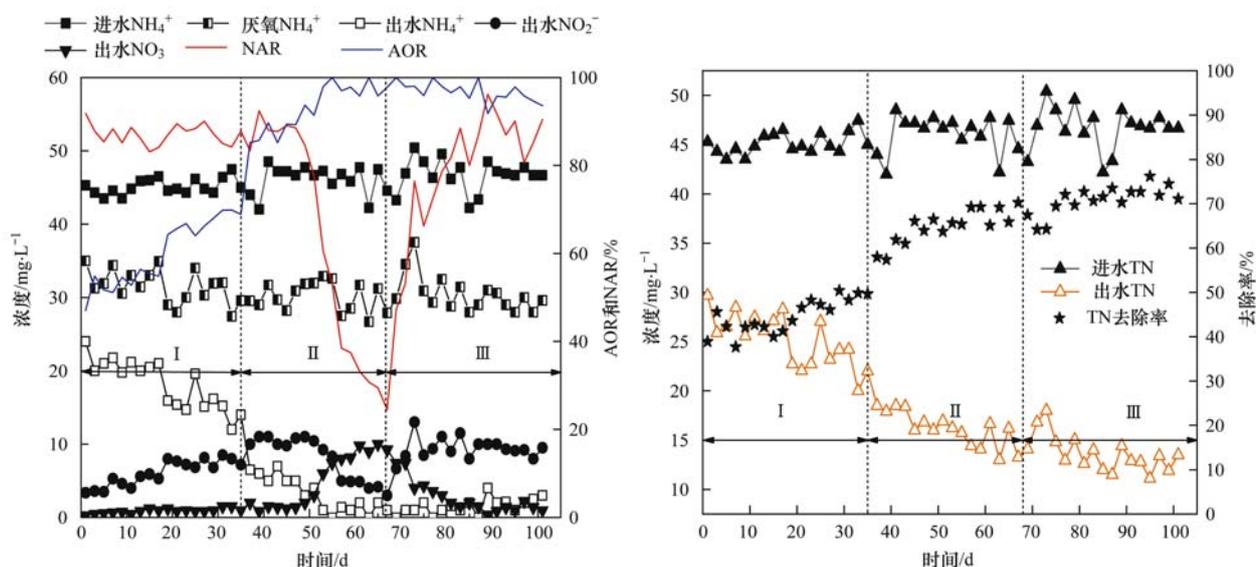


图3 运行过程中出水 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 TN 浓度变化

Fig. 3 Variations in NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , and TN concentration during the process

$\rho(\text{DO}) = 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,硝化速率与反硝化速率相同,但溶解氧过低(小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),易引发丝状菌膨胀,甚至引起颗粒污泥的解体,且颗粒中存在氧传质限制,并不需要极低的溶解氧来实现颗粒内部的缺氧微环境.在阶段 II 降低曝气强度为 $3.5 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$ 后,总氮去除率有所上升,氨氧化率也逐渐提高至 90%.从第 49 d 起,发现出水中硝酸盐浓度呈升高趋势,NAR 随之不断下降至 24.8%.极大原因是随着系统氨氧化能力增强,出现了延时曝气,故阶段 III 针对曝气时长进行优化,当氨氧化结束时及时停止曝气,亚硝化性能才逐渐恢复.通过亚硝酸盐途径脱氮进一步降低了脱氮过程所需的有机碳源需求,有利于提高系统的脱氮性能,TN 去除率最终稳定在 70% 以上,出水 TN 小于 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.2 典型周期实验

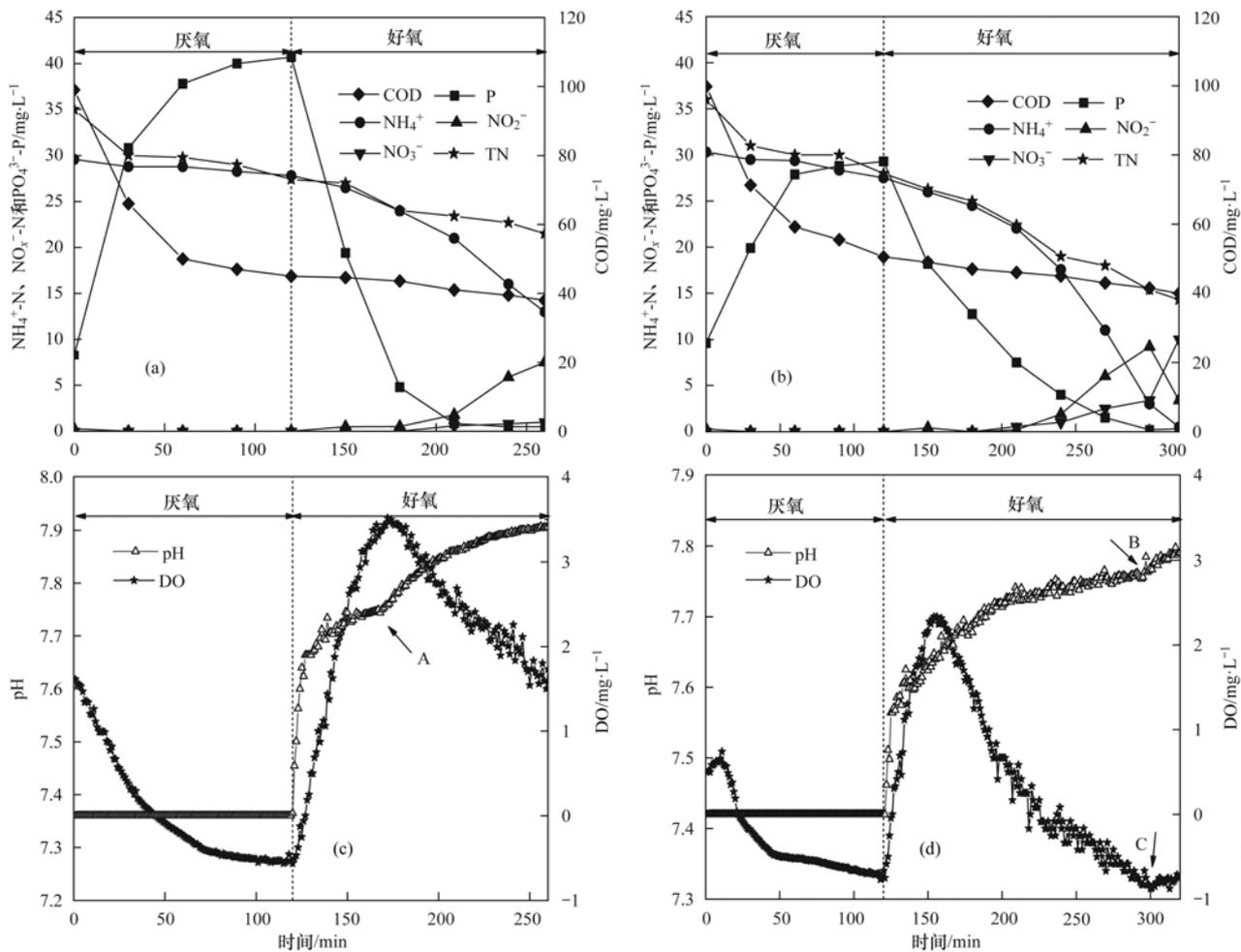
为分析系统脱氮除磷机制,对系统运行典型周期内(阶段 I 和阶段 II)基质浓度变化情况进行分析(图 4).将颗粒有机物转化为易于生物降解底物的水解过程是厌氧段限速步骤,该底物可作为反硝化或生物除磷的必要碳源.较长的厌氧时间的好氧颗粒污泥中形成了致密的厌氧核心,将复杂基质转化为易吸收的 VFA 以抑制丝状细菌生长.伴随着 NO_x^- 的去除和 P 的释放,绝大部分 COD 在厌氧段消耗,COD 浓度在前 60 min 迅速下降.阶段 II 在 90 ~ 120 min 内,P 浓度基本保持不变,但是 COD 浓度持续下降了 $10.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明这段时间仍存在着外源 COD 向内碳源转化的过程,这有可能是聚糖菌的作用.阶段 II 进水 COD 浓度与阶段 I 相当,但是释磷量明显低于后者.原因是在以聚磷菌为优势菌种的单一除磷系统中,食微比充足,而兼顾脱氮除磷时,受到低碳氮比生活污

水的碳源限制,与其他异养菌竞争过程中聚磷菌可利用的底物变少,聚磷菌对内碳源的贡献率降低.而且阶段 II 硝化产物以 NO_3^- 为主,消耗的碳源更多,影响了释磷.阶段 II 前 60 min 内吸磷速率为 $19.32 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$,相比阶段 I 的 $35.15 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$ 下降了 45%,除了受到曝气强度降低的影响外,增强的氨氧化作用与吸磷相互制约是主要因素.在阶段 I 吸磷作用占主导地位,好氧 60 min 内吸磷过程迅速,之后硝化作用才逐渐加强.而在阶段 II 中,氨氧化速率为 $7.57 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$,虽然也随曝气强度的降低而下降[阶段 I 为 $8.58 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}$],但与吸磷速率的差距却缩小了.在脱氮方面,低曝气平衡了硝化作用与反硝化间的速率差距,SND 作用更显著,好氧段氮损可达到 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

系统内 pH 与溶解氧的变化与生化反应有良好的相关性,可清晰地揭示两个阶段的反应特征.两个阶段都是开始曝气后溶解氧快速上升,之后阶段 I 中异养菌有较大的耗氧速率使得上升速度缓慢,在 175 min 时(A 点) DO 浓度增长加快表征此时吸磷过程基本结束.阶段 II 中 DO 浓度基本是匀速上升,并未出现上升速度陡增的情况.直到第 300 min 时才出现拐点(B 点),DO 浓度迅速上升,pH 曲线也出现“氨谷”,说明此时氨氮基本降解完全,但未停止曝气,使得 NO_2^- 向 NO_3^- 转化,出水 NO_3^- 达到 $10.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,破坏了亚硝化.由此 pH 和 DO 曲线的特征点可以指示氨氧化过程结束,避免不必要的曝气浪费.

2.3 脱氮除磷机制分析

在除磷方面,根据电子受体划分,PAOs 可被分



(a)和(c)为第35 d;(b)和(d)为第66 d

图4 典型周期内污染物浓度、pH和DO变化

Fig. 4 Variations in pollutant concentrations, pH, and DO in a typical period

为 P_0 、 P_{ON} 和 P_{ONn} 三大类, P_0 为好氧 PAOs (APAOs), 而 P_{ON} 和 P_{ONn} 属于兼性微生物. 参考 Hu^[15] 的实验方法, 聚磷菌所占比例可近似按以下公式计算:

$$\frac{P_{ONn}}{P} = \frac{M_3}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\frac{P_{ON}}{P} = \frac{M_2 - M_3}{M_1} \times 100\% \quad (2)$$

$$\frac{P_0}{P} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中, P_{ONn} 是能利用 O_2 、 NO_3^- 和 NO_2^- 作为电子受体去除的 P; P_{ON} 是能利用 O_2 和 NO_3^- (不能利用 NO_2^-) 作为电子受体去除的 P; P_0 是只能利用 O_2 作为电子受体去除的 P; M_1 是利用 O_2 为电子受体在好氧段的吸磷量; M_2 是利用 NO_3^- 为电子受体在缺氧段的吸磷量; M_3 是利用 NO_2^- 为电子受体的吸磷量.

基于以上分析, 分别以 O_2 、 NO_2^- 和 NO_3^- 作为电子受体进行批次实验. 实验具体操作为厌氧段释磷结束后取出 3 L 泥水混合物, 平均分为 3 份,

好氧条件下控制溶解氧浓度为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 另外两份不曝气, 分别加入 NaNO_2 和 KNO_3 , 使 NO_2^- 和 NO_3^- 初始浓度分别为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 反应时间 2.5 h, 期间测定磷浓度的变化, 不同条件下的吸磷情况如图 5 所示.

厌氧段结束后释磷浓度达到 $50.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 以 O_2 为电子受体的实验中磷全部去除, 以 NO_3^- 和 NO_2^- 为电子受体的反应中吸磷量分别为 $35.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $26.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 颗粒污泥特殊的分层结构为聚磷菌的多样性提供了可能, 兼性 PAOs 丰富的生化代谢途径赋予了系统更强的除磷能力^[16]. 根据公式 (1) ~ (3) 计算得出能利用 O_2 和 NO_3^- 而不能以 NO_2^- 为电子受体的 DPAOs 仅占 18.38%, 只能利用 O_2 为电子受体的聚磷菌占 29.19%, 而亚硝酸型反硝化聚磷菌在聚磷菌中占绝大部分可达 52.43%, 在磷的去除中起到重要贡献.

有研究指出亚硝酸盐在 EBPR 系统中的积累成为除磷恶化的因素之一^[17,18], 尤其对于好氧吸磷的影响较大, NO_2^- 的存在会对微生物的生长及

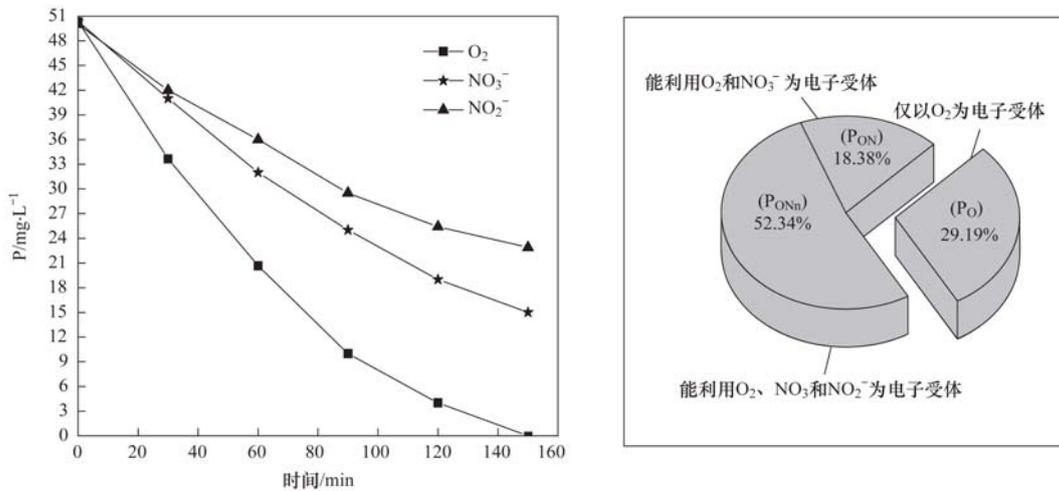


图5 分别以氧、NO₂⁻和NO₃⁻为电子受体时吸磷的批次实验

Fig. 5 P uptake batch tests using oxygen, nitrite, and nitrate as electron acceptors

生理活动产生抑制作用. 本系统中最高NO₂⁻积累量为12.3 mg·L⁻¹,吸磷并未受到影响. 因为本实验中NO₂⁻生成是一个动态过程,并非先前研究中静态投加大量NO₂⁻而强烈抑制了吸磷过程,另外系统中以NO₂⁻为电子受体DPAOs的存在一定程度上缓解了抑制作用,其受影响的阈值大于仅在有氧条件下可生存的聚磷菌^[19,20]. 而且DPAOs还起到与NOB竞争NO₂⁻的作用,有利于亚硝化的维持.

至于脱氮,在系统稳定运行期间厌氧末期的COD浓度与出水COD浓度相差较少,好氧段异养菌几乎没有可利用的外碳源进行反硝化,则具有内碳源脱氮能力的DPAOs和GAOs在同步硝化反硝化的提高中做出重要贡献. 上文周期实验也验证了此推断,随着吸磷进行TN含量同步减少,此时大部分N被去除,可能发生反硝化除磷现象,而吸磷基本完成后TN下降变缓发生SND. 又因聚糖菌在内碳源储存中不占优势,故反硝化除磷过程是实现好氧段NO_x⁻去除的主要途径. 分析系统中反硝化聚磷菌得以富集的原因如下:阶段I好氧吸磷迅速完成,当有NO_x⁻生成时吸磷基本结束,反硝化聚磷菌难以得到电子受体;而阶段II和阶段III好氧吸磷速率与氨氧化速率差距缩小,加之颗粒中缺氧区域的扩大均有利于反硝化聚磷菌生长.

2.4 颗粒生物量、沉淀性能及外观变化

如图6所示,到第60d时污泥浓度从接种的3300 mg·L⁻¹逐渐增长至4567 mg·L⁻¹,之后受到食微比限制,增长速度变缓. 整个过程系统MLVSS/MLSS在0.79~0.84中变化,生物量较稳定. Mosquera-Corral等^[21]的研究表明,当氧气浓度降低

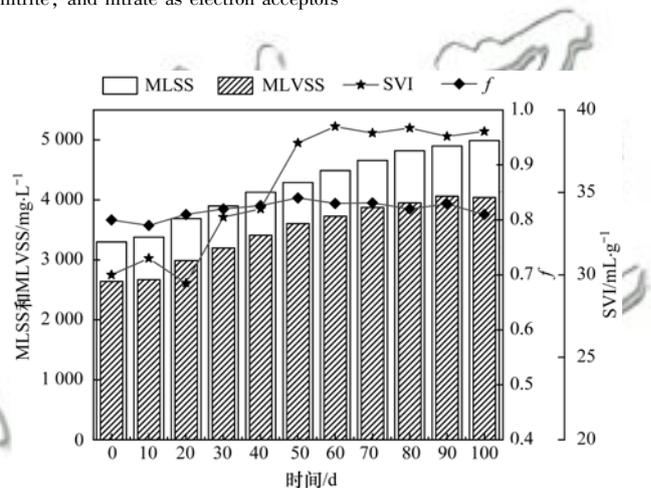


图6 运行过程中SVI、MLSS、MLVSS及f的变化

Fig. 6 Variation of SVI, MLSS, MLVSS, and f during of operation

到40%时(DO < 3~4 mg·L⁻¹)会导致颗粒失稳破碎成不规则形状,SVI增加到100 mL·g⁻¹,沉淀性能急剧下降. 但是在本实验中SVI值随着曝气强度的降低呈现小幅增加后趋于稳定(39 mL·g⁻¹),具有良好的沉降性能,而没有继续恶化. 分析原因如下: 先前研究在全程好氧条件下进行,系统存在着大量生长速度快的异养菌. 降低的DO浓度增加了饱食段时长,加之丝状菌较大的比表面积使之对氧有更高的亲和力,在高COD负荷与低DO不适配的组合下极易引起丝状菌的过度增殖. 此外高曝气强度下的气体流速提供了水力剪切力,这有助于维持颗粒的稳定. 本系统中除了曝气以外还有机械搅拌提供的水力剪切力,因此曝气强度的降低对水力剪切力的影响不大. 另有研究证实^[22],以低速率控制微生物生长是颗粒污泥稳定的关键因素,饥饿期相比饱食期而言对氧气供应和剪切力需求更低. 系统中较长的厌氧饱食时间在颗粒中富集了生长缓慢的微生物

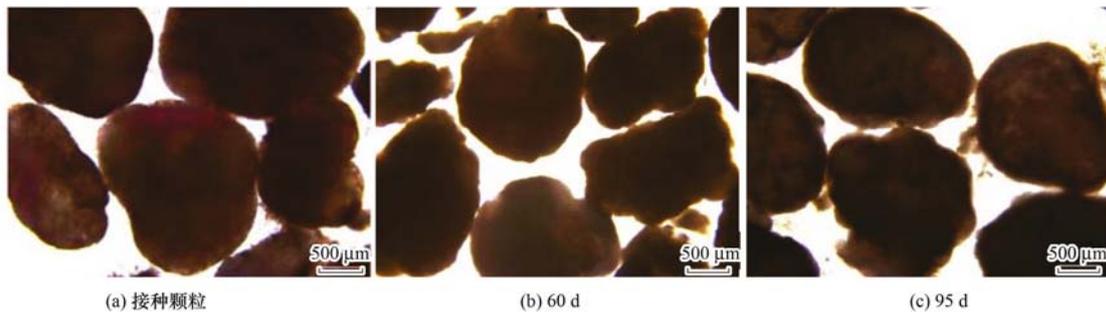


图7 不同时期颗粒污泥的显微镜照片

Fig. 7 Optical microscopy images of granules during different phase

物(PAOs 和 GAOs 等), 故好氧段降低了剪切力需求, 更易在低 DO 下保持稳定. 结合颗粒形态分析(如图 7), 颗粒污泥在整个运行中结构完整性能良好保持, 即使在曝气强度降低后, 未出现丝状菌膨胀或颗粒解体等现象, 但由于生活污水中的有毒物质和部分难降解有机物的存在, 颗粒边缘未能如接种颗粒圆滑.

2.5 EPS 变化及三维荧光特性分析

蛋白质类(PN)和多糖类(PS)是 EPS 的重要组成部分, 运行过程中 EPS 含量以及 PS/PN 的变化如图 8 所示. PS 在整个运行过程中变化不大, 但是 PN 随着曝气强度的降低而降低, 导致 PS/PN 有所上

升. 笔者发现 PS/PN 和 SVI 有相似的变化趋势, 因此考察了二者的相关性. 经过线性拟合发现, 相关系数可达 0.917, 即 PS/PN 对污泥沉降性能有影响. 大部分 PN 由疏水性氨基酸(甘氨酸和丙氨酸等)构成, 而 PS 中含有较高比例的羧基等亲水性基团, 因此 PS 与 PN 的比值能直观表现污泥的疏水性. 疏水性增加可以增强细胞间的亲和力, 进而影响污泥沉降性能. 阶段 I 高曝气强度和短曝气时长可刺激微生物分泌更多的 EPS^[23], 之后降低的曝气强度使 EPS 含量略有下降, 随着系统处理性能的恢复以及对环境参数变化过程的适应后, PS/PN 值趋于稳定, 保持在 0.70 左右.

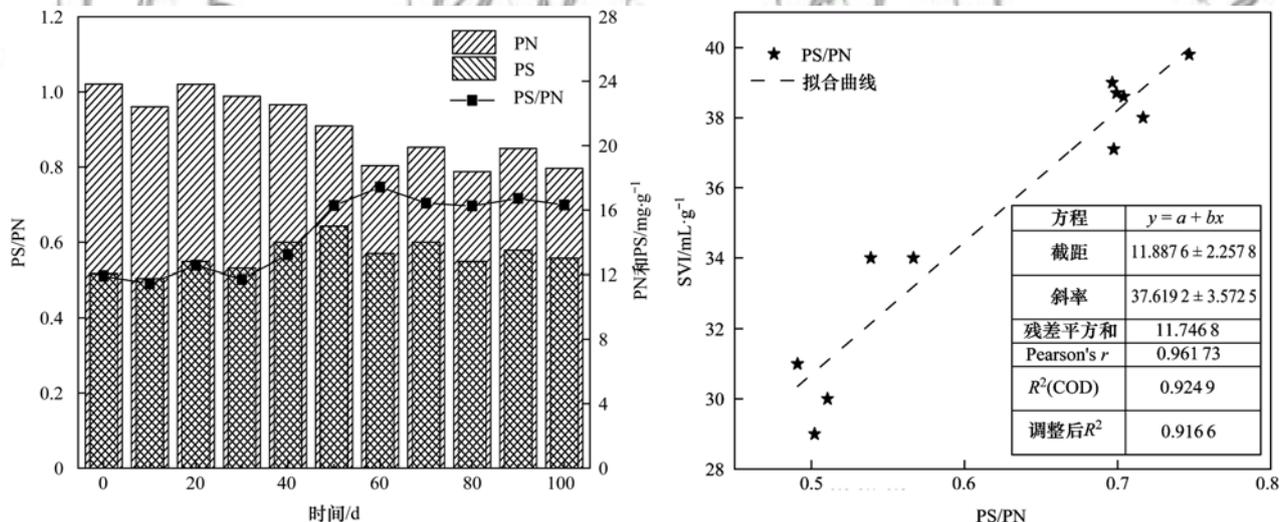
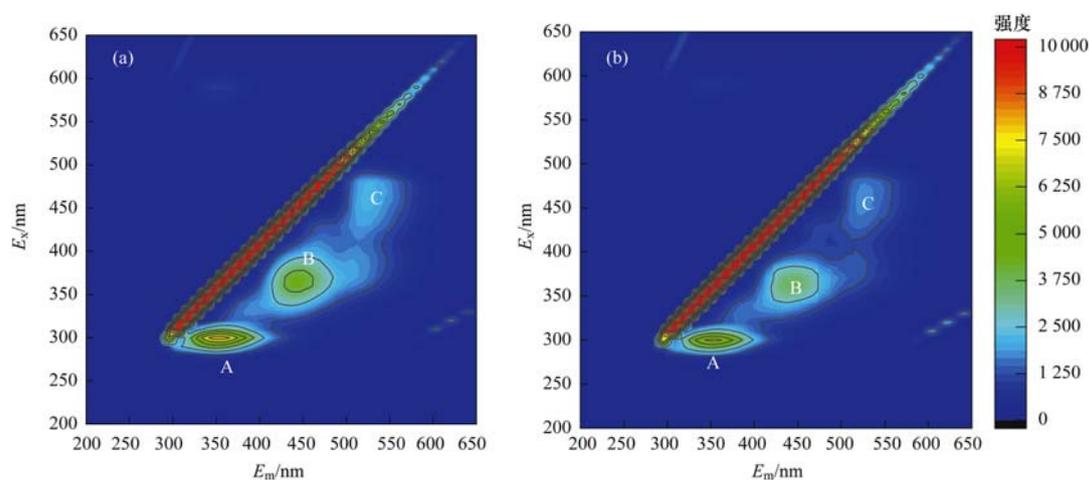


图8 运行过程中 EPS 变化及 PS/PN 与 SVI 相关性

Fig. 8 Variation in EPS during procession of operation and correlation between PS/PN and SVI

采用三维荧光光谱分析方法, 通过特征荧光峰位置和荧光参数能够定性表示出 EPS 中物质. 在第 25 d 和 90 d 对 EPS 样品进行 3D-EEM 荧光光谱分析, 结果如图 9 所示. 根据 Chen 等^[24]的研究鉴定了峰的组成, 归纳如下: 色氨酸蛋白类 (E_x/E_m 为 280 ~ 300/340 ~ 360 nm 处的峰 A), 腐殖酸类 (E_x/E_m 为 340 ~ 360/430 ~ 450 nm 的峰 B, E_x/E_m 为 450 ~ 480/510 ~ 540 nm 的峰 C).

主峰位置的相似性表明 EPS 的主要物质和化学成分没有明显变化, 而荧光强度发生变化. 和上述测量的 PN 结果相同, 第 90 d 峰 A 荧光值略微下降, 蛋白类物质含量降低, 同时峰 B 的荧光强度也有所减弱. 腐殖酸成分主要是脂肪族和芳香族的高聚物, 含有羧基、酚基等带负电官能团影响污泥絮凝的物质, 其含量的减少有利于污泥沉降性能的恢复^[25].



(a)第25 d, (b)第90 d

图9 运行过程中颗粒污泥三维荧光分析

Fig. 9 Analysis with 3D-EEM spectra of granular sludge during operation

3 结论

(1)以实际生活污水为研究对象,以曝气强度及好氧时间为控制手段,在较短曝气时长下(140 min)可实现除磷颗粒中 AOB 初步富集,在此基础上降低曝气强度 $[3.5 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{L})^{-1}]$ 并联合优化曝气时长,抑制 NO_2^- 向 NO_3^- 转化,降低了周期末溶解氧浓度,进一步改善脱氮性能.最终成功将除磷颗粒诱导成同步短程硝化反硝化除磷颗粒,在一个反应器中完成氮、磷的去除.

(2)COD 主要通过 PAOs 和 GAOs 的内碳源储存作用而去除,其中 PAOs 在内碳源储存过程中贡献比例占 60% 以上,外源反硝化贡献较少.批次实验证实,经过诱导后系统中富集了反硝化聚磷菌,其丰富生化代谢途径增强了系统的同步脱氮除磷能力,在氮和磷的去除中起到重要贡献.系统稳定运行后出水 $\text{COD} < 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} < 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ < 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TN} < 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,符合 GB 18918-2002 一级 A 标准.

(3)系统中存在好氧吸磷与反硝化吸磷两种途径,在聚磷菌群具体分布中,仅能利用 O_2 为电子受体的 PAO 占 29.19%;以 O_2 和 NO_3^- 而不能利用 NO_2^- 为电子受体的 DPAOs 只占 18.38%;可以 NO_2^- 作为电子受体的 DPAOs 菌占绝大部分可达 52.43%,此部分 DPAOs 的富集进一步降低了系统碳源需求,从而保证处理效果.

(4)PS 在运行过程中变化不大,PN 随曝气强度降低略有下降,PS/PN 与污泥的沉降性能有良好相关性.具有内碳源储存作用的 PAOs 和 GAOs 以较低的生长速率确保了曝气强度降低后颗粒污泥性状的稳定维持.

参考文献:

- [1] 张可方,张朝升,罗思音,等. SBR 短程同步硝化反硝化耦合除磷的研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(7): 65-67, 70. Zhang K F, Zhang C S, Luo S Y, et al. Coupling of short-cut simultaneous nitrification and denitrification with denitrifying phosphorus removal in SBR[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(7): 65-67, 70.
- [2] 吴春英. 新型短程硝化同步反硝化除磷工艺的快速启动[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9): 111-114, 119.
- [3] 于德爽,袁梦飞,王晓霞,等. 厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5065-5073. Yu D S, Yuan M F, Wang X X, et al. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal characteristics of an anaerobic/aerobic operated SPNDPR system treating low C/N urban sewage[J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 5065-5073.
- [4] 甄建园,于德爽,王晓霞,等. 低 C/N (<3) 条件下 SNEDPR 系统启动及其脱氮除磷特性研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2960-2967. Zhen J Y, Yu D S, Wang X X, et al. The nutrient removal characteristic of SNEDPR system during start-up and steady operation phases treating low C/N (<3) sewage[J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 2960-2967.
- [5] 赵智超,黄剑明,李健,等. 间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 799-807. Zhao Z C, Huang J M, Li J, et al. Simultaneous nitrification and denitrifying phosphorus removal in continuous flow reactor with intermittent aeration[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 799-807.
- [6] López-Palau S, Pericas A, Dosta J, et al. Partial nitrification of sludge reject water by means of aerobic granulation[J]. Water Science & Technology, 2011, 64(9): 1906-1912.
- [7] 李冬,曹美忠,郭跃洲,等. 进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1360-1366. Li D, Cao M Z, Guo Y Z, et al. Effect of influent ammonia concentration on a biological phosphorus removal granules system[J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1360-1366.
- [8] 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. 100-124.
- [9] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation

- and dewaterability of activated sludge [J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1022-1030.
- [10] Wang X X, Wang S Y, Zhao J, *et al.* A novel stoichiometries methodology to quantify functional microorganisms in simultaneous (partial) nitrification-endogenous denitrification and phosphorus removal (SNEDPR) [J]. *Water Research*, 2016, **95**: 319-329.
- [11] 戴娟, 彭永臻, 王晓霞, 等. 不同厌氧时间对富集聚磷菌的 SNDPR 系统处理性能的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 92-99.
Dai X, Peng Y Z, Wang X X, *et al.* Effect of different anaerobic time on the nutrient removal in simultaneous nitrification-denitrification and phosphorus removal (SNDPR) systems enriched with phosphorus accumulating organisms [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 92-99.
- [12] Erdal U G, Erdal Z K, Randall C W. The competition between PAOs (phosphorus accumulating organisms) and GAOs (glycogen accumulating organisms) in EBPR (enhanced biological phosphorus removal) systems at different temperatures and the effects on system performance [J]. *Water Science and Technology*, 2003, **47**(11): 1-8.
- [13] Whang L M, Park J K. Competition between polyphosphate-and glycogen-accumulating organisms in enhanced-biological-phosphorus-removal systems; effect of temperature and sludge age [J]. *Water Environment Research*, 2006, **78**(1): 4-11.
- [14] Münch E V, Lant P, Keller J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors [J]. *Water Research*, 1996, **30**(2): 277-284.
- [15] 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.
- [16] 蒋轶锋, 郑建军, 王宝贞, 等. O_2 、 NO_3^- 、 NO_2^- 为电子受体的生物除磷比较[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 421-426.
Jiang Y F, Zheng J J, Wang B Z, *et al.* Comparison of biological phosphorus removal between different systems using O_2 , NO_3^- and NO_2^- as electron acceptors [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(2): 421-426.
- [17] 马娟, 李璐, 俞小军, 等. FNA 对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3786-3793.
Ma J, Li L, Yu X J, *et al.* Long-term inhibition of FNA on aerobic phosphate uptake and variation of phosphorus uptake properties of the sludge [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3786-3793.
- [18] 鲍林林, 李相昆, 李冬, 等. 亚硝酸盐氮对生物除磷系统的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, **42**(12): 1907-1910.
Bao L L, Li X K, Li D, *et al.* Nitrite effect on biological phosphorus removal process [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, **42**(12): 1907-1910.
- [19] 黄荣新, 李冬, 张杰, 等. 电子受体亚硝酸氮在反硝化除磷过程中的作用 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(7): 1141-1144.
Huang R X, Li D, Zhang J, *et al.* The effect of nitrite as electron acceptor on the denitrifying phosphorus removal process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(7): 1141-1144.
- [20] 康婷婷, 王亮, 何洋洋, 等. 亚硝酸型反硝化除磷工艺特性及其应用[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1705-1714.
Kang T T, W L, He Y Y, *et al.* The performance of DPAO using nitrite as electron acceptor and its practical application [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1705-1714.
- [21] Mosquera-Corral A, De Kreuk M K, Heijnen J J, *et al.* Effects of oxygen concentration on N-removal in an aerobic granular sludge reactor [J]. *Water Research*, 2005, **39**(12): 2676-2686.
- [22] Liu Y Q, Tay J H. Variable aeration in sequencing batch reactor with aerobic granular sludge [J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, **124**(2): 338-346.
- [23] He Q L, Chen L, Zhang S J, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in aerobic granular sequencing batch reactors with high aeration intensity: impact of aeration time [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **263**: 214-222.
- [24] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [25] 李定昌, 王琦, 高景峰, 等. 不同粒径成熟好氧颗粒污泥 EPS 的三维荧光光谱特性 [J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(7): 26-31.
Li D C, Wang Q, Gao J F, *et al.* Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of Extracellular Polymeric Substances of mature aerobic granular sludge with different particle sizes [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(7): 26-31.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. (1005)