

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

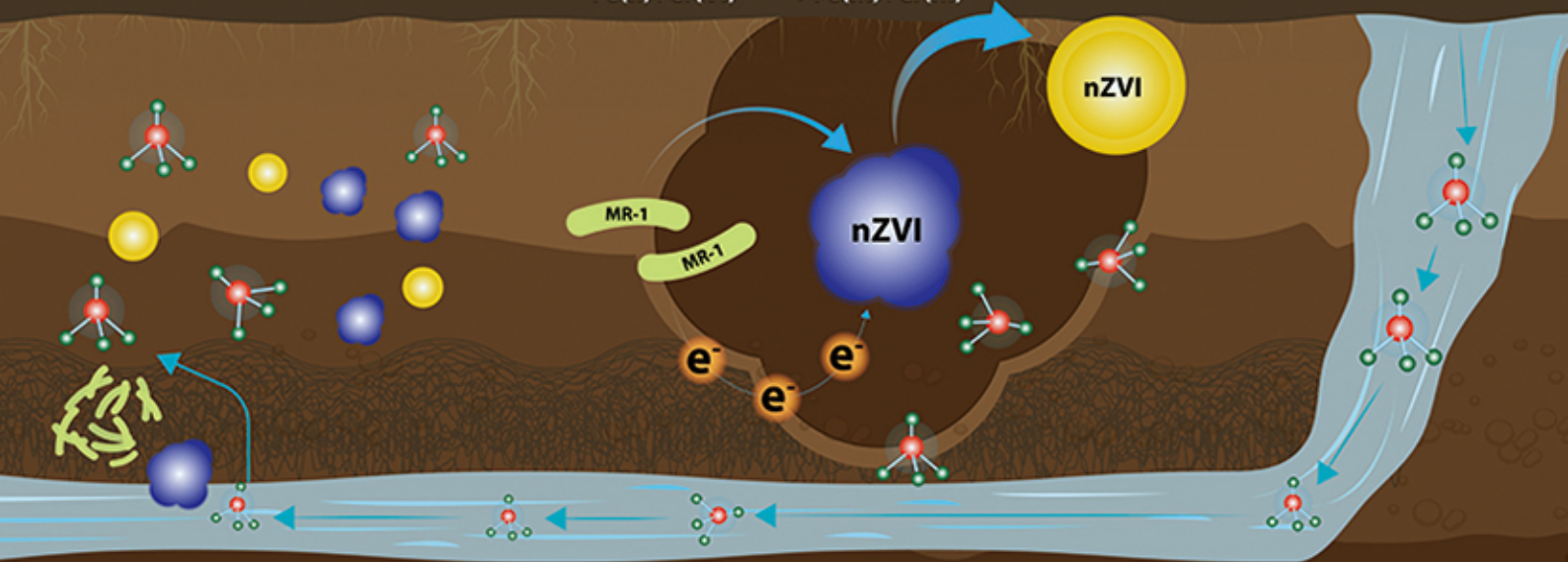
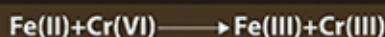
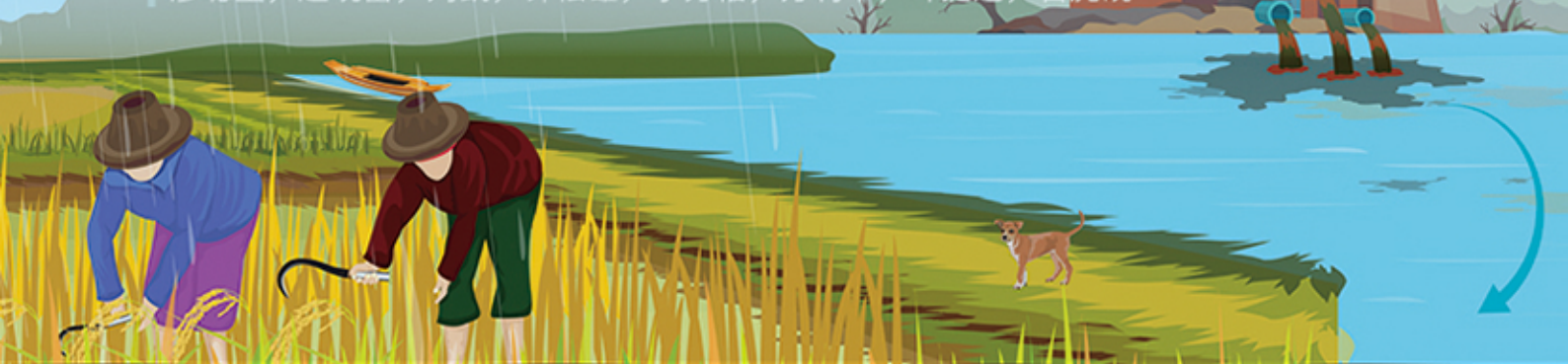
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (<i>Scenedesmus obliquus</i>) 生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿康伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N ₂ O 排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载 NH ₄ ⁺ -N 生物炭对土壤 N ₂ O-N 排放和 NH ₃ -N 挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)	

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行

王文琪¹, 李冬^{1*}, 高鑫¹, 张杰^{1,2}

(1. 北京工业大学城市建设学部, 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: 采用生活污水接种人工配水下成熟短程硝化反硝化除磷颗粒, 通过不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化调控短程硝化反硝化除磷系统运行. 结果表明, 调控好氧/缺氧时长联合分区排泥可实现系统的稳定运行. 后期稳定期出水 COD 浓度在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 出水 TN 浓度低于 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率达 83% 左右并保持平稳, 出水 P 浓度均在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 平均去除率为 93.72%. 同时, 分区排泥 (70% 顶部污泥和 30% 底部污泥) 可作为筛选微生物的途径, 维持了良好的亚硝化和除磷性能, 使粒径分布更为集中, 并保证氨氧化菌 (ammonia oxidizing bacteria, AOB) 和反硝化聚磷菌 (denitrifying phosphate accumulating organisms, DPAOs) 的生长优势. 缺氧时长的增加提高了缺氧异养菌的生长速率, 使得缺氧异养菌分泌出更多的 EPS, 确保了颗粒污泥性状的改善和后续维持稳定.

关键词: 好氧/缺氧时长; 分区排泥; 生活污水; 联合优化; 短程硝化反硝化除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4406-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202102182

Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage

WANG Wen-qi¹, LI Dong^{1*}, GAO Xin¹, ZHANG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Faculty of Architecture, Civil and Transportation 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: In this study, domestic sewage was used to inoculate mature short-cut nitrification denitrifying phosphorus removal particles, which were cultivated and matured under artificial water. The operation of the short-cut nitrification denitrifying phosphorus removal system was optimized using different aerobic/anoxic durations combined with zoned sludge discharge. The results showed that regulating the aerobic/anoxic duration, in combination with zoned sludge discharge, can realize the stable operation of the system. In the later stable period, the effluent COD concentration was below $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the effluent TN concentration was below $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the TN removal rate reached about 83% and remained stable, the effluent P concentration was below $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the average P removal rate was 93.72%. At the same time, zoned sludge discharge (70% top sludge and 30% bottom sludge) can be used to screen out microorganisms, maintain good nitrosation and phosphorus removal performance, limit the particle size distribution, and ensure the growth advantages of AOB and DPAOs. Increases in the anoxic duration improved the growth rate of anoxic heterotrophic bacteria, causing them to secrete more EPS and ensuring granular sludge improvements and continued stability.

Key words: aerobic/anoxic duration; zoned sludge discharge; domestic sewage; joint optimization; short-cut nitrification denitrifying phosphorus removal

短程硝化反硝化除磷工艺因其在节约碳源和能耗方面的优势,被认为是具有可持续发展前景的污水处理技术之一^[1,2]. 近年来,不少研究者开展了相关短程硝化反硝化除磷工艺的启动及运行研究^[3-5],如何对此工艺进行优化和调控,使好氧亚硝化-缺氧吸磷相互协同平衡,以实现高效稳定的运行,是该工艺实际应用中的难点. 实现稳定运行的关键有两点:一是保证氨氧化反应与反硝化吸磷的平衡;二是抑制亚硝酸盐氧化菌 (nitrite oxidizing bacteria, NOB) 的活性,维持短程硝化的稳定.

不同的好氧/缺氧时长下,微生物与底物的接触

时间以及传质过程不同. 好氧时长过高会导致磷酸盐在好氧段就被吸收完全,缺氧吸磷缺少底物 P,同时积累的 NO_2^- 进入缺氧段无法反应完全,出现抑制作用和影响厌氧释磷^[6],而缺氧时长过高则会导致反硝化吸磷的基质匮乏,出现缺氧释磷并进入内源呼吸阶段,消耗过多体内储能物质,微生物活性下

收稿日期: 2021-02-27; 修订日期: 2021-03-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07601-001); 北京高校卓越青年科学家计划项目 (BJJWZYJH01201910005019)

作者简介: 王文琪 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水质科学与水环境恢复技术, E-mail: wangwq0227@163.com

* 通信作者, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

降^[7]. 故合理调控好氧/缺氧时长有利于氨氧化与反硝化吸磷的平衡. 此外, 排泥方式的不同则会引起微生物种群的迁移和活性变化, 不同功能菌群的活性和数量决定了系统的处理效果. 研究表明 NOB 倾向生长在好氧区所占体积比例较高的小粒径颗粒中, 通过排出污泥床顶部污泥, 有望改善亚硝化性能^[8], 同时也有研究指出污泥床底部聚集着大量老化污泥, 尤其对于富含聚磷菌的颗粒污泥来说, 只从顶部排泥会导致底部大颗粒的污泥龄过高, 污泥产率降低, 进一步限制了磷的去除^[9]. 故通过颗粒污泥内部结构不同及粒径差异等因素造成的颗粒沉降速率不同来分区排泥, 是筛选特定微生物种群的一种有效途径. 综上所述, 合理调控好氧/缺氧时长联合分区排泥有利于实现系统稳定运行.

在进水水质由人工配水转为实际生活污水条件下, 着手于好氧/缺氧时长联合分区排泥的调控, 考察系统去除性能、污泥特性及 EPS 变化的综合影响, 以期为实现生活污水下短程硝化反硝化除磷工

艺优化提供实验依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方法

本实验采用 1 组有机玻璃制成的 SBR 反应器, 其有效容积 6 L, 换水比 2/3. 每天运行 4 个周期, 每周周期 360 min, 其中进水 5 min, 沉淀 2 min, 排水 3 min. 实验具体参数见表 1. 分区排泥 (70% 顶部排泥和 30% 底部排泥) 采取在 SBR 周期末的沉降阶段排泥, 在沉降过程中因沉降速率的差异造成颗粒沿沉降方向的分离, 在沉降开始后沉降速率慢的顶部污泥和沉降速率快的底部污泥被排出反应器, 控制污泥龄为 30 d.

1.2 接种污泥与实验用水

接种污泥是配水培养的具有良好性能的短程硝化反硝化除磷颗粒污泥, 初始污泥浓度为 3 400 mg·L⁻¹, 实验用水为北京某大学家属区化粪池实际生活污水, 其具体水质指标如表 2.

表 1 反应器运行工况

Table 1 Operational conditions of the reactor

阶段	时间/d	厌氧时长 /min	好氧时长 /min	缺氧时长 /min	曝停时间 (好氧: 缺氧)/min	曝停频率 /次	曝气量 /L·(h·L) ⁻¹
I	1~35	110	140	100	35:25	4	3.5
II	36~70	110	120	120	30:30	4	3.5
III	71~120	110	100	140	25:35	4	3.5

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	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P /mg·L ⁻¹	pH
数值	150~300	50~60	<1	0~2	4~8	7.0~8.0

1.3 分析项目与检测方法

NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法; NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法; NO₃⁻-N 采用麝香草酚紫外分光光度法; COD 和 TP 的测定采用 5B-3B 型 COD 多参数快速测定仪, 每两天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^[10]. 污泥中胞外聚合物 (extracellular polymeric substance, EPS) 的提取步骤: 取 30 mL 泥水混合物, 常温下 4 000g 离心 10 min, 去掉上清液后加入磷酸盐缓冲液 (PBS) 恢复原体积至 30 mL. 常温下 4 000g 离心 15 min, 去掉上清液后用 PBS 恢复至 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. 待样品冷却至接近室温时, 4℃ 下 20 000g 离心 20 min. 多糖测定采用 Lowry 法, 蛋白质测定采用葱酮硫酸法^[11,12].

三维荧光 E_x (激发光谱) 和 E_m (发射光谱) 扫描范围均为 200~600 nm, 激发/发射波长间隔 10 nm, 扫描速度 15 000 nm·min⁻¹. 其中 X 轴代表 E_m 发射波长, Y 轴代表 E_x 激发波长, 等高线颜色深浅反映 EPS 样品的荧光强度.

1.4 批次实验

取沉降开始阶段沉降速率慢的顶部污泥和沉降速率快的底部污泥, 分别对其进行烧杯批次实验研究. 通过 AOB 和 NOB 活性来反映顶部污泥和底部污泥中 AOB 和 NOB 分布的差异性, 其活性可分别通过比氨氧化速率 (SAOR) 和比亚硝酸盐氧化速率 (SNOR) 来表示. 分别加入 NH₄Cl 和 NaNO₂, 使 NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 初始浓度为 50 mg·L⁻¹, 调节 pH 为 7.5±0.1, DO 控制在 3.0 mg·L⁻¹. 每隔 30 min 取样, 以浓度不再变化终止. 通过碳源利用效率 (以 P/COD 计) 来反映顶部污泥和底部污泥中 DPAOs

对有机物利用率的差异性,加入丙酸钠,使 COD 浓度为 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,保持厌氧环境,在碳源充足的条件下充分释磷,每 30 min 取样,直至释磷达到最大值时。

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 和 TP 去除性能

图 1 分别为不同阶段下 COD 和 TP 的去除情况,可从阶段 I 看出进水水质转为实际生活污水时, COD 和 TP 的去除都出现了一定程度的波动,尤其 COD 去除波动更为剧烈。在初始时出水 COD 浓度达到了 $114.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 去除率仅为 49.56%,这与人工配水下 COD 易去除相反,可见实际生活污水成分复杂,难降解有机物增多,虽进水 COD 浓度在 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,但其 BOD 浓度低,可生化性差。随着系统的运行,出水 COD 浓度逐渐降低,第 32d 时才降至 $45.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,符合城镇污

水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)中的一级 A 标准。阶段 II 和 III 对 COD 的去除保持良好性能,进水 COD 虽有上下波动,但出水 COD 浓度均在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,阶段 III 去除率维持在 85% 左右,此时系统已较适应实际污水冲击负荷变化。大部分 COD 在厌氧段被消耗,作为内碳源用于除磷,因此厌氧 COD 和厌氧释磷密切相关,从图 1 中看出阶段 III 厌氧 COD 浓度和出水 COD 浓度相接近,有充足的内碳源,故其厌氧释磷量也维持在较高水平,最高达 $39.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相较于 COD, P 的去除则较为良好。随着缺氧时长的增加,亚硝酸盐为电子受体的反硝化除磷进一步得到充分反应,避免了残留 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 进入厌氧争夺碳源反硝化从而削弱聚磷菌储存内碳源,实现良好的交替循环。P 的去除率随着阶段的进程逐渐趋于稳定,这也说明了随着好氧/缺氧时长的改变, DPAOs 活性也在逐步增长,除磷效果渐好并稳定,阶段 III 出水 P 浓度均在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,平均去除率达 93.72%。

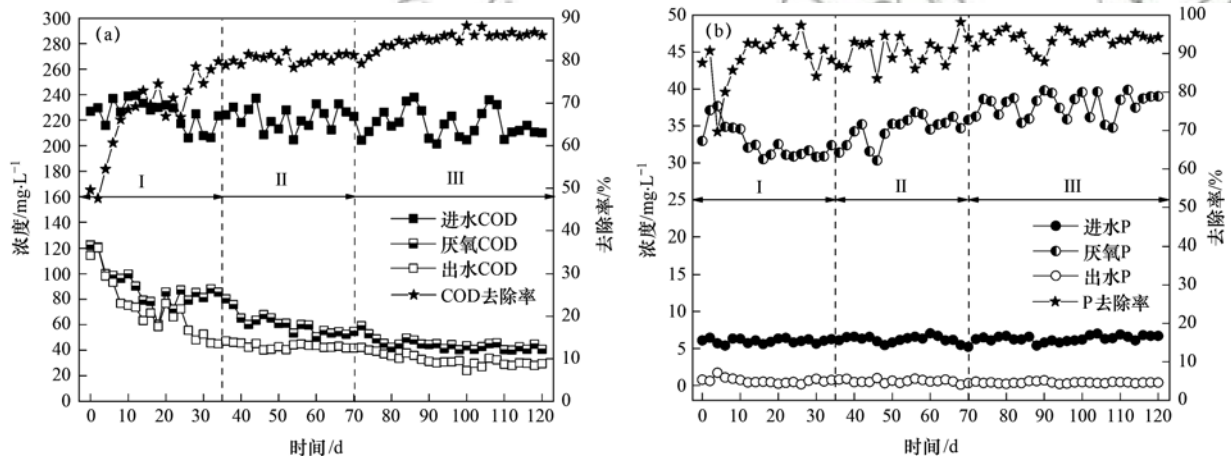


图 1 不同阶段下 COD 和 TP 变化

Fig. 1 Variation of COD and TP during different stages

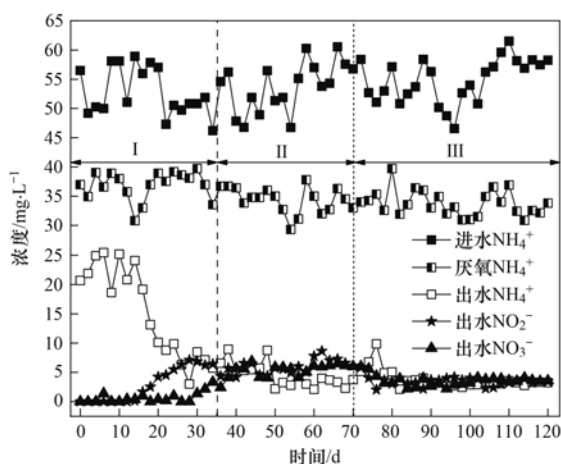
2.1.2 脱氮性能

图 2(a) 为系统不同阶段下进出水氮元素转化,图 2(b) 则为不同阶段下 TN 去除率和氨氧化率 (ammonia oxidation rate, AOR) 的变化。由于生活污水中含有较高且波动的氨氮,故阶段 I 先好氧时长大于缺氧时长,实现氨氧化菌的富集,使氨氮能够反应完全。在好氧/缺氧时长联合分区排泥的控制下,阶段 I 的 AOR 由初始的 63.39% 逐渐升高至 87.60%,此后 AOR 一直维持在高水平,阶段 III 的 AOR 平均可达 93.12%。在总时长不变下,阶段 II 延长缺氧时长和缩短好氧时长,使二者相等,此时更多氨氮被转化为亚硝氮和硝氮,出水 NO_2^- 浓度最高达 $8.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,缺氧段无法反应完全,导致 TN 去除率难以提高,故即使阶段 II 的 AOR 平均可达 93.39%,

但其 TN 平均去除率仍只在 70.92%。因此若想获得较高的脱氮效率,其首先在于调控好氧/缺氧时长,使氨氧化反应和反硝化除磷能够均衡进行,生成的 NO_2^- 能够及时且适量作电子受体进行反硝化除磷。在氨转化完全的基础上,阶段 III 进一步延长缺氧时长和缩短好氧时长,创造良好的缺氧环境,总时长仍保持不变。此阶段出水 TN 浓度在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,低于我国城镇污水排放一级 A 标准 ($15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), TN 去除率也升高至 83% 左右并保持平稳。

2.2 颗粒污泥物理特性变化

污泥浓度、 f (MLVSS/MLSS) 和 SVI 都是能反映颗粒污泥稳定的重要参数,其不同阶段下的变化如图 3 所示。污泥初始浓度为 $3400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, f 值为 0.88, SVI 为 $35.29 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,具有良好的生物量和

图2 不同阶段下 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、TN 和 AOR 变化Fig. 2 Variation of NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , TN, and AOR during different stages

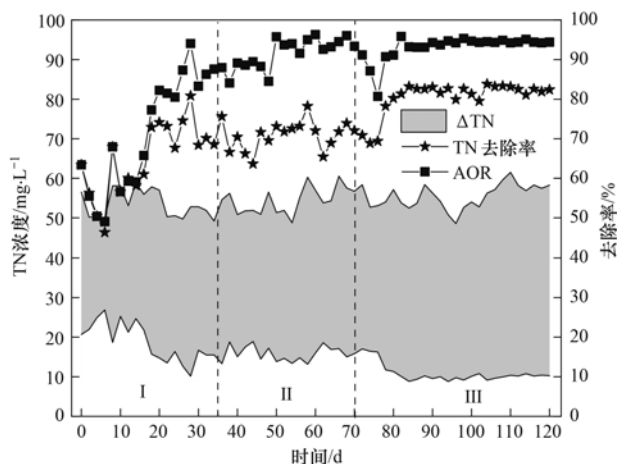
沉降性能. 进水水质从人工配水转为实际生活污水后, 阶段 I 污泥浓度出现了较大幅度的下降, f 值也随之降至 0.72, SVI 值升至 $47.9 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 此阶段污泥性能由于水质复杂后出现了恶化. 通过好氧/缺氧时长联合分区排泥调控后, 阶段 II 的 f 值略有上升, SVI 值回降至 $37.71 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 生物量有所增长, 污泥沉降性能恢复. 阶段 III 进一步延长缺氧时长后, 促进了缺氧异养菌的生长并以其为核心, MLVSS 增势明显, f 值最高可达 0.87, SVI 值保持在 $35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右, 颗粒稳定, 沉降性能良好.

污泥随运行时间延长的外观变化如图 4 所示. 接种污泥为黄色, 表面光滑, 呈椭球状结构. 在实际生活污水的基质条件下, 污泥颜色逐渐变为深黄色, 第 30 d 在显微镜下可观察到颗粒污泥表面有一层细绒毛出现, 阶段 I 厌氧段 COD 降解不完全, 过多的 COD 进入好氧段和缺氧段引起了异养菌增殖^[13], 影响沉降性. 第 100 d 时已恢复并形成密实完整、边界清晰的褐色颗粒污泥.

2.3 分区排泥对系统的影响

2.3.1 颗粒粒径

分别取沉降开始阶段沉降速率慢的顶部污泥和

图3 不同阶段下 MLSS、MLVSS、 f 和 SVI 的变化Fig. 3 Variation of MLSS, MLVSS, f , and SVI during different phases

沉降速率快的底部污泥, 以及运行阶段搅拌均匀的混合污泥, 对这 3 种污泥进行粒径测量, 测量结果如表 3 和图 5 所示. 显示底部污泥的粒径最大, 平均粒径为 $1183 \mu\text{m}$, 且其粒径在 $500 \mu\text{m}$ 以下的污泥分布为 0, 说明底部污泥颗粒大且集中, 没有污泥解体碎片. Voleke 等^[14]的研究, 表明颗粒污泥粒径增大会造成表面负荷增大, 且随粒径的增大颗粒内部氧渗透深度也随之减小, 颗粒污泥氧传质限制的特殊结



(a) 接种污泥; (b) 第 30 d; (c) 第 100 d

图4 颗粒污泥随时间变化的显微镜照片

Fig. 4 Optical microscopy images of granular sludge over time

构进一步深化,造成缺氧区体积的增大和好氧区体积的下降.因此大颗粒缺氧区体积的增大对富集反硝化聚磷菌提供了良好的生长环境,Winkler 等^[15]的研究利用 FISH 观察到微生物在污泥床存在高度分离,聚糖菌(glycogen accumulating organisms, GAOs)在顶部污泥中占主导地位,而污泥床底部的颗粒以聚磷菌为主.若不对底部大颗粒进行排泥,则会聚集着大量老化污泥,无机质含量高,尤其对于富含反硝化聚磷菌的颗粒污泥来说,污泥产率降低,进一步限制了 P 的去除.相反,顶部污泥的粒径分布情况则存在两个峰值,分别在 100 μm 和 1 000 μm 左右处,粒径差异较大,小于 250 μm 的颗粒多达 16.01%,平均粒径为 943.94 μm ,颗粒相对较小.颗粒污泥中 AOB 优先占用外层,NOB 则在次外层毗邻 AOB 生长^[16],而小颗粒内部氧渗透深度增加,因此在与 AOB 竞争 O_2 中,NOB 会倾向于生长在小颗粒中并占据优势.在短程硝化反硝化除磷系统中,除需考虑除磷效果外,同时还需考虑短程硝化的稳定性,通过排出顶部污泥,可淘洗 NOB,维持污泥短程硝化性能.

从搅拌均匀的混合污泥粒径来看,其小颗粒所占体积分数较小,粒径 500 μm 以下的污泥分布仅为 3.07%,因此若在运行期间内排出混合污泥,则不能较为准确地淘洗出 NOB 和老化含 P 污泥.故本实验采取分区排泥,使粒径分布更为集中,完整度更高,同时考虑到 AOB 和反硝化聚磷菌不同的世代周期,即排出 70% 的顶部污泥和 30% 的底部污泥,保证反硝化聚磷菌和 AOB 的生长优势.

表 3 不同区间颗粒粒径范围内体积分数分布情况/%

Table 3 Distribution of volume percentage in particle size range at different intervals/%

粒径范围/ μm	顶部污泥	底部污泥	混合污泥
<250	16.01	0	2.45
250~500	0.2	0	0.62
500~1 000	33.76	31.19	42.57
>1 000	50.03	68.81	54.36

2.3.2 功能菌活性

为进一步地探究顶部污泥和底部污泥分布菌群的不同,分别对其进行厌氧释磷、氨氧化和亚硝酸盐氧化的批次实验研究,结果如图 6 所示.可以看出,顶部污泥的碳源利用效率(以 P/COD 计)为 0.172 $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 低于底部污泥的碳源利用效率 0.198 $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$,碳源利用效率同时可指示 DPAOs 活性,这表明底部污泥中 DPAOs 对有机物利用率是明显高于顶部污泥的,其活性更好,也间接说明底部大颗粒确实富含更多 DPAOs,吸收过量 P 再转化为颗粒

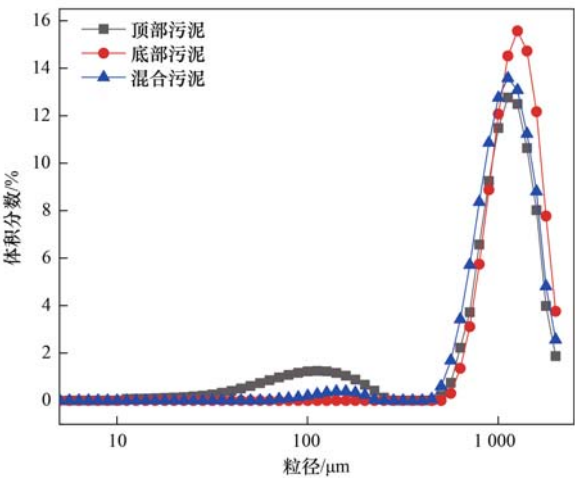


图 5 颗粒污泥粒径分布情况

Fig. 5 Particle size distribution of granular sludge

内部增殖,污泥中高磷含量也能提高污泥沉降能力,促进颗粒污泥的形成^[17],因此颗粒粒径大,密度强,沉降速率快.生物除磷中依靠排出富含磷酸盐颗粒污泥从而达到良好的除磷效果,若不针对底部污泥进行排放,则其就会聚集大量无机质高且老化的污泥,同时考虑到除磷仍需依靠反硝化聚磷菌,不宜排出太多从而保证良好的去除效果.但从 COD 消耗量来看,顶部污泥消耗了更多的 COD,分析原因可能是上文提及的 Winkler 等^[15]的研究,表明顶部污泥是与 DPAOs 竞争碳源的 GAOs 占主导,GAOs 消耗碳源但不能实现磷的去除^[18],从而造成 DPAOs 吸收外碳源不足,除磷效果变差.故通过排顶层污泥还可淘洗 GAOs,避免对碳源的争夺.

虽然接种污泥具有良好的亚硝化性,但通入生活污水运行后其出水始终存在一定量的 NO_3^- ,说明颗粒内部有 NOB 的存活和生长,因此若不能及时将尚存的 NOB 淘洗出系统,则 NOB 会逐渐适应环境,获得生长优势,造成短程硝化性能的下降.反观 NOB 的活性,则是顶部污泥明显高于底部污泥,其 SNOR 分别为 2.58 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 1.63 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,再看 AOB 的活性,顶部污泥和底部污泥所得 SAOR 相差无几,底部污泥略占优势,故顶层污泥的排放显得尤为重要. AOB 和 NOB 因对 O_2 的竞争,在不同粒径颗粒中实现了富集和分离^[19].同时有研究表明除对 O_2 争夺的影响外,NOB 和其他微生物竞争底物 NO_2^- 也对其在颗粒分布中有重要影响^[20],本实验以 NO_2^- 为电子受体的反硝化聚磷菌在底部大颗粒中占据优势,NOB 不易获取 NO_2^- ,使得 NOB 在不同粒径颗粒中进一步分离.综上,分区排泥(70% 顶部污泥和 30% 底部污泥)可作为筛选微生物的途径,维持良好的亚硝化和除磷性能.

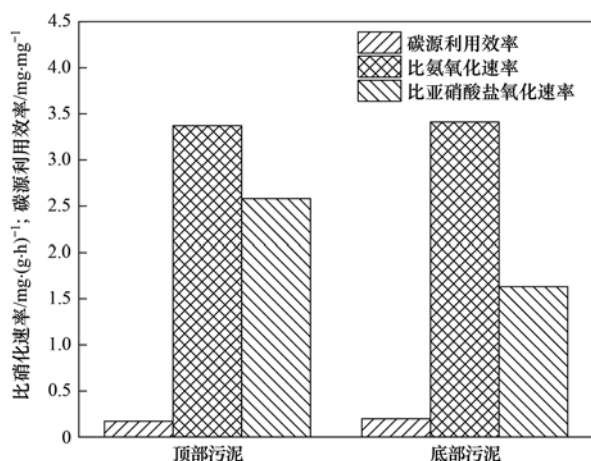


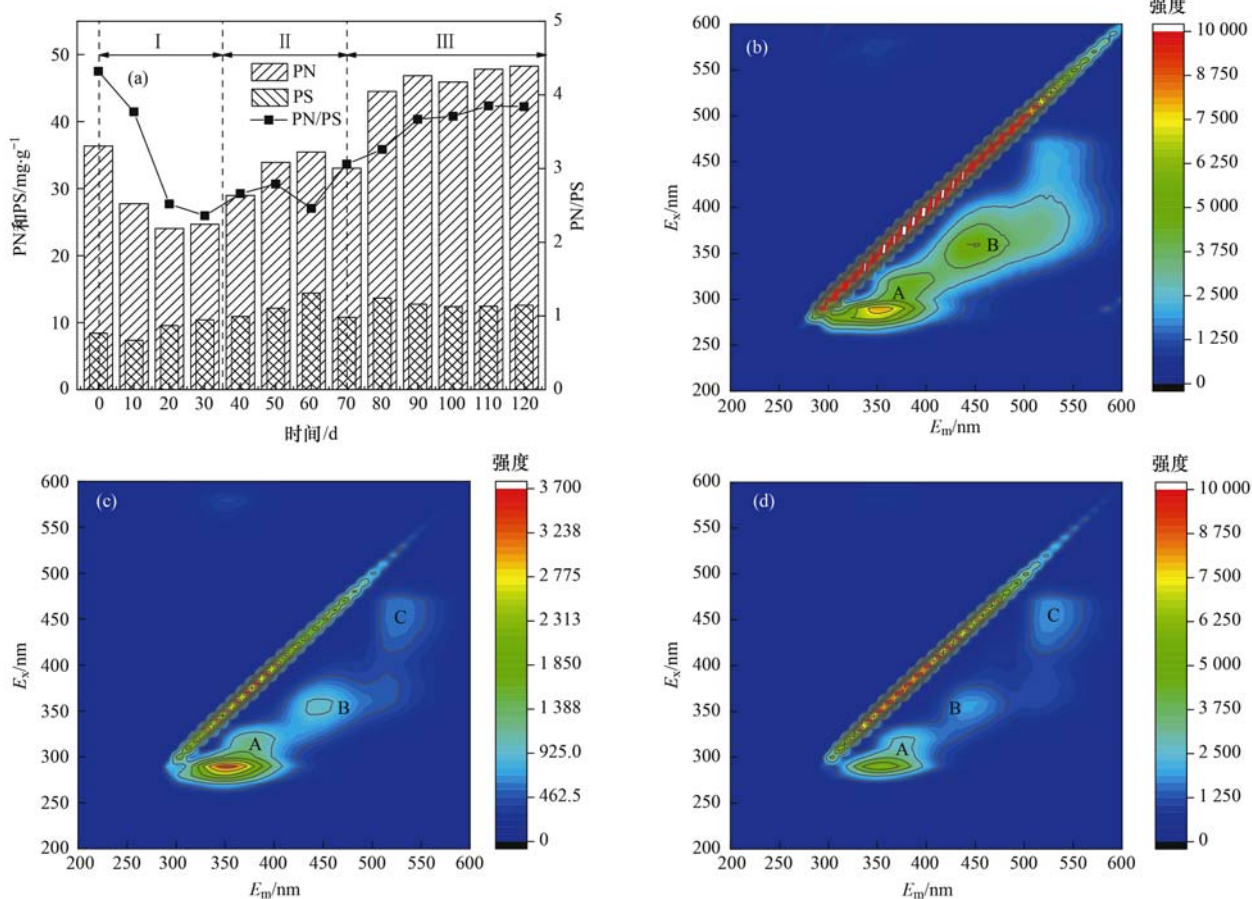
图6 不同区间颗粒污泥的功能菌活性

Fig. 6 Functional bacterial activity of granular sludge at different intervals

2.4 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,不同阶段下PN、PS和PN/PS的变化如图7(a)所示.在系统运行过程中PN和PS均发生了较大的波动,在阶段I通入生活污水后PN从初期的36.36 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 降低至24.7 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,PS含量变化则为上升

趋势.在不利的生存环境下微生物通过消耗大量胞外酶用以适应水质改变,造成PN含量降低,而微生物出于自我保护则会分泌更多的PS,从而使得颗粒保持稳定,不发生解体现象^[21, 22].阶段II逐渐适应后PN开始增加,大部分PN由疏水性氨基酸构成,疏水性增加可以增强细胞间的亲和力,使细胞更易聚集,形成致密稳定的颗粒结构使系统稳定运行^[23, 24].阶段III的PN增加至46.86 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 后保持相对稳定状态,PS没有发生明显变化,维持在12 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右.较长缺氧时间会提高缺氧异养菌的生长速率,使得缺氧异养菌分泌出更多的EPS^[25],故阶段III的PN含量最高.有研究表明PN/PS是反映颗粒稳定性的一个重要参数,同时也能间接反映出污泥沉降性能^[26],PN/PS值越大说明颗粒越稳定,污泥沉降性能越好.PN/PS值的总体趋势为先下降后上升,最终稳定在3.84.可从中看出阶段I由于环境和水质的改变,使得PN/PS值骤降,颗粒出现轻微解体,污泥沉降性能恶化.随着运行时间延长,阶段III的PN/PS值逐步上升并稳定,此时颗粒化程度高,颗粒污泥稳定,污泥沉降性能良好.



(a)EPS 变化,(b)接种污泥,(c)第30 d,(d)100 d

图7 运行过程中EPS变化和颗粒污泥三维荧光分析

Fig. 7 Analysis with 3D-EEM spectra of granular sludge and variation of EPS during operation

采用三维荧光光谱分析方法,通过光谱显示的特征荧光峰位置和荧光参数定性分析不同阶段下 EPS 组成的变化情况. 对接种污泥、第 30 d 和 100 d 的 EPS 样品进行 3D-EEM 荧光光谱分析,结果如图 7(b)~7(d)所示. 根据以往研究荧光峰的判定^[27],本系统颗粒污泥运行过程中主要包含 3 种峰,即色氨酸蛋白类峰 A, E_x/E_m 为 280~300 nm/330~370 nm,腐殖酸类峰 B, E_x/E_m 为 350~360 nm/430~460 nm,以及腐殖酸类峰 C, E_x/E_m 为 450~470 nm/520~540 nm. 荧光峰位置的相近说明 EPS 的主要物质和组成变化较小,而荧光强度发生了变化. 和上述 PN 结果相同,第 30 d 峰 A 荧光值大幅下降,蛋白类物质含量降低,经过运行方式的强化后,第 100 d 峰 A 荧光值增强明显从 3 436 升至 6 230,蛋白类物质含量上升. 腐殖酸会影响污泥絮凝,峰 B 的荧光强度的减弱有利于污泥沉降性能的恢复. 峰 C 的荧光强度在实际生活污水运行下明显增强,分析原因可能是实际生活污水中腐殖酸类物质含量多,且经系统处理后腐殖酸程度进一步增高,由微生物产生的腐殖酸类物质增多^[28].

3 结论

(1) 以实际生活污水为进水基质,调控好氧/缺氧时长联合分区排泥实现了短程硝化反硝化除磷颗粒系统的稳定运行. 在较长的好氧时长实现氨转化完全的基础下,缩短好氧时长并延长缺氧时长,使氨氧化反应和反硝化除磷达到动态平衡,提高了脱氮和除磷效率. 阶段Ⅲ出水 TN 浓度低于我国城镇污水排放一级 A 标准 ($15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), TN 去除率也升高至 83% 左右并保持平稳,出水 P 浓度均在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,平均去除率达 93.72%.

(2) 分区排泥 (70% 顶部污泥和 30% 底部污泥) 可作为筛选微生物的途径,维持良好的亚硝化和除磷性能. 其中顶部污泥粒径差异大,有较多小颗粒存在,富集了更多 NOB 和 GAOs; 而底部污泥老化且富含大量 DPAOs,颗粒大,沉速快. 故采取分区排泥,使粒径分布更为集中,完整度更高,并保证 AOB 和 DPAOs 的生长优势.

(3) 由于环境和水质的改变, PN/PS 值出现了较大的下降,污泥沉降性能恶化. 随着运行时间的延长,颗粒恢复稳定,污泥沉降性能良好,其中 EPS 的分泌起到了重要作用. 缺氧时长的增加提高了缺氧异养菌的生长速率,使得缺氧异养菌分泌出更多的 EPS 确保了颗粒污泥性状的改善和后续稳定维持.

参考文献:

[1] Li W, Zhang H Y, Sun H Z, *et al.* Influence of pH on short-cut

denitrifying phosphorus removal [J]. *Water Science and Engineering*, 2018, **11**(1): 17-22.

[2] Yuan C S, Wang B, Peng Y Z, *et al.* Enhanced nutrient removal of simultaneous partial nitrification, denitrification and phosphorus removal (SPNDPR) in a single-stage anaerobic/micro-aerobic sequencing batch reactor for treating real sewage with low carbon/nitrogen [J]. *Chemosphere*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127097.

[3] 缪新年,程诚,朱琳,等. 短程硝化和反硝化除磷耦合工艺研究进展[J]. *水处理技术*, 2020, **46**(12): 12-16, 24. Miao X N, Cheng C, Zhu L, *et al.* Research progress on the coupling process of short-cut nitrification and denitrification for phosphorus removal [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, **46**(12): 12-16, 24.

[4] 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.

[5] Zhang J H, Zhang Q, Li X Y, *et al.* Rapid start-up of partial nitrification and simultaneously phosphorus removal (PNSPR) granular sludge reactor treating low-strength domestic sewage [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **243**: 660-666.

[6] 宋姬晨,王淑莹,杨雄,等. 亚硝酸盐对 A^2O 系统脱氮除磷的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(9): 2231-2238. Song J C, Wang S Y, Yang X, *et al.* Effect of nitrite on nutrient removal in A^2O system [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(9): 2231-2238.

[7] 张建华,王淑莹,张森,等. 不同反应时间内碳源转化对反硝化除磷的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(3): 989-997. Zhang J H, Wang S Y, Zhang M, *et al.* Effect of conversion of internal carbon source on denitrifying phosphorus removal under different reaction time [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 989-997.

[8] 刘文如,阴方芳,丁玲玲,等. 选择性排泥改善颗粒污泥亚硝化性能的研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 396-402. Liu W R, Yin F F, Ding L L, *et al.* Improved nitrification performance by selective sludge discharge in aerobic granular sludge process [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 396-402.

[9] Zhu L, Yu Y W, Dai X, *et al.* Optimization of selective sludge discharge mode for enhancing the stability of aerobic granular sludge process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **217**: 442-446.

[10] 国家环境保护局. 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.

[11] Frølund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, **43**(4): 755-761.

[12] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.

[13] 李冬,刘博,王文琪,等. 污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5048-5056. Li D, Liu B, Wang W Q, *et al.* Effects of solid retention time on the phosphorus removal and nitrosation granules system [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5048-5056.

[14] Volcke E I P, Picioreanu C, De Baets B, *et al.* Effect of granule size on autotrophic nitrogen removal in a granular sludge reactor [J]. *Environmental Technology*, 2010, **31**(11): 1271-1280.

- [15] Winkler M K H, Bassin J P, Kleerebezem R, *et al.* Selective sludge removal in a segregated aerobic granular biomass system as a strategy to control PAO-GAO competition at high temperatures [J]. *Water Research*, 2011, **45**(11): 3291-3299.
- [16] 李冬, 刘博, 王文琪, 等. 除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 867-875.
- Li D, Liu B, Wang W Q, *et al.* Simultaneous short-cut nitrification-denitrification phosphorus removal granules induced by phosphorus removal granules [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 867-875.
- [17] Zhang M, Wang C, Peng Y Z, *et al.* Organic substrate transformation and sludge characteristics in the integrated anaerobic anoxic oxic-biological contact oxidation (A^2/O -BCO) system treating wastewater with low carbon/nitrogen ratio [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **283**: 47-57.
- [18] 韦佳敏, 刘文如, 程洁红, 等. 反硝化除磷的影响因素及聚磷菌与聚糖菌耦合新工艺的研究进展[J]. *化工进展*, 2020, **39**(11): 4608-4618.
- Wei J M, Liu W R, Cheng J H, *et al.* Influencing factors of denitrifying phosphorus removal and advance research on novel process of coupling PAOs and GAOs [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, **39**(11): 4608-4618.
- [19] Volcke E I P, Picioreanu C, De Baets B, *et al.* The granule size distribution in an anammox-based granular sludge reactor affects the conversion-implications for modeling [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 2012, **109**(7): 1629-1636.
- [20] Winkler M K H, Kleerebezem R, Kuenen J G, *et al.* Segregation of biomass in cyclic anaerobic/aerobic granular sludge allows the enrichment of anaerobic ammonium oxidizing bacteria at low temperatures [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(17): 7330-7337.
- [21] Lee D J, Chen Y Y, Show K Y, *et al.* Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 919-934.
- [22] 张杰, 李海玲, 李冬, 等. 梯度曝气 SBR 除磷亚硝化颗粒处理生活污水[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, **51**(8): 1-7.
- Zhang J, Li H L, Li D, *et al.* Domestic sewage treatment by partial nitrification and phosphorus removal granular sludge in gradient aerated SBR [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, **51**(8): 1-7.
- [23] 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 等. 厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5605-5611.
- Chen F M, Gu C W, Hu Y T, *et al.* Granular characteristics of anaerobic ammonia oxidation sludge during the recovery process [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5605-5611.
- [24] 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 等. 全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4653-4660.
- Qi Z K, Wang J F, Qian F Y, *et al.* Analysis of rapid start-up and mixed nutritional nitrogen removal performance of complete autotrophic granular sludge [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4653-4660.
- [25] 张杰, 劳会妹, 李冬, 等. 不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5097-5105.
- Zhang J, Lao H M, Li D, *et al.* Effect of different ratios of anaerobic time and aeration time on the operation of a continuous-flow reactor with partial nitrification granules [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5097-5105.
- [26] 张春晖, 鲁文静, 苏长罗, 等. Ni^{2+} 对好氧颗粒污泥系统性能的影响[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(11): 4721-4727.
- Zhang C H, Lu W J, Su C L, *et al.* Effect of Ni^{2+} on the performance of aerobic granular sludge system [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(11): 4721-4727.
- [27] 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.
- [28] Li D, Zhang S R, Li S, *et al.* Aerobic granular sludge operation and nutrients removal mechanism in a novel configuration reactor combined sequencing batch reactor and continuous-flow reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **292**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122024.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)