

百方知库  
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.4  
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 ..... 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市PM<sub>2.5</sub>中碳质气溶胶污染特征 ..... 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季PM<sub>2.5</sub>化学组分特征与来源解析 ..... 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 ..... 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气PM<sub>2.5</sub>中元素特征及重金属健康风险评价 ..... 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 ..... 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于SOA转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 ..... 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 ..... 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 ..... 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 ..... 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 ..... 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 ..... 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程PAN和O<sub>3</sub>分析 ..... 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 ..... 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 ..... 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 ..... 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 ..... 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 ..... 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 ..... 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 ..... 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析 ..... 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 ..... 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 ..... 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 ..... 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中DOM光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 ..... 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) ..... 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 ..... 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 ..... 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素a的空间分布特征 ..... 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 ..... 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中PhACs在传统水相中的分布及环境风险 ..... 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 ..... 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 刚佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 ..... 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架MIL-53(Fe)可见光催化还原水中U(VI) ..... 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 ..... 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 ..... 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 ..... 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对Cd的吸附、回收与再生 ..... 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 ..... 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 ..... 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD颗粒污泥工艺小试 ..... 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 ..... 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌Pseudomonas putida YH的脱氮特性及降解动力学 ..... 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及pH值对反硝化除磷工艺效能的影响 ..... 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下ANAMMOX-EGSB反应器颗粒污泥微生物群落 ..... 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷PHA的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 ..... 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 ..... 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 ..... 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)浓度特征及影响因素 ..... 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤CH<sub>4</sub>吸收规律 ..... 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 ..... 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 ..... 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 ..... 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 ..... 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药VOCs与臭味治理技术研究与发展 ..... 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明晗, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

## 污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响

韦佳敏<sup>1</sup>, 黄慧敏<sup>1</sup>, 程诚<sup>1</sup>, 蒋志云<sup>1</sup>, 刘文如<sup>1,2,3</sup>, 沈耀良<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

**摘要:**以 SBR 成功富集后的反硝化聚磷菌(DPBs)为研究对象, 分别考察了污泥龄(SRT, 35、25、15 d)及 pH 值(7.5、8.0、8.5)对反硝化除磷过程的影响. 结果表明, SRT 从 35d 缩短至 25d, 使活性污泥浓度(MLVSS)从 2 821 mg·L<sup>-1</sup> 降低为 2 301 mg·L<sup>-1</sup>, 而污泥负荷(F/M, 以 COD/MLVSS 计)从 0.256 kg·(kg·d)<sup>-1</sup> 增加至 0.312 kg·(kg·d)<sup>-1</sup>, 虽然净释磷量及净吸磷量有所下降, 但是由于污泥活性的增加, 此阶段厌氧释磷、缺氧吸磷及比反硝化速率均达到最高, 分别为 25.07、15.92 及 9.45 mg·(g·h)<sup>-1</sup>, 污泥含磷率从 4.78% 升为 5.33%, 出水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度保持在 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 以下, 即 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率稳定在 95% 以上; 当 SRT 进一步缩短为 15d 时, MLVSS 低至 1448 mg·L<sup>-1</sup>, 污泥中 DPBs 占聚磷菌(PAOs)的比例从 82.4% 骤降为 65.7%, 表明过短的 SRT 使得 DPBs 逐渐从系统中流失, 此阶段污泥含磷率降至 3.43%, 释磷、吸磷及比反硝化速率亦出现不同程度的降低. 随着 pH 值的升高(7.5~8.0), 厌氧释磷及缺氧吸磷速率也升高, pH 值为 8.0 时分别达到 25.86 mg·(g·h)<sup>-1</sup> 和 16.62 mg·(g·h)<sup>-1</sup>; 当 pH 超过 8.0 后, 除磷效率快速下降, 推测为磷化学沉淀导致.

**关键词:**反硝化除磷; 污泥龄; pH; 污泥负荷; 吸磷速率

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1900-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808063

## Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process

WEI Jia-min<sup>1</sup>, HUANG Hui-min<sup>1</sup>, CHENG Cheng<sup>1</sup>, JIANG Zhi-yun<sup>1</sup>, LIU Wen-ru<sup>1,2,3</sup>, SHEN Yao-liang<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China; 3. Key Laboratory of Environmental Science and Engineering of Jiangsu Province, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** In this work, the effects of the sludge retention time (SRT, 35, 25, or 15 d) and pH (7.5, 8.0, 8.5) on denitrifying phosphorus removal were investigated using denitrifying phosphorus bacteria (DPBs) enriched in a sequencing batch reactor (SBR). The results indicated that shortening the SRT from 35 d to 25 d resulted in a decrease in the mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) from 2 821 to 2 301 mg·L<sup>-1</sup>, while the sludge loading rate (F/M) increased from 0.256 kg·(kg·d)<sup>-1</sup> to 0.312 kg·(kg·d)<sup>-1</sup>. Although the quantity of net phosphorus release and net phosphorus uptake decreased at this stage, the rates of anaerobic phosphorus release, anoxic phosphorus absorption, and denitrification reached their highest levels with values of 25.07, 15.92, and 9.45 mg·(g·h)<sup>-1</sup>, respectively, due to the increased sludge activity. Consequently, the phosphorus content of the sludge increased from 4.78% to 5.33%, and the removal rate of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P was stable at above 95% with an average effluent PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P concentration below 0.5 mg·L<sup>-1</sup>. When the SRT was further shortened to 15 d, the MLVSS decreased to values as low as 1 448 mg·L<sup>-1</sup>, and the proportion of DPBs in the phosphorus accumulating organisms (PAOs) decreased from 82.4% to 65.7%, indicating that the DPBs were gradually washed out from the system due to the excessively short SRT. At this stage, the phosphorus content of sludge decreased to 3.43%, while the rates of phosphorus release, phosphorus absorption, and denitrification also decreased to some extent. When the pH was increased (7.5-8.0), the anaerobic phosphorus release rate and the anoxic phosphorus absorption rate also increased, and reached 25.86 mg·(g·h)<sup>-1</sup> and 16.62 mg·(g·h)<sup>-1</sup>, respectively, at a pH of 8.0. When the pH exceeded 8.0, the phosphorus removal efficiency dropped rapidly, supposedly due to phosphorus chemical precipitation.

**Key words:** denitrifying phosphorus removal; sludge retention time; pH; sludge loading rate; phosphorus uptake rate

反硝化除磷工艺是通过反硝化除磷菌(DPBs)在缺氧条件下,以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N作为电子受体利用在厌氧条件下储存于体内的PHA提供能量以过量吸磷的一种工艺<sup>[1,2]</sup>. DPBs因其采用NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N代替O<sub>2</sub>作为电子受体而能够同时实现氮、磷的去除,解决了传统脱氮除磷工艺关于碳源及泥龄上的矛盾,理论上可以减少30%的曝气能耗,50%的碳源需求及污泥产量<sup>[3,4]</sup>,因此反硝化除磷工艺被视为一种可持续工艺,近年来成为脱氮除磷研究的热点.

反硝化除磷工艺的影响因素较多,早期研究者已作了相关研究,如碳源类型<sup>[5]</sup>、C/N<sup>[6,7]</sup>、电子受体类型<sup>[8]</sup>、厌氧及缺氧反应时间<sup>[9,10]</sup>、温度<sup>[11]</sup>等,然而目前关于SRT对反硝化除磷工艺的影响报道有限.SRT能直接影响系统中的微生物种群结构

收稿日期: 2018-08-07; 修订日期: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578353)

作者简介: 韦佳敏(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制与理论, E-mail: 478223661@qq.com

\* 通信作者, E-mail: ylshen@mail.usts.edu.cn

以及污泥的生化、理化特性,所以成为生化系统处理效能的一个控制性因素. 同样对于反硝化除磷工艺,有限的研究表明过长的泥龄使得污泥产率下降,导致胞内存储物 PHA、糖原(Gly)的减少,影响释磷及吸磷速率<sup>[12, 13]</sup>,但泥龄过短会使得 DPBs 逐渐从系统中淘汰,从而破坏了系统的除磷效率. 因此, SRT 的选择成为反硝化除磷工艺能否高效持续运行的关键因素之一,有待系统深入研究. 同时, pH 值也是反硝化除磷过程中的重要影响因素,但关于 pH 值对反硝化除磷的影响多是单因素研究<sup>[14]</sup>,所以本实验通过结合 SRT 及 pH 值考察对反硝化除磷工艺的影响,对于明晰反硝化除磷机理及高效稳定的反硝化除磷工艺具有重要意义.

本研究主要探讨了不同 SRT 条件下反硝化除磷的处理效能及规律,同步考察了最优 SRT 下不同 pH 值对反硝化除磷效能的影响,通过确定合理的参数,以期工程应用提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

本研究采用 SBR 装置,内径 15 cm,高 45 cm,由有机玻璃制成,有效容积 6.2 L,换水比为 50%,进水瞬时加入,反应器壁垂直方向设置 4 个取样口,用以排水和取样. 缺氧段使用蠕动泵瞬时加入硝酸钠溶液,反应器内置搅拌器使反应混合均匀. SBR 反应器的进水、搅拌、加药、出水等均由时间控制器自动控制. pH 值通过自动投加 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的盐酸及氢氧化钠进行控制.

### 1.2 实验用水和接种污泥

本实验用水采用人工模拟生活污水,组成主要为丙酸钠、氯化铵、磷酸二氢钾、氯化钙、硫酸镁、微量元素等. 水质成分见表 1. 微量元素配比为: FeCl<sub>3</sub> 1.5 g·L<sup>-1</sup>、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.15 g·L<sup>-1</sup>、CoCl<sub>2</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.15 g·L<sup>-1</sup>、CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 0.03 g·L<sup>-1</sup>、MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.06 g·L<sup>-1</sup>、Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 0.06 g·L<sup>-1</sup>、ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.12 g·L<sup>-1</sup>、KI 0.18 g·L<sup>-1</sup>、EDTA 10 g·L<sup>-1</sup>.

表 1 进水水质

分析指标	范围	均值
COD/mg·L <sup>-1</sup>	147.46 ~ 204.13	176.88
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	11.32 ~ 15.33	12.48
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0 ~ 0.11	0.05
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0 ~ 0.15	0.1
TN/mg·L <sup>-1</sup>	11.11 ~ 15.78	12.59
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/mg·L <sup>-1</sup>	9.46 ~ 11.32	10.37
pH	7.5 ~ 8.0	7.7

污泥接种于苏州市某污水处理厂 A<sup>2</sup>/O 工艺的二沉池,具有良好的硝化能力及除磷能力,经闷曝 24 h 后接种至反应器中,通过 SBR 反应器启动反硝化除磷. 系统采用三阶段富集反硝化聚磷菌,第一阶段为 A/O 运行实现 PAOs 的诱导富集,运行 15 d, 45 个周期;第二阶段为 A/A/O 运行方式,使 DPBs 逐渐成为优势种群,运行 15 d, 60 个周期;第三阶段采用 A/A 运行方式,进一步强化 DPBs 的反硝化除磷效果,提高以硝酸盐作为电子受体的 DPBs 在 PAOs 中的数量. 系统启动时间为 45 d,启动成功后反硝化除磷效果良好.

### 1.3 实验过程

系统采用厌氧/缺氧(A/A)运行模式,每天运行 4 个周期,每个周期运行步骤如下:厌氧 1.5 h,缺氧 3.5 h,进水、沉淀、出水为 1 h. 污泥龄通过排放周期末泥水混合液控制. 实验分为 3 个阶段分别记为 I、II、III,启动阶段不计入运行时间中. 第一阶段控制 SRT 为 35 d,运行 49 d, MLSS 为 4 095 mg·L<sup>-1</sup>(平均值);第二阶段 SRT 为 25 d,运行 26 d, MLSS 为 3 175 mg·L<sup>-1</sup>;第三阶段 SRT 为 15 d,运行 14 d, MLSS 为 1 942 mg·L<sup>-1</sup>. 其中进水 COD 浓度及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度根据剩余量进行适当调整,防止系统厌氧段无充分的外碳源导致“无效释磷”的发生<sup>[15]</sup>,造成缺氧段无充分的内碳源 PHA 进行吸磷,同时避免 COD 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 共存进行反硝化脱氮,对系统运行不利. 实验期间不同运行阶段的其他运行参数由表 2 所示.

表 2 实验过程及参数和条件控制

Table 2 Schemes of experimental processes and parameter/condition control

实验阶段	工况/d	pH	SRT/d	运行模式及时间/min	温度/°C
I	1 ~ 49	7.5 ~ 8.0	35	A/A(90/210)	25 ± 2
II	50 ~ 75	7.5 ~ 8.0	25	A/A(90/210)	25 ± 2
III	76 ~ 89	7.5 ~ 8.0	15	A/A(90/210)	25 ± 2

批次实验污泥取自第二阶段污泥,清洗 3 遍后均匀置于 3 个密闭容器中,进水 COD 为 160 mg·L<sup>-1</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 为 10.2 mg·L<sup>-1</sup>, 缺氧段 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为

40 mg·L<sup>-1</sup>, 分别控制 pH 值为 7.5、8.0、8.5, 考察不同 pH 值条件下 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的去除效果及厌氧释磷速率和缺氧吸磷速率. 反应均在室温下(20°C)进行.

1.4 分析方法

COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、TN 等指标采用标准方法<sup>[16]</sup>测定，水样采用 0.45 μm 中速滤纸过滤，以去除悬浮物的影响，其中 COD 采用快速消解法；NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂光度法测定；NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定；NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用紫外分光光度法；PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 采用钼锑抗分光光度法；TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法；MLSS、MLVSS 采用称重法测定。胞内多聚磷酸盐的测定参照文献<sup>[17]</sup>中的方法，糖原(Gly)采用蒽酮比色法<sup>[18]</sup>测定，pH 采用便携式测定仪进行测定。

根据文献<sup>[19]</sup>中的方法确定 DPBs 占 PAOs 的比例，具体方法是缺氧末段将反应器泥水混合液取出用蒸馏水清洗两遍，以去除残余的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 及其他物质的影响，并重新放入 SBR 反应器中，加入丙酸钠及磷酸二氢钾使得初始 COD 为 180 mg·L<sup>-1</sup>，PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 为 10 mg·L<sup>-1</sup>，控制 pH 为 7.5 ± 0.1，进行 90 min 的厌氧反应；反应结束后，将混合液均分为 2 份，其中一份取出进行好氧曝气，控制 DO 在 1.5 ~ 2.5 mg·L<sup>-1</sup>，另一份适量加入 NaNO<sub>3</sub>，缺氧搅拌，反应时间为 210 min。测定缺氧最大吸磷速率 (K<sub>ano</sub>)、好氧最大吸磷速率 (K<sub>aer</sub>)、比反硝化速率 (D<sub>ano</sub>)，K<sub>ano</sub> 与 K<sub>aer</sub> 的比值可粗略地反映出系统中 DPBs 占 PAOs 的比例，记为 f<sub>DPBs/PAOs</sub>。

$$K_{ano} = \frac{(P_{a,t_1} - P_{a,t_2})}{[(t_2 - t_1) \times MLVSS]}$$

$$K_{aer} = \frac{(P_{o,t_1} - P_{o,t_2})}{[(t_2 - t_1) \times MLVSS]}$$

$$D_{ano} = \frac{(N_{a,t_1} - N_{a,t_2})}{[(t_2 - t_1) \times MLVSS]}$$

式中，P<sub>a,t<sub>1</sub></sub>，P<sub>a,t<sub>2</sub></sub>，P<sub>o,t<sub>1</sub></sub>，P<sub>o,t<sub>2</sub></sub> 分别为在 t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub> 时间下，在好氧及缺氧条件下 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的质量浓度，mg·L<sup>-1</sup>。N<sub>a,t<sub>1</sub></sub>，N<sub>a,t<sub>2</sub></sub> 分别为在 t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub> 时间下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的质量浓度，mg·L<sup>-1</sup>。

聚磷污泥的含磷率计算如下：

$$P(\%) = \frac{(P_1 - P_2)}{1000} \times 100$$

式中，P<sub>1</sub> 为缺氧吸磷后污泥中的聚磷含量，mg·g<sup>-1</sup>；P<sub>2</sub> 为厌氧释磷后污泥中的聚磷含量，mg·g<sup>-1</sup>。

2 结果与讨论

2.1 污泥龄对除磷的影响

2.1.1 不同 SRT 下磷的去除特性

不同 SRT 条件下磷的去除特性见图 1。如图 1 (a)所示，反应器进水磷浓度维持在 10.37 mg·L<sup>-1</sup> 左右，在运行的第一阶段，SRT 为 35 d 时，磷的平均去除率为 79.2%。第二阶段 SRT 为 25 d 时，系统对磷的去除率达到 95.9%。至第三阶段，控制 SRT 为 15 d 时，平均去除率降至 67.4%。从图 1 (b)可知，胞内聚磷 (Poly-P) 在厌氧释磷及缺氧吸磷阶段呈现出明显的变化趋势，污泥含磷率在 SRT 为 25 d 时为 5.33%，表明 DPBs 在此阶段得到大量的增殖，此时的除磷效率最高，而 SRT 为 15 d 时污泥含磷率最低，可能是因为在短泥龄条件下，DPBs 被逐渐淘洗出系统，磷去除率也最低，在 SRT 为 35 d 时，污泥活性较差，污泥含磷率相对较低，去除率相对阶段 II 也较低。同时，可以从表 3 中看出，随着 SRT 的降低，系统污泥浓度、净释磷量及净吸磷量随之降低，但是污泥负荷 (F/M) 呈上升趋势，系统的污泥活性增加了，当 SRT 缩短为 25 d 时，去除率最佳，随着 SRT 进一步降低，虽然系统的进水基质没有增加，但是生物量的减少使得污泥磷负荷过高，去除率反而下降。随着 SRT 的增长，VSS/TSS 的比例随之降低，当 SRT 为 35 d 时 VSS/TSS 最低，只有 68.9%，可能是因为在长 SRT 条件下 MLVSS 逐渐增长，使得内源代谢的比例增高，活性细胞衰减比例增大<sup>[12, 13]</sup>，而 F/M 的降低导致微生

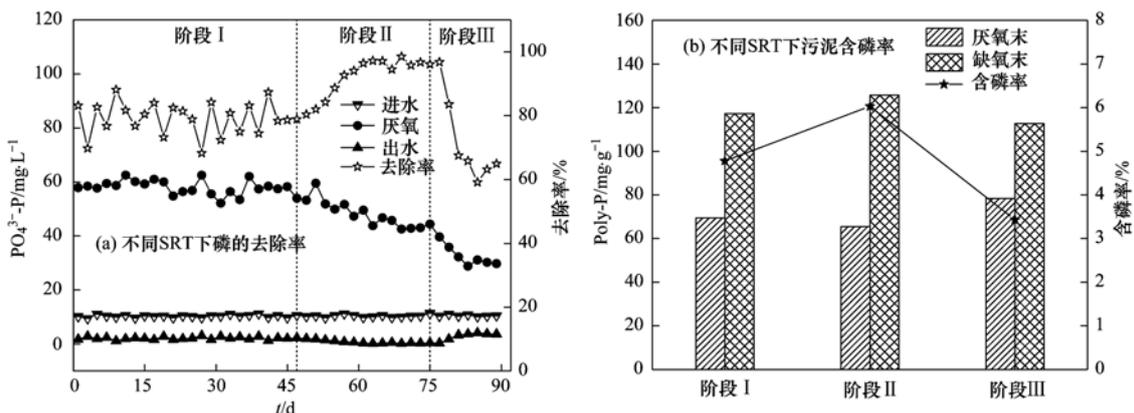


图 1 不同 SRT 条件下磷的去除特性

Fig. 1 Phosphorous removal characteristics under different SRT conditions

物降解细胞内储存的糖原, 在厌氧阶段挥发性脂肪酸(VFA)的代谢及 PHA 的生成降低, 在随后的缺氧阶段对吸收过程产生了负面影响<sup>[20]</sup>.

表 3 不同 SRT 下系统污泥特性

分析指标	阶段 I	阶段 II	阶段 III
F/M(以 COD/MLVSS 计)/ $\text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	0.256	0.312	0.428
MLSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4 095	3 175	1 942
MLVSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2 821	2 301	1 448
VSS/TSS/%	68.9	72.4	74.6
污泥含磷率/%	4.78	5.33	3.43
净释磷量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	47.64	37.63	22.03
净吸磷量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	55.82	47.24	29.56
磷的去除率/%	79.2	95.9	67.4

### 2.1.2 不同 SRT 下污泥动力学特性

从图 2 可以看出, 在 SRT 为 35 d 时, 厌氧段上清液  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度高达  $53.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而释磷速率(以 P/VSS 计)仅为  $22.61 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ , 可能是由于 SRT 过长, 系统污泥负荷过低, DPBs 呈现出较高的内源衰减速率<sup>[21]</sup>. 当 SRT 降低至 25 d 时, 厌氧段  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度及释磷速率分别为  $47.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

和  $25.07 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ . 虽然此阶段释磷量低于阶段 I, 但由于污泥活性的增加, 其释磷速率明显大于阶段 I. 同时, 污泥的缺氧最大吸磷速率  $K_{\text{ano}}$ 、好氧最大吸磷速率  $K_{\text{acr}}$  和比反硝化速率  $D_{\text{ano}}$  (以 N/VSS 计) 分别由 11.34、14.96 和  $8.88 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$  提高到了 15.92、19.32 和  $9.45 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ , DPBs 占 PAOs 的比例( $f_{\text{DPBs/PAOs}}$ )由 75.8% 提升为 82.4%, 说明 SRT 缩短为 25 d 时, 系统中 DPBs 的富集程度得到进一步加强. 此外, 在阶段 II 中, 平均每利用  $1 \text{ mg NO}_3^- \text{-N}$  可吸收约  $1.27 \text{ mg PO}_4^{3-}\text{-P}$ , 高于张建华等<sup>[9]</sup>的实验结果(每利用  $1 \text{ mg NO}_3^- \text{-N}$  能吸收约  $1.09 \text{ mg PO}_4^{3-}\text{-P}$ ), 这与污泥性质及实验条件不同有关, 同时也说明了该阶段下污泥活性较高. 而当 SRT 由 25 d 缩短至 15 d 时, 厌氧段  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度及释磷速率分别降低至  $28.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $16.24 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ , 缺氧  $D_{\text{ano}}$  降为  $6.09 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ , 其  $f_{\text{DPBs/PAOs}}$  也降低至 65.7%, 这是由于反硝化聚磷菌的生长速率缓慢, 世代周期长, SRT 过短导致 DPBs 污泥从反应器中流失, 污泥浓度的减少使得污泥负荷变高, 导致此阶段厌氧释磷及缺氧吸磷速率出现了不同程度地下降.

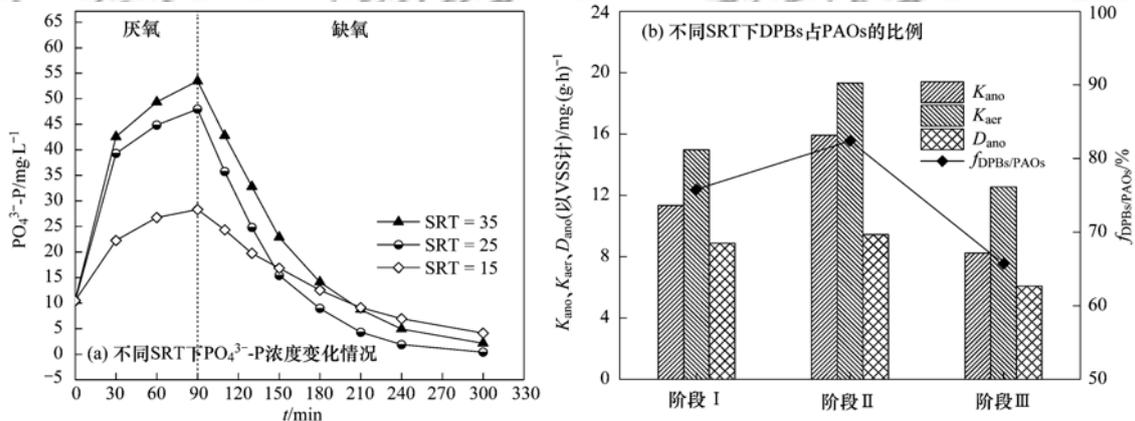


图 2 不同 SRT 条件下  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度变化及反硝化聚磷菌动力学特性

Fig. 2 Variations in the  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  concentration and kinetic activities of the DPBs under different SRT conditions

### 2.2 pH 值对除磷的影响

不同 pH 值对除磷的影响如图 3 所示, 当 pH 从 7.5 升为 8.0 时, 厌氧末  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度从  $45.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  提高至  $49.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 释磷速率从  $23.65 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$  升至  $25.87 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ , 在一定的范围内释磷量及速率都随着 pH 升高而升高. 这可以从除磷生化代谢模型来解释<sup>[22]</sup>: VFA 通过主动运输以分子的形式扩散进入细胞膜, 在细胞内被转变为离子和质子形式. 该过程需要消耗细菌质子移动力 (PMF), 其主要作用是通过膜结合酶复合体合成 ATP 并运输基质到细胞内. 在聚磷细胞体内, 为了重建或者恢复 PMF, 细胞需要分解体内贮存的 Poly-P, 并利用质子传输 ATP 的能力将分解的离子

或分子输送到细胞外, 从而发生了释放, 其宏观表现为液相中磷浓度的升高, 因为 pH 值的升高将进一步减小 PMF, 为了维持 PMF 的恒定则细胞需要分解更多的 Poly-P, 故升高 pH 值能使更多的磷被释放出来. 然而, 当 pH 升高至 8.5 后, 厌氧末  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度及释磷速率急剧下降至  $31.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $14.15 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ , 分析认为形成的磷酸盐沉淀引起液相中检测值变小, 同时一部分沉淀吸附到菌胶团表面, 阻碍了 DPBs 对碳源的吸收及磷的释放<sup>[8, 23]</sup>. 不同 pH 对缺氧吸磷能力的影响与释磷的趋势一致, 即当 pH 从 7.5 升至 8.0 时, 吸磷速率随之升高, 而当 pH 继续提升至 8.5 时, 吸磷速率快速下降, 最大缺氧吸磷速率分别为 15.12、16.62

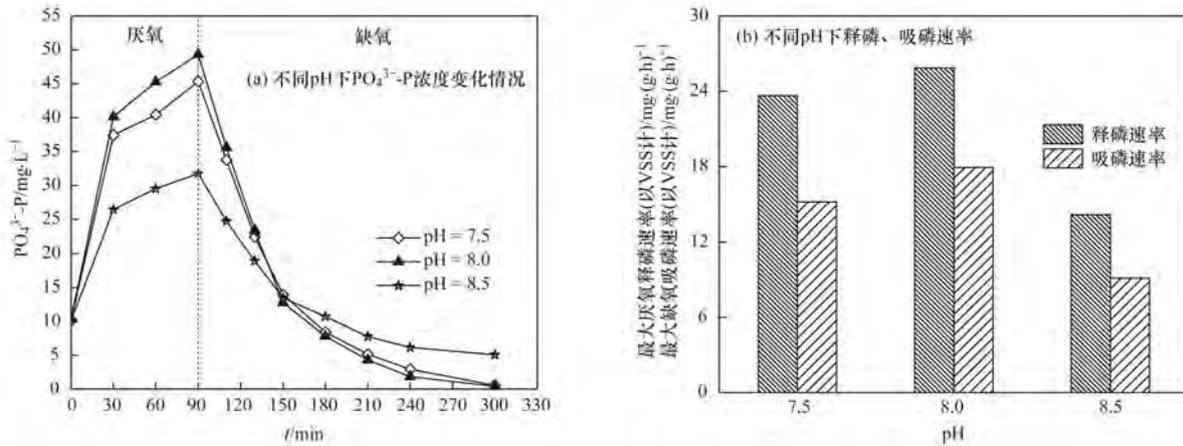


图3 不同 pH 条件下PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P浓度及释磷、吸磷速率变化

Fig. 3 Variations of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P concentration, phosphorus release rate, and phosphorus uptake rate under different pH values

和 9.14 mg·(g·h)<sup>-1</sup>. Sun 等<sup>[24]</sup> 的研究表明, DPBs 最佳的增殖及除磷的 pH 为 8.0, 与本实验的结果一致.

### 2.3 典型周期内各污染物转变规律

在 SRT 为 25 d, pH 控制在 8.0 时, 典型周期内 COD、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、Poly-P 及 Gly 的变化如图 4 所示. 从中可知, 在厌氧条件下 DPBs 通过 Poly-P 的分解及糖原(Gly)的酵解获得能量, 吸收 VFA 以聚-β-羟基链烷酸酯(PHA)的形式存储在胞内, COD 从 185.29 mg·L<sup>-1</sup>降至 21.88 mg·L<sup>-1</sup>, 液相中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 快速增长, 厌氧末 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度达到 42.58 mg·L<sup>-1</sup>, Poly-P 及 Gly 则分别降至 70.35 mg·g<sup>-1</sup>和 132.39 mg·g<sup>-1</sup>; 在缺氧条件下, DPBs 利用 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 作为电子受体将厌氧段合成的 PHA 氢化, 产生的能量实现磷的过量吸收, 并伴随着糖原的再生及细胞的增殖, 缺氧结束时 Poly-P 及 Gly 呈现出相同的趋势, 分别增长至 127.45 mg·g<sup>-1</sup>和 189.43 mg·g<sup>-1</sup>, 同时 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 降低至 0.15 mg·L<sup>-1</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 也从 31.31 mg·L<sup>-1</sup>降至 0.81 mg·L<sup>-1</sup>. 此外, 厌氧

末较低的 COD 含量避免了碳源和硝酸盐同时出现, 否则存在常规反硝化菌与反硝化除磷菌之间对电子供体及电子受体的竞争, 不利于反硝化除磷系统<sup>[25]</sup>.

### 3 结论

(1) 当系统处于长 SRT(35 d) 条件下, 污泥负荷过低, DPBs 呈现出较高的内源衰减速率, SRT 过短(15 d)时, DPBs 则逐渐从系统中流失, SRT 为 25 d 时, 系统污泥活性最佳, VSS/TSS 为 72.4%, 污泥含磷率高达 5.33%, 出水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度稳定在 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 以下, 去除率稳定在 95% 以上, 平均每利用 1 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 可吸收约 1.27 mg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P.

(2) 在一定 pH(7.5 ~ 8.0) 范围内, 随着 pH 的升高, 释磷及吸磷速率也随之增加, 当 pH 超过 8.0 后, 易形成磷沉淀, 影响磷的正常释放及吸收, 除磷效率快速下降, 因此反硝化除磷 pH 值应控制在 7.5 ~ 8.0 之间.

(3) 在典型周期内, 进水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 为 10.37 mg·L<sup>-1</sup>, 厌氧末 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 达到 42.58 mg·L<sup>-1</sup>, COD 降至 21.88 mg·L<sup>-1</sup>, 缺氧吸磷及脱氮明显, 出水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 分别为 0.15 mg·L<sup>-1</sup> 和 0.81 mg·L<sup>-1</sup>, 系统脱氮除磷效果良好.

#### 参考文献:

[1] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Improving the nitrogen removal efficiency of an A<sup>2</sup>/O based WWTP by using an on-line knowledge based expert system[J]. Water Research, 2002, 36(8): 2109-2123.

[2] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, et al. Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale[J]. Water Research, 2007, 41(11): 2271-2300.

[3] Xu X Y, Liu G, Zhu L. Enhanced denitrifying phosphorus removal in a novel anaerobic/aerobic/anoxic (AOA) process with the diversion of internal carbon source [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(22): 10340-10345.

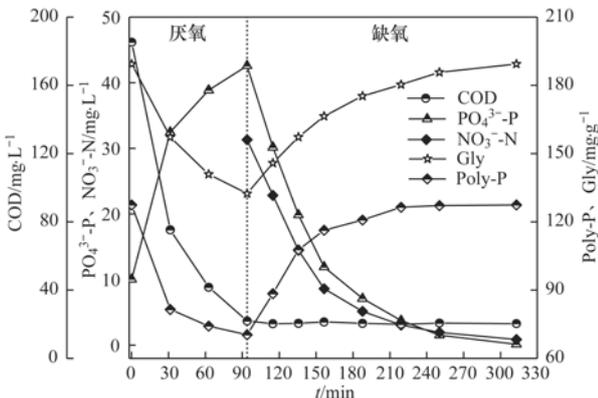


图4 典型周期内 COD、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、Poly-P 及 Gly 变化情况

Fig. 4 Variations in COD, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, Poly-P, and Gly during a typical period

- [ 4 ] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z G. Development of a 2-sludge, 3-stage system for nitrogen and phosphorous removal from nutrient-rich wastewater using granular sludge and biofilms [J]. *Water Research*, 2008, **42**(12): 3207-3217.
- [ 5 ] Carvalho G, Lemos P C, Oehmen A, *et al.* Denitrifying phosphorus removal; Linking the process performance with the microbial community structure [J]. *Water Research*, 2007, **41**(19): 4383-4396.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Wang Y Y, Geng J J, Ren Z J, *et al.* Effect of COD/N and COD/P ratios on the PHA transformation and dynamics of microbial community structure in a denitrifying phosphorus removal process [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2013, **88**(7): 1228-1236.
- [ 8 ] Zhang S H, Huang Y, Hua Y M. Denitrifying dephosphatation over nitrite; Effects of nitrite concentration, organic carbon, and pH [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(11): 3870-3875.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] Zhang M, Peng Y Z, Wang C, *et al.* Optimization denitrifying phosphorus removal at different hydraulic retention times in a novel anaerobic anoxic oxic-biological contact oxidation process [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **106**: 26-36.
- [ 11 ] 鲍林林, 李相昆, 李冬, 等. 温度和污泥质量浓度对反硝化除磷的影响 [J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2008, **24**(4): 400-403, 408.
- Bao L L, Li X K, Li D, *et al.* Study on influence of temperature and MLSS on denitrifying phosphorus removal system [J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2008, **24**(4): 400-403, 408.
- [ 12 ] Belli T J, Bernardelli J K B, Da Costa R E, *et al.* Effect of solids retention time on nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in a sequencing batch membrane bioreactor [J]. *Environmental Technology*, 2016, **38**(7): 806-815.
- [ 13 ] Ersu C B, Ong S K, Arslankaya E, *et al.* Impact of solids residence time on biological nutrient removal performance of membrane bioreactor [J]. *Water Research*, 2010, **44**(10): 3192-3202.
- [ 14 ] 胡筱敏, 李微, 刘金亮, 等. pH 对以亚硝酸盐为电子受体反硝化除磷的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, **44**(5): 2144-2149.
- Hu X M, Li W, Liu J L, *et al.* Influence of pH on denitrifying phosphorus removal using nitrite as electron acceptor [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, **44**(5): 2144-2149.
- [ 15 ] 吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 等. 容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 239-246.
- Lü L, You W, Wei J M, *et al.* Effect of volume loading rate (VLR) on denitrifying phosphorus removal by the ABR-MBR process [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 239-246.
- [ 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.
- [ 17 ] 由阳, 彭永臻, 王淑莹, 等. 强化生物除磷系统胞内聚合物测定方法优化 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, **42**(2): 207-211.
- You Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Optimization of intracellular polymer analysis for enhanced biological phosphorous removal system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, **42**(2): 207-211.
- [ 18 ] Liu Y, Chen Y G, Zhou Q. Effect of initial pH control on enhanced biological phosphorus removal from wastewater containing acetic and propionic acids [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(1): 123-129.
- [ 19 ] Wachtmeister A, Kuba T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Water Research*, 1997, **31**(3): 471-478.
- [ 20 ] Lee D, Kim M, Chung J. Relationship between solid retention time and phosphorus removal in an anaerobic-intermittent aeration process [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2007, **103**(4): 338-344.
- [ 21 ] 王朝朝, 闫立娜, 李思敏, 等. SRT 对 UCT-MBR 反硝化除磷性能与膜污染行为的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1715-1723.
- Wang Z Z, Yan L N, Li S M, *et al.* Influence of sludge retention time on denitrifying dephosphatation propensity and membrane fouling behavior in a UCT-MBR process [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1715-1723.
- [ 22 ] 王亚宜, 王淑莹, 彭永臻. MLSS、pH 及  $\text{NO}_2^-$ -N 对反硝化除磷的影响 [J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(7): 47-51.
- Wang Y Y, Wang S Y, Peng Y Z. Influence of MLSS, pH and  $\text{NO}_2^-$ -N concentration on denitrifying phosphorus removal [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, **21**(7): 47-51.
- [ 23 ] 郭琇, 孟昭辉, 董晶颖. 厌氧池中 pH 值对生物除磷的影响 [J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2005, **21**(3): 292-293, 297.
- Guo X, Meng Z H, Dang J H. Study on pH value effect on removal of biological phosphorus in anaerobic pool [J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2005, **21**(3): 292-293, 297.
- [ 24 ] Sun L, Cao W P, Zhang H F, *et al.* Optimal growth conditions and nutrient removal characteristic of a denitrifying phosphorus-accumulating organism [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(52): 25028-25035.
- [ 25 ] Ng W J, Ong S L, Hu J Y. Denitrifying phosphorus removal by anaerobic/anoxic sequencing batch reactor [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(3): 139-146.

## CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area .....	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM <sub>2.5</sub> in Xi'an .....	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> During Winter in Taiyuan .....	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou .....	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in a Suburb of Zhuhai City .....	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean .....	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM <sub>2.5</sub> in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism .....	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei .....	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017 .....	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region .....	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions .....	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station .....	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing .....	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM <sub>2.5</sub> Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City .....	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization .....	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators .....	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days .....	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days .....	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting .....	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO <sub>2</sub> Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities .....	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing .....	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay .....	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay .....	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring .....	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis .....	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin .....	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model .....	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs .....	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn .....	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers .....	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis .....	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water .....	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution .....	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake .....	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide .....	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals .....	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles .....	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater .....	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor .....	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test .....	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System .....	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System .....	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics .....	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process .....	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions .....	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature .....	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China .....	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou .....	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River .....	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH <sub>4</sub> Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia .....	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application .....	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China .....	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region .....	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land .....	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry .....	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)