

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



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈革, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建国, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建国, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志辉, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

进水 C/P 对 SNEDPR 系统脱氮除磷性能的影响

甄建园, 于德爽, 王晓霞*, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明

(青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071)

摘要: 为了解不同进水 C/P 条件下同步硝化内源反硝化除磷(SNEDPR)的脱氮除磷特性, 以实际城市污水为处理对象, 采用延时厌氧(180 min)/低氧(溶解氧 0.5 ~ 1.0 mg·L⁻¹)运行的序批式反应器(SBR), 考察了进水 C/P(分别为 60、30、20、15、10)对系统 C、N、P 去除特性的影响。结果表明:适当降低进水 C/P(由 60 降至 30)有利于提高系统内 PAOs 竞争优势。当 C/P 为 30 时系统除磷性能最高, 厌氧段释磷速率(PRR)和好氧段吸磷速率(PUR, 以 P/MLSS 计, 下同)分别高达 3.5 mg·(g·h)⁻¹和 4.2 mg·(g·h)⁻¹, 出水 PO₄³⁻-P 浓度均低于 0.3 mg·L⁻¹, 且 P_{PAO, An} 高达 88.1%; 但进一步降低进水 C/P 至 10 时, PO₄³⁻-P 去除率和 P_{PAO, An} 分别由 38.1% 和 82.4% 降低至 3.1% 和 5.3%, PRR 和 PUR 分别仅为 0.2 mg·(g·h)⁻¹和 0.24 mg·(g·h)⁻¹, 系统表现出较差的除磷性能。降低 C/P 对系统 COD 去除性能没有影响, COD 去除率稳定在 85% 左右。此外, 当 C/P 由 60 降低至 20 时, 系统硝化性能变差, 表现为出水 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 浓度分别由 0 和 6.9 mg·L⁻¹ 升高至 5.1 mg·L⁻¹ 和 16.2 mg·L⁻¹; 而当 C/P 进一步降低至 10 时, 系统硝化性能得以恢复, 但亚硝积累特性遭到破坏, 表现为出水 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 浓度逐渐降低为 0, 但出水 NO₃⁻-N 浓度由 0.08 mg·L⁻¹ 升高至 14.1 mg·L⁻¹。SNED 率先由 62.1% 降低为 36.4% 后又逐渐提高至 56.4%。C/P 低于 15 时, 有利于提高 GAOs 的竞争优势, 且 C/P 由 20 降至 10 时系统脱氮性能得以恢复, 原因在于 GAOs 内源反硝化作用的增强。

关键词: C/P; 同步硝化内源反硝化(SNED); 反硝化除磷; 聚磷菌(PAOs); 反硝化聚糖菌(DGAOs)

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0343-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806006

Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System

ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia*, CHEN Guang-hui, DU Ye-qi, YUAN Meng-fei, DU Shi-ming

(School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: This study focuses on the nitrogen (N) and phosphorus (P) removal characteristics in a simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorus removal (SNEDPR) system at different influent C/P ratios. An extended anaerobic/low aerobic (dissolved oxygen: 0.5-1.0 mg·L⁻¹) sequencing batch reactor (SBR) fed with municipal sewage was studied by adjusting different C/P ratios (10, 15, 20, 30, and 60). The experimental results show that the proper reduction of the influent C/P ratio (C/P ratio reduced from 60 to 30) enhances the competitive advantages of phosphorus-accumulating organisms (PAOs) in the SNEDPR system. The highest phosphorus removal efficiency was achieved at a C/P ratio of 30, with the anaerobic phosphorus release rate (PRR) and aerobic phosphorus uptake rate (PUR, used as P/MLSS) reaching 3.5 mg·(g·h)⁻¹ and 4.2 mg·(g·h)⁻¹ respectively, and an average effluent PO₄³⁻-P concentration below 0.3 mg·L⁻¹. The percentage of PAOs contributing to the storage of endogenesis carbon (P_{PAO, An}) reached 88.1%. However, a poor phosphorus removal performance was observed with further reduction of the influent C/P ratios to 10; both the PO₄³⁻-P removal efficiency and P_{PAO, An} decreased from 38.1% and 82.4% to 3.1% and 5.3%, respectively. The PRR and PUR were 0.2 mg·(g·h)⁻¹ and 0.24 mg·(g·h)⁻¹, respectively. The COD removal performance was not affected by the decreasing influent C/P ratios; the average COD removal efficiency stabilized at 85%. In addition, the nitrification performance became worse with decreasing C/P ratios (from 60 to 20) because the effluent NH₄⁺-N and NO₂⁻-N concentrations increased from 0 and 6.9 mg·L⁻¹ to 5.1 mg·L⁻¹ and 16.2 mg·L⁻¹, respectively. The nitrification performance recovered when the C/P ratios further decreased to 10, but the nitrite accumulation was disturbed as both the effluent NH₄⁺-N and NO₂⁻-N concentrations reduced to 0. The effluent NO₃⁻-N concentration increased from 0.08 mg·L⁻¹ to 14.1 mg·L⁻¹. The SNED efficiency first decreased from 62.1% to 36.4% and then increased to 56.4%. The advantageous competition of glycogen accumulating organisms (GAOs) improved when the influent C/P ratio was lower than 15. The enhancement of the endogenous denitrification ability of GAOs might explain the recovery denitrification performance of the system when the influent C/P ratios decreased from 20 to 10.

Key words: C/P; simultaneous nitrification-endogenous denitrification (SNED); denitrification phosphorus removal; phosphorus accumulating organisms (PAOs); denitrification glycogen accumulating organisms (DGAOs)

收稿日期: 2018-06-01; 修订日期: 2018-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778304, 51708311); 山东省自然科学基金项目(ZR2017BEE002); 中国博士后科学基金项目(2017M612209)

作者简介: 甄建园(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: zhenjy12@126.com

* 通信作者, E-mail: elainewangxx@163.com

污水处理中氮磷的超标排放导致水体富营养化日益严重^[1], 有效地控制出水氮磷含量对城市污水处理至关重要。然而, 由于城市污水水质和水量的波动性等诸多因素的影响, 使得污水处理厂很难实现稳定的脱氮除磷目的^[2]。同步硝化反硝化 (SNEDPR) 系统^[3,4]指在厌氧/好氧交替运行的反应器中, 聚磷菌 (PAOs) 在厌氧条件下分解体内的多聚磷酸盐 (Poly-P) 和糖原 (Gly) 产生能量来吸收污水中的外碳源并将其储存为 PHAs, 此阶段伴随着 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的释放; 而在好氧条件下反硝化聚磷菌 (DPAOs) 利用细胞内储存的 PHAs 作为内碳源, 以 NO_3^- 、 NO_2^- 为电子受体进行缺氧反硝化 (除磷), 进而完成污水中磷的去除。在 SNEDPR-SBR 系统好氧段发生常规硝化、内源反硝化反应的同时, 存在反硝化除磷以及好氧除磷的过程, 可实现污水的同步脱氮除磷。此工艺解决了反硝化与除磷过程对碳源竞争的矛盾, 通过“一碳多用”的方式, 可实现污水的深度脱氮除磷, 且具有节省能耗、简化工艺流程的优势^[5]。

而有关污水生物脱氮除磷的影响因素的研究主要集中在碳源种类及浓度^[6~8]、溶解氧 (DO)、污泥龄 (SRT) 和 HRT 等^[9~13] 方面, 近年来, 有研究发现 C/P 是生物脱氮除磷关键因素之一^[14,15]。有学者发现^[16~19], 在富集 PAOs 的系统内除 PAOs 外, 还存在着—类代谢过程与 PAOs 类似的微生物聚糖菌 (GAOs)。厌氧段 GAOs 能吸收外界有机基质合成 PHA, 在好氧段能分解 PHA 产能, 并用于细胞内碳源的合成和细胞生长, 但其体内不存在磷代谢途径。有研究报道^[20,21], GAOs 的过量富集是导致富集 PAOs 系统崩溃的主要原因之一, 而系统进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 负荷会影响系统中两种菌类的竞争优势。目前, 有关 C/P 对同步硝化反硝化、反硝化除磷的影响鲜有报道, 有关 C/P 对 SBR 反应器处理城市污水 SNEDPR 系统脱氮除磷性能的影响尚未见报道。

本研究以实际城市污水为处理对象, 采用延时厌氧 (180min)/低氧 ($\text{DO}: 0.5 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 运行的 SBR 反应器, 通过固定 COD 进水浓度并调节进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的方式来考察不同进水 C/P 比对 SNEDPR 系统除磷特性和同步硝化反硝化脱氮特性的影响, 以期为 SNEDPR 系统在不同 C/P 比废水处理中的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行工序

本试验装置采用 SBR 反应器, 由有机玻璃制成, 总体积为 4 L, 有效容积为 3.2 L, 反应器侧面设有出水口, 以方便进水和取样, 磁力搅拌器进行搅拌。采用延时厌氧/低氧的运行方式, 每天运行 4 个周期, 每周期为 6 h, 运行的工序为: 延时厌氧搅拌 180 min (包括进水 5 min), 低氧曝气搅拌 150 min (包括排泥 5 min), 沉淀 20 min, 排水 5 min, 静置 5 min。反应器内污泥浓度维持在 $2.8 \sim 3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, SRT 为 15 d, 低氧段 DO 通过转子流量计控制在 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内。

1.2 试验用泥和试验水质

本试验用接种污泥取自青岛大学处理低 C/N 城市污水的厌氧/低氧同步硝化内源反硝化 SBR 反应器, 该污泥具有高效稳定的脱氮除磷和 (短程) 硝化 (内源) 反硝化性能, SNED 率和 TN 去除率平均达 89.1% 和 96.2%, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均低于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。接种后 SBR 内污泥浓度 (MLSS) 为 $3.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥沉降比 (SV%) 为 36%。

本文用水取自青岛市某污水处理厂粗格栅预处理后城市污水, 试验过程中通过投加固态无水乙酸钠为碳源调节其进水 COD 浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 同时以磷酸氢二钾配置 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 母液, 用以调配不同浓度的 C/P。试验过程中不同 C/P 条件下反应器进水水质情况见表 1。

表 1 不同 C/P 条件下进水水质

Table 1 Concentration of the substrates with different C/P ratios

C/P	运行时间/d	$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
60	1 ~ 15	63.71 ~ 65.26	0.01 ~ 0.06	0.36 ~ 2.82	5	300
30	16 ~ 31	63.93 ~ 67.15	0.01 ~ 0.04	0.09 ~ 2.87	10	300
15	32 ~ 47	65.13 ~ 69.55	0.01 ~ 0.04	0.70 ~ 2.06	20	300
10	48 ~ 64	58.91 ~ 70.50	0.01 ~ 0.04	0.63 ~ 2.28	30	300
5	65 ~ 80	61.84 ~ 68.52	0.01 ~ 0.05	0.52 ~ 2.64	60	300

1.3 检测项目及分析方法

水样经 $\phi 11 \text{ cm}$ 定性滤纸过滤后测定以下参数: COD 采用连华 5B-3ACOD 多元快速测定仪测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定^[22]; $\text{NO}_2^-\text{-N}$

采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用酚二磺酸分光光度法测定^[22]; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用钼锑抗分光光度法测定; pH 采用雷磁 PHB-3CpH 计测定; DO 采用雷磁 JPB-607 溶解氧测定仪测定; MLSS、

SVI 采用重量法测定. 此外, 分别在 SBR 运行第 13、29、44、62 和 79 d 测定一个典型运行周期内 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P 和 COD 浓度及 pH 值和 DO 浓度的变化情况.

1.4 SNED 率

SNED 率用以表示在 SNEDPR 系统好氧段的氮损失情况^[23], 其计算方法见式(1):

$$\text{SNED} = [1 - (\Delta\text{NO}_3^- + \Delta\text{NO}_2^-) / \Delta\text{NH}_4^+] \times 100\% \quad (1)$$

式中, ΔNH_4^+ 、 ΔNO_2^- 和 ΔNO_3^- 分别为系统低氧段 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度的变化量.

1.5 COD_{ins} 和 $P_{\text{PAOs, An}}$

SNEDPR 系统厌氧段有机碳源的消耗量 (COD_{AC}) 主要包括两部分: 一部分是通过异养菌的外源反硝化作用去除的 COD 量 (COD_{dn}), 见公式(2), 另一部分是通过 PAOs 和 GAOs 的作用储存为内碳源的 COD 量 (COD_{ins}), 而 COD_{ins} (%) 指 COD_{ins} 占 COD_{AC} 的质量分数^[23], 见公式(3). PAOs 在内碳源 PHA 储存过程中的贡献比例 ($P_{\text{PAOs, An}}$) 的计算方法见公式(4).

$$\text{COD}_{\text{dn}} (\%) = 1.71\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} + 2.86\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} \quad (2)$$

$$\text{COD}_{\text{ins}} = \frac{\text{COD}_{\text{AC}} - \text{COD}_{\text{dn}}}{\text{COD}_{\text{AC}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$0.5P_{\text{PAOs, An}} = \text{PRA} / \text{COD}_{\text{ins}} \quad (4)$$

式中, ΔNO_2^- -N 和 ΔNO_3^- -N 分别为系统厌氧段 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度的变化量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 1.71 和 2.86 分别为单位质量浓度的 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 被异养菌反硝化时所消耗的 COD 浓度 (质量比); PRA 为厌氧释磷量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 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 (摩尔比).

2 结果与讨论

2.1 不同进水 C/P 对 SNEDPR 系统除磷性能的影响

由图 1 可知, 当进水 C/P 由 60 降低为 30 时 (PO_4^{3-} -P 浓度由 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), PRA 和好氧吸磷量 (PUA) 分别由 $19.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $21.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $32.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且出水 PO_4^{3-} -P 浓度稳定在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, PO_4^{3-} -P 去除率保持在 100% 水平. 说明随着进水 C/P 降低, 系统内 PAOs 有足够的碳源进行厌氧释磷, 且进水 PO_4^{3-} -P 浓度的提高有利于增强聚磷菌 (PAOs) 在碳源利用的竞争优势. 这与王晓莲等^[24]得出的适当降低 C/P 有利于 PAOs 的富集, 系统会表现出更强的除磷性能的研究结果相一致.

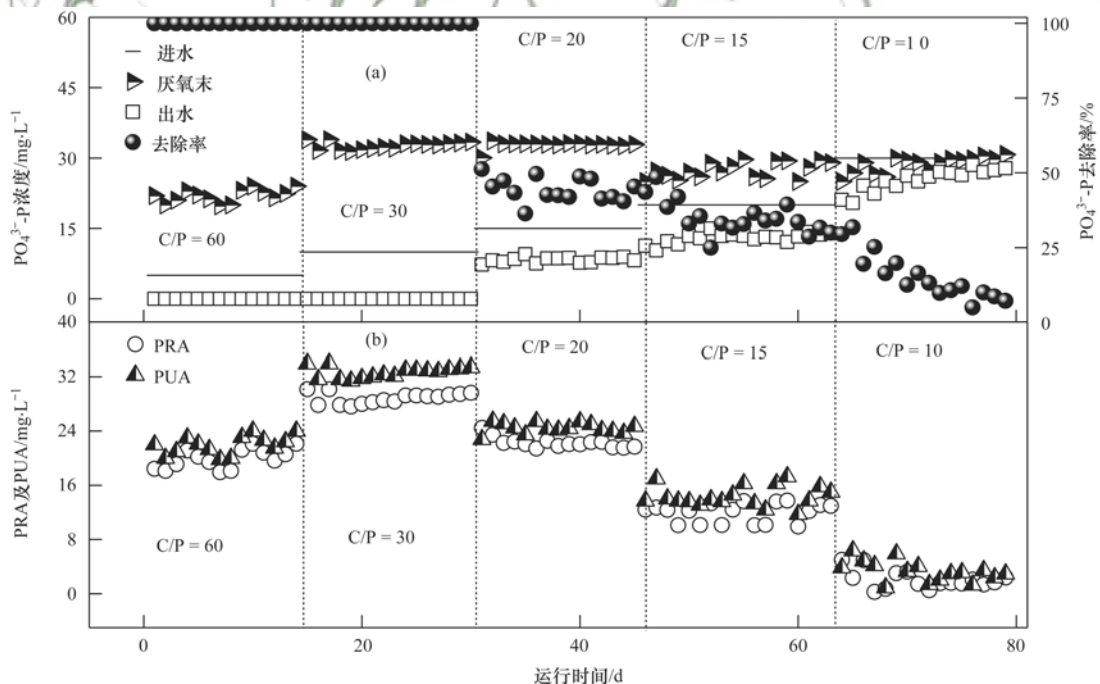


图 1 不同进水 C/P 条件下 SNEDPR 系统 PO_4^{3-} -P 浓度和去除率、PRA 及 PUA 变化情况

Fig. 1 Variations of the PO_4^{3-} -P concentration and removal efficiency, PRA and PUA, in the SNEDPR system at different influent C/P ratios

当进水 C/P 为 20 和 15 时 (PO_4^{3-} -P 浓度分别为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), PRA 和 PUA 分别降低至 $21.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $12.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 PO_4^{3-} -P 浓度高达

$14.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P 去除率由 51.3% 降低至 38.1%, 此时, 随着进水 PO_4^{3-} -P 浓度的提高, 系统的除磷性能开始下降. 可能是由于高磷负荷下 PAOs

的厌氧储存 PHA 性能受抑制引起的^[25], 因而其 PRA 和 PUA 均有所降低。

当进水 C/P 进一步降低至 10 时, PRA 和 PUA 分别仅为 $2.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度高达 $27.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率仅为 3.1%, 系统具有较差的除磷特性且好氧段出现释磷现象. 说明高浓度 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 会抑制 PAOs 储存 PHAs 的能力, 且 PAOs 厌氧段释磷量的持续降低会导致系统除磷性能的崩溃. 此外, 分析系统除磷性能变差的原因可能在于 C/P 比的降低使得随着 PAOs 在厌氧 COD 利用中竞争优势减弱, 使得 GAOs 等其它异养菌活性增强. 蒋涛等^[26]的研究发现 C/P 为 10 时, EBPR 系统中 GAOs 含量会增加而 PAOs 含量会减少, GAOs 会代替 PAOs 成为优势菌群, 进而导致系统的除磷性能的降低。

2.2 不同进水 C/P 对 SNEDPR 系统 COD 去除性能的影响

从图 2 可以看出, 当进水 C/P 为 60 时, 系统 COD 去除率平均为 75.7%, 其中厌氧末期和出水 COD 浓度平均分别为 $87.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $72.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD_{AC} 和好氧段消耗 COD (COD_{OC}) 浓度分别平均为 $70.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $14.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在厌氧段, 污水中的 COD 除一部分用于 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ 反硝化外, 大部分被 PAOs 和 GAOs 用于 PHAs 储存. 当进水 C/P 为 30 时, COD 去除率高达 81.8%, 厌氧末期和出水 COD 浓度分别降至 $56.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $54.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 COD_{AC} 高达 $94.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 而 COD_{OC} 仅为 $2.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据 2.1 节分析可知, PAOs 在 C/P 为 30 时 PRA 最高, 因此厌氧段 PAOs 消耗的 COD 也最多。

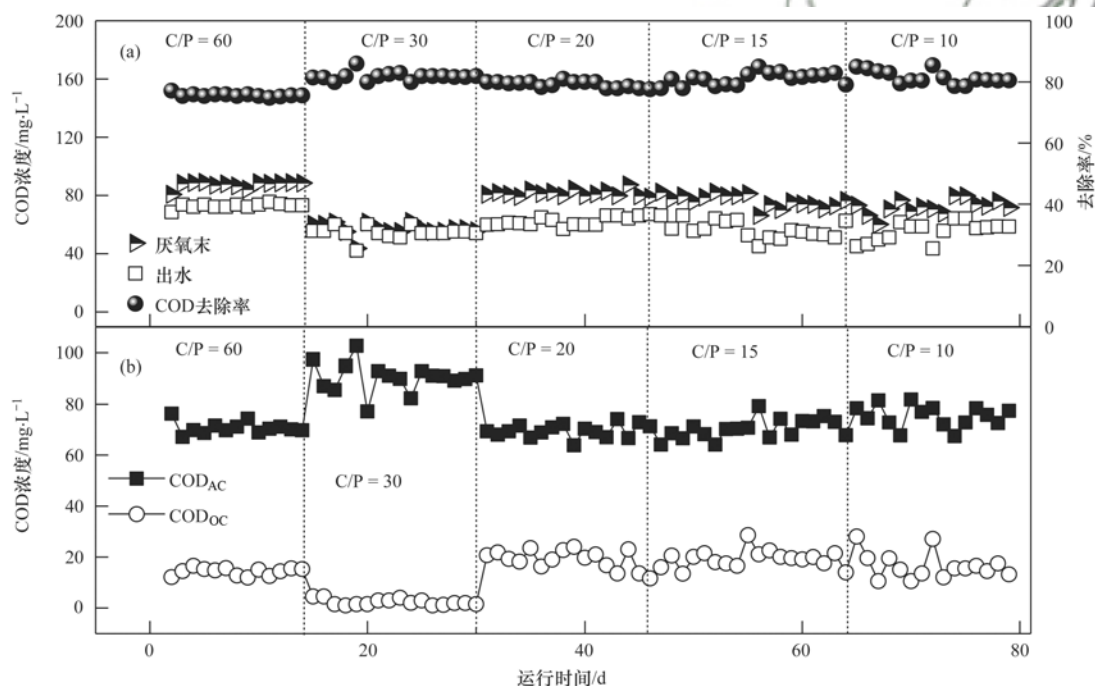


图 2 不同进水 C/P 条件下 SNEDPR 系统 COD 浓度和去除率及 COD_{AC} 、 COD_{OC} 变化情况

Fig. 2 Variations of the COD concentration and removal efficiency, COD_{AC} and COD_{OC} , in the SNEDPR system at different influent C/P ratios

当进水 C/P 为 20 时, COD 去除率下降至 79.1%, 厌氧末期 COD 浓度由 $55.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $87.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 COD 浓度高达 $71.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 同时, COD_{AC} 由 $89.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $63.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD_{OC} 由 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $23.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此时, 系统 COD_{OC} 所占比例由 2.1% 升高至 18.2%, 而 COD_{AC} 所占比例由 83.6% 降低至 46.7%. 分析原因: 由 2.1 节分析可知, 系统进水 COD 浓度不变 (进水 COD 浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 降低进水 C/P 时, PAOs 消耗的 COD 较 C/P 为 30 时有所降低, 系统 PRA 开始下降. 因此, PAOs 对 COD 的竞争优势下降, 使得系统厌氧末期存在 COD 剩余, 表现

为 COD_{AC} 的降低. 而在好氧段 COD_{OC} 升高的原因可能为系统厌氧末期剩余的可生物降解 COD 增多, 导致在好氧段 COD 继续进行消耗。

当进水 C/P 为 15 时, COD 去除率平均为 80.9%, 系统厌氧末期和初始 COD 浓度分别由 $82.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $67.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $70.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此时, COD_{AC} 所占比例由 43.7% 提高至 55.3%. 对比 COD 在厌氧末期的消耗以及去除率可知, C/P 为 15 时 COD_{AC} 大于其 C/P 为 20 时的值 ($79.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 63.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 分析原因主要是系统出水主要以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为主 (见 2.4 节), 且由 2.5 节知 GAOs 较 PAOs 在厌氧段 COD 去除中逐渐

占据优势.

当进水 C/P 为 10 时, 系统 COD 去除率平均为 81.3%, 厌氧末期和出水 COD 浓度分别为 $72.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $55.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此时, COD_{AC} 和 COD_{OC} 分别平均为 $74.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $16.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统厌氧段 COD 的去除主要是由 GAOs 的内碳源储存作用以及异养菌的全程反硝化作用实现, 而系统厌氧末剩余的可生物降解 COD 则在好氧段得以进一步去除. 对比不同 C/P 下 COD 去除率可知, 进水 C/P 的变化

几乎不会对系统 COD 的去除性能产生影响.

2.3 不同进水 C/P 对 SNEDPR 系统硝化性能的影响

从图 3 可以看出, 当进水 C/P 为 60 和 30 时, 系统具有较高的硝化性能, 表现为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为 100%. 由 2.1 节可知, 在 C/P 为 30 时, PRA 最高, 而此时好氧段末期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明系统好氧段 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除主要是通过缺氧(内源)反硝化实现的.

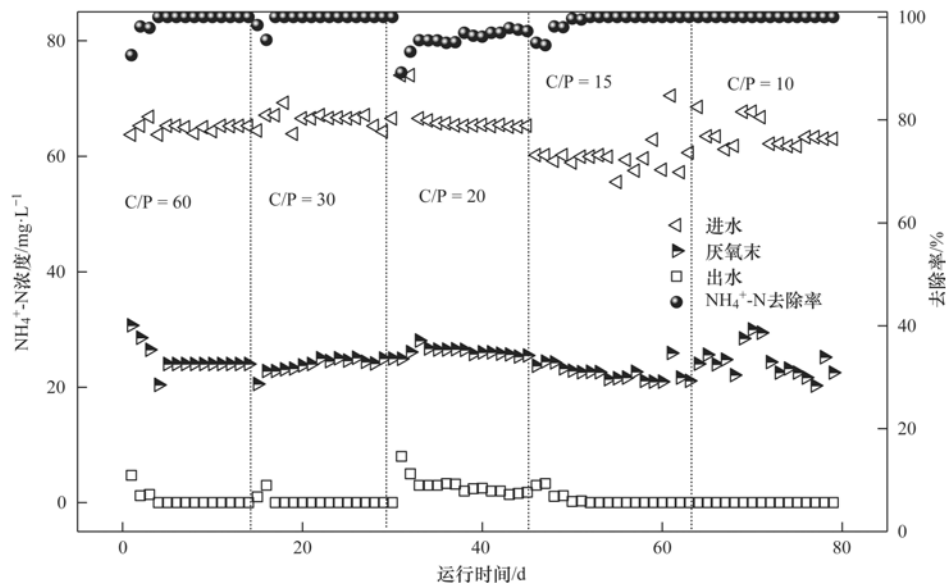


图 3 不同进水 C/P 条件下 SNEDPR 系统 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化情况

Fig. 3 Variations of the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentrations in the SNEDPR system at different influent C/P ratios

当 C/P 降低至 20, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率降低为 88.7%, 系统反应周期末存在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 积累, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 高达 $7.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由 2.1 节可知, C/P 为 20 时, 系统除磷性能开始降低, 同时 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 在反应器中开始积累且厌氧段末期 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度开始升高. 因此, 该 C/P 条件下系统硝化性能变差的原因可能在于好氧段 PAOs 和 AOB 存在对 DO 的竞争. 好氧吸磷与硝化反应的同时进行, 导致系统的硝化反应不完全.

当 C/P 降低至 15 时, 系统出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 由 $8.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率逐渐恢复至 100%. 由 2.1 节的分析可知, 此时系统 PUA 基本保持不变, PAOs 在系统中不再具有竞争优势, PAOs 对氧气的利用率较低. 因此, 在系统好氧段主要是 AOB 和 NOB 在消耗 DO, 使其硝化性能得以恢复. 同时, 当 C/P 进一步降低为 10 时, 系统 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率仍高达 100%.

2.4 不同进水 C/P 对 SNEDPR 系统好氧段脱氮性能的影响

图 4 为不同进水 C/P 条件下 SNEDPR 系统中

$\text{NO}_x^- - \text{N}$ 浓度、SNED 率及 TN 去除率变化情况. 当进水 C/P 为 60 时, TN 去除率和 SNED 率均维持在较高的水平, 表现为 TN 去除率和 SNED 率分别平均为 85.6% 和 62.8%, 出水 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 浓度和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别为 $8.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0. 而当 C/P 降低为 30 时, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度由 $9.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $16.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水仍无 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, TN 去除率和 SNED 率分别降至 65.1% 和 33.9%. 分析出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的升高主要是由于 PAOs 在好氧段的好氧吸磷消耗氧气导致系统好氧段 DO 降低. 有文献指出, 低 DO 有利于实现短程硝化^[27]. 该 C/P 条件下系统 SNED 率和 TN 去除率较 C/P 为 60 时有所下降.

当 C/P 为 20 时, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度由 $11.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $9.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由 $2.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $5.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率和 SNED 率分别由 67.5% 和 20.9% 提高至 75.4% 和 41.7%. 该 C/P 条件下 SNED 率提高可能在于系统的除磷性能下降(见 2.1 节), 使得 GAOs 能利用更多的内碳源进行反硝化脱氮; 而 TN 去除率提高可能在于系统硝化性能的提高(见 2.3 节).

当 C/P 为 15 时, 出水 NO_3^- -N 浓度由 $3.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $10.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而出水 NO_2^- -N 浓度由 $11.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率由 77.1% 升高至 84.6%, SNED 率由 43.8% 提高至 53.6%. 此时, 出水 NO_x^- -N 主要以 NO_3^- -N 为主, 出水 NO_2^- -N 开始逐步降低. 分析其原因可能在于随着系统除磷

性能降低, 使好氧段硝化菌可利用的 DO 增多, 促进 NO_2^- -N 向 NO_3^- -N 的进一步转化. 当进水 C/P 为 10 时, 系统出水 NO_2^- -N 由 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐步降低为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而出水 NO_3^- -N 由 $9.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $14.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率和 SNED 率分别平均为 79.8% 和 56.4%.

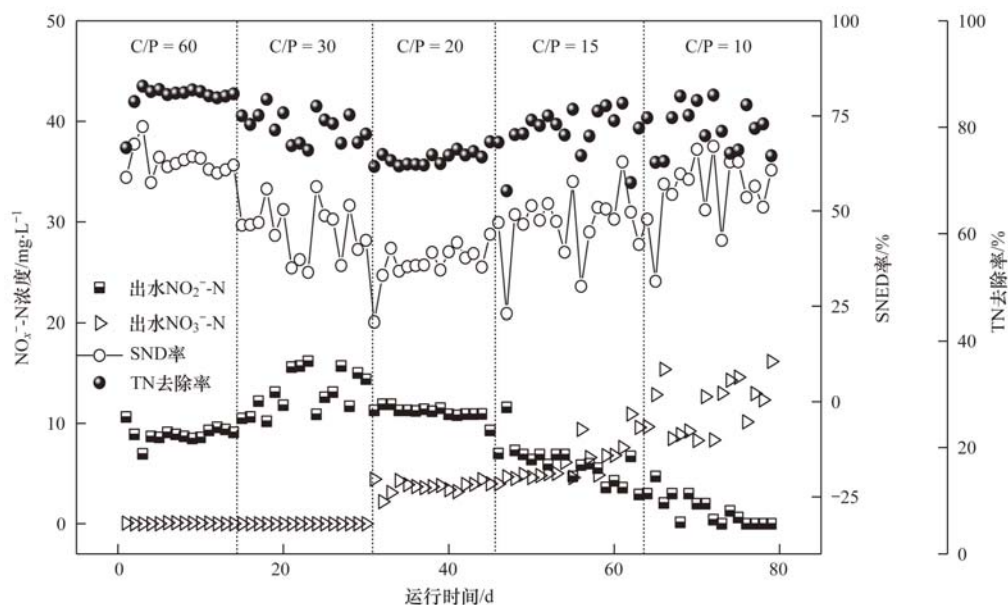


图4 不同进水 C/P 条件下 SNEDPR 系统中 NO_x^- -N 浓度、SNED 率及 TN 去除率变化情况

Fig. 4 Variations of the NO_x^- -N concentration, SNED efficiency, and TN removal efficiency in the SNEDPR system at different influent C/P ratios

通过对比不同 C/P 条件下系统出水 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度变化可知, 当进水 C/P 为 60~20 时, C/P 降低使得系统出水以 NO_2^- -N 为主, 但当 C/P 进一步降低为 10 时, 进水 C/P 的降低会导致系统短程硝化过程的破坏. 此外, 还可以得出, 当 C/P 由 60 降低至 20 时, 系统脱氮性能变差的原因在于

PAOs 反硝化除磷作用的减弱; 而当 C/P 由 20 降至 10 时系统脱氮性能得以恢复原因在于 GAOs 内源反硝化作用的增强.

2.5 不同进水 C/P 对 SNEDPR 系统厌氧段 COD_{ins} 的影响

图5 为不同进水 C/P 条件下 SNEDPR 系统厌

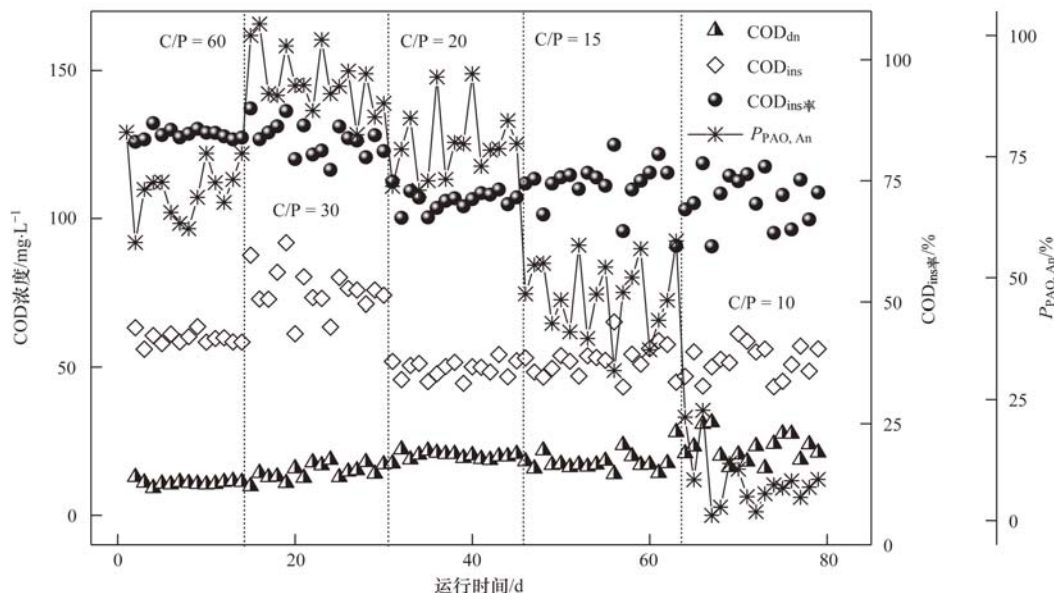


图5 不同进水 C/P 条件下 SNEDPR 系统厌氧段 COD_{dn} 、 COD_{ins} 、 COD_{ins} 率及 $P_{\text{PAOs, An}}$ 变化情况

Fig. 5 Variations of the COD_{dn} and COD_{ins} concentrations, COD_{ins} efficiency, and $P_{\text{PAOs, An}}$ in the SNEDPR system at different influent C/P ratios

氧段 COD_{dn} 、 COD_{ins} 、 $COD_{ins率}$ 及 $P_{PAOs, An}$ 变化情况. 由图 5 可知, 当进水 C/P 为 60 时, 系统 COD_{dn} 仅为 $10.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $COD_{ins率}$ 平均为 85.6%; PAOs 在厌氧段内碳源储存所占比例($P_{PAOs, An}$) 为 68.1%. 当 C/P 为 30 时, COD_{dn} 由 $9.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $14.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $COD_{ins率}$ 平均为 75.7%, $P_{PAOs, An}$ 由 75.7% 提高至 99.1%. COD_{ins} 的提高主要由 PAOs 实现, 这也解释了系统在该 C/P 条件下除磷性能逐渐提高的原因(2.1 节).

当 C/P 为 20 时, COD_{dn} 由 $13.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $22.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $COD_{ins率}$ 和 $P_{PAOs, An}$ 分别由 81.1% 和 89.6% 降低至 67.4% 和 62.1%. 说明 C/P 的降低使系统厌氧段由异养菌去除的 COD 开始增多, 且 PAOs 对 COD 的利用能力减弱. 该 C/P 条件下系统厌氧段内碳源的储存由 PAOs 和 GAOs 共同来完成, 但 PAOs 较 GAOs 在厌氧段内碳源的利用仍占优势.

当 C/P 为 15 时, COD_{dn} 由 $20.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $28.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD_{ins} 和 $COD_{ins率}$ 分别平均为 $49.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 72.9%, 但是 $P_{PAOs, An}$ 由 83.1% 下降为 36.2%. 说明厌氧段 GAOs 对内碳源的储存特性逐

渐增强. 当 C/P 为 10 时, COD_{dn} 和 $COD_{ins率}$ 分别平均为 $23.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 52.3%, 而 $P_{PAOs, An}$ 由 34.6% 下降至 5.3%. 此时, 系统在厌氧段 COD 的去除主要由异养菌反硝化作用和 GAOs 内碳源储存作用来实现的, GAOs 较 PAOs 在厌氧段内碳源储存占据优势, 其也解释了 2.1 节中系统释磷和吸磷性能降低的原因.

2.6 不同进水 C/P 条件下典型周期内底物反应速率以及 DO 变化

在 SBR 运行第 13、29、44、62 和 79 d 时分别测定系统运行一个典型周期内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 COD 浓度及 pH 值、DO 浓度的变化情况. 由图 6(a) 可知, 在系统运行第 13 d (C/P 为 60) 和第 29 d (C/P 为 30) 时, PRR 和 PUR (以 P/MLSS 计, 下同) 分别由 $2.9 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $3.4 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 提高至 $3.5 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $4.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 而当系统运行至第 79 d (C/P 为 10) 时, PRR 和 PUR 分别降低为 $0.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.24 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 此时系统表现出较差的除磷性能, 这与 2.1 节的分析一致.

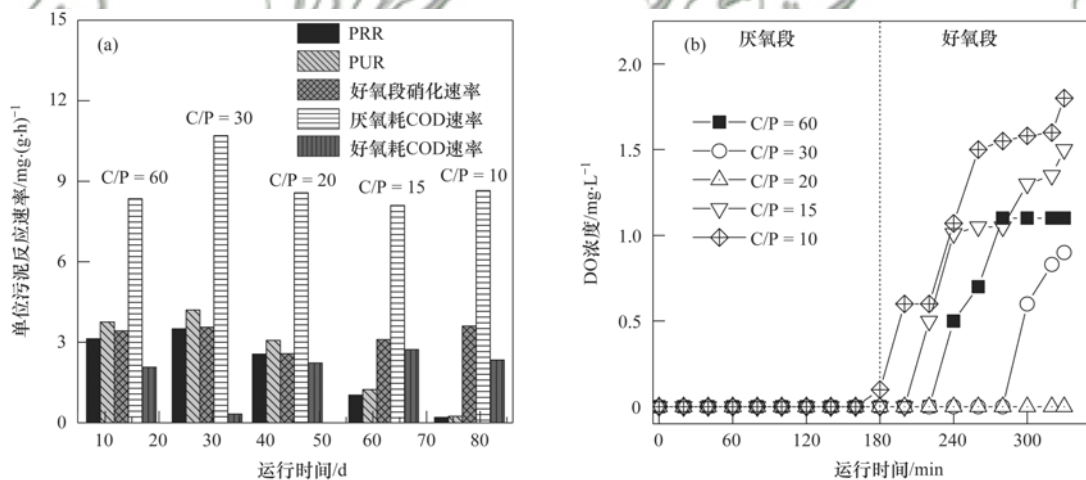


图 6 不同进水 C/P 条件下 SNEDPR 系统 5 个典型周期内底物反应速率和 DO 浓度变化情况

Fig. 6 Variations of the nutrient removal rates and DO concentration during five typical operations in the SNEDPR system at different influent C/P ratios

同时当系统进水 C/P 由 60 降低至 30 时, 系统厌氧段 COD 去除速率由 $8.3 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 提高至 $10.7 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 好氧段 COD 去除速率由 $2.1 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 降低至 $0.3 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 而随着 C/P 由 30 持续降至 10, 系统厌氧段 COD 去除速率降低至 $8.5 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 并维持, 好氧段 COD 去除速率逐渐提高并维持在 $2.3 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 该结果与 2.2 节的解释相一致.

由图 6(a) 可见, 当系统进水 C/P 由 60 降低至 10 时, 好氧段硝化速率先由 $3.4 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 降低为 $2.5 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 后又逐渐恢复至 3.6

$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; 且当 C/P 为 20 时, 系统好氧段硝化速率最低为 $2.5 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 同时, 从图 6(b) 可知, 在 C/P 为 20 时系统好氧段的 DO 恒为 0, 不同于其他 C/P 条件下 DO 上升的趋势. 王晓霞等^[28] 在研究 SNEDPR 系统的脱氮特性时同样发现, 低 DO 浓度 ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 会引起硝化细菌硝化速率的降低, 并且低 DO 浓度会引起氨氧化菌 (AOB) 和亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 硝化速率的同时受限, 造成氨氮去除效果变差. 这与 2.3 节中该 C/P 条件下出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 存在剩余的结果相一致.

3 结论

(1)适当地降低 C/P 可以提高 SNEDPR 系统的除磷性能,当 C/P 为 30 时,系统除磷性能最高,PRR 和 PUR 分别高达 $3.5 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $4.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均低于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而当进一步降低 C/P 由 20 至 10 时,PRR 和 PUR 分别仅为 $0.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.24 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率由 38.1% 降低至 3.1%,系统除磷性能变差.

(2)进水 C/P 几乎不影响系统 COD 的去除性能,不同 C/P 条件下,COD 去除率稳定维持在 85% 左右.但是,不同 C/P 条件下系统中消耗 COD 的功能菌群是不同的.C/P 大于 30 时,系统主要由 PAOs 实现 COD 的去除,而当 C/P 为 10~20 时,系统 COD 的去除由 GAOs 和异养菌来完成.

(3)随着进水 C/P 的降低,系统脱氮性能呈现降低后恢复的趋势,表现为 SNED 率和 TN 去除率分别由 C/P 为 60 时的 62.8% 和 85.6% 降低 C/P 为 20 时的 36.4% 和 74.2% 后又提高至 C/P 为 10 时的 59.8% 和 85.9%,且 C/P 由 20 降至 10 时系统脱氮性能得以恢复的原因在于 GAOs 内源反硝化作用的增强.

(4)当进水 C/P 由 60 降低至 10 时,系统硝化性能呈现先下降后逐渐恢复的趋势,而系统的短程硝化性能先升高后逐渐降低.表现为出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别由 0 和 $6.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $16.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而当 C/P 进一步降低至 10 时,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度逐渐降低为 0, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 由 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $14.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 当进水 C/P 为 20 时最有利于系统短程硝化的进行.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年中国环境状况公报[R]. 北京: 环境保护部, 2016.
- [2] Wu C Y, Peng Y Z, Li X L, *et al.* Effect of carbon source on biological nitrogen and phosphorus removal in an anaerobic-anoxic-oxic (A^2O) process [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, **136**(11): 1248-1254.
- [3] Wang X X, Wang S Y, Xue T L, *et al.* Treating low carbon/nitrogen (C/N) wastewater in simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorous removal (SNDPR) systems by strengthening anaerobic intracellular carbon storage [J]. *Water Research*, 2015, **77**: 191-200.
- [4] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **84**(2): 170-178.
- [5] Wang X X, Wang S Y, Zhao J, *et al.* Combining simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorus removal with post-denitrification for low carbon/nitrogen wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **220**: 17-25.
- [6] 邹联沛, 刘旭东, 王宝贞, 等. MBR 中影响同步硝化反硝化的生态因子 [J]. *环境科学*, 2001, **22**(4): 51-55.
Zou L P, Liu X D, Wang B Z, *et al.* The influence of ecological factors on simultaneous nitrification and denitrification in MBR [J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(4): 51-55.
- [7] Li H B, Zhou B H, Tian Z Y, *et al.* Efficient biological nitrogen removal by Johannesburg-Sulfur autotrophic denitrification from low COD/TN ratio municipal wastewater at low temperature [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(9): 5027-5035.
- [8] 杜馨, 张可方, 方茜, 等. 碳源对 SBR 工艺同步硝化反硝化的影响 [J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(11): 47-51.
Du X, Zhang K F, Fang Q, *et al.* Effect of carbon source on simultaneous nitrification and denitrification of SBR process [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, **23**(11): 47-51.
- [9] Guerrero J, Guisasaola A, Baeza J A. Controlled crude glycerol dosage to prevent EBPR failures in C/N/P removal WWTPs [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **271**: 114-127.
- [10] 潘欣语. 不同 HRT 和 C/P 比对 A^2O 系统性能的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
Pan X Y. Start-up of A^2O process and the change of the performance of the system at different HRT and different C/P [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [11] 毛玉凤, 殷旭东, 刘正辉. 碳磷比和污泥龄对一体化工艺同步脱氮除磷的影响 [J]. *广东化工*, 2015, **42**(8): 77-79.
Mao Y F, Yin X D, Liu Z H. Effects of C/P ratio and SRT on integration OCO and simultaneous nitrogen and phosphorus removal process [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2015, **42**(8): 77-79.
- [12] 赵骥, 王晓霞, 李夕耀, 等. DO 浓度对 EBPR 耦合 SND 处理低 C/N 污水的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(1): 120-128.
Zhao J, Wang X X, Li X Y, *et al.* Effect of DO concentration on the combination of EBPR and SND for low C/N sewage treatment [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(1): 120-128.
- [13] Wang Y Y, Peng Y Z, Stephenson T. Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(14): 3506-3512.
- [14] Kong Y H, Beer M, Rees G N, *et al.* Functional analysis of microbial communities in aerobic-anaerobic sequencing batch reactors fed with different phosphorus/carbon (P/C) ratios [J]. *Microbiology*, 2002, **148**(Pt 8): 2299-2307.
- [15] 王榕, 成鹏飞, 张建, 等. 碳磷比对 SND 过程污染物去除及 N_2O 释放的影响 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 378-382.
Wang R, Cheng P F, Zhang J, *et al.* Effects of COD/P ratio on contaminant removal and N_2O emission during simultaneous nitrification and denitrification process [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 378-382.
- [16] 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 等. 同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4696-4705.
Gao J F, Wang S J, Fan X Y, *et al.* Microbial population dynamics during sludge granulation in a simultaneous nitrogen and phosphorus removal system [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4696-4705.
- [17] Schuler A J, Jenkins D. Enhanced biological phosphorus removal from wastewater by biomass with different phosphorus contents, Part I: Experimental results and comparison with metabolic models [J]. *Water Environment Research*, 2003, **75**(6): 485-

- 498.
- [18] 苗志加, 彭永臻, 王淦, 等. 强化生物除磷工艺富集聚磷菌及其微生物菌群分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, **39**(5): 742-748.
- Miao Z J, Peng Y Z, Wang G, *et al.* Enrichment and analysis of the population of phosphate accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal system [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, **39**(5): 742-748.
- [19] Coma M, Verawaty M, Pijuan M, *et al.* Enhancing aerobic granulation for biological nutrient removal from domestic wastewater[J]. Bioresource Technology, 2012, **103**(1): 101-108.
- [20] Orhon D, Soybay S, Tünay O, *et al.* The effect of reactor hydraulics on the performance of activated sludge systems—I. The traditional modelling approach[J]. Water Research, 1989, **23**(12): 1511-1518.
- [21] Carvalheira M, Oehmen A, Carvalho G, *et al.* The impact of aeration on the competition between polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms [J]. Water Research, 2014, **66**: 296-307.
- [22] 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.
- [23] He Q L, Zhang S L, Zou Z C, *et al.* Unraveling characteristics of simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal (SNEDPR) in an aerobic granular sequencing batch reactor[J]. Bioresource Technology, 2016, **220**: 651-655.
- [24] 王晓莲, 王淑莹, 彭永臻. 进水 C/P 比对 A²/O 工艺性能的影响[J]. 化工学报, 2005, **56**(9): 1765-1770.
- Wang X L, Wang S Y, Peng Y Z. Effects of feed water C/P ratio on performance of anaerobic-anoxic-oxic process [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2005, **56**(9): 1765-1770.
- [25] 戴娟. 富集聚磷菌的 EBPR 耦合同步硝化反硝化系统脱氮除磷性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [26] 蒋涛, 方婧, 孙培德, 等. C/P 对 EBPR 系统 PAOs 与 GAOs 竞争及 PHAs 代谢过程影响研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2938-2944.
- Jiang T, Fang J, Sun P D, *et al.* Effects of C/P on the competition between PAOs and GAOs and PHAs metabolism in EBPR system [J]. Environmental Science, 2010, **31**(12): 2938-2944.
- [27] 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.
- [28] 王晓霞, 王淑莹, 赵骥, 等. 厌氧/好氧 SNEDPR 系统处理低 C/N 污水的优化运行[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2672-2680.
- Wang X X, Wang S Y, Zhao J, *et al.* Optimization for low C/N sewage treatment in an anaerobic/aerobic simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorus removal system [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2672-2680.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i>	(1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i>	(11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i>	(24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i>	(33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i>	(44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i>	(55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i>	(67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i>	(76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i>	(86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i>	(104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i>	(114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i>	(121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i>	(126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i>	(143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i>	(149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i>	(157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i>	(164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue	(192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i>	(200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i>	(211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i>	(219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i>	(228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan	(239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i>	(248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i>	(256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i>	(263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i>	(273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i>	(281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i>	(293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Maifanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i>	(300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i>	(310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i>	(318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	(327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i>	(336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i>	(360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i>	(369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i>	(376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i>	(383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i>	(392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i>	(412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i>	(421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i>	(437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping	(445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong	(461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i>	(480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i>	(488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i>	(496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i>	(504)