

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.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量和好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响

李冬¹, 曹美忠¹, 郭跃洲¹, 梅宁¹, 李帅², 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: 在 SBR 反应器中接种成熟的生物除磷颗粒, 通过分阶段提高进水中氨氮浓度, 研究了进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响, 确定系统对进水氨氮负荷的承受能力。结果表明, 进水氨氮浓度低于 $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 生物除磷颗粒系统具有良好的性能, TP 去除率在 96% 以上, COD 去除率在 89% 以上, 出水 TP 浓度和 COD 浓度分别在 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 颗粒粒径在 $950 \mu\text{m}$ 以上, SVI 在 $45 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下; 进水氨氮浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, TP 去除率在 95% 以上, 出水 TP 浓度在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 颗粒粒径为 $760 \mu\text{m}$, SVI 为 $56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 系统中生物除磷颗粒出现部分解体, PAOs 代谢和生长开始受到抑制。进水氨氮浓度达到 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, TP 去除率为 70%, 出水 TP 浓度在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 颗粒粒径为 $570 \mu\text{m}$, SVI 为 $75 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, PN/PS 值达到 7.50 左右, 系统中生物除磷颗粒严重解体, PAOs 代谢和生长被严重抑制。随着进水氨氮浓度上升, 导致生物除磷颗粒中微生物分泌蛋白质增加和多糖减少, PN/PS 值增大, 出现生物除磷颗粒解体, 颗粒粒径减小和 SVI 上升, 生物除磷颗粒的结构和功能被破坏。

关键词: 生物除磷颗粒; 氨氮浓度; 颗粒粒径; 胞外聚合物(EPS); PN/PS

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1360-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201808128

Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System

LI Dong¹, CAO Mei-zhong¹, GUO Yue-zhou¹, MEI Ning¹, LI Shuai², 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: Mature biological phosphorus removal granules were inoculated into a SBR. The effect of the ammonia concentration on biological phosphorus removal granules system was investigated by increasing the concentration of ammonia in the influent. The ability of the system to withstand ammonia loading was determined. The results showed that when the influent ammonia concentration was below $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the biological phosphorus removal granule system showed good performance. The TP removal efficiency was above 96%, the COD removal efficiency was over 89%. The effluent TP concentration and COD concentration were $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. The particle size was above $950 \mu\text{m}$ and the SVI was below $45 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. When the influent ammonia concentration was $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the removal efficiency of TP was more than 95%. The effluent TP concentration was below $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the particle size was $760 \mu\text{m}$, and the SVI was $56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. Furthermore, the biological phosphorus removal granules partially disintegrated and the metabolism and growth of PAOs began to be inhibited in the system. When the influent ammonia concentration reached $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the removal efficiency of TP was 70%, the effluent TP concentration was about $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the particle size was $570 \mu\text{m}$, the SVI was $75 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, and the value of PN/PS was about 7.50. The biological phosphorus granules severely disintegrated and the metabolism and growth of PAOs was severely inhibited in the system. Moreover, as the influent ammonia concentration increased, the protein increased and polysaccharide decreased from the microbial secretion of biological phosphorus removal granules. Moreover, the value of PN/PS increased, the biological phosphorus removal granules disintegrated, the particle size decreased, the SVI increased, and the structure and function of the biological phosphorus removal granules were destroyed.

Key words: biological phosphorus removal granules; ammonia concentration; particle size; extracellular polymeric substance(EPS); PN/PS

近年来,过量的磷排放到天然水体中加速了水体富营养化,并导致水质恶化,磷的高效去除已经成为研究热点。目前,强化生物除磷以其高效除磷和节能环保的特点得到广泛应用,但在传统的强化生物除磷中,存在生物量低、易污泥膨胀以及二次释磷等缺点^[1~3]。生物颗粒具有结构密实、沉降性能好、生物量高以及抗冲击能力强等优点^[4~6]。因此,以聚磷菌(PAOs)为主体的生物除磷颗粒成为

了污水生物处理工艺的创新和最具有发展前景的除磷技术,吸引了越来越多研究者的兴趣^[7~9]。

目前,关于进水底物对生物除磷颗粒稳定性的影响研究有很多报道。刘小英等^[10]在 SBR 中探讨

收稿日期: 2018-08-15; 修订日期: 2018-09-09

基金项目: 北京市优秀青年拔尖团队项目(2014000026833TD02)

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

进水 COD 浓度对系统稳定性的影响, 进水 COD 浓度提高到 $550\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 颗粒污泥周围丝状菌过度生长, 颗粒污泥解体. Yu 等^[11] 在 SBR 中研究了 COD 负荷对生物除磷颗粒系统的影响, 当 COD 浓度大于 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 聚磷菌 (PAOs) 的新陈代谢能力受到抑制, 系统的性能恶化, 丝状菌过量繁殖而导致污泥膨胀. Li 等^[12] 研究了 COD 负荷对生物除磷颗粒连续流系统的影响, 当 COD 浓度达到 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 由于丝状菌的增殖而导致系统厌氧 COD 和总磷 (TP) 去除率明显降低以及颗粒沉降能力的恶化. Li 等^[13] 研究了不同 COD 负荷下污泥停留时间 (SRT) 对生物除磷颗粒连续流的影响, 较长的 SRT 及较高的 COD 负荷 ($300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 使颗粒沉降能力和系统性能恶化. Zheng 等^[14,15] 通过在 SBR 中研究了亚硝酸盐和游离氨对生物除磷颗粒系统的影响, 由于亚硝酸盐和游离氨的影响, 生物除磷颗粒系统中聚糖菌和丝状菌过量生长, 污泥膨胀. 生物除磷颗粒工艺处理生活污水的过程中进水氨氮浓度会对系统的性能和颗粒的特点产生不可忽视的影响. 然而在同一生物除磷颗粒系统中探究进水氨氮负荷的承受能力却鲜见报道.

本试验在 SBR 中接种成熟生物除磷颗粒, 通过分阶段提高进水中氨氮浓度, 测定系统中 TP 和 COD 的去除性能、颗粒的特性以及胞外聚合物 (EPS) 等参数的变化, 探究进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响, 确定系统对进水氨氮负荷的承受能力, 以期为生物除磷颗粒实际应用提供基础依据和参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方式

本试验采用由有机玻璃制成的 SBR 反应器, 高 50 cm , 内径 14 cm , 有效容积 6 L . 反应器垂直方向每隔 5 cm 设置取样口. 反应器内底部装有直径为 8 cm 的曝气盘, 通过气体流量计控制曝气强度.

反应器每天运行 4 个周期, 每周期运行 6 h , 分为: 6 min 进水, 2 h 厌氧, 3 h 好氧, 3 min 沉淀, 5 min 排水, 剩余时间闲置. 整个试验过程温度和 pH 均不作控制, 水温 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, pH 为 $7.0\sim 8.0$. 换水比为 $2/3$, 曝气强度为 $0.6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 污泥浓度控制在 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

1.2 接种污泥与试验用水

接种污泥取自本实验室培养成熟的生物除磷颗粒, 浓度为 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, COD 去除率为 $85\%\sim 90\%$, TP 去除率为 $96\%\sim 99\%$.

本试验采用自来水配制的人工合成废水, 采用

丙酸钠为碳源, 磷酸二氢钾为磷源, 硫酸铵为氮源, 进水 NH_4^+-N 浓度由试验阶段决定, 其余主要水质指标如表 1 所示.

表 1 进水水质指标

Table 1 Characteristics of the influent

成分	数值	成分	数值
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	200	$\text{MgSO}_4/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	40
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	10	pH	$7.0\sim 8.0$
$\text{CaCl}_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	30	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$15\sim 25$

1.3 试验参数

本试验分阶段逐步提高进水中氨氮浓度, 探究生物除磷颗粒系统对进水氨氮负荷的承受能力. 具体试验参数如表 2 所示.

表 2 试验参数

Table 2 Operation parameters

运行阶段	NH_4^+-N 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
I ($1\sim 14\text{ d}$)	15
II ($15\sim 42\text{ d}$)	30
III ($43\sim 70\text{ d}$)	45
IV ($71\sim 105\text{ d}$)	60
V ($106\sim 147\text{ d}$)	70
VI ($148\sim 197\text{ d}$)	60

1.4 分析方法

COD 和 TP 的测定采用 5B-3B 型 COD 多参数快速测定仪, NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、MLSS、MLVSS、SV30、SVI 等指标均采用国家规定的标准方法^[16]. 本试验中 pH、DO 和温度的测定均采用 WTW-pH/Oxi 340i 便携式多参数测定仪.

颗粒粒径采用 Mastersize 2000 激光粒度仪测定. EPS 的提取步骤^[17]: 取 25 mL 泥水混合物, $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min ; 去掉上清液后加入 PBS 溶液 ($50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸钠、 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 及 $\text{pH}=7$) 稀释至原体积; 超声破碎 3 min ; 然后 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 30 min , 冷却后, $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min , 取上清液测定蛋白质 (PN) 和多糖 (PS), 剩余污泥测定 MLSS. PN 采用考马斯亮蓝法; PS 采用苯酚硫酸法.

2 结果与讨论

2.1 不同氨氮浓度下生物除磷颗粒系统的处理性能

本试验研究分为 6 个阶段, 进水氨氮浓度分别为 15 、 30 、 45 、 60 、 70 和 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中阶段 VI 为主要恢复系统活性阶段. 图 1 为不同阶段系统中 TP 浓度及去除率的变化情况. 阶段 I 为生物除磷颗粒系统的适应阶段, 进水氨氮浓度为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应器运行 14 d , 主要是恢复系统中聚磷菌 (PAOs) 的活性, 以 TP 去除率达到 95% 以上

为 PAOs 活性恢复成功的标志; 该阶段 TP 去除率达到 97%, 出水 TP 浓度在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 低于我国城镇污水处理厂污染物排放标准一级 A 标准 ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[18], 说明系统中 PAOs 活性得到了良好的恢复. 在阶段 II、III, 进水氨氮浓度分别为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 去除率均在 96% 以上, 出水 TP 浓度在 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 系统中聚磷菌活性较高. 在阶段 IV, 进水氨氮浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统运行到第 7 d 时, TP 去除率下降到 82%, 出水 TP 浓度达到 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 但系统经过 13 d 的适应, TP 去除率恢复到 95% 以上, 出

水 TP 浓度在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 在此阶段, PAOs 活性开始受到抑制. 在阶段 V, 进水氨氮浓度为 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经过 10 d 运行, TP 去除率由 98% 下降到 30%, 出水 TP 浓度仅为 $7.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 随后 TP 去除率提高至 70%, 出水 TP 浓度稳定在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 系统中 PAOs 活性被严重抑制. 在阶段 VI, 进水氨氮浓度调回 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此阶段主要恢复系统的处理性能. 系统经过 14 d 的运行, TP 去除率达到了 95% 以上, 出水 TP 浓度在 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 系统的处理性能得到了良好的恢复.

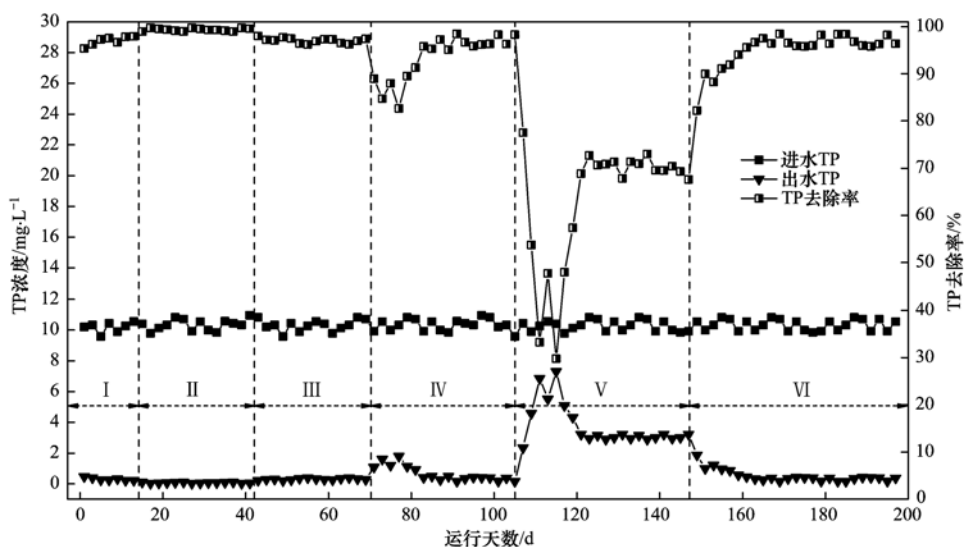


图1 运行过程中 TP 浓度的变化

Fig. 1 Variation of TP concentration during the operation process

图2 为不同阶段系统中 COD 浓度及去除率的变化情况. 从中可以看出, 在阶段 I、II、III, 进水氨氮浓度低于 $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧 COD 去除率与总 COD 去除率相近, 均在 89% 以上, 厌氧末期 COD

浓度与出水 COD 浓度相近, 都在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 远低于我国城镇污水处理厂污染物排放标准一级 A 标准 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[18]. 在阶段 IV, 进水氨氮浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统运行第 5 d, 厌氧 COD 去除率和总

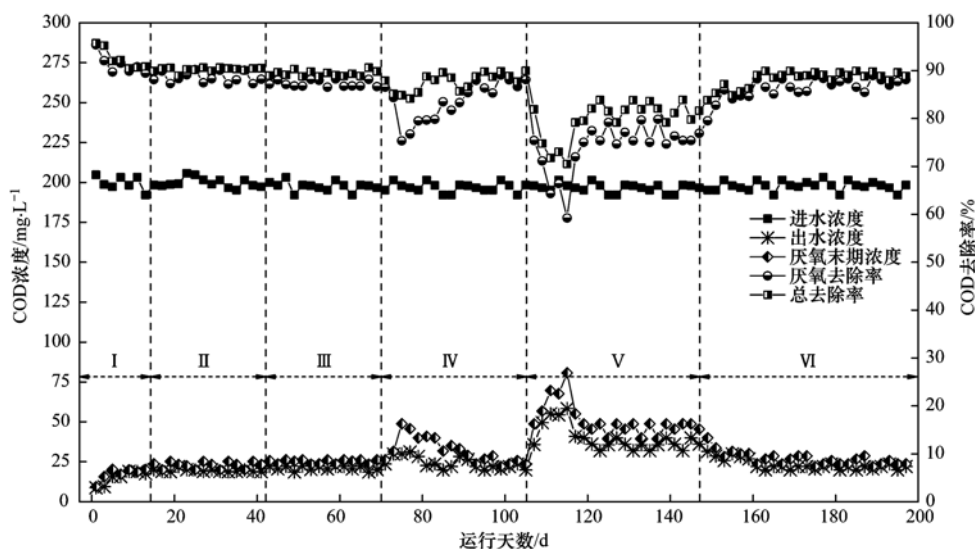


图2 运行过程中 COD 浓度的变化

Fig. 2 Variation of COD concentration during the operation process

COD 去除率分别降低至 75% 和 85%, 厌氧末期 COD 浓度和出水 COD 浓度分别达到 $49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 系统经过 19 d 的运行, 厌氧 COD 去除率和总 COD 去除率相近, 都在 85% 以上, 厌氧末期 COD 浓度和出水 COD 浓度均在 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 在阶段 V, 进水氨氮浓度为 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧 COD 去除率和总 COD 去除率呈现先降低后增大的趋势, 最后分别稳定在 75% 和 80%, 厌氧末期 COD 浓度和出水 COD 浓度分别为 $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在阶段 VI, 系统经过 12 d 的运行恢复, 厌氧 COD 去除率和总 COD 去除率均达到 85% 以上, 厌氧末期 COD 浓度和出水 COD 浓度都在 $26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 整个运行过程中, COD 去除率都维持比较高的状态.

在阶段 IV 和阶段 V, 进水氨氮浓度分别为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮浓度对 TP 和 COD 去除效果的影响程度不同. 原因可以归结于: ①较高的氨氮浓度会抑制生物除磷颗粒中 PAOs 的代谢和生长, 同时使其他异养菌增殖; ②可能是氨氮转化成亚硝酸盐和硝酸盐, 造成亚硝酸盐和硝酸盐的积累, 抑制了生物除磷颗粒中 PAOs 的代谢和生长; ③可能发生了反硝化异养菌反硝化作用与 PAOs 竞争碳源. 为了进一步确定出水 TP 浓度上升和出水 COD 浓度变化不大的原因, 在反应器运行 100 d (阶

段 IV) 和 142 d (阶段 V) 的第二个周期进行周期试验. 由图 3 可以看出, 前 60 min 的 COD 去除速率较快, 在阶段 IV 中, COD 浓度由 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 快速降至 $35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; 阶段 V 中, COD 浓度由 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 快速降至 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 在两个阶段的厌氧段, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度的变化不大, 初始 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度都在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 反硝化消耗的有机物相差不大. 两个阶段厌氧段的释磷量相差很大, 在阶段 IV 中, 厌氧末期的 TP 浓度达到 $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 而在阶段 V 中, 厌氧末期的 TP 浓度只有 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 较高的氨氮浓度抑制了生物除磷颗粒中 PAOs 的厌氧代谢. 在两个阶段中, 系统在好氧进行 2 h 左右基本完成了磷的吸收, 在好氧末期, 系统中积累了较高的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度, 分别达到 $13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可能会抑制生物除磷颗粒中 PAOs 的好氧代谢. 但 Zeng 等^[19]的研究表明, $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度对 PAOs 的好氧磷吸收没有明显的影响. 徐少娟等^[20]的研究表明较高的进水氨氮浓度会抑制 PAOs 的代谢和生长. 从以上分析结果可知, 在阶段 IV 和阶段 V, 氨氮浓度对 TP 和 COD 去除效果的影响程度不同的主要原因是较高的氨氮浓度会抑制生物除磷颗粒中 PAOs 的代谢和生长, 同时使其他异养菌增殖, 故而 TP 去除效果变化大, COD 去除效果变化相对小.

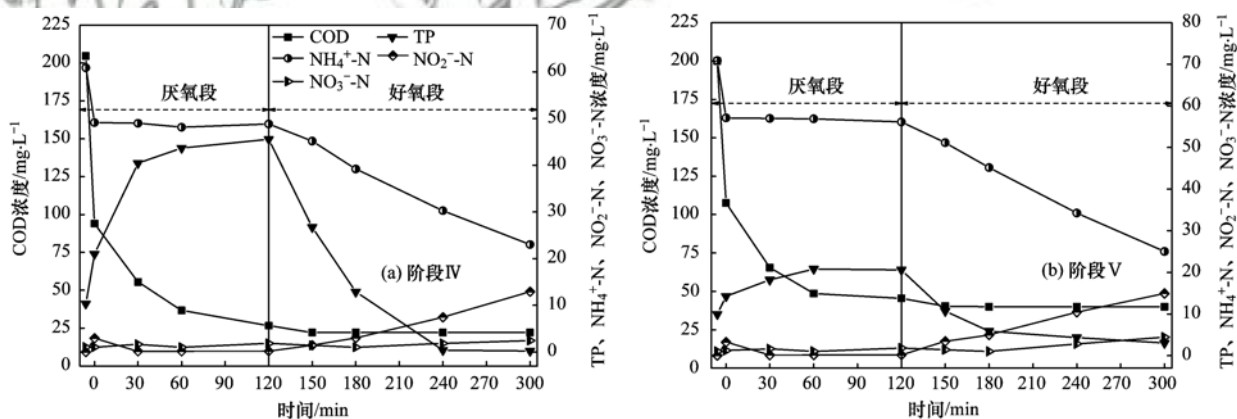


图 3 一个典型周期内污染物的变化

Fig. 3 Variation of pollutants in one typical cycle

2.2 不同氨氮浓度下生物除磷颗粒的特性

沉降能力和颗粒粒径是颗粒污泥在生物反应器中持留能力的重要特征. 通常, 颗粒粒径越大意味着颗粒沉降速率越大^[12]; SVI 通常被用作污泥沉降能力的指标, 较低的 SVI 意味着污泥具有良好的沉降能力^[11,14]. 因此, 本试验通过测定平均粒径、SVI 和 MLVSS/MLSS, 评估不同氨氮浓度下系统中颗粒特性的变化.

图 4 为运行过程中颗粒粒径、SVI 和 MLVSS/

MLSS 的变化. 在阶段 I, 颗粒平均粒径、SVI 和 MLVSS/MLSS 分别为 $1\,120 \mu\text{m}$ 、 $30 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.85, 说明生物除磷颗粒具有良好的沉降能力和较高的微生物含量. 在阶段 II, 颗粒平均粒径减小至 $1\,090 \mu\text{m}$, SVI 升高到 $35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, MLVSS/MLSS 为 0.84; 在阶段 III, 颗粒平均粒径减小至 $950 \mu\text{m}$, SVI 和 MLVSS/MLSS 分别升高到 $45 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.87; 在阶段 IV, 颗粒平均粒径大幅度减小, 最终为 $760 \mu\text{m}$, 生物除磷颗粒出现部分解体现象, SVI 和 MLVSS/

MLSS 升高到 $56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.87; 在阶段 V, 颗粒平均粒径减小到 $570 \mu\text{m}$, 生物除磷颗粒解体严重, SVI 逐渐升高 $75 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, MLVSS/MLSS 升高到 0.89. 随着进水氨氮浓度的升高, SVI 和 MLVSS/MLSS 呈现上升趋势, 颗粒平均粒径呈下降趋势; 进水氨氮浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 颗粒平均粒径和 SVI 变化显著, 生物除磷颗粒沉降性能严重恶化. Zou 等^[21]的研究表明较高的氨氮浓度会导致大的生物除磷颗粒解体成小颗粒, 颗粒粒径下

降. Zheng 等^[14]的研究也表明较高的氨氮浓度会导致大颗粒不稳定并破碎成较小的颗粒, 同时 SVI 会升高; 同时也暗示 MLVSS/MLSS 升高可能是由于颗粒崩解导致比表面积增大, 促进更多有机物质的吸附. 在阶段 VI, 系统经过 21 d 的运行, 颗粒平均粒径、SVI 和 MLVSS/MLSS 分别恢复到 $780 \mu\text{m}$ 、 $56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.86, 系统中生物除磷颗粒的沉降性能得到一定的恢复. 以上结果表明进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统中颗粒的沉降性能有重要的影响.

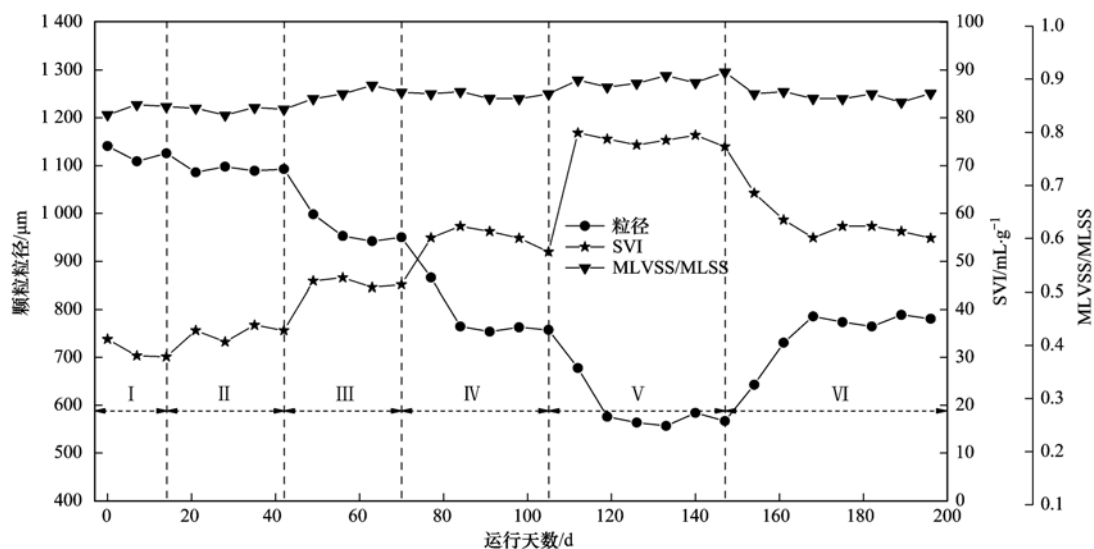


图4 运行过程中粒径、SVI 和 MLVSS/MLSS 的变化

Fig. 4 Variation of particle size, SVI, and MLVSS/MLSS during the operation process

2.3 不同氨氮浓度下 EPS 中 PN 和 PS 的变化

胞外聚合物(EPS)是由微生物分泌的胞外聚合物黏度物质, 在细胞自凝聚中起着重要的作用^[22,23], 主要成分为蛋白质(PN)和多糖(PS), 它

们有助于细菌聚集在一起并黏附每个细胞^[14], 且颗粒的特性与 PN/PS 值有关^[21,24,25].

图5为整个运行过程中 PN、PS 含量及 PN/PS 的变化情况. 在阶段 I, EPS 中 PN 和 PS 含量(以

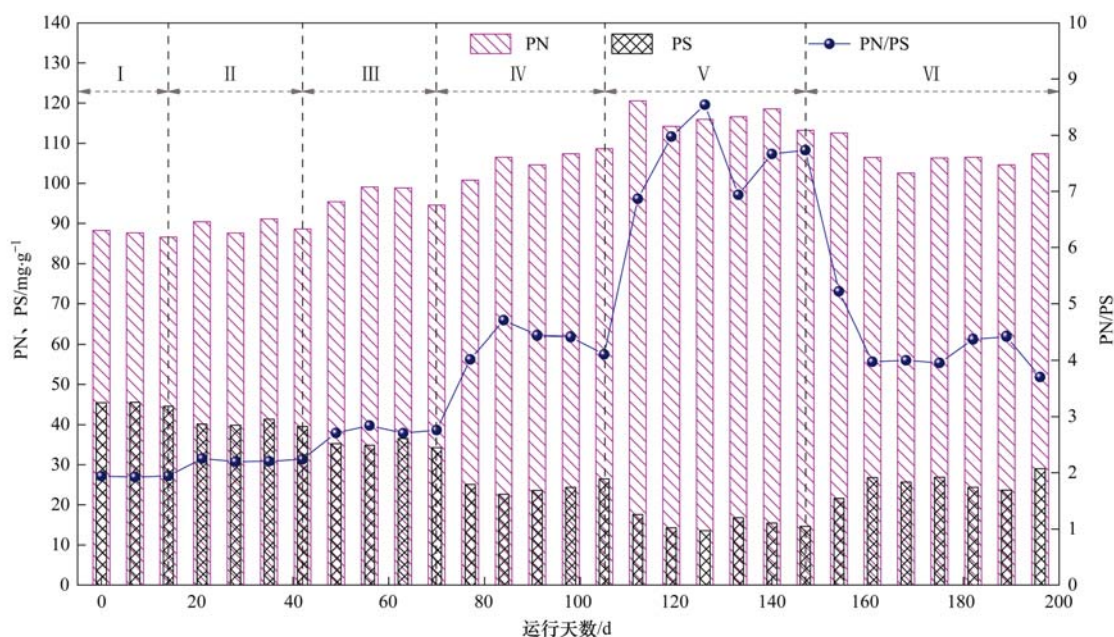


图5 运行过程中 PN、PS 及 PN/PS 的变化

Fig. 5 Variation of PN, PS, and PN/PS during the operation process

MLSS 计) 比较稳定, 分别为 $87 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PN/PS 值为 1.94. 在阶段 II, PN 含量为 $88 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PS 含量下降至 $39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PN/PS 值增大到 2.20; 在阶段 III, PN 含量上升到 $98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PS 含量略微降低至 $35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PN/PS 值增大到 2.70; 在阶段 IV, PN 含量上升至 $106 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PS 含量下降明显, 达到 $23 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PN/PS 值增大到 4.42; 在阶段 V, PN 含量上升到 $115 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PS 含量降低至 $15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PN/PS 值明显增大, 达到 7.50 左右. 当进水氨氮浓度高于 $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PN 含量略微上升, 而 PS 含量急剧减少, PN/PS 值急剧增大, 即较高的进水氨氮浓度会抑制 PS 的分泌. Zou 等^[21]的研究表明在较高的进水氨氮浓度下, 大部分有机物用于生物合成而不是分泌 PS, 而反应器中的氮(N)用于合成 PN. Yang 等^[26]也暗示较高的氨氮浓度会导致 PS 产量的显著下降, 不利于颗粒的稳定. Tay 等^[27]已经表明 PS 可以作为细胞凝聚和黏附的介质, 有助于颗粒的形成和维持颗粒中细胞群的结构完整性. 因此, 上述研究中随着进水氨氮浓度上升, 导致微生物分泌蛋白质增加和多糖减少, PN/PS 值增大, 出现生物除磷颗粒解体, 颗粒粒径减小和 SVI 上升(图 4), 生物除磷颗粒的结构和功能被破坏, 这些结果表明 PN/PS 较低的颗粒具有更好的结构和功能. 在阶段 VI, 进水氨氮浓度恢复到 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PN 含量逐渐降低至 $106 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PS 含量升高至 $26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 说明系统中生物除磷颗粒的结构和功能得到一定的恢复.

3 结论

(1) 进水氨氮浓度低于 $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 生物除磷颗粒系统具有良好的处理性能, TP 去除率在 96% 以上, COD 去除率在 89% 以上, 出水 TP 浓度和 COD 浓度分别在 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 进水氨氮浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统中 PAOs 的代谢和生长开始受到抑制, 经过 13 d 的适应, TP 去除率恢复到 95% 以上, 出水 TP 浓度在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 进水氨氮浓度达到 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统中 PAOs 的代谢和生长被严重抑制, TP 去除率为 70%, 出水 TP 浓度稳定在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.

(2) 进水氨氮浓度高于 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 生物除磷颗粒系统中颗粒粒径和 SVI 变化显著, 生物除磷颗粒沉降性能严重恶化.

(3) 进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统中颗粒的结构和性能有重要的影响. 随着进水氨氮浓度上升, 导致生物除磷颗粒中微生物分泌蛋白质增加和多糖减少, PN/PS 值增大, 出现生物除磷颗粒解

体, 颗粒粒径减小和 SVI 上升, 生物除磷颗粒的结构和功能被破坏.

参考文献:

- [1] Mielczarek A T, Nguyen H T T, Nielsen J L, *et al.* Population dynamics of bacteria involved in enhanced biological phosphorus removal in Danish wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2013, **47**(4): 1529-1544.
- [2] 李冬, 吕育锋, 张金库, 等. SBR 中曝气强度对除磷颗粒的影响[J]. *化工学报*, 2015, **66**(12): 4994-5001.
Li D, Lü Y F, Zhang J K, *et al.* Influence of aeration intensity on phosphorus removal granules in SBR [J]. *CIESC Journal*, 2015, **66**(12): 4994-5001.
- [3] Li D, Lv Y F, Cao M Z, *et al.* Optimized hydraulic retention time for phosphorus and COD removal from synthetic domestic sewage with granules in a continuous-flow reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **216**: 1083-1087.
- [4] Adav S S, Lee D J, Show K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: recent advances [J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(5): 411-423.
- [5] 张小玲, 刘珊, 陈旭. 有机负荷对除磷颗粒污泥的培养及特性的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 2030-2035.
Zhang X L, Liu S, Chen X. Effects of organic loading rate on the cultivation and characteristic of granular sludge with phosphorus removal [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(7): 2030-2035.
- [6] Li D, Lv Y F, Zeng H P, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal using granules in continuous-flow reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **298**: 107-116.
- [7] Fang J, Su B, Sun P D, *et al.* Long-term effect of low concentration Cr(VI) on P removal in granule-based enhanced biological phosphorus removal (EBPR) system [J]. *Chemosphere*, 2015, **121**: 76-83.
- [8] Zhang B, Ji M, Qiu Z G, *et al.* Microbial population dynamics during sludge granulation in an anaerobic-aerobic biological phosphorus removal system [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2474-2480.
- [9] Wu C Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal by granular sludge: from macro-to micro-scale [J]. *Water Research*, 2010, **44**(3): 807-814.
- [10] 刘小英, 姜应和, 郭超, 等. COD 对生物除磷颗粒污泥稳定性影响研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(4): 807-811.
Liu X Y, Jiang Y H, Guo C, *et al.* Influence of COD on phosphorus removal granular sludge stability [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(4): 807-811.
- [11] Yu S J, Sun P D, Zheng W, *et al.* The effect of COD loading on the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the recoverability [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **171**: 80-87.
- [12] Li D, Lv Y F, Zeng H P, *et al.* Long term operation of continuous-flow system with enhanced biological phosphorus removal granules at different COD loading [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **216**: 761-767.
- [13] Li D, Lv Y F, Zeng H P, *et al.* Effect of sludge retention time on continuous-flow system with enhanced biological phosphorus removal granules at different COD loading [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **219**: 14-20.
- [14] Zheng X L, Sun P D, Luo J Q, *et al.* Inhibition of free ammonia to the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the recoverability [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **148**: 343-351.

- [15] Zheng X L, Sun P D, Luo J Q, *et al.* The long-term effect of nitrite on the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the reversibility [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **132**: 333-341.
- [16] 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.
- [17] Wang Z P, Liu L L, Yao J, *et al.* Effects of extracellular polymeric substances on aerobic granulation in sequencing batch reactors[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(10): 1728-1735.
- [18] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [19] Zeng W, Yang Y Y, Li L, *et al.* Effect of nitrite from nitrification on biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(12): 6657-6664.
- [20] 徐少娟, 蒋涛, 殷峻, 等. 进水氨氮浓度对强化生物除磷(EBPR)系统除磷特性及微生物群落结构的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(4): 745-751.
- Xu S J, Jiang T, Yin J, *et al.* Effects of influent ammonia concentration on phosphorus removal and the microbial community in an EBPR system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(4): 745-751.
- [21] Zou J T, Li Y M, Zhang L L, *et al.* Understanding the impact of influent nitrogen concentration on granule size and microbial community in a granule-based enhanced biological phosphorus removal system[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **177**: 209-216.
- [22] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 882-894.
- [23] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [24] Liu Y Q, Liu Y, Tay J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, **65**(2): 143-148.
- [25] 李冬, 曹美忠, 郭跃洲, 等. 不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的 COD 需求[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3247-3253.
- Li D, Cao M Z, Guo Y Z, *et al.* COD requirement for biological phosphorus removal granule system under different phosphorus concentrations [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3247-3253.
- [26] Yang S F, Tay J H, Liu Y. Inhibition of free ammonia to the formation of aerobic granules [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2004, **17**(1): 41-48.
- [27] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, **57**(1-2): 227-233.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)