

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

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

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力

马娟,王瑾,俞小军,张伟,魏雪芬,陈永志,田文清

(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,考察了不同诱导模式下系统的除磷脱氮性能。结果表明,在缺氧条件下投加亚硝酸盐对系统反硝化除磷性能的抑制作用较大,投加量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时系统除磷性能变差。相比较,好氧投加亚硝酸盐的 CAST 系统更稳定,当亚硝酸盐投加浓度为 5、10、15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时各工况初期除磷性能均有小幅波动,但分别经过 10、6、34 d 驯化后,除磷率迅速回升并稳定在 95% 以上,出水磷浓度均小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 投加量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时工艺除磷性能急速恶化,但污泥的亚硝酸盐型缺氧吸磷能力是驯化前的 10.4 倍,说明投加一定浓度亚硝酸盐导致的除磷性能恶化可以解除,且长期投加有利于富集以 NO_2^- 为电子受体的反硝化聚磷菌。实验还发现,好氧投加一定浓度亚硝酸盐系统污泥沉降性能良好且污泥浓度不断降低,这对污泥减量具有一定指导意义。

关键词: 改良型 CAST 工艺; 亚硝酸盐; 反硝化除磷; 污泥减量

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4664-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201705106

Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns

MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, ZHANG Wei, WEI Xue-fen, CHEN Yong-zhi, TIAN Wen-qing

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

Abstract: A modified cyclic activated sludge technology (CAST) reactor was utilized to investigate the phosphorus and nitrogen removal performance under different inducing patterns in this experiment. The results show that nitrite addition under anoxic conditions has a more inhibitory effect on the denitrifying phosphorus removal performance of the sludge. The phosphorus removal performance of the system was least effective when nitrite dosage was $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Compared to an anoxic addition system, the CAST system is more stable under aerobic addition conditions. The phosphorus removal properties have a slight fluctuation during each initial operating condition when the nitrite concentrations are 5, 10 and $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. However, the phosphorus removal rate was observed to recover quickly and remain stable at more than 95% after acclimatizing for 10, 6, and 34 days, respectively. The effluent phosphorus concentration was less than $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in all cases. It was also found that the phosphorus removal performance deteriorated drastically when the nitrite dosage was $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Nevertheless, the nitrite type denitrifying phosphorus uptake capacity of the sludge was 10.4 times greater than that of the sludge before acclimatizing, suggesting that the phosphorus performance deterioration due to nitrite addition could be relieved and long-term addition is beneficial to enriching denitrifying phosphorus accumulating bacteria using NO_2^- as an electron acceptor. Moreover, the sludge settling performance was found to be effective and the sludge concentration decreased continuously when adding a certain concentration of nitrite under aerobic conditions, which is of significant for sludge reduction.

Key words: modified cycle activated sludge technology; nitrite; denitrifying phosphorus removal; sludge reduction

传统脱氮除磷系统中,生物脱氮和生物除磷是两个相互独立的反应,在碳源有限的条件下反硝化反应通常优先于释磷作用进行^[1,2],从而导致除磷效果不理想。有学者研究发现^[3-6],在厌氧/缺氧交替运行时,很容易富集一类具有反硝化除磷功能的微生物,该类微生物能够利用 NO_3^- 代替 O_2 作为电子受体,由于其生物代谢作用与传统聚磷菌相似,因此,人们将此类微生物称为反硝化聚磷微生物(DPB)。反硝化除磷技术因能够实现氮磷的同时去除及实现“一碳两用”,对 COD 需求量能节省约 50%、曝气能耗节省约 30%,污泥产生量亦可减少

约 50% 而备受关注^[7]。此外,污泥减量技术是解决城市污水剩余污泥问题的重要途径之一,也成为国内外的研究热点^[8-11]。

对于 NO_2^- 能否被用作反硝化除磷的电子受体,学者们持有不同观点。Kern-Jespersen 等认为^[12]:聚磷菌(PAOs)不能以 NO_2^- 作为电子受体

收稿日期: 2017-05-11; 修订日期: 2017-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168027,51668033); 甘肃省大学生创新创业训练计划项目(201610732009)

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:meggy.ma@163.com

进行反硝化吸磷. 也有学者研究表明^[13,14], NO_2^- 增加到一定浓度时, 会抑制微生物的生长和生理活动. 王亚宜等^[15]的研究发现当 NO_2^- -N 浓度在 $5.5 \sim 9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 聚磷污泥能够以 NO_2^- 作为电子受体进行反硝化吸磷. 此外, Casey 等^[16]的研究表明, 亚硝酸盐存在于 UCT 系统中会引发污泥 SVI 的急剧增长; 马娟等^[17]的研究则显示, 好氧吸磷系统内长期投加 NO_2^- -N 有利于系统内污泥的沉降. 也有学者认为^[18,19], 反硝化除磷真正的电子受体是 NO_2^- 而不是 NO_3^- . 利用 NO_2^- 为电子受体进行反硝化吸磷的研究较多, 但实验主要在 SBR 反应器内进行. CAST 因具有投资少及运行费用低、选择器能防止污泥膨胀及运行灵活等优点, 从而成为众多污水处理厂的首选工艺, 因此, 研究 CAST 工艺内的反硝化除磷具有一定的工程指导意义.

本研究通过分别在缺氧、好氧两种条件下向 CAST 反应器内投加 NO_2^- , 主要考察两种不同诱导模式下体系内的亚硝酸盐型反硝化吸磷能力及 NO_2^- 对反应器整体除磷脱氮性能的影响, 同时分析了不同诱导模式下系统的污泥沉降性能.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行

CAST 装置如图 1 所示, 反应器由有机玻璃制成. 总容积 84 L, 有效容积 54 L, 生物选择器占总容积的 10%, 反应器的运行由定时器控制, 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控制.

本研究采用 R_1 和 R_2 两个 CAST 反应器, 分别在缺氧和好氧初瞬时投加不同浓度 NaNO_2 , 以进行

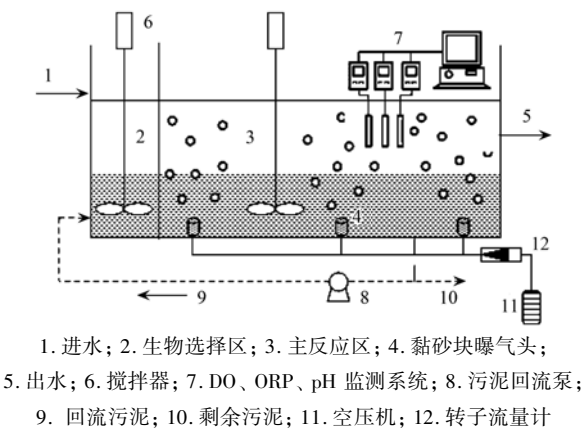


图 1 CAST 工艺实验装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of CAST experimental setup

缺氧和好氧诱导实验(表 1). 其中, R_1 反应器每天运行 3 个周期, 每个周期 8 h, 即厌氧 2 h(进水 1 h), 缺氧 2 h, 好氧 3 h, 沉淀 0.5 h 和排水 0.5 h; R_2 反应器每天运行 4 个周期, 每个周期 6 h, 即厌氧 1.5 h(进水 1 h), 好氧 3.5 h, 沉淀 0.5 h 和排水 0.5 h. 两反应器运行参数相同, 污泥龄(SRT) 20 d, 回流比 20%, 排水比 1/3, pH 值 7.0 ~ 9.0, 温度 22℃.

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 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD (以无水乙酸钠为碳源) 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 PO_4^{3-} -P $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中, SBR_1 进行好氧吸磷小试, DO 控制在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, SBR_2 和 SBR_3 分别进行以 NO_2^- 和 NO_3^- 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 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 各 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SBR 其他条件同 CAST 反应器.

表 1 反应器运行工况 ¹⁾							
缺氧诱导实验(R_1)				好氧诱导实验(R_2)			
编号	工况	运行时间/d	MLSS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	编号	工况	运行时间/d	MLSS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
I	NO_2^- -N = $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1 ~ 30	3 421	I	NO_2^- -N = $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1 ~ 47	3 618
II	NO_2^- -N = $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	31 ~ 90	1 696	II	NO_2^- -N = $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	48 ~ 81	2 877
				III	NO_2^- -N = $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	82 ~ 119	2 837
				IV	NO_2^- -N = $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	120 ~ 173	2 272
				V	NO_2^- -N = $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	174 ~ 240	1 435

1) MLSS 为各工况下所有 MLSS 的平均值

1.2 实验水质及接种污泥

缺氧诱导实验(R_1)用水采用生活污水和模拟废水 1:1 混合而成, 其中生活污水取自兰州交通大

学家属区. 进水指标均值分别为 COD $405 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N $28.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN $35.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP $8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.9, COD/TN = 11.3. 好氧诱导实验

(R_2)用水采用模拟废水,由碳源液、磷液、氮液及微量元素^[20]配制而成.用乙酸钠配制碳源液, KH_2PO_4 配制磷液, NH_4Cl 配制氨氮液,进水 COD $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, NH_4^+-N $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,TN $41.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,TP $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.

实验用的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 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 采用钼锑抗分光光度法测定,COD 采用 COD 快速测定仪测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法, $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 采用麝香草酚分光光度法, $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 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.温度和溶解氧(DO)由德国 Multi 3420 在线测定仪在线监测.

2 结果与讨论

2.1 不同诱导模式下污染物的去除性能

图 2 为 R_1 和 R_2 两个反应器在不同工况条件下的污染物去除性能.

由图 2 可见,两反应器在所有工况下 NH_4^+-N 均能得以全部去除,而 COD 的平均去除率也都在 95% 以上,由此说明,本研究采用的 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 浓度对降解 COD 的异养菌和氨氧化菌(AOB)的增殖与产能代谢活动影响甚微.从图 2(b₁)可知,缺氧投加 $\text{NO}_2^- -\text{N}$, R_1 出水总氮(TN)浓度增大,两工况下 TN 均值分别为 $3.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TN 去除率则由 90.6% 降至 75.4%.而各工况下 R_2 反应器中

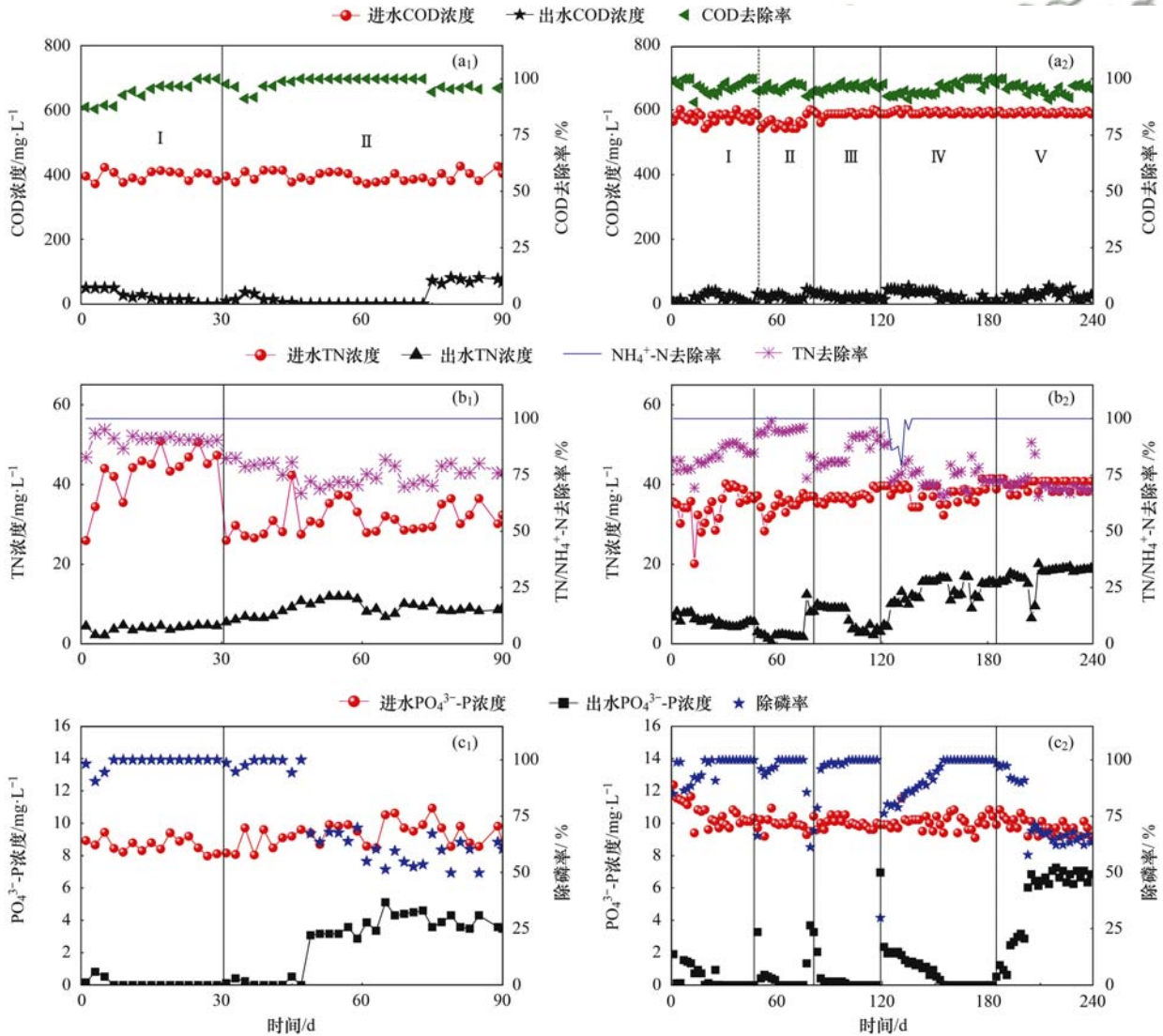


图 2 缺氧和好氧诱导模式下 CAST 工艺污染物去除性能

Fig. 2 Nutrient removal performance of the CAST system under different operating conditions

[图 2 (b₂)] 出水 TN 均值分别为 5.2、2、3.4、12.6、16.6 mg·L⁻¹, 对应去除率为 84.2%、95%、91.5%、75%、71.7%, 可见, 好氧投加 5 mg·L⁻¹ 或 10 mg·L⁻¹ 时系统总氮去除效果优于未投加, 且好氧投加 5 mg·L⁻¹ 总氮去除效果明显优于缺氧投加. 由图 2(c₁) 可知, 在工况 I 期间 R₁ 运行 5 d 后, 磷均能完全去除; 而工况 II 初期 (31 ~ 47 d), 反应器出水磷浓度保持在较低水平 (<0.5 mg·L⁻¹), 47 d 后, 除磷性能迅速变差, 出水磷浓度均值为 3.8 mg·L⁻¹, 去除率仅为 62%. 分析认为, 亚硝酸盐对微生物活性具有抑制作用^[21~25], 缺氧投加 5.0 mg·L⁻¹ NO₂⁻-N 后系统部分微生物被抑制, 细胞增殖量低于排泥量从而导致污泥浓度降低, 继而引发除磷性能恶化以及出水水质不达标. 由图 2(c₂) 可知, 好氧投加 NO₂⁻-N 后工况 II、III、IV 运行初期出水磷均有小幅波动但分别经过 10、6、34 d 驯化后, 除磷

率迅速回升至 95% 以上, 出水磷浓度均小于 0.5 mg·L⁻¹; 而工况 V 中, 投加 20 mg·L⁻¹ NO₂⁻-N 后出水磷浓度迅速上升, 最高可达 7.3 mg·L⁻¹, 均值为 4.7 mg·L⁻¹, 磷平均去除仅为 53%. 对比发现, 缺氧投加 5 mg·L⁻¹ NO₂⁻-N 时, CAST 系统除磷性能下降, 而好氧投加 20 mg·L⁻¹ 时系统除磷性能才恶化, 由此说明, 缺氧投加 NO₂⁻ 时聚磷菌更为敏感, 受抑制影响更大; 而好氧投加浓度低于 20 mg·L⁻¹ 时, 经过驯化系统除磷性能均能得以恢复且 TN 去除较好, 说明聚磷菌可以在好氧条件下还原 NO₂⁻ 用以解毒^[26,27].

2.2 不同诱导模式下 CAST 工艺典型周期污染物变化规律

图 3 为不同诱导模式下典型周期内污染物变化规律. 生物选择器长时间维持较低 DO 浓度 (<0.05 mg·L⁻¹), 但由于污泥回流作用使选择区

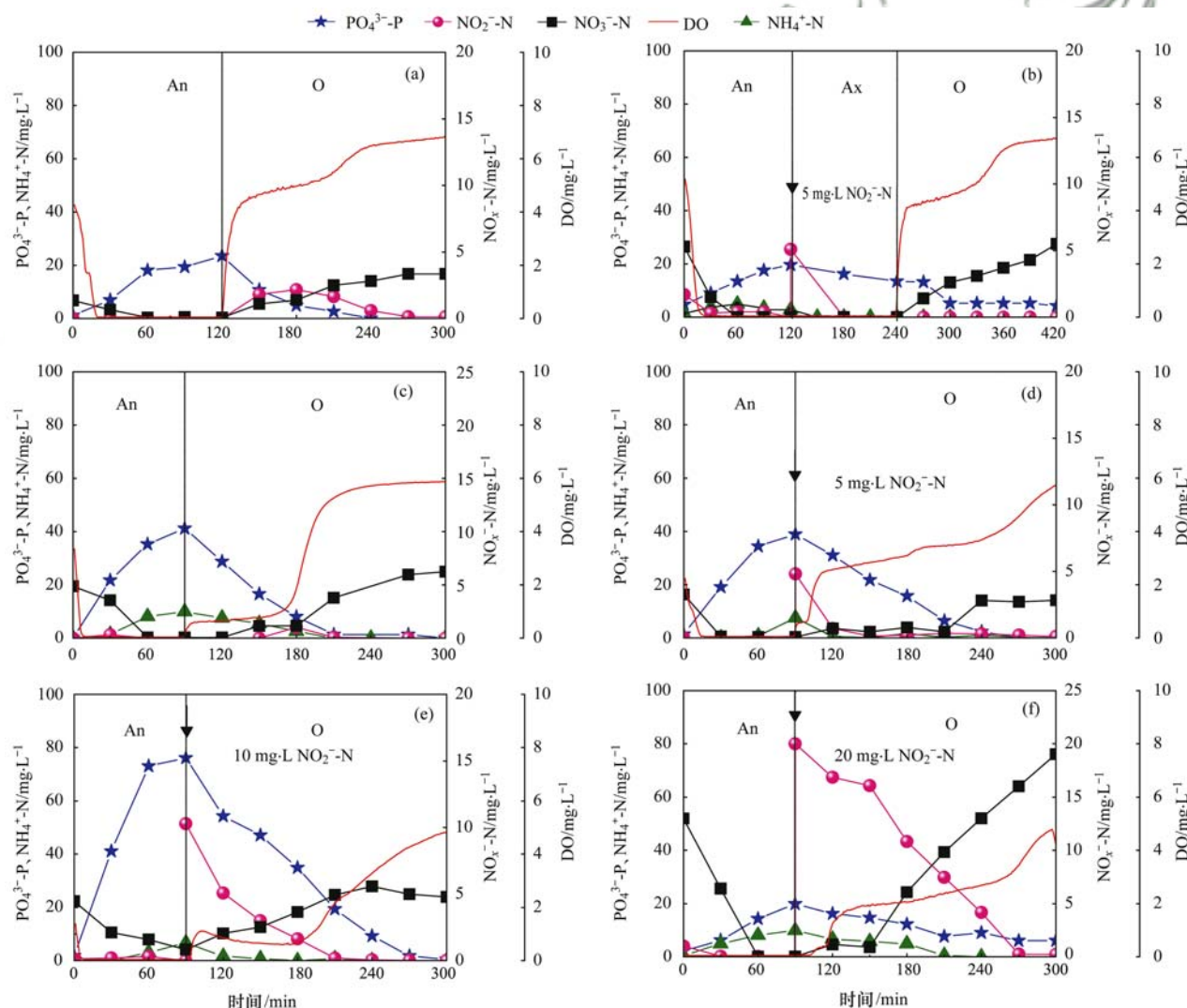


图 3 各工况 CAST 工艺典型周期污染物变化规律

Fig. 3 Variation of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, $\text{NO}_x\text{-N}$, and DO concentrations during typical cycles under different operating conditions

污染物浓度的变化规律与主反应区基本一致,现只对主反应区进行分析.

图 3(a) 和 3(b) 为 R_1 分别在工况 I 和工况 II 的典型污染物变化,从中可知,两工况下厌氧释磷量分别为 $23.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $19.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水磷浓度则分别为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可见未投加 NO_2^- 时系统除磷性能明显优于投加后,分析认为,投加 NO_2^- 抑制 PAOs 的呼吸作用^[28,29]. 图 3(c) ~ 3(f) 为 R_2 在工况 I、II、III、V 的典型污染物变化规律. 由图 3(c) 和 3(d) 可知,工况 II、III 厌氧末期释磷量分别为 $38.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $76.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,工况 III 释磷量几乎是工况 II 的 2 倍. 反应进行到好氧阶段,DO 迅速升高并最终维持在 $4\sim6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,且 PAOs 在反应时间内能彻底完成吸磷,出水磷浓度均小于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明 NO_2^- -N 浓度 $\leq 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,系统除磷性能不受影响. 而进入系统的 NH_4^+ 在有氧条件下也被快速降解,反应末端仅出现 NO_3^- -N 的积累,积累量分别为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 根据表 2 的氮平衡计算,随进水进入系统

的 NH_4^+ 和好氧初始投加的 NO_2^- 并未完全转化为 NO_3^- ,尽管部分 NH_4^+ 用于微生物同化吸收,且通过选择器反硝化由回流污泥带入的 NO_x^- 及 CAST 系统好氧反硝化作用去除部分 NO_x^- ,但根据长期运行 CAST 反应器经验,上述方式去除的 NO_x^- 量远低于本实验研究中的氮损失量,因此,如果假设有 O_2 和 NO_2^- 两种电子受体同时存在的情况下,排除 PAOs 利用不同电子受体吸磷的产能差异, NO_2^- 和 O_2 对 PAOs 具有相同竞争力,因而, NO_2^- 在好氧条件下同样能被 PAOs 利用,这才合理解释了 NO_2^- 在好氧段大量损失这一现象,这与 Maite 等^[26] 的研究一致. 工况 IV 投加量增至 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图中未给出),但厌氧释磷量较工况 III 大幅度降低,仅为 $34.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 积累量增至 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 此时,尽管磷能被彻底去除,系统内 PAOs 释磷性能已经受到抑制. 进一步加大投加量至 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,PAOs 受抑制现象更加明显,释磷量仅为 $19.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水磷浓度可达 $6.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 积累达到 $20.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 2 好氧诱导模式下各工况氮转化量¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Variation of nitrogen in the aerobic phase under different operating conditions/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
工况	理论 NH_4^+ -N 投加量	NH_4^+ -N 积累量	NO_2^- -N 投加量	NO_2^- -N 积累量	NO_3^- -N 积累量	NO_x^- -N 损失量
I	13.3	0.8	0	0.03	5.9	6.6
II	13.3	0.01	5	0.08	1.9	16.0
III	13.3	0.3	10	0.05	6.5	16.5
IV	13.3	0.9	15	0.07	11.8	15.5
V	13.3	0.7	20	0.5	16.5	15.6

1) 表中数据为各工况下计算平均值

2.3 好氧诱导模式下 CAST 系统的释磷和吸磷性能

图 4 为好氧诱导模式不同工况下污泥释磷和吸

磷性能.

由图 4 可知,工况 I 中,系统释磷量均值为

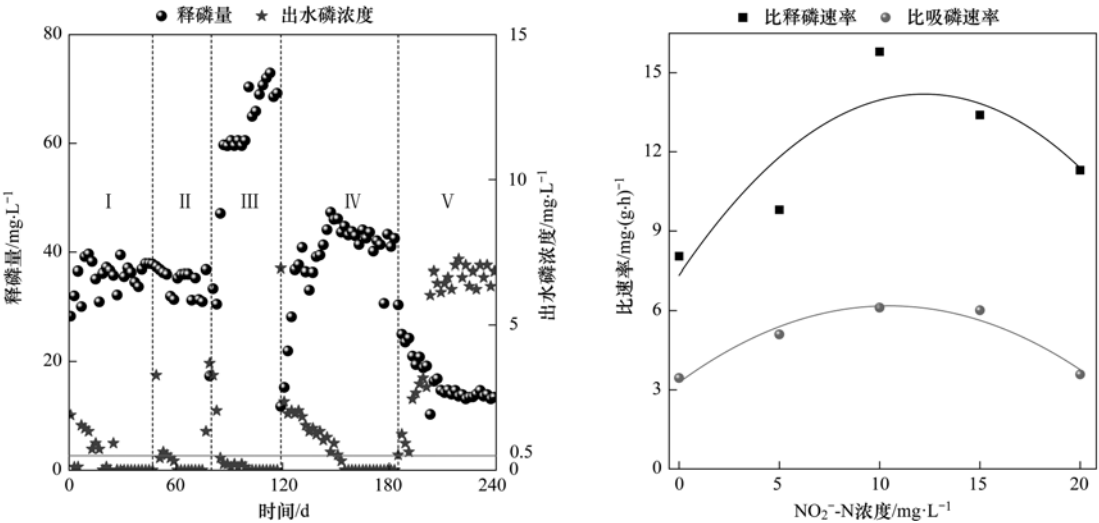


图 4 不同浓度下好氧诱导系统的释磷和除磷性能

Fig. 4 Phosphate releasing and phosphorus removal performance of aerobic inducing systems under different NO_2^- -N levels

$35.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着 NO_2^- 投量的增加, 工况 II、III、IV、V 的释磷量呈现出先增加后减小的趋势, 均值分别为 33.1 、 34.4 、 56.2 、 40.1 、 $16.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 结合图 2 可知, 当投加量小于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 各工况经过一段时间的驯化, 出水磷浓度均小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准, 达标天数分别为 22、24、34、34 d; 而投加量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时释磷量大幅降低, 出水水质严重恶化. 此外, 对各工况的比释、吸磷速率 (污泥浓度以 MLVSS 计) 曲线拟合发现, 投加 NO_2^- 后, 比释、吸磷速率均高于投加前且在投

加量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最大. 由此得出, 投加一定浓度的亚硝酸盐 ($< 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 不仅未抑制污泥的释、吸磷能力, 反而能起到促进作用, 这一现象可由 NO_2^- 的解耦联作用解释^[30,31], NO_2^- -N 可作为质子载体通过细胞膜且在膜两侧反复运动而产生能量, 而由于解耦联作用导致其透过细胞膜后胞外驱动质子的能量增加, 因此, PAOs 必须提高呼吸速率, 进而其除磷效果增强^[17].

2.4 好氧诱导系统污泥的吸磷及反硝化性能

图 5 为好氧诱导系统污泥的吸磷及反硝化性能.

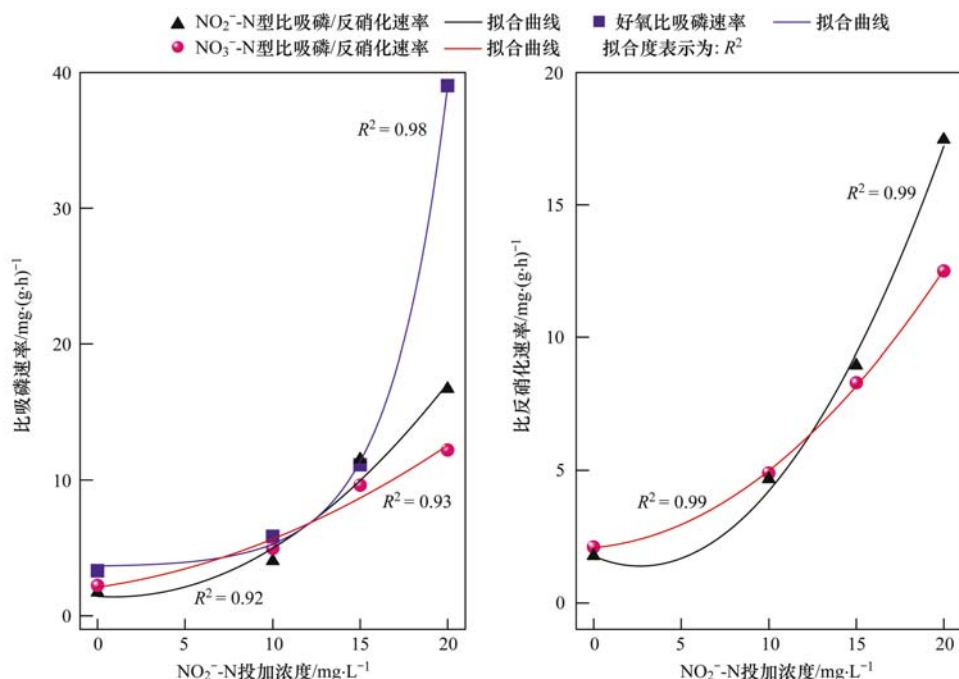


图 5 投加不同 NO_2^- 浓度后污泥的吸磷及反硝化能力

Fig. 5 Phosphate uptake and denitrification capacity of sludge subject to different nitrite addition levels

从图 5 可知, 对好氧诱导系统各工况不同电子受体的比吸磷速率和比反硝化速率进行曲线拟合发现, 未投加 NO_2^- , 以 O_2 为电子受体的比吸磷速率为 $3.3 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 高于以 NO_3^- 或 NO_2^- 为电子受体的比吸磷速率分别为 $2.23 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $1.6 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 投加 NO_2^- 驯化后, 污泥以 O_2 为电子受体的好氧比吸磷速率呈指数增长, 投加 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NO_2^- -N 的污泥好氧比吸磷速率可达 $39.1 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 是驯化前的 11.8 倍, 说明长期好氧投加 NO_2^- 驯化有助于提高污泥的好氧吸磷性能. 而以 NO_3^- 和 NO_2^- 为电子受体的比吸磷速率和比反硝化速率均符合抛物线趋势. 由图 5 还可见, 增大 NO_2^- 投加量, 各工况下污泥利用两种电子受体的比吸磷速率和比反硝化速率也随之增加, 但均在

NO_2^- -N 投加量为 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 污泥的 NO_2^- 型比吸磷速率和比反硝化速率反超 NO_3^- 型比吸磷速率和比反硝化速率且增速显著, 其中, 投加 NO_2^- -N 为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 污泥的 NO_3^- 型和 NO_2^- 型比吸磷速率分别为驯化前的 5.4 倍和 10.4 倍, NO_2^- 型反硝化除磷模式逐渐成为优势. 上述现象说明, 好氧阶段向 CAST 系统投加 NO_2^- 并长期驯化可以诱导系统内以 NO_2^- 为电子受体的反硝化聚磷菌的富集.

2.5 NO_2^- 对系统污泥量及其沉降性能的影响

图 6 为缺氧诱导模式和好氧诱导模式对 CAST 系统污泥沉降性能及污泥量的影响.

对于 R_1 反应器, 未投加 NO_2^- 时 (工况 I) 系统污泥体积指数 (SVI) 由 $69 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 不断增涨至 $137.9 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 污泥浓度 (MLSS) 稳定维持在 $3400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

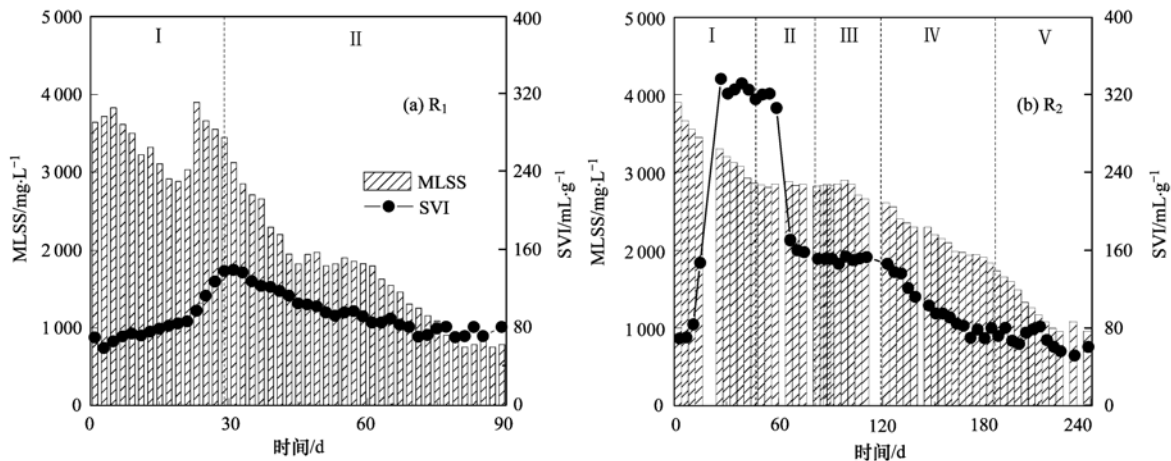
图6 NO_2^- -N对系统污泥量及其沉降性能的影响

Fig. 6 Sludge sedimentation performance of the CAST system under different operating conditions

左右,期间污泥未发生膨胀现象;缺氧投加 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_2^-$ -N后(工况 II),系统污泥的 SVI 逐渐降低,最终稳定在 $70 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,同时,污泥浓度不断降低并最终稳定在 $784 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。分析认为, NO_2^- 的抑制效应致使部分微生物死亡,且增殖速率低于死亡速率,进而导致系统污泥浓度降低。对于 R_2 反应器,工况 I 系统混合液的 SVI 值由 $69 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 迅速升至 $336.1 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,污泥发生严重膨胀,分析原因是以无水乙酸钠作为生物脱氮除磷系统单一碳源引发的污泥膨胀^[32]。此后(在 28~46d),因污泥膨胀引起系统污泥流失并导致污泥浓度下降了 $455 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。好氧投加 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_2^-$ -N后(工况 II),污泥浓度几乎未发生变化,但 SVI 迅速降低至 $160 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下,说明好氧条件下投加亚硝酸盐可以有效解决由单一碳源引起的系统污泥膨胀问题。增大 NO_2^- -N 投加量至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (工况 III),系统污泥 SVI 一直稳定在 $150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右。进一步加大 NO_2^- -N 投加量(工况 IV 和工况 V),SVI 值继续下降并最终稳定在 $50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,此时系统污泥沉降性能良好。这与宋姬晨等^[33]关于亚硝酸盐影响污泥沉降性能的研究结果相反,分析原因:一方面,改良型 CAST 反应器的选择区可以很好地预防污泥膨胀的发生;另一方面, NO_2^- 的存在抑制丝状菌的增长,从而更有利于污泥的沉降。好氧投加亚硝酸盐后, R_2 (工况 II~V)的污泥浓度的变化趋势同 SVI 相似,污泥浓度由 $3827 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $954 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,尤其当投加浓度低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,尽管污泥浓度维持在较低水平但系统除磷性能良好,说明好氧投加亚硝酸盐有利于 CAST 系统污泥减量。

3 结论

(1)在改良型 CAST 系统中,缺氧/好氧条件下投加亚硝酸盐,均会抑制系统的反硝化除磷性能,但缺氧投加 NO_2^- 时聚磷菌更为敏感,受抑制影响更大, NO_2^- -N 投加量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 系统除磷性能变差。相比较而言,好氧投加亚硝酸盐系统则更稳定。

(2)好氧系统,投加 NO_2^- -N 浓度提高到 5、10、 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水磷浓度均有大幅上升,分别经过 10、6、34d 运行,出水磷浓度均低于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明投加一定浓度亚硝酸盐导致的除磷性能恶化可以解除。此外,将 NO_2^- -N 投加量控制在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时可实现高效脱氮除磷,为最优工况。

(3)好氧阶段向 CAST 系统投加 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_2^-$ -N,污泥的亚硝酸盐型缺氧吸磷能力是驯化前的 10.4 倍,说明投加 NO_2^- 并长期驯化可以诱导系统内以 NO_2^- 为电子受体的反硝化聚磷菌的富集。此外,好氧投加亚硝酸盐还有利于系统污泥减量。

参考文献:

- [1] 罗志腾. 水污染控制工程微生物学[M]. 北京:北京科学技术出版社,1988. 190-192.
- [2] 徐亚同. 废水的生物除磷[J]. 环境科学研究,1994,7(5): 1-6.
Xu Y T. Biological phosphorus removal of wastewater [J]. Research of Environmental Sciences, 1994, 7(5): 1-6.
- [3] Kuba T, Smolders G, Van Loosdrecht M, et al. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor [J]. Water Science & Technology, 1993, 27(5-6): 241-252.
- [4] Gerber A, de Villiers R H, Mostert E S, et al. The Phenomenon of simultaneous phosphate uptake and release, and its importance in biological nutrient removal [A]. In: Ramadori R (Eds.). Biological Phosphate Removal from Wastewaters [M]. Oxford:

- Pergamon Press, 1987. 123-134.
- [5] Comeau Y, Oldham W K, Hall K J. Dynamics of carbon reserves in biological dephosphatation of wastewater[A]. In: Ramadori R (Eds.). Biological Phosphate Removal from Wastewaters[M]. Oxford: Pergamon Press, 1987. 39-55.
- [6] Vlekke G J F M, Comeau Y, Oldham W K. Biological phosphate removal from wastewater with oxygen or nitrate in sequencing batch reactors[J]. Environmental Technology Letters, 1988, 9(8): 791-796.
- [7] 孙洪伟, 王淑莹, 王希明, 等. 高氨氮垃圾渗滤液 SBR 法短程深度生物脱氮[J]. 化工学报, 2009, 60(7): 1806-1811.
- Sun H W, Wang S Y, Wang X M, et al. Advanced nitrogen removal from landfill leachate with highly concentrated ammonia nitrogen via nitrite in SBR[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(7): 1806-1811.
- [8] 刘宇辉, 解庆林. 解偶联污泥减量技术的研究进展[J]. 净水技术, 2016, 35(S1): 70-74.
- Liu Y H, Xie Q L. Research progress in metabolic uncoupler in activated sludge reduction technologies[J]. Water Purification Technology, 2016, 35(S1): 70-74.
- [9] 李立欣, 赵乾身, 马放, 等. 废水处理中污泥减量技术现状及发展趋势[J]. 水处理技术, 2015, 41(1): 1-4.
- Li L X, Zhao Q S, Ma F, et al. Status and development trend of sludge reduction technologies in wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(1): 1-4.
- [10] 王敏, 熊娅, 宋英豪, 等. 废水处理中污泥减量技术研究进展[J]. 环境工程, 2012, 30(S2): 171-175, 186.
- Wang M, Xiong Y, Song Y H, et al. Research progress in sludge reduction technologies in waste water treatment[J]. Environmental Engineering, 2012, 30(S2): 171-175, 186.
- [11] 袁媛, 于海琴. 剩余污泥减量技术及其研究进展[J]. 给排水, 2009, 35(S1): 150-153.
- [12] Kern-Jespersen J P, Henze M, Strube R. Biological phosphorus release and uptake under alternating anaerobic and anoxic conditions in a fixed-film reactor[J]. Water Research, 1994, 28(5): 1253-1255.
- [13] Van Hulle S W H, Volcke E I, Teruel J L, et al. Influence of temperature and pH on the kinetics of the Sharon nitrification process[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2007, 82(5): 471-480.
- [14] Meinhold J, Arnold E, Isaacs S. Effect of nitrite on anoxic phosphate uptake in biological phosphorus removal in activated sludge[J]. Water Research, 1999, 33(8): 1871-1883.
- [15] 王亚宜, 王淑莹, 彭永臻. MLSS、pH 及 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 NO_2^- -N concentration on denitrifying phosphorus removal[J]. China Water & wastewater, 2005, 21(7): 47-51.
- [16] Casey T G, Wentzel M C, Ekama G A. Filamentous organism bulking in nutrient removal activated sludge systems. Paper 9: Review of biochemistry of heterotrophic respiratory metabolism[J]. Water SA, 1999, 25(4): 409-424.
- [17] 马娟, 李璐, 俞小军, 等. FNA 对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3786-3793.
- Ma J, Li L, Yu X J, et al. Long-term inhibition of FNA on aerobic phosphate uptake and variation of phosphorus uptake properties of the sludge[J]. Environmental Science, 2015, 36(10): 3786-3793.
- [18] Flowers J J, He S M, Yilmaz S, et al. Denitrification capabilities of two biological phosphorus removal sludges dominated by different “*Candidatus Accumulibacter*” clades [J]. Environmental Microbiology Reports, 2009, 1(6): 583-588.
- [19] Kim J M, Lee H J, Lee D S, et al. Characterization of the denitrification-associated phosphorus uptake properties of “*Candidatus Accumulibacter Phosphatis*” clades in sludge subjected to enhanced biological phosphorus removal [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(6): 1969-1979.
- [20] Hesselmann R P X, Werlen C, Hahn D, et al. Enrichment, phylogenetic analysis and detection of a bacterium that performs enhanced biological phosphate removal in activated sludge[J]. Systematic and Applied Microbiology, 1999, 22(3): 454-465.
- [21] Yoshida Y, Takahashi K, Saito T, et al. The effect of nitrite on aerobic phosphate uptake and denitrifying activity of phosphate-accumulating organisms [J]. Water Science and Technology, 2006, 53(6): 21-27.
- [22] Sin G, Niville K, Bachis G, et al. Nitrite effect on the phosphorus uptake activity of phosphate accumulating organisms (PAOs) in pilot-scale SBR and MBR reactors[J]. Water SA, 2008, 34(2): 249-260.
- [23] 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.
- [24] 宋姬晨, 王淑莹, 杨雄, 等. 亚硝酸盐对 A^2O 系统脱氮除磷的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2231-2238.
- Song J C, Wang S Y, Yang X, et al. Effect of nitrite on nutrient removal in A^2O system [J]. China Environmental Science, 2014, 34(9): 2231-2238.
- [25] 委燕, 王淑莹, 马斌, 等. 亚硝酸盐对外碳源反硝化过程 N_2O 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 N_2O reduction during denitrification process using external carbon source[J]. China Environmental Science, 2014, 34(7): 1722-1727.
- [26] Pijuan M, Ye L, Yuan Z G. Free nitrous acid inhibition on the aerobic metabolism of poly-phosphate accumulating organisms [J]. Water Research, 2010, 44(20): 6063-6072.
- [27] Zeng W, Wang A Q, Zhang J, et al. Enhanced biological phosphate removal from wastewater and clade-level population dynamics of “*Candidatus Accumulibacter phosphatis*” under free nitrous acid inhibition: linked with detoxication [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 296: 234-242.
- [28] 李捷, 熊必永, 张树德, 等. 亚硝酸盐对聚磷菌吸磷效果的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 701-703.
- Li J, Xiong B Y, Zhang S D, et al. Effects of nitrite on phosphorus uptake in anaerobic/oxic process[J]. Environmental Science, 2006, 27(4): 701-703.
- [29] Saito T, Takahashi K, Tsuboi S, et al. Mechanisms of unstable nitrite inhibition of aerobic phosphate uptake [J]. Journal of Water and Environment Technology, 2008, 6(1): 65-75.
- [30] Sijbesma W F H, Almeida J S, Reis M A, et al. Uncoupling effect of nitrite during denitrification by *Pseudomonas fluorescens*: an in vivo ^{31}P -NMR study [J]. Biotechnology and

- Bioengineering, 1996, **52**(1): 176-182.
- [31] Ye L, Pijuan M, Yuan Z G. The effect of free nitrous acid on the anabolic and catabolic processes of glycogen accumulating organisms[J]. Water Research, 2010, **44**(9): 2901-2909.
- [32] 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.
- [33] 宋姬晨, 王淑莹, 杨雄, 等. 缺/好氧条件下亚硝酸盐的存在对污泥沉降性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(4): 1361-1368.
Song J C, Wang S Y, Yang X, *et al.* Influence of nitrite on sludge settleability under anoxic and aerobic conditions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, **45**(4): 1361-1368.

欢迎订阅 2018 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2018 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)