

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能

马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要: 实验采用改良型 CAST 工艺, 以生活污水为研究对象, 考察了 C/P、回流比及温度等不同运行模式对系统除磷性能的影响。结果表明, 常温条件下进水 C/P 由 50 升至 100, 系统除磷率均值从 15% 迅速升至 95.6%, 除磷性能显著提高; 继而降低 C/P 至 75, 除磷性能因进水碳源不足再度下降, 除磷率均值为 51.4%, 且长期投加易降解碳源引发系统污泥膨胀并导致污泥大量流失。C/P 较低情况下, 回流比由 25% 降低至 12.5%, 除磷性能提高 2.3 倍, 继续降低回流比至 0, 除磷性能反而下降; 温度实验研究则表明, 低温系统($14^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), 除磷率稳定维持在 90% 以上, 而高温短程硝化系统($27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$)除磷率仅为 14.1%, 可见低温更有利于系统磷的去除。吸磷小试发现, 常温系统污泥以 O_2 、 NO_3^- 和 NO_2^- 为电子受体均能进行吸磷, 而低温系统污泥能以 O_2 、 NO_3^- 为电子受体进行吸磷, 高温系统污泥则仅能以 O_2 为电子受体进行少量吸磷。此外, 实验还发现, 系统短期闲置导致的污泥“饥饿”有利于系统除磷率的提高。

关键词: 改良型 CAST 工艺; C/P; 温度; 回流比

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5146-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705206

Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes

MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, ZHOU Meng, SUN Hong-wei, WANG Lei

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A modified cyclic activated sludge technology (CAST) treating domestic wastewater was employed to investigate the effects of different operating modes, such as C/P ratio, reflux ratio, and temperature on phosphorus removal. The results illustrated that at room temperature the phosphorus removal of the system improved significantly when the influent C/P ratio increased from 50 to 100, with the removal efficiency increasing rapidly from 15% to 95.6%. Decreasing the C/P ratio to 75, the phosphorus removal performance declined due to influent carbon source deficiency, and the mean phosphorous removal efficiency decreased to 51.4%. At the same time, the long-term addition of an easily degradable carbon source resulted in sludge bulking and a large amount of sludge loss. With a low C/P ratio, the phosphorus removal performance increased by 2.3 times when the sludge reflux ratio decreased from 25% to 12.5%. However, the phosphorus removal performance declined when reducing it to 0. The temperature experiment results showed that the phosphorous removal efficiency of the system remained stable, above 90%, in the low temperature system ($14^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). However, the phosphorous removal efficiency of a shortcut nitrification system at high temperature ($27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) was only 14.1%, suggesting that a low temperature was beneficial for removing phosphorous. It was observed from the batch tests that the sludge at room temperature could utilize dissolved oxygen, nitrate, and nitrite as electron acceptors to take up phosphate. The sludge in the low temperature system could use both dissolved oxygen and nitrate as the electron acceptors. However, the sludge in the high temperature system could only use dissolved oxygen as the electron acceptors to take up phosphate. In addition, it was also found that sludge under starvation conditions resulting from short-term idling of the system favored phosphorus removal.

Key words: modified CAST; COD/TP ratio; temperature; sludge reflux ratio

目前, 由氮、磷等元素引起的水体富营养化现象日趋严峻, 而磷对藻类生长的影响更为显著, 有资料显示, 磷浓度超过 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 就会导致水体富营养化, 水中藻类继而得以疯长^[1,2], 这严重影响着自然环境。因此, 开发经济高效的除磷技术对改善水环境具有重要的意义。循环式活性污泥法(cyclic activated sludge technology, CAST 工艺)因具有投资少、运行费用低、选择器能防止污泥膨胀及运行灵活等优点, 成为众多污水处理厂的首选工

艺。然而, CAST 工艺是集有机物去除、硝化、反硝化及生物除磷等处理功能于一体的单一污泥悬浮生长系统, 反应器内微生物种群间复杂的生存竞争关系尚不明确, 此外, 由于生活污水碳氮比(C/N)较低, 系统内可利用的碳源有限, 且由季节更替引起

收稿日期: 2017-05-21; 修订日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168027, 51668031); 兰州交通大学大学生创新性实验计划项目(2017066)

作者简介: 马娟(1978~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: meggyma@163.com

的温度变化等因素在很大程度上影响了污水厂的高效运行. 资料显示, PAOs 虽被证明是一种耐冷菌, 但降低温度影响其生化反应速率, 进而影响系统除磷功能^[3,4]; 另有研究表明, 低温环境中除磷效果更好^[5~8]; 但也有学者持不同意见, 认为当水温为 20~30℃ 时, 系统污泥的 TN 和 TP 去除负荷较高^[9]. 此外, 对进水碳源影响系统除磷性能的研究表明, C/P 高于 33 左右时系统除磷效果较好, C/P 低于 33 时除磷效果线性下降^[10~12]; 也有学者认为 C/P 比过高(>50)会导致进入好氧段的 COD 太高而使聚磷菌被聚糖菌淘汰掉^[13]. 但上述实验主要在 SBR 或 A²/O 系统内进行且以人工配水为研究对象, 对 CAST 处理实际生活污水的研究鲜见报道.

针对以上问题, 本研究以实际生活污水为处理对象, 考察了常温强化、低温及高温短程硝化等不同运行模式下 CAST 工艺的除磷性能, 同时分析了不同运行条件下系统污泥的沉降性能, 并采取降低回流比的方法以提高系统除磷效率.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行

实验装置如图 1 所示, 反应器为有机玻璃制成. 反应器总容积 84 L, 有效容积 54 L, 生物选择区占总容积的 10%, 反应器的运行由在线系统控制, 根据需要对反应器的进水、搅拌、曝气、沉淀、回流的启动和停止进行实时控制.

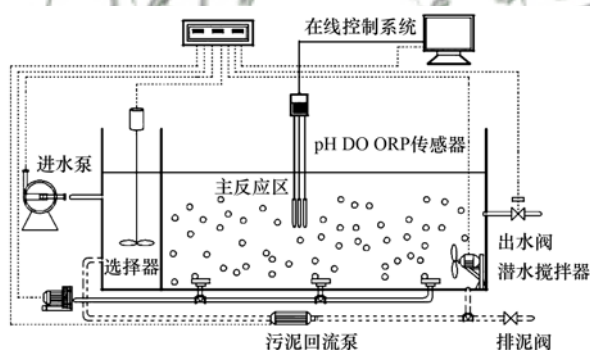


图 1 CAST 工艺实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the CAST experimental setup

CAST 反应器分别以不同模式运行, 其中温度实验采用 R₁ 运行模式, 即进水/缺氧 1 h-曝气 1 h-进水/缺氧 1 h-曝气 1 h-沉淀 1 h-排水、闲置 1 h. 反应器运行参数: 低温控制在 14℃ ± 1℃, 高温为 27℃ ± 1℃, SRT 为 15 d, 回流比 25%, 排水比 1/3. 强化除磷(即投加碳源)及降低回流比实验采用 R₂ 运行模式, 即进水/缺氧 1 h-曝气 2 h-进水/缺氧

1 h-曝气 2 h-沉淀 1 h-排水、闲置 1 h, 其中强化除磷实验外加碳源为无水乙酸钠, 投量分别为 250 mg·L⁻¹ 和 100 mg·L⁻¹, SRT 与排水比同 R₁.

吸磷小试分别于实验各工况的稳定运行期间进行. 待 CAST 反应器运行至好氧结束时, 取泥水混合液 6 L 置于 SBR 反应器并投加 300 mg·L⁻¹ COD 厌氧搅拌 2 h, 污泥充分释磷后沉淀、排水并加电解质溶液洗泥 2 次, 然后将污泥均分至 3 个 SBR 反应器, 加自来水至总体积为 4 L 后备用. 小试反应初始向 3 个 SBR 反应器各投加 PO₄³⁻-P 35 mg·L⁻¹, 其中, SBR₁ 进行好氧吸磷小试, DO 控制在 2 mg·L⁻¹ 左右, SBR₂ 和 SBR₃ 分别进行以 NO₂⁻ 和 NO₃⁻ 为电子受体的缺氧吸磷小试, 因此, 反应初始分别向其中投加 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 各 35 mg·L⁻¹, SBR 其他条件同 CAST 反应器.

1.2 实验用水及接种污泥

实验用水取自兰州交通大学家属区的实际生活污水, 进水水质为: COD 200.9~369.6 mg·L⁻¹, 氨氮 33.41~87.2 mg·L⁻¹, 总氮 33.95~88.7 mg·L⁻¹, PO₄³⁻-P 2.1~5.6 mg·L⁻¹, pH 值 7.0~7.8, 平均 COD/TP 约 50.

本实验用污泥取自兰州市七里河污水处理厂二沉池, 采用非限制性曝气方式培养驯化 2 d, 其后按照各自的实验方案运行, 定期检测出水水质并记录.

1.3 分析项目及方法

所有水样均采用定性滤纸过滤后测定, 水质分析项目中 PO₄³⁻-P 采用钼锑抗分光光度法测定, COD 采用 COD 快速测定仪测定, TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法, NO₃⁻-N 采用麝香草酚分光光度法, NO₂⁻-N 用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法. MLSS(混合液悬浮固体浓度)、MLVSS(混合液挥发性悬浮固体浓度)采用滤纸重量法测定, SV(污泥沉降比)采用 30 min 沉降法测定. 温度、DO、ORP 及 pH 由德国 Multi 3420 在线测定仪在线监测.

2 结果与讨论

2.1 C/P 对改良型 CAST 工艺除磷性能的影响

图 2 中工况 I、II、III 及 IV 分别为 C/P 为 50、100、75 及 75(曝气时间较之前减少 2 h) 的污染物去除性能.

由图 2(a) 可知, 反应器运行期间, 工况 I、II、III 中, 系统 COD 去除率随着 C/P 的增加略有

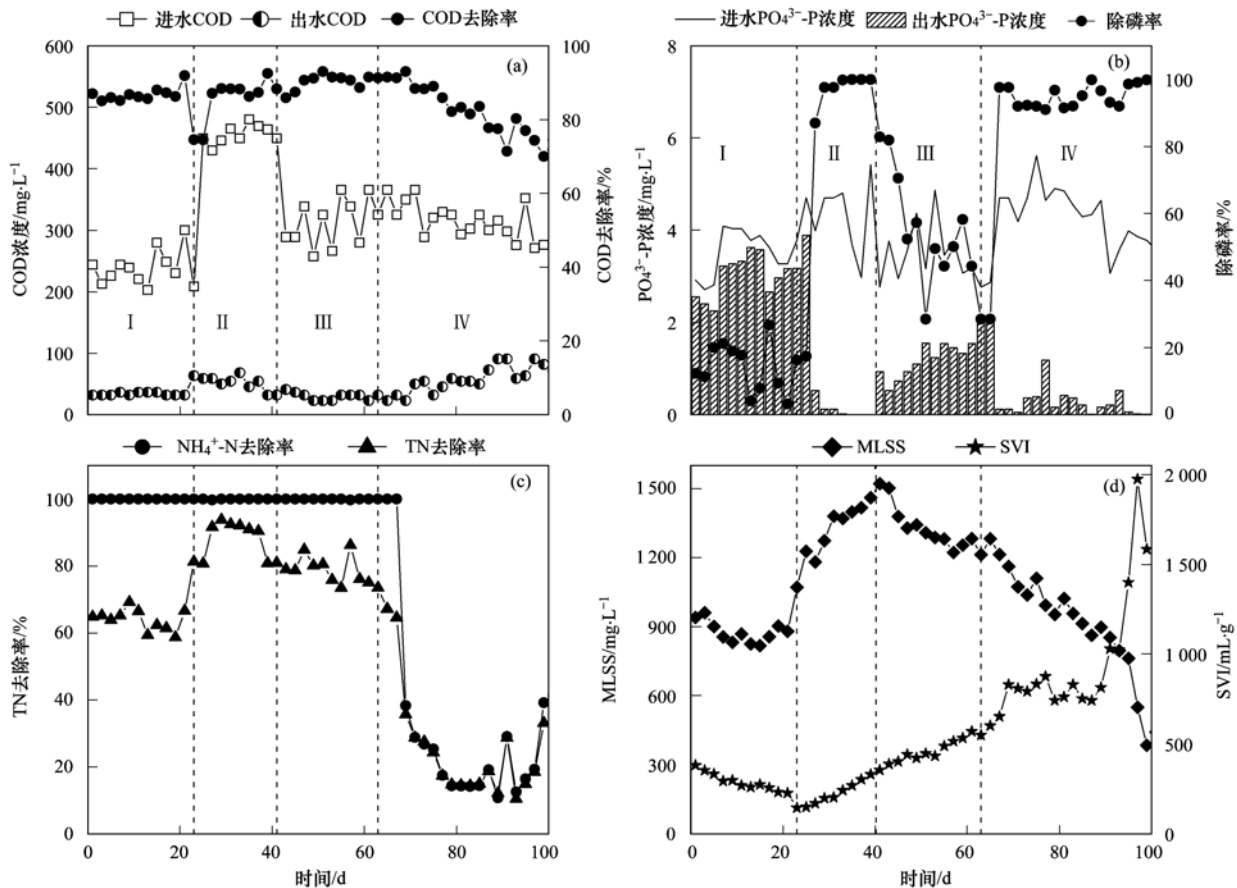


图2 不同 C/P 对改良型 CAST 工艺除磷性能的影响

Fig. 2 Phosphorus removal of the CAST system under different C/P conditions

提高,但基本稳定维持在 87% 左右,这和史静等^[14]的研究结果一致.从图 2(b)可见,工况 I 即 $\text{C/P}=50$,其出水磷浓度均值为 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除磷率仅为 15%;继而提高 C/P 至 100,出水磷浓度小于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)规定一级 A 标准,实现了良好的除磷性能,除磷率也迅速提高至 95.6%,系统除磷性能较工况 I 大为改善.工况 III 降低 C/P 至 75,系统除磷性能迅速恶化,出水磷浓度均值为 $1.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除磷率降至 51.4%,最低仅为 28.5%,分析认为外投碳源的减少致使进水有机碳源不足,无法缓解反硝化细菌与聚磷菌对有机碳源的竞争,聚磷菌只能利用反硝化作用后的剩余碳源进行释磷作用,继而导致系统除磷性能恶化.而由图 2(c)得,增加 C/P 后,工况 II 和工况 III 的 TN 去除率分别为 88% 和 83.3%,较工况 I 的 64% 显著提高.

此外,图 2(d)中 SVI 值在工况 I、II、III 运行期间由 $149.2\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 逐渐升至 $601.8\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,分析认为,投加易降解碳源可解决因碳源不足而引起的除磷性能差的问题,但长期投加会引发污泥膨胀现

象.与此同时,由图 3(a)典型周期图还可知,工况 II 中,进入系统的氨氮在短时间内已完全硝化,DO 发生突跃,说明系统在好氧阶段已处于过曝气状态,而过量曝气会导致污泥沉降性能变差甚至发生解体,这可能是引起系统污泥膨胀的另一原因^[15],为解决由投加碳源和过曝气引起的污泥沉降性能变差的问题,工况 IV 通过缩短曝气时间缓解污泥膨胀等问题(运行方式同 R_1).由图 2 可见,缩短曝气时间(64~110 d),系统 TN 去除率迅速降低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 因曝气时间不足出现不完全硝化现象,出水 TN 以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主,平均去除率由 83.4% 跌至 33.9%,脱氮效率明显下降.相反,除磷性能迅速回升,79 d 后出水磷浓度均小于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除磷率稳定维持在 90% 以上,说明由于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的不完全硝化导致反硝化菌所利用碳源量减少,继而使聚磷菌可获得碳源增多;从另一个角度分析,一旦碳源易得,聚磷菌能迅速利用其提高除磷效率.在此期间,COD 去除率波动较小,其平均去除率为 81.6%,较工况 III 降低了 5.4%,但 SVI 值依然保持上升趋势并高达 $1947.0\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,污泥膨胀现象非但没有减弱,

反而更加严重, 污泥严重流失, 至本工况结束 MLSS 仅为 $678 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此, 投加易降解碳源, 虽能提高系统的除磷性能, 但长期投加易引发污泥

膨胀^[16].

各个工况典型周期内释磷量如图 3(b).

分析发现, 随着 COD/TP 的增加, 各工况下选

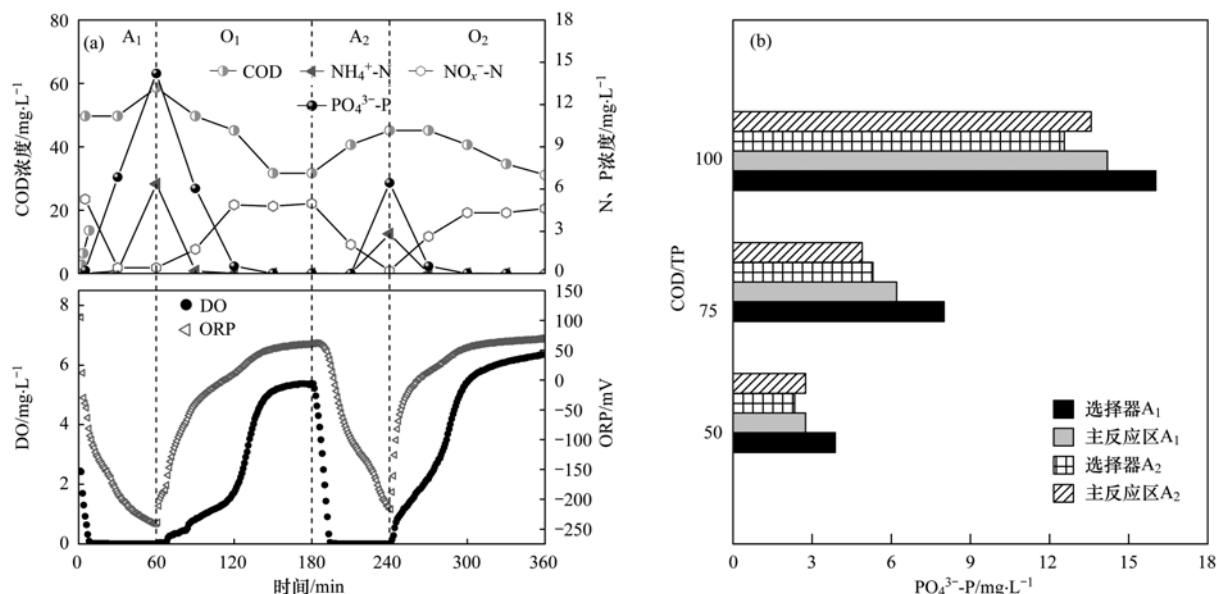


图3 不同 C/P 下典型周期内系统释磷变化量

Fig. 3 Phosphate release during typical cycles under different conditions

择器和主反应器中的释磷量显著提高, 其中, 工况 III, 选择器在缺氧时期 A₁ 和 A₂ 段的释磷量较工况 I 分别增加了 2.1 和 1.5 倍, 主反应区在缺氧时期 A₁ 和 A₂ 段的释磷量分别高了 2.2 和 2.3 倍, 而工况 II, 选择器在缺氧时期 A₁ 和 A₂ 段释磷量较工况 I 分别提高了 4.13 和 3.13 倍, 主反应区在缺氧时期 A₁ 和 A₂ 段分别提高 4.94 和 7.84 倍, 而厌氧释磷与好氧过量摄磷是一个相辅相成的关系, 厌氧段磷释放量越大, 合成的 PHB 就越多, 那么在好氧段时由于分解 PHB 而合成的聚磷速度就较大, 所以表现出来其除磷性能也就越好, 这也就是 COD/TP 比为 100, 除磷性能良好的原因。

2.2 回流比对改良型 CAST 工艺除磷性能的影响

图 4 为不同回流比条件下污染物去除性能。

由图 4 可知, 系统回流比由 25% 降至 12.5%, 再降为 0 的过程中, 各工况下 COD 去除率稳定维持在 88.3% 左右, TN 去除率因降低回流比弱化了选择器的反硝化性能从而呈下降趋势, 其值分别为 65.4%、58.3%、54%。各工况下系统除磷率均值依次为 15.7%、36.1% 和 14.1%, 其中回流比为 12.5% 的除磷效率较 25% 时提高约 2.3 倍, 可见, 降低回流比可提高系统生物除磷性能, 但当回流比降为 0 后, 除磷效果反而变差。分析认为, 选择器是聚磷菌进行放磷的主要场所, 当回流比为 25%

时, 进入选择区的活性污泥混合液中含有较高的 NO_x--N , 甚至一定浓度的 DO, 打破了选择器严格厌氧的环境, 不利于污泥厌氧释磷的进行; 当系统回流比降至为 0 时, 选择器内 MLSS 减少, 聚磷菌数量降低, 亦不利于系统进行除磷, 因此, 当回流比为 12.5% 时, 有助于提高系统除磷性能。整个运行期间, 污泥浓度稳定在 $1100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 而在回流比为 25% 工况初期, 反应器污泥有轻微膨胀, 但随着反应的进行, SVI 值趋于稳定, 最终稳定在 $250 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右; 在污泥回流比为 12.5% 和 0% 时, 系统 SVI 略有增加, 但均稳定维持在 $300 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右。

此外, 由图 4 还可知, 除磷率曲线有 3 个明显的峰值, 第一个峰值出现在回流比降至 12.5% 初期, 降低回流比可以在短时间内迅速提高系统除磷效率, 但长期运行发现系统 TP 的去除率又下降至 26%; 第二个峰值出现在反应器运行的 49 d, 由于外界因素反应器停止运行 2 d, 系统处于厌氧闲置状态, 污泥利用内碳源进行反硝化和释磷作用, 聚磷菌合成了一定量的 PHB, 当系统再次恢复运行时, 除磷性能显著增加。为验证第二个峰值产生的原因, 人为停运反应器 2 d, 结果发现厌氧闲置有利于快速提高系统除磷率即第三个峰值 (67 d)。

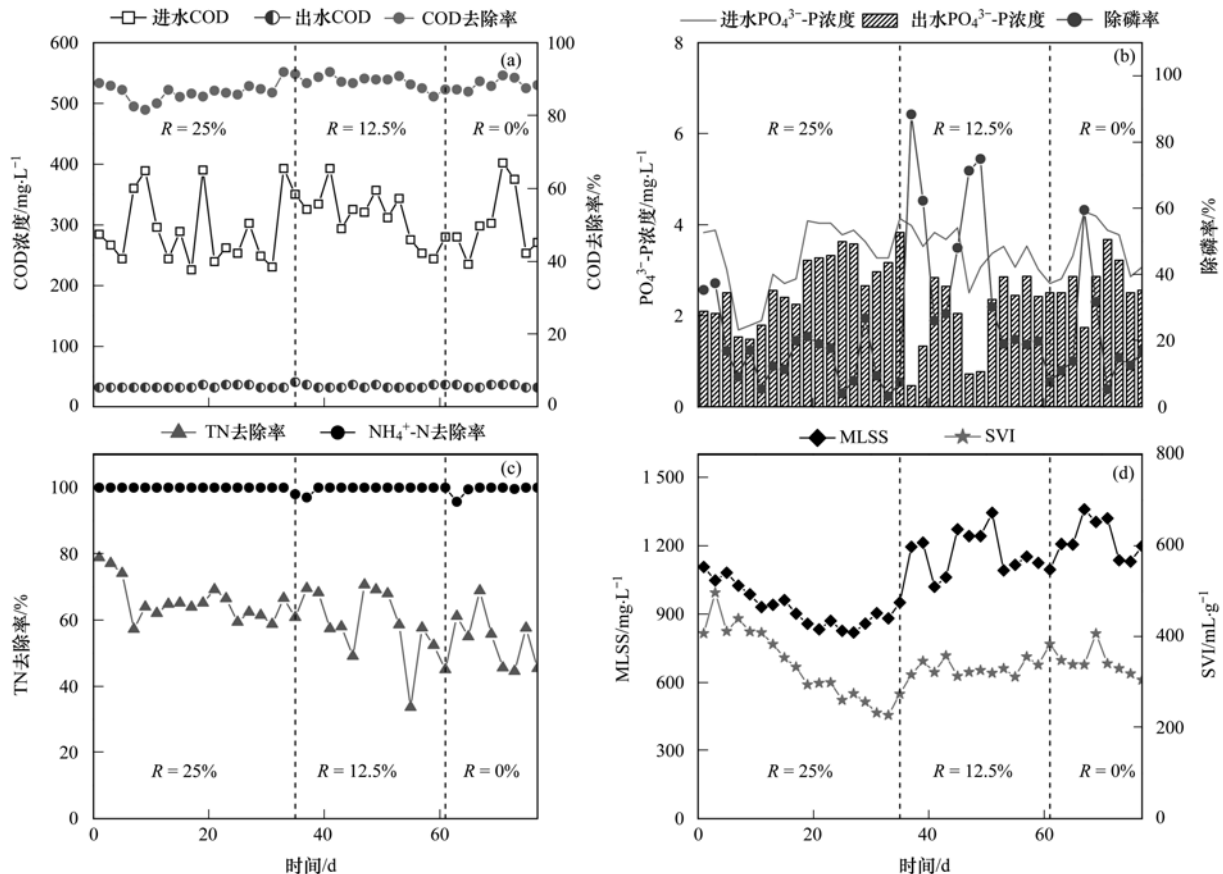


图4 不同回流比条件下改良型 CAST 中污染物去除性能

Fig. 4 Nutrients removal performance of the CAST system under different reflux ratio conditions

2.3 低/高温条件对改良型 CAST 工艺除磷性能的影响

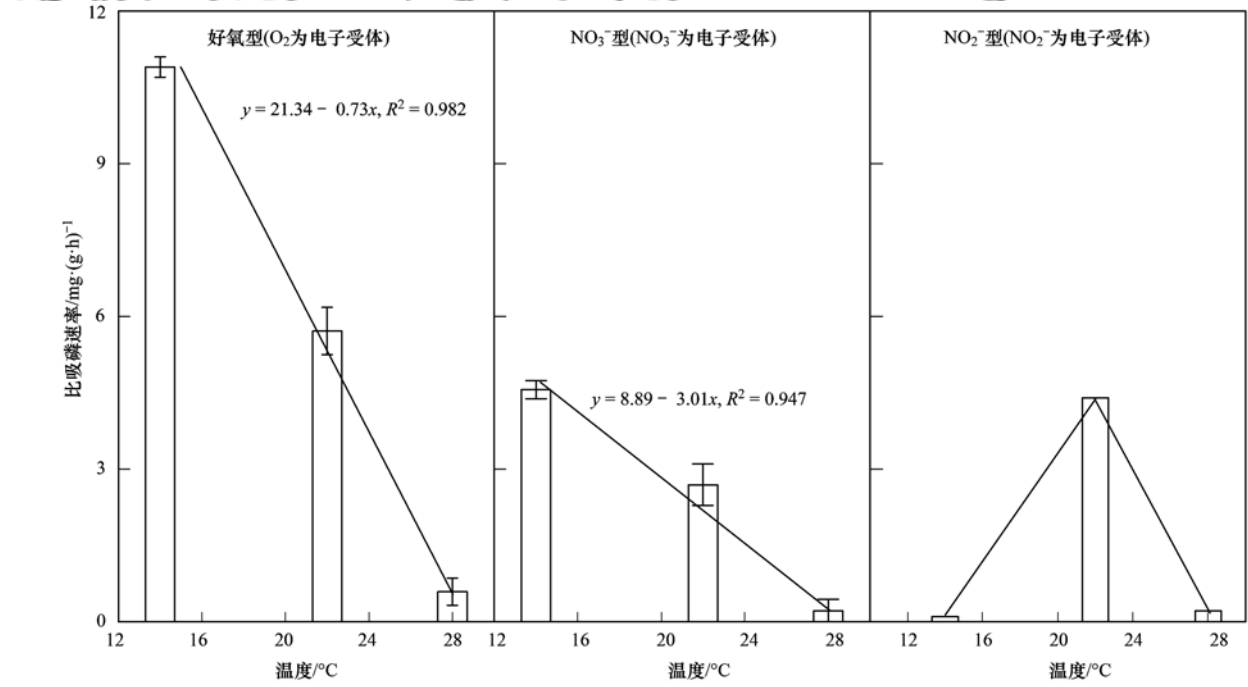
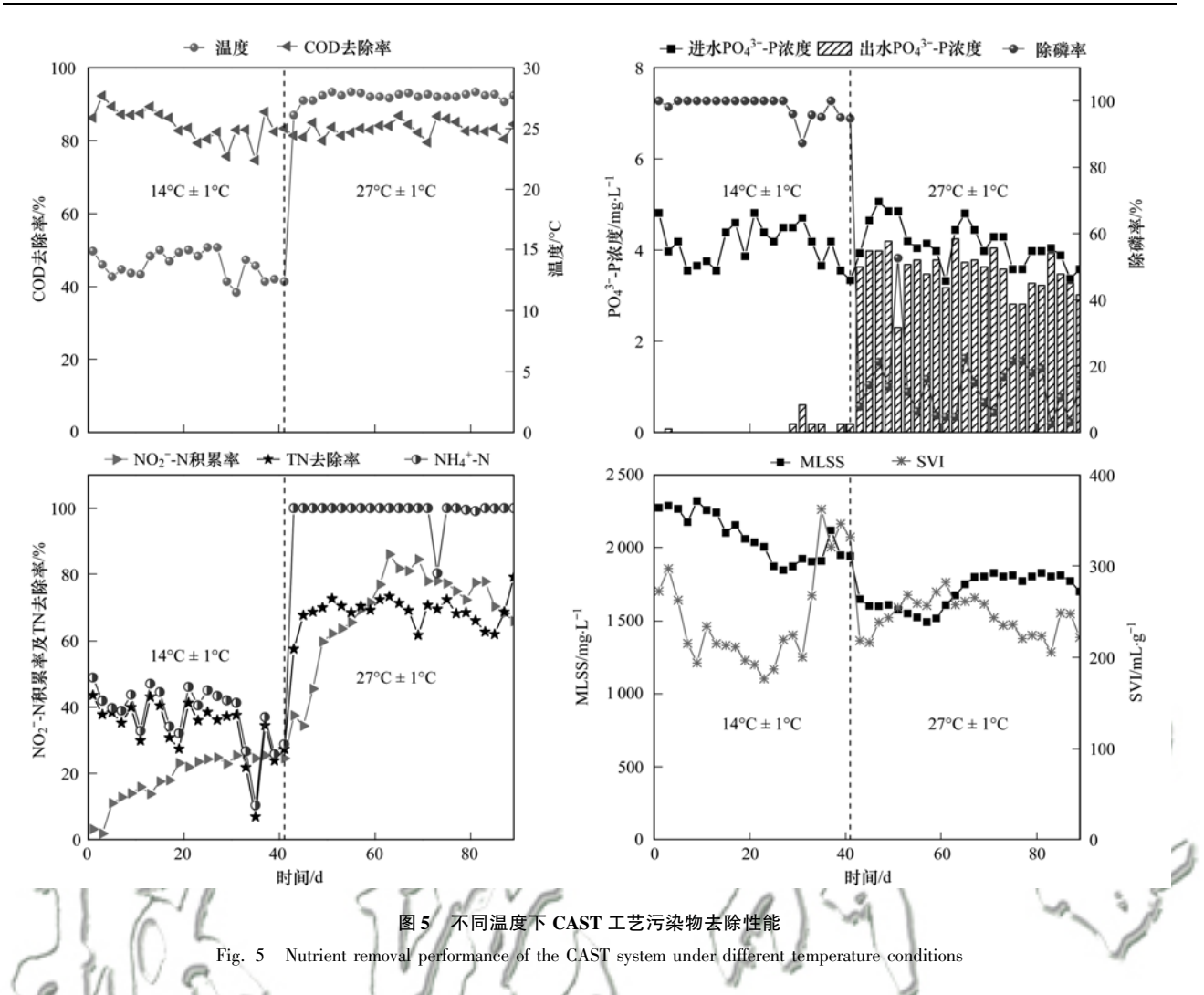
图5为低/高温对分段进水交替 A/O 运行模式 CAST 工艺的污染物去除性能。

由图5可知,低温运行期间将温度控制在 $14^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 系统 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率分别为 84.3%、33.6% 和 37.6%, 较常温条件下(图2中工况 I、II、III), COD 的去除率无较大波动, 而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不完全硝化导致出水 TN 以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, 去除率较低, 但系统出水磷浓度则均在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 除磷效果较常温运行条件下大大改善, 平均除磷率达到 98.2%, 可见, 低温条件下, 高效的除磷性能是以出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不达标为代价。分析原因, 低温条件下系统拥有良好的除磷性能, 一方面, 温度低于 15°C 时, 硝化细菌的活性显著降低, COD 降解速率变化相对较小^[17,18], 另一方面, 生物除磷脱氮系统中, 少部分聚磷菌为嗜温菌, 大部分聚磷菌为嗜冷菌, 嗜冷菌在温度低于 15°C 时占有优势, 低温条件下聚磷菌优先利用碳源进行除磷活动^[19]。在此期间, SVI 值随着温度的降低而逐步升高, 系统

发生轻微污泥膨胀现象, 但其最高值仅为 $331.8 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 并未影响系统除磷效果。高温对改良型 CAST 工艺除磷性能的研究发现, 升高温度至 $27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 系统 COD 去除性能比较稳定, 平均值为 83.2%, 但 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效率较低温系统大幅提高, 平均值分别为 68.7% 和 99.1%, 分别是低温时的 2.1 倍和 2.6 倍, 系统在运行第 6 d 时亚硝酸盐积累率达到 60%, 成功实现了短程硝化, 并稳定维持了 99 个周期。在此期间, 出水磷均值高达 $3.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 除磷率仅为 14.1%, 系统除磷能力恶化。分析认为, 温度升高, 硝化细菌活性恢复, 且在碳源有限的条件下 ($\text{C/P} = 50$), 聚磷菌无法进行充分释磷和吸磷, 异养菌则利用有机物去除氧化态氮, 因而系统优先进行脱氮作用, 同时系统内较高的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 或游离亚硝酸浓度对聚磷菌的生长和代谢也会产生抑制作用^[20~22], 这都严重影响了好氧吸磷作用, 从而导致系统除磷效果变差。在此期间, 污泥发生轻微膨胀, SVI 值稳定在 $200 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右。

2.4 不同运行条件下系统反硝化除磷性能

图6为低温、常温、高温条件下污泥吸磷能力。



由图6可知,以 O_2 和 NO_3^- 为电子受体的2种运行模式中,其比吸磷速率分别为 10.9 、 5.71 、 $0.59\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 4.56 、 2.69 、 $0.21\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,分别对其进行线性拟合发现,以 O_2 和 NO_3^- 为电子受体的吸磷小试中,温度与比吸磷速率呈负相关,即升高温度,以 O_2 或 NO_3^- 为电子受体的比吸磷速率下降,其拟合度较高分别为 0.987 和 0.947 .而以 NO_2^- 为电子受体的吸磷小试发现,温度与比吸磷速率无线性关系,具体函数关系有待进一步研究,其仅在常温条件下,发生明显吸磷现象,比吸磷速率为 $4.40\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,低温和高温系统中比吸磷速率仅为 $0.09\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.21\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.对比各个模式下的不同电子吸磷能力可得,低温条件下,只有以 O_2 和 NO_3^- 为电子受体的系统发生明显吸磷作用,且以 O_2 为电子受体的比吸磷速率是以 NO_3^- 为电子受体的 2.4 倍;常温系统中,以 O_2 、 NO_3^- 和 NO_2^- 为电子受体的3种系统均发生明显吸磷现象,较低温系统其以 O_2 和 NO_3^- 为电子受体的比吸磷速率明显降低,但以 NO_2^- 为电子受体的比吸磷速率却提高了 49 倍.分析认为,低温系统聚磷菌的潜力得以充分发挥,相对于硝化细菌等其他功能微生物受低温抑制,聚磷菌在低温条件下仍能保持较高的活性,更有利于聚磷菌的富集;常温除磷系统中,温度条件为各功能菌适宜生长环境,硝化细菌及聚磷菌等皆能共生,因而各功能菌之间仍存在一定的竞争,聚磷菌未能表现出明显的优势;而高温系统中,处于短程硝化阶段的系统污泥仅能以 O_2 为电子受体进行少量吸磷,说明聚磷菌在该体系内处于竞争劣势,这与聚磷菌嗜低温特性有关.对于低温不完全硝化系统内的污泥不能以 NO_2^- 为电子受体进行缺氧吸磷,而常温系统内则有较明显的亚硝酸盐型反硝化吸磷,关于这一问题尚未发现相关报道,因此,对该现象有待于进一步实验研究.

3 结论

(1)改良型CAST工艺处理生活污水,常温条件下,进水C/P对COD的去除影响甚微.进水C/P=100,系统TN去除率为88%,出水磷浓度均低于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,脱氮除磷性能达到最佳.

(2)低C/P(50)比情况下,降低污泥回流比或不回流尽管可以节约污水厂运行费用,但除磷效果并未得到实质性提高,且弱化了选择器的反硝化

效果.此外,系统短期闲置导致的污泥“饥饿”有利于系统除磷率的提高.

(3)低温条件下($14^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$),除磷率能稳定维持在90%以上,但该高效除磷性能建立在以出水 NH_4^+-N 不达标为代价的基础上;而高温短程硝化系统,因碳源不足无法进行充分释磷和吸磷,因而系统优先进行脱氮,除磷率仅为14.1%.

(4)常温系统污泥以 O_2 、 NO_3^- 和 NO_2^- 为电子受体均能进行吸磷,而低温系统污泥能以 O_2 、 NO_3^- 为电子受体进行吸磷,高温系统污泥则仅能以 O_2 为电子受体进行少量吸磷;并且以 O_2 或 NO_3^- 为电子受体的比吸磷速率与温度呈负相关.

参考文献:

- [1] Biswas B K, Inoue K, Ghimire K N, *et al.* Removal and recovery of phosphorus from water by means of adsorption onto orange waste gel loaded with zirconium [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(18):8685-8690.
- [2] 张胜花,常军军,孙珮石.水体藻类磷代谢及藻体磷矿化研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(7):1250-1254.
Zhang S H, Chang J J, Sun P S. Phosphorus cycle of algae during its growth and death process: phosphorus uptake and release[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(7):1250-1254.
- [3] 许春生.生物复合工艺处理寒冷地区城市污水试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
Xu C S. Experimental study on treatment of municipal wastewater in cold region with combined biological process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [4] He S M, Bishop F I, McMahon K D. Bacterial community and “*Candidatus Accumulibacter*” population dynamics in laboratory-scale enhanced biological phosphorus removal reactors [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(16):5479-5487.
- [5] Kang S J, Horvatin P J, Briscoe L. Full-scale biological phosphorus removal using A/O process in a cold climate [A]. In: *Proceedings of the International Conference; Management Strategies for Phosphorus in the Environment* [C]. London, England: Selper Ltd, 1985.
- [6] 彭党聪,张晓霞,樊香妮,等.温度对SBR强化生物除磷工艺除磷性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(11):6106-6110.
Peng D C, Zhang X X, Fan X N, *et al.* Effects of temperature on performance of enhanced biological phosphorus removal in activated sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(11):6106-6110.
- [7] 张兰河,庄艳萍,王旭明,等.温度对改良 A^2/O 工艺反硝化除磷性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(10):213-219.
Zhang L H, Zhuang Y P, Wang X M, *et al.* Effect of temperature on denitrifying phosphorus removal efficiency using modified A^2/O process [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(10):213-219.
- [8] 马娟,宋相蕊,俞小军,等.不同运行模式对同步脱氮除磷

- CAST 工艺快速启动及其稳定维持的影响[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(8): 3181-3188.
- Ma J, Song X R, Yu X J, *et al.* Effect of operational strategy on startup and maintenance of a CAST process with simultaneous nitrogen and phosphorus removal performance [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(8): 3181-3188.
- [9] 王荣昌, 司书鹏, 杨殿海, 等. 温度对生物强化除磷工艺反硝化除磷效果的影响[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1535-1544.
- Wang R C, Si S P, Yang D H, *et al.* Effects of temperature on denitrifying phosphorus removal in enhanced biological phosphorus removal (EBPR) process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(6): 1535-1544.
- [10] 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.
- [11] 赵晨红, 彭永臻, 王淑莹. 进水碳磷比对 UniFed SBR 工艺性能的影响[J]. 现代化工, 2008, **28**(1): 50-52, 54.
- Zhao C H, Peng Y Z, Wang S Y. Effects of influent C/P ratio on performance of UniFed SBR process [J]. Modern Chemical Industry, 2008, **28**(1): 50-52, 54.
- [12] 吕佩嵘, 李勇, 杨小梅. $m(C)/m(P)$ 对污泥絮体中磷形态与分布及除磷能力的影响[J]. 水处理技术, 2015, **41**(4): 50-53, 57.
- Ly P R, Li Y, Yang X M. Effect of $m(C)/m(P)$ on forms and distribution of phosphorus in sludge floc and phosphate removal capacity [J]. Technology of Water Treatment, 2015, **41**(4): 50-53, 57.
- [13] 申沛, 陈银广, 张超. 影响聚磷菌与聚糖菌竞争的关键因素研究进展[J]. 四川环境, 2008, **27**(1): 73-75, 86.
- Shen P, Chen Y G, Zhang C. Advances in research on the key factors affecting the competition between phosphorus-and glycogen accumulating organisms [J]. Sichuan Environment, 2008, **27**(1): 73-75, 86.
- [14] 史静, 吕锡武, 朱光灿, 等. 进水碳磷比对连续流反硝化除磷工艺脱氮除磷效果的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, **42**(1): 94-98.
- Shi J, Lü X W, Zhu G C, *et al.* Effect of COD-to-phosphorus ratio on performance of continuous-flow two-sludge process [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, **42**(1): 94-98.
- [15] 刘旭亮, 彭永臻, 彭赵旭, 等. 高曝气量引发的活性污泥粘性膨胀研究[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(17): 1-5.
- Liu X L, Peng Y Z, Peng Z X, *et al.* Viscous activated sludge bulking caused by high aeration rate [J]. China Water & Wastewater, 2011, **27**(17): 1-5.
- [16] 杨雄, 霍明昕, 王淑莹, 等. 碳源类型对污泥沉降性能及丝状菌生长的影响[J]. 化工学报, 2011, **62**(12): 3471-3477.
- Yang X, Huo M X, Wang S Y, *et al.* Effects of carbon sources on sludge settling and filamentous bacteria growth [J]. CIESC Journal, 2011, **62**(12): 3471-3477.
- [17] Sudarmo U, Winter J, Gallert C. Effect of varying salinity, temperature, ammonia and nitrous acid concentrations on nitrification of saline wastewater in fixed-bed reactors [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(10): 5665-5673.
- [18] 张智, 李柏林, 相欣奕, 等. 处理低温低碳源城市污水的 A/A/O 氧化沟工艺脱氮运行工况优化[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(8): 2565-2570.
- Zhang Z, Li B L, Xiang X Y, *et al.* Operation optimization of A/A/O oxidation ditch for nitrogen removal from low-temperature and low-carbon municipal sewage [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(8): 2565-2570.
- [19] 尹军, 李瑞, 张振庭, 等. 低温 SBR 工艺活性污泥代谢特性研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 69-74.
- Yin J, Li R, Zhang Z T, *et al.* Activated sludge metabolic features in low temperature sequencing batch reactor [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(1): 69-74.
- [20] Weng D C, Peng Y Z, Wang X X, *et al.* Inhibition of nitrite on denitrifying phosphate removal process [J]. Advanced Materials Research, 2014, **955-959**: 1944-1950.
- [21] 委燕, 王淑莹, 马斌, 等. 亚硝酸盐对外碳源反硝化过程 N₂O 还原的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(7): 1722-1727.
- Wei Y, Wang S Y, Ma B, *et al.* The effect of nitrite on N₂O reduction during denitrification process using external carbon source [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(7): 1722-1727.
- [22] 宋姬晨, 王淑莹, 杨雄, 等. 亚硝酸盐对 A²O 系统脱氮除磷的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(9): 2231-2238.
- Song J C, Wang S Y, Yang X, *et al.* Effect of nitrite on nutrient removal in A²O system [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(9): 2231-2238.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)