

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

低温低溶解氧 EBPR 系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究

马娟¹, 李璐¹, 俞小军¹, 魏雪芬¹, 刘娟丽²

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 西北民族大学化工学院, 兰州 730030)

摘要: 试验采用交替厌氧/好氧(An/O)SBR 反应器, 在温度为 13 ~ 16℃ 的条件下启动并运行 EBPR 系统。研究表明, 进水磷浓度 20 mg·L⁻¹, 控制 DO 浓度为 2 mg·L⁻¹, 低温条件下即可在短期内 (< 6 d) 实现 EBPR 系统的成功启动并获得高效稳定的除磷性能, 出水磷浓度低于 0.5 mg·L⁻¹。降低 DO 浓度会影响 EBPR 系统的稳定运行效果, 反应器好氧阶段 DO 浓度由 2 mg·L⁻¹ 降为 1 mg·L⁻¹, 系统仍可以稳定运行, 磷的去除率均大于 97.4%, 但厌氧释磷量略有下降; DO 浓度进一步降至 0.5 mg·L⁻¹ 时, EBPR 系统除磷性能迅速恶化且出水磷浓度超标。通过提高溶解氧浓度以恢复 EBPR 除磷性能的试验发现, 低 DO 导致的系统失效在短期内不可逆。研究还发现, 以 NO₂⁻ 及 NO₃⁻ 为电子受体的缺氧除磷小试对 EBPR 系统的稳定运行具有冲击作用, 但由此产生的不利影响可在 6 个周期内得以恢复; 此外, 长期低温运行的 EBPR 系统内 MLSS 基本保持恒定且 SVI 略有降低, 说明低温低 DO 条件有利于系统内污泥的沉降。

关键词: 低温; 低溶解氧; EBPR; 启动; 失效

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0597-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.030

Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition

MA Juan¹, LI Lu¹, YU Xiao-jun¹, WEI Xue-fen¹, LIU Juan-li²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Chemical Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730030, China)

Abstract: A sequencing batch reactor (SBR) was started up and operated with alternating anaerobic/oxic (An/O) to perform enhanced biological phosphorus removal (EBPR) under the condition of 13-16℃. The results showed that under the condition of low temperature, the EBPR system was successfully started up in a short time (< 6 d). The reactor achieved a high and stable phosphorus removal performance with an influent phosphate concentration of 20 mg·L⁻¹ and the dissolved oxygen (DO) concentration of 2 mg·L⁻¹. The effluent phosphate concentration was lower than 0.5 mg·L⁻¹. It was found that decreasing DO had an influence on the steady operation of EBPR system. As DO concentration of aerobic phase decreased from 2 mg·L⁻¹ to 1 mg·L⁻¹, the system could still perform EBPR and the phosphorus removal efficiency was greater than 97.4%. However, the amount of phosphate released during anaerobic phase was observed to decrease slightly compared with that of 2 mg·L⁻¹ DO condition. Moreover, the phosphorus removal performance of the system deteriorated immediately and the effluent phosphate concentration couldn't meet the national integrated wastewater discharge standard when DO concentration was further lowered to 0.5 mg·L⁻¹. The experiments of increasing DO to recover phosphorus removal performance of the EBPR suggested the process failure resulted from low DO was not reversible in the short term. It was also found that the batch tests of anoxic phosphorus uptake using nitrite and nitrate as electron acceptors had an impact on the stable operation of EBPR system, whereas the resulting negative influence could be recovered within 6 cycles. In addition, the mixed liquor suspended solids (MLSS) of the EBPR system remained stable and the sludge volume index (SVI) decreased to a certain extent in a long run, implying long-term low temperature and low DO condition favored the sludge sedimentation.

Key words: low temperature; low DO; EBPR; startup; failure

氮、磷的过量排放是引起水体富营养化的主要原因, 其中又以磷为关键因素, 因而, 各国制定的污水综合排放标准中针对出水磷的浓度更为严格。强化生物除磷(enhanced biological phosphorus removal, EBPR)就是利用聚磷微生物(polyphosphate accumulating organisms, PAOs)的厌氧释磷及好氧(或缺氧)超量吸磷特性, 在交替厌氧/好氧(缺氧)运行环境下实现水体中磷的去除^[1-3]。

溶解氧(DO)浓度是影响 PAOs 生长的重要因素。通常, EBPR 系统的 DO 浓度控制在 2 ~ 3 mg·L⁻¹, 但在实际的污水处理厂, 很多工艺尤其是间歇流工艺会在好氧末期出现溶解氧过高的现象,

收稿日期: 2014-06-04; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168027); 甘肃省科技计划项目(145RJZA093)

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

而过高的 DO 浓度 ($5.5 \sim 7.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 或过曝气会使厌氧阶段贮存在聚磷菌体内的聚羟基脂肪酸 (PHAs) 过度消耗^[4], 导致污泥活性降低, 从而引发 EBPR 系统的失效; 另一方面, 对实际运营的城市污水处理厂调研发现, 曝气成本约占总运行费用的 50% ~ 80% 且好氧段的过曝气现象普遍存在, 这种高能耗的污水处理方式无疑背离了当前所提倡的低碳经济及建设节约型社会的发展方向. 研究表明, 低 DO 条件下 PAOs 依然具有良好的释、吸磷能力, 系统除磷性能良好^[5]. 因此, 低 DO 条件下实现 EBPR 系统的稳定运行以节约污水生物除磷的处理成本, 这在能源问题突出的今天尤为重要.

温度是影响 EBPR 系统除磷性能的另一主要因素. 文献报道降低温度会减慢聚磷菌的生化反应速度, 从而影响其释磷及吸磷速率^[6]. 另有研究表明, PAOs 是一种嗜冷性细菌^[7], 即使在较低温度条件下也能成功运行 EBPR 系统^[8~10]; 此外, 从与聚糖菌 (GAOs) 的竞争角度分析, 低温更不适宜于 GAOs 的生长, 降低温度可有效减弱 GAOs 对 EBPR 系统的不利影响^[11~13]. 然而, 在实际污水处理厂或实验室研究过程中发现, 由于 PAOs 对温度条件的不适而经常处于竞争劣势, 低温条件下 EBPR 系统的生物除磷效果明显下降, 甚至消失^[14]. 在实际工程应用中, 调节温度在操作上难度较大、可行性较低, 因此, 考察 EBPR 系统的低温启动及运行对实际污水处理厂的运营, 尤其对季节性低温条件下的工艺运行及管理更有意义.

本研究采用交替厌氧/好氧 (An/O) SBR 反应器, 在温度为 $13 \sim 16^\circ\text{C}$ 的条件下启动并长期运行 EBPR 系统, 考察了低温低 DO 下系统的污染物去除性能、PAOs 的释、吸磷能力以及污泥沉降性能, 并进行了反硝化吸磷冲击小试及系统除磷性能的恢复试验.

1 材料与方法

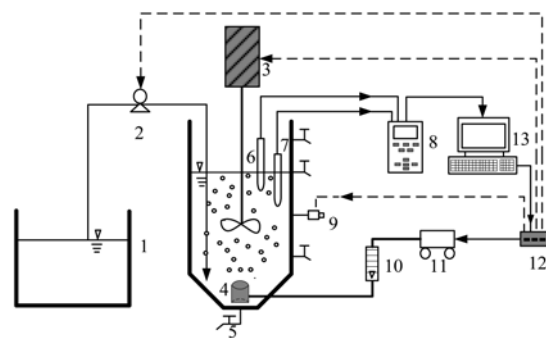
1.1 试验装置及运行

SBR 反应器由有机玻璃制成, 上部为圆柱形, 底部为圆锥体, 总有效容积 5.4 L. 在反应器壁上的垂直方向设置一排间距 10 cm 的取样口, 用于取样和排水, 底部设有排泥口; 以黏砂块作为微孔曝气器, 采用鼓风机曝气, 气量由转子流量计调节; 反应器进、出水, 搅拌及曝气过程的溶解氧浓度均采用带有 Labview 软件编程的计算机系统加以控制, 整个试验装置如图 1 所示.

试验共经历 4 个阶段: 第 1 ~ 26 d 为启动阶段, 控制 DO 临界值 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 第 27 ~ 48 d 降低 DO 临界值为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 第 49 ~ 91 d 进一步降低 DO 临界值至 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 第 92 ~ 120 d 为恢复阶段, 撤销 DO 浓度控制.

试验每天共进行 3 个周期, 每周期 8 h, 包括 2 h 厌氧, 5 h 好氧及 1 h 沉淀、排水、闲置. 反应器排水比 1/3, 温度保持在 $13 \sim 16^\circ\text{C}$, pH 值维持在 6.8 ~ 7.5 之间, 污泥龄为 10 d, 反应器内溶解氧浓度由 DO 控制系统根据不同阶段的试验需求分别稳定在 2、1 及 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

缺氧吸磷小试: 分别于试验前 3 个阶段的稳定运行期间进行, 在缺氧段初始瞬时投加 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 试验周期 8 h, 包括 2 h 厌氧, 5 h 缺氧及 1 h 沉淀、排水、闲置, 其他参数同厌氧/好氧稳定运行模式.



1. 水箱; 2. 蠕动泵; 3. 搅拌装置; 4. 黏砂块曝气头;
5. 排泥口; 6. pH 探头; 7. DO 探头; 8. Multi 3420 在线测定仪;
9. 电磁阀; 10. 流量计; 11. 空气压缩机;
12. DO 控制系统; 13. 计算机

图 1 SBR 生物除磷反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR for biological phosphorus removal

1.2 试验水质及接种污泥

试验采用模拟废水, 由碳源液、磷液、浓缩液及微量元素配制而成. 碳源液由乙酸和丙酸组成 (乙酸与丙酸摩尔比为 3:1), 磷液由 KH_2PO_4 配制而成, 其中溶解性正磷酸盐 (SOP) 质量浓度为 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 浓缩液^[15] (1L) 由 21 g NH_4Cl , 45 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 80 g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 21 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 10 g 酵母浸膏, 61 g 蛋白胨和 0.25 g 硝化抑制剂 (ATU) 组成, 微量元素组成^[16] 见表 1. 1 L 模拟废水加入磷液 5 mL, 碳源液乙酸 0.26 mL、丙酸 0.098 mL, 浓缩液 1 mL 及微量元素液 1 mL, 由此得出, 进水 COD $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ $5.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ $0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 1 微量元素液成分及其浓度			
Table 1 Composition and concentration of trace elements			
基质种类	浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	基质种类	浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
柠檬酸	5.51	$\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.06
苯甲酰胺基醋酸	4.03	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.3
$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	3.03	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.06
H_3BO_3	0.5	EDTA	10
$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.12	$\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.06
KI	0.06	$\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.06
$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.24		

试验所用污泥接种自甘肃省兰州市七里河城市污水处理厂 4 号曝气池,该污水厂污泥具有一定脱氮除磷性能,污泥各项指标性能良好。

1.3 分析项目及方法

试验所有水样均采用定性滤纸过滤后测定,水质分析项目中 COD 采用 COD 快速测定仪测定, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用钼锑抗分光光度法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用 *N*-(1 萘基)-乙二胺分光光度法测定, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用麝香草酚分光光度法测定,MLSS、MLVSS 采用滤纸重量法测定,SV 采用 30 min 沉降法测定。温度、pH 和 DO 测定采用德国 Multi 3420 在线测定仪在线监测。

2 结果与讨论

2.1 低温条件下不同 DO 浓度 EBPR 系统的污染物去除性能

图 2 为 120 d 低温运行过程中,不同 DO 条件下

系统的污染物去除性能。从中可见,在阶段 1 和 2, DO 浓度分别维持在 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,系统出水磷浓度仅在启动前 5 d 有小幅波动,此后, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均小于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除磷率保持在 97.4% 以上。在试验 1、2 阶段,温度由启动时的 16°C 逐步降低后一直稳定维持在 $13\sim 15^\circ\text{C}$ 之间,说明此温度范围对生物除磷没有影响。进一步降低 DO 浓度至 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后(阶段 3),系统除磷性能迅速恶化,出水磷浓度严重超标,在降低溶解氧至 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 4d 内,出水磷浓度甚至大于进水磷浓度,经过 40 多天的运行,除磷率最高仅恢复至 50.2%。在此期间,曾提高 COD 浓度以改善 PAOs 的放磷性能及系统的除磷性能,但结果显示除磷率不升反降,出水磷浓度再次接近进水浓度。为了考察低 DO 对生物除磷系统性能的影响,试验阶段 4 中撤消对 DO 控制,反应器内好氧阶段末期溶解氧达到 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,经过近 90 个周期的运行,平均出水磷浓度为 $14.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除磷率低于 56.7%,系统未能恢复到阶段 1、2 的除磷效果,说明低 DO 条件运行导致的 EBPR 系统失效问题在短期内不可逆。

2.2 不同阶段 EBPR 系统典型周期内污染物变化规律

图 3 为不同试验阶段典型周期内 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 DO 的浓度变化规律。从中各阶段典型周期内 COD 的降解规律分析,在 EBPR 启动阶段(阶段 1),有机物迅速降解,仅需约 1 h 左右即消耗完毕。此

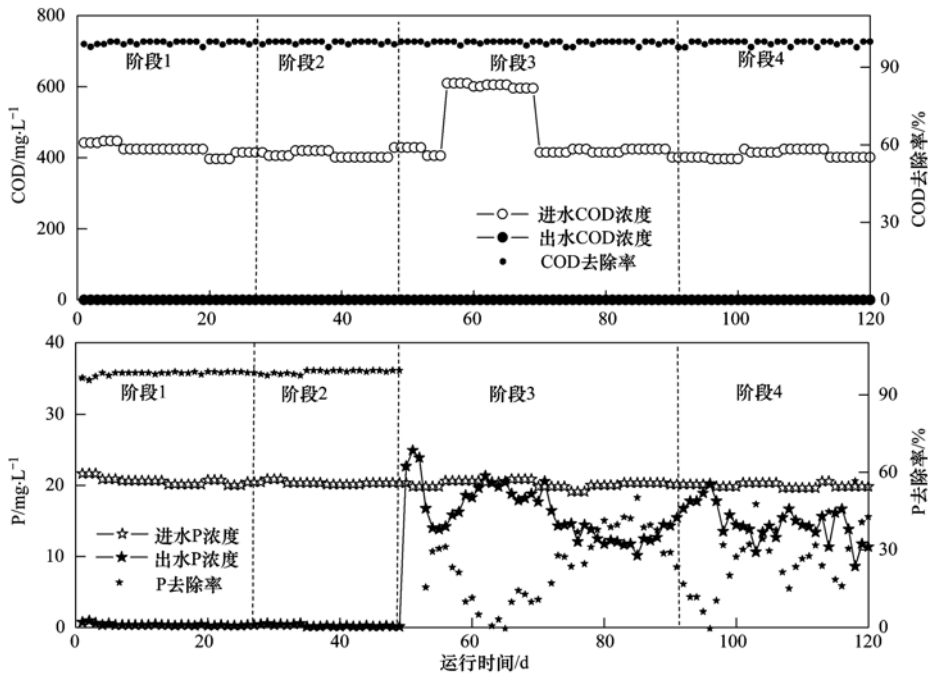


图 2 不同 DO 条件下系统进、出水 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度及其去除率

Fig. 2 Influent and effluent concentrations of COD, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and its removal efficiency under different DO levels

过程中,底物浓度与反应时间基本呈线性关系.而在阶段2和阶段3中,即DO临界值低于 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下时,有机物的降解速率受到好氧段DO浓度的影响,且表现为DO浓度越低,降解速率越小.当DO临界值降低至 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,COD完全降解需要整个厌氧段的时间(120 min).1、2、3阶段COD比利用速率分别为 0.067 、 0.049 和 $0.034\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.在试验恢复阶段(阶段4),尽管未对系统DO加以控制,

但降解相同浓度进水COD的时间较试验前3个阶段均有所延长,需 210 min ,且厌氧结束后仍有少量COD存在,只能通过好氧阶段去除,该阶段COD比利用速率仅为 $0.017\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.结合图2,尽管最终出水COD浓度接近,但各阶段COD利用速率减慢说明聚磷菌活性的降低,原因是,COD的降解几乎发生在厌氧阶段,放磷产生的能量被聚磷菌利用摄取有机碳源并合成PHAs.

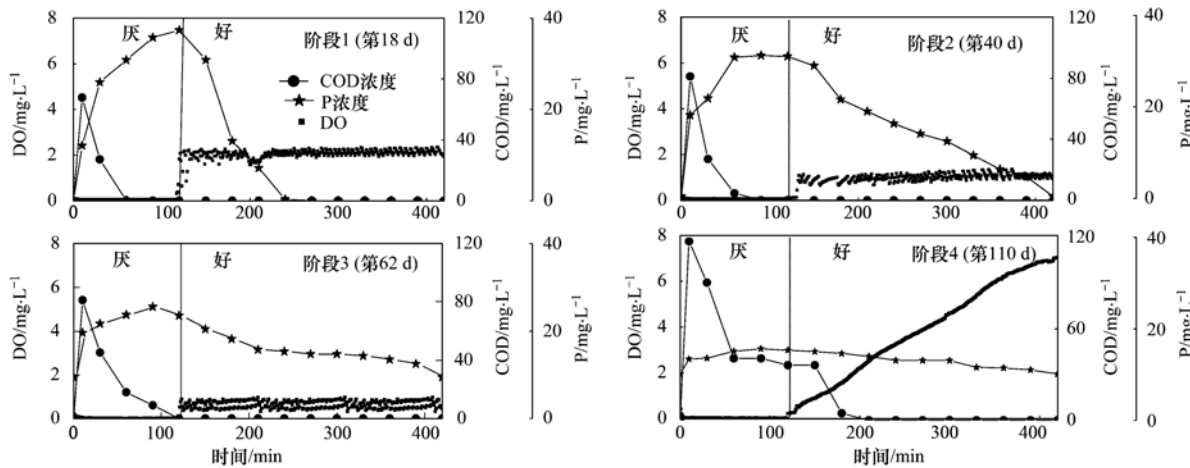


图3 不同DO条件下典型周期内COD和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度变化规律

Fig. 3 Variations of COD and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration during typical cycles under different DO levels

由图3还可以看出,试验的4个阶段均有释、吸磷现象,但前3个阶段的释、吸磷量随DO浓度的降低相应减小.在阶段1的厌氧时段内,DO浓度维持在极低范围,约 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,PAOs释放磷的同时利用挥发性脂肪酸(VFA)并以PHAs的形式储存在体内,厌氧结束时释磷量约为 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;好氧时段内DO浓度从 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 快速上升并以 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为基准上下浮动,在此期间,PAOs以降解PHAs为能量来源实现微生物生长、糖原合成以及磷的吸收,吸磷过程在 120 min 内迅速完成.降低DO临界浓度至 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,厌氧结束时磷浓度为 $35.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,较阶段1有所下降,且吸磷过程延长至 300 min .进一步降低DO至 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,厌氧结束后释磷浓度降至 $22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,好氧反应结束时系统中仍有 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷,说明完成吸磷需要更长的时间.在试验恢复阶段,系统没有明显的释、吸磷现象,且并未观察到除磷性能恢复的迹象,这从另一个方面证明EBPR系统一旦失效,短期内不可逆转.

2.3 不同DO条件下EBPR系统的释、吸磷状况及 NO_x^- 冲击试验

图4为EBPR系统在 120 d 的运行期间内各阶

段厌氧及好氧末期反应器内的磷浓度.由于系统在启动及长期运行过程中均投加ATU以抑制系统内硝化作用的发生,且试验过程中未检测到 NO_x^- ,为此,分别在不同试验阶段投加 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NO}_2^- \text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 进行冲击试验以考察系统内聚磷菌的缺氧吸磷性能,其中箭头位置表示进行冲击试验的时间.

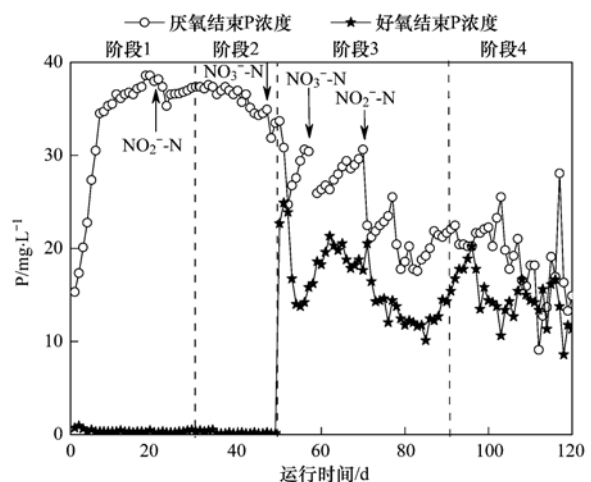


图4 不同DO条件下系统的厌氧、好氧末期 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度

Fig. 4 Concentration of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at the end of anaerobic and aerobic phases under different DO levels

由图 4 可见, 在 1、2 两阶段投加 NO_x^- 会降低系统厌氧释磷量, 但经过若干周期后释磷量会有所恢复. 对比两次投加可以发现, 投加 NO_2^- 冲击后需 6 个周期的运行厌氧释磷量才有所恢复, 而投加 NO_3^- 冲击后恢复只需 3 个周期. 在阶段 3 的试验中, 投加 NO_x^- 同样出现了释磷恢复迹象, 但由于系统内 DO 浓度过低, NO_x^- 冲击所造成的不利影响明显增大.

在试验启动阶段, 系统厌氧结束时磷的浓度由第 1 d 的 $16.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 快速递增至第 7 d 的 $35.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 说明 EBPR 系统在短期内 ($<6 \text{ d}$) 成功启动且未受低温影响, 这与所接种的污泥除磷性能很好有部分关系, 原因是本试验进水磷浓度 ($20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 远远高于污水处理厂的进水浓度 ($3\sim5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 因此驯化方式和配水方案是决定快速启动系统的主要因素; 降低 DO 临界浓度至 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 系统厌氧阶段释磷量逐渐降低, 由 $38.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 递减到 $34.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 当 DO 浓度降低至

$0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 系统中没有充足的氧气供应, 影响 PAOs 的吸磷作用, 进而影响厌氧释磷能力, 加之 NO_x^- 对系统的冲击影响, EBPR 系统开始恶化并失效. 撤消对系统的溶解氧控制, 使 DO 浓度在好氧阶段逐渐升高, 系统的释、吸磷状况并未恢复到最初的情况.

表 2 归纳了系统在不同阶段的释、吸磷量, 比释磷速率和比吸磷速率及 MLSS 和 VSS. 从中可以看出, 随着试验各阶段 DO 浓度的降低, 系统的比释磷速率和比吸磷速率均在减小. 当 DO 浓度降至 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 释、吸磷量分别从之前 DO 浓度为 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的 $(15.94 \pm 0.1) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $(19.66 \pm 0.1) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 大幅降低至 $(3.74 \pm 0.1) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $(4.72 \pm 0.1) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 系统开始失效. 通过计算释磷量与吸磷量的比值可以发现, 随着试验阶段的进行, 释磷量与吸磷量的比值由 0.83 降低到 0.34, 除磷性能逐渐下降.

表 2 不同 DO 条件下 EBPR 系统的释、吸磷情况及污泥量¹⁾

Table 2 Phosphate released, adsorption and sludge amount of the EBPR system under different DO levels								
试验阶段	释磷量 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	比释磷速率 / $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	吸磷量 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	比吸磷速率 / $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	释磷量 /吸磷量	MLSS / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	VSS / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	VSS /MLSS
1	16.94 ± 0.2	8.12	20.35 ± 0.2	4.68	0.83 ± 0.2	$2\,961.3 \pm 1.2$	$1\,986.5 \pm 1.2$	0.68 ± 1.2
2	15.94 ± 0.1	7.97	19.66 ± 0.1	3.93	0.81 ± 0.1	$2\,475.3 \pm 1.3$	$1\,807.5 \pm 1.3$	0.73 ± 1.3
3	3.74 ± 0.1	1.87	4.72 ± 0.1	0.94	0.79 ± 0.1	$2\,392.9 \pm 1.1$	$1\,989.3 \pm 1.1$	0.84 ± 1.1
4	0.92 ± 0.1	0.46	1.72 ± 0.1	0.34	0.53 ± 0.1	$2\,488.7 \pm 1.2$	$2\,182.5 \pm 1.2$	0.87 ± 1.2

1) 释磷及吸磷量以每克 VSS 吸收的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量计, 表中数据形式为平均值 $\pm$ 标准偏差

Lu 等^[17] 的研究表明, 活性污泥微生物的含磷量可采用污泥中混合液挥发性悬浮固体浓度 (VSS) 与混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 的比值 (VSS/MLSS) 表征, VSS/MLSS 越大表示微生物含磷量越小. 由表 2 可见, 试验由阶段 1 进行至阶段 4, VSS/MLSS 的数值由 0.68 增加到 0.87, 说明微生物体内含磷量逐渐降低, 即微生物的聚磷能力逐步降低, 这也从另一个方面说明了系统的恶化和失效.

NO_x^- 的存在会抑制 EBPR 系统的释磷性能. 厌氧阶段, 反硝化细菌将优先利用碳源并以 NO_x^- 为电子受体进行反硝化从而抑制 PAOs 的释磷和 PHAs 的合成, 因此, 向长期投加硝化抑制剂的 EBPR 系统内投加 NO_x^- 会对 PAOs 的释、吸磷能力造成冲击, 最终影响除磷的效果.

图 5 为 NO_x^- 冲击试验中, EBPR 系统缺氧段 NO_x^- 、P 浓度变化规律. 从中可见, 对比投加电子受体后缺氧段 (300 min) 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 NO_x^- 浓度变化可以发现, 在试验第 21 d 和第 69 d 投加 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

NO_2^- 后系统均发生了二次释磷现象, 这与曾薇等^[18] 的试验现象一致. 厌氧条件下 NO_2^- 的投加促进磷酸盐的释放, 其原因是 NO_2^- 的存在破坏 PAOs 细胞的质子驱动力 (pmf)^[19], 为了维持 pmf 恒定并为 PAOs 吸收 VFA 提供能量, PAOs 需要分解更多的聚磷为厌氧代谢过程提供能量; 另一个原因可能是, 系统内不存在或缺少以 NO_2^- 为电子受体的反硝化聚磷菌. 在第 40 d 和第 56 d 投加 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NO_3^- 的试验发现, 系统虽有吸磷现象发生, 但吸磷不完全, 说明系统内虽有以 NO_3^- 为电子受体的反硝化聚磷菌存在但数量较少或活性较低, 系统内的 PAOs 不能适应 NO_3^- 的冲击, 这与长期投加硝化抑制剂有直接关系.

pH 值是影响生物除磷性能的一个关键因素. pH 值的变化能够引起细胞膜电荷的变化, 从而影响微生物对营养物质的吸收、利用和代谢过程中酶的活性. 当生物除磷系统 pH 值发生变化时, 活性污泥的微生物种群也会相应地发生显著变化. 对本研究

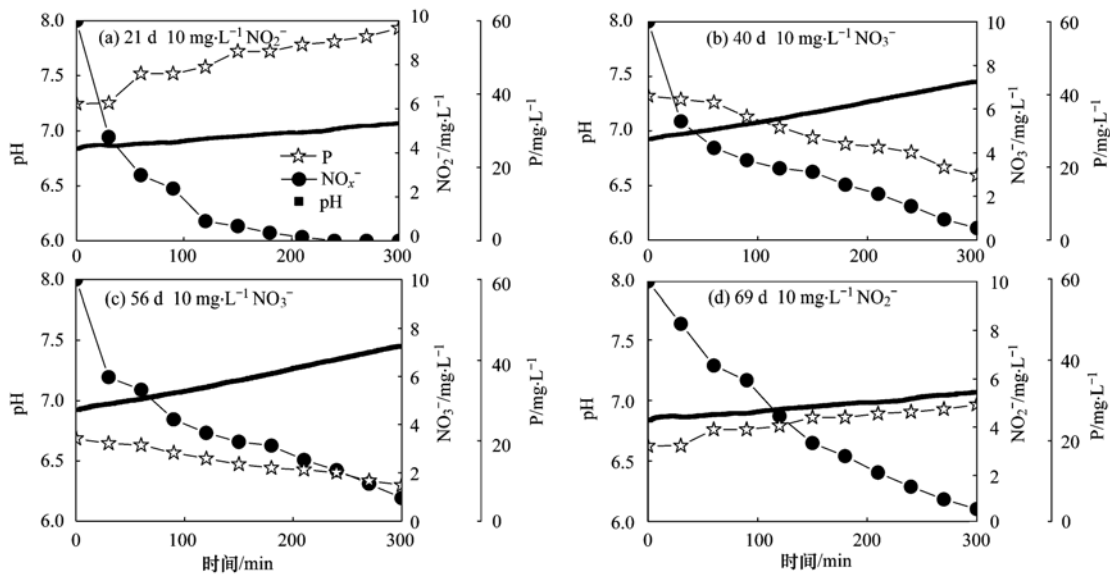


图5 NO_x^- 冲击试验缺氧段的 NO_x^- 及 PO_4^{3-} -P 浓度变化规律

Fig. 5 Variations of NO_x^- and PO_4^{3-} -P concentrations during anoxic period in NO_x^- shocking experiments

各试验阶段典型周期的监测发现, pH 值介于 6.8 ~ 7.5 之间, 与文献[20 ~ 22]报道的 PAOs 生长适宜 pH 值(7.0 ~ 8.0)相近, 因此, 本研究中 pH 值不是影响系统除磷性能的因素。

2.4 DO 浓度对 EBPR 系统污泥性质的影响

低 DO 一直被认为是引起丝状菌膨胀并导致污泥流失的主要因素之一[23 ~ 26]。从图 6 中不同 DO 浓度下反应器内污泥体积指数(SVI)的变化可以看出, BEPR 系统在运行初期有微膨胀的现象(150 <

SVI < 180), 但随着试验的进行, SVI 逐步降低直至稳定, 说明系统的污泥沉降性能在整个运行过程中并未受到 DO 浓度变化的影响。分析原因, 一方面由于 PAOs 比丝状菌更容易吸收易降解性有机物, 抑制了丝状菌的生长; 另一方面, 含有 PAOs 的活性污泥比重较大, 有利于污泥的沉降。此外, 低 DO 环境下菌群活性减弱, 代谢过程缓慢, 使得在菌胶团形成中起主要作用的荚膜(含水量 90% ~ 98%)分泌量减少, 污泥含水率下降, 从而使 SVI 值降低。

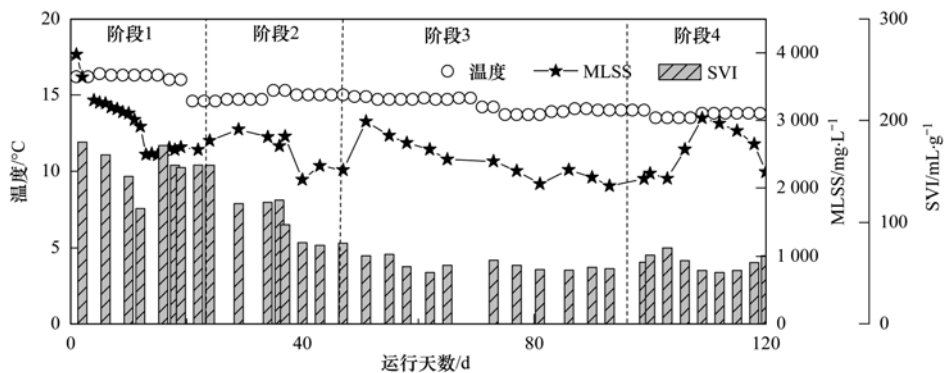


图6 DO 浓度对 EBPR 系统污泥性质的影响

Fig. 6 Influence of DO level on sludge properties of the EBPR system

3 结论

(1) 在低温条件下(温度 13 ~ 16°C), EBPR 系统可在短期内(< 6 d)成功启动, 且对系统 COD 和磷的去除效果几乎没有影响。

(2) 低 DO 对系统有机物的去除基本没有影响,

但随着 DO 浓度的降低, COD 的利用速率减慢; 低 DO 影响 EBPR 系统的稳定运行, 当 DO 浓度 $\geq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 磷去除率均大于 97.4%, DO 浓度降至 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 出水水质恶化, 系统丧失除磷性能且这种失效在短期内不可逆。

(3) 以 NO_2^- 及 NO_3^- 为电子受体的缺氧除磷小

试对 EBPR 系统的稳定运行具有冲击作用,但由此产生的不利影响可在 6 个周期内得以恢复,且长期低温运行有利于 EBPR 系统内污泥的沉降。

参考文献:

- [1] 赵永红, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(3): 92-97.
- [2] Wentzel M C, Lötter L H, Loewenthal R E, *et al.* Metabolic behavior of *Acinetobacter* spp. in enhanced biological phosphorus removal-A biochemical model[J]. Water S A, 1986, **12**(4): 209-224.
- [3] Arun V, Mino T, Mitsu T. Biological mechanism of acetate uptake mediated by carbohydrate consumption in excess phosphorus removal systems[J]. Water Research, 1988, **22**(5): 565-570.
- [4] 彭赵旭, 霍明昕, 彭永臻, 等. DO 对除磷过程的长期影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, **43**(4): 42-46.
- [5] Lemaire R, Meyer R, Taske A, *et al.* Identifying causes for N_2O accumulation in a lab-scale sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal[J]. Journal of Biotechnology, 2006, **122**(1): 62-72.
- [6] Beaton D, Vanrolleghem P A, van Loosdrecht M C M, *et al.* Temperature effects in bio-P removal[J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(1): 215-225.
- [7] Helmer C, Kunst S. Low temperature effects on phosphorus release and uptake by microorganisms in EBPR plants[J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(4-5): 531-539.
- [8] Brdjanovic D, Logemann S, van Loosdrecht M C M, *et al.* Influence of temperature on biological phosphorus removal: process and molecular ecological studies[J]. Water Research, 1998, **32**(4): 1035-1048.
- [9] Bassin J P, Winkler M K H, Kleerebezem R, *et al.* Improved phosphate removal by selective sludge discharge in aerobic granular sludge reactors[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, **109**(8): 1919-1928.
- [10] Zou H M, Lu X W, Saad A. Characterization of microorganisms responsible for phosphorus removal linking operation performance with microbial community structure at low temperature[J]. Environmental Technology, 2014, **35**(9): 1101-1109.
- [11] Erdal Z K, Erdal U G, Randall C W. Biochemistry of enhanced biological phosphorus removal and anaerobic COD stabilization[J]. Water Science and Technology, 2005, **52**(10-11): 557-567.
- [12] Lopez-Vazquez C M, Oehmen A, Hooijmans C M, *et al.* Modeling the PAO-GAO competition: effects of carbon source, pH and temperature[J]. Water Research, 2009, **43**(2): 450-462.
- [13] Tian W D, Lopez-Vazquez C M, Li W G, *et al.* Occurrence of PAOI in a low temperature EBPR system[J]. Chemosphere, 2013, **92**(10): 1314-1320.
- [14] Lopez-Vazquez C M, Hooijmans C, Brdjanovic D, *et al.* Temperature effects on glycogen accumulating organisms[J]. Water Research, 2009, **43**(11): 2852-2864.
- [15] 卢文健, 杨殿海, 郭云, 等. 聚磷菌的快速富集及其除磷特性研究[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(6): 31-36.
- [16] 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.
- [17] Lu H B, Oehmen A, Virdis B, *et al.* Obtaining highly enriched cultures of *Candidatus Accumulibacter* Phosphates through alternating carbon sources[J]. Water Research, 2006, **40**(20): 3838-3848.
- [18] 曾薇, 杨莹莹, 王向东, 等. 亚硝酸盐对聚磷菌厌氧代谢的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, **34**(2): 132-137.
- [19] Zhou Y, Oehmen A, Lim M, *et al.* The role of nitrite and free nitrous acid (FNA) in wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2011, **45**(15): 4672-4682.
- [20] 郭春艳, 王淑莹, 李夕耀, 等. 聚磷菌和聚糖菌的竞争影响因素研究进展[J]. 微生物学通报, 2009, **36**(2): 267-275.
- [21] 李楠, 王秀衡, 亢涵, 等. pH 对低温除磷微生物种群与聚磷菌代谢的影响[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(3): 9-11.
- [22] 姜体胜, 杨琦, 尚海涛, 等. 温度和 pH 值对活性污泥法脱氮除磷的影响[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(9): 10-14.
- [23] 左金龙, 王淑莹, 彭赵旭, 等. 低溶解氧下微膨胀污泥对污染物的去除性能[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(15): 11-14.
- [24] 彭赵旭, 彭永臻, 桂丽娟, 等. 低溶解氧丝状菌污泥微膨胀在 SBR 中的可行性[J]. 化工学报, 2010, **61**(6): 1534-1539.
- [25] 桂丽娟, 彭永臻, 甘冠雄, 等. 低 DO 协同负荷引发的黏性膨胀和丝状菌膨胀[J]. 化工学报, 2011, **62**(7): 2042-2048.
- [26] Li X S, Zhao M, Zhang M. A comparative research on sludge properties under different wastewater quality conditions[J]. Advanced Materials Research, 2013, **706-708**: 467-471.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ni (751)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行