

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚类化合物的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

超低溶解氧条件下的 EBPR 系统除磷性能

马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银

(兰州交通大学环境与市政工程学院,兰州 730070)

摘要: 实验采用两个交替厌氧/好氧(An/O)模式运行的 SBR 反应器,对不同溶解氧(DO)浓度梯度下 EBPR 系统除磷效果及工艺性能进行了为期 127 d 的研究. 在未控制 DO 的对照组反应器 R_1 中,好氧段 $DO \geq 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,运行的前 65 d 内工艺除磷性能稳定,除磷率 $> 95.9\%$,出水总磷 $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但由于系统长期处于过曝气状态,65 d 后除磷性能逐渐恶化,直至 97 d 后系统彻底失效,整个运行阶段(1~127 d)出水总磷一级 A 达标率为 39.4%. 对于实验组反应器 R_2 ,控制好氧段 DO 浓度分别为 2、1、0.5、0.2、0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,各工况初期除磷性能均有小幅波动,但除磷率迅速回升,继而反应器达到稳定运行. 统计发现,实验组反应器 R_2 在整个运行阶段出水总磷一级 A 的达标率为 94.6%,127 d 内仅有 6 d 不达标,工艺性能远优于 R_1 . $DO = 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 系统的比吸磷速率接近最大值,而低 DO 条件对比吸磷速率影响较大. 实验还发现,尽管由超低 DO(0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)引起的有机物降解速率低导致系统发生污泥微膨胀,但出水总磷仍能 100% 达标排放,微好氧 EBPR 的节能除磷具有可行性.

关键词: 强化生物除磷(EBPR); 溶解氧; 比吸磷速率; 曝气; 厌氧

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3128-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.039

Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition

MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, LI Lu, SUN Lei-jun, SUN Hong-wei, LI Guang-yin

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

Abstract: Two sequencing batch reactors (SBRs) were operated with alternating anaerobic/oxic (An/O) for 127 days to study the phosphorus removal efficiency and process performance of the EBPR under different dissolved oxygen gradient. For the reactor (R_1) in which DO was not controlled and measured as high as $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ during the aerobic stage, a stable phosphorus removal performance was achieved in the former 65 days during the operational period. The phosphorus removal efficiency was greater than 95.9% and the total phosphorus in effluent was less than $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. However, the phosphorus removal performance subsequently deteriorated after 65 days and completely broke up until 97 day due to long-term excessive aeration. Throughout the operational period, only 39.4% of effluent TP met the national wastewater discharge standard A. For the test reactor (R_2) in which DO was controlled at the levels of 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ during the aerobic stage, respectively, the phosphorus removal performance showed a slight fluctuation at the beginning of each stage but rapidly increased to a stable state. According to the statistics, 94.6% of effluent TP in reactor R_2 could meet the national wastewater discharge standard A throughout the operational period. In only 6 days out of the 127 days, effluent TP failed to meet the national standard and the process performance was far better than that of R_1 . The specific phosphate uptake rate under $DO = 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ was found to be nearly the maximum, but it was greatly influenced by the low DO. In addition, limited filamentous bulking resulted from low organic matter degradation rate under extra-low DO level (0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) was observed. Nevertheless, 100% of effluent TP during this stage could meet the national standard. As a result, the phosphorus removal in micro-aerobic EBPR system for saving energy was feasible.

Key words: enhanced biological phosphorus removal(EBPR); dissolved oxygen; ratio of phosphorus uptake rate; aeration; anaerobic

磷是所有生物细胞的重要组成元素之一,也是人们生产生活中洗涤用品、肥料等必需品的原料,但若使用不当,会对人们的生活环境造成不利影响. 诸多研究表明,大量含氮、磷废水排入地表水体会导致富营养化问题,而磷对藻类生长的影响更大,水中总磷浓度达到 0.015 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 就足以引起藻类大量繁殖^[1,2]. 因而,各国针对污水处理厂出水磷浓度制定了更为严格的污水综合排放标准. 就目前研究的污水除磷工艺方面,强化生物除磷(enhanced biological phosphorus removal, EBPR)工艺被公认是一种经济有效的除磷技术,此工艺利用活性污泥系

统中聚磷微生物(polyphosphate accumulating organisms, PAOs)厌氧释磷及好氧(或缺氧)超量吸磷的特性,在交替厌氧/好氧(或缺氧)运行环境下,通过排放富磷剩余污泥达到除磷目的^[3,4].

溶解氧(DO)浓度是影响生物除磷的重要因素^[5,6]. EBPR 系统中,DO 浓度一般情况下控制在 2

收稿日期: 2016-01-26; 修订日期: 2016-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168027, 51168028); 甘肃省科技计划项目(145RJZA093); 兰州交通大学大学生创新实验项目(2016059)

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

$\sim 3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但实际污水处理厂中很多工艺尤其是间歇流工艺常常会在好氧末期出现 DO 过高的现象. 有研究表明,DO 浓度为 $5.5\sim 7.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或过量曝气会导致聚磷菌体内聚 β 羟基丁酸盐 (PHB) 不足,引起污泥活性降低,从而影响除磷效果^[7,8]. 陈滢等^[9]的研究表明,在 $\text{DO}=0.55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 PAOs 依然具有良好的释、吸磷能力. 尽管如此,对各 DO 尤其是超低 DO 条件下 EBPR 系统除磷性能的研究较为少见. 此外,对实际运营污水处理厂的调研发现,曝气成本占污水厂总运营支出的 $50\%\sim 80\%$ 且大部分污水厂存在过量曝气现象^[10]. 因此,EBPR 系统如能在低 DO 浓度下实现稳定运行,可大大节约污水生物除磷成本.

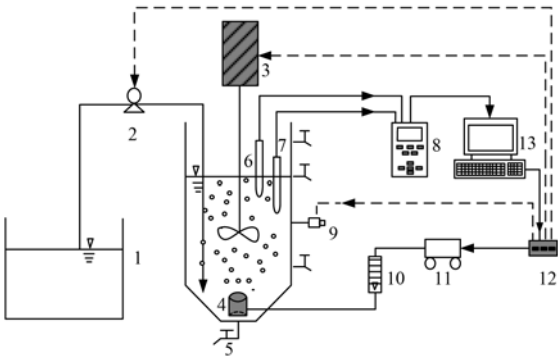
本研究通过对不同 DO 浓度下 EBPR 系统除磷及污泥沉降性能的考察,探究了超低 DO 条件下实现 EBPR 系统稳定高效除磷的可行性,并通过分析不同 DO 条件下系统的比吸磷速率,确定最经济有效的生物除磷所需溶解氧浓度.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行

实验用两个 SBR 反应器均由有机玻璃制成,分别标记为 R_1 (对照组) 和 R_2 (实验组),总有效容积均为 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; R_2 反应器进、出水、搅拌及好氧段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, R_1 反应器除不控制 DO 外,其余同 R_2 . 实验装置如图 1 所示.



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. 控制系统; 13. 计算机

图 1 SBR 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR experimental setup

两反应器每天共运行 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 $1/3$,污泥龄均为 15 d . 两反应器运行工况见表 1,其中 R_2 溶解氧为理论控制值,实际 DO 浓度因控制系统的滞后性除 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 外均略高于控制值.

表 1 两反应器运行工况¹⁾

Table 1 Experimental approach of the two reactors

对照组反应器(R_1)				实验组反应器(R_2)			
编号	工况	运行时间/d	$\text{MLSS}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	编号	工况	运行时间/d	$\text{MLSS}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
I	稳定运行阶段	1~65	2 482	I	$\text{DO}=2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1~11	3 377
II	工艺性能恶化阶段	66~127	3 355	II	$\text{DO}=1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	12~28	3 085
				III	$\text{DO}=0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	29~47	2 321
				IV	$\text{DO}=0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	48~88	2 027
				V	$\text{DO}=0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	89~127	2 683

1)表中 MLSS 为各工况下所有 MLSS 的平均值

1.2 实验水质及接种污泥

实验采用模拟废水,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(乙酸与丙酸量比为 $3:1$),磷液由 KH_2PO_4 配制而成,其中溶解性正磷酸盐质量浓度为 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 浓缩液(1 L)由 $21\text{ g NH}_4\text{Cl}$, $45\text{ g MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $80\text{ g MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $21\text{ g CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 10 g 酵母浸膏, 61 g 蛋白胨和 0.25 g 硝化抑制剂($\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$)组成,微量元素组成参考文献^[11]. 1 L 模拟废水加入磷液 2 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 $\text{COD } 400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P } 8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N } 5.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^-\text{-N } 0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^-\text{-N } 0.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

实验所用污泥接种自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

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,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、pH 值和 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 DO 条件下 EBPR 系统的污染物去除性能

图 2 为不同 DO 条件下 R_1 、 R_2 系统 PO_4^{3-} -P、COD 去除性能.

图 2(a1)中, 未控制 DO 的 R_1 系统在稳定阶段(1~65 d)初期的除磷率有小幅波动, 总磷去除率在 95.9% 以上, 该阶段平均厌氧释磷量为 $33.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在 66~127 d 内由于系统长期处于过曝气状态, 反应器除磷性能开始下降并逐渐恶化, 该阶段平均厌氧释磷量为 $19.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 97 d 时出水磷浓度高于进水磷浓度, 系统彻底失效. 分析认为, 当长期 DO 浓度较高时, 氧能迅速穿透菌胶团, 破坏菌胶团内部厌氧环境, 不利于微生物释磷, 因而释磷量下降. 此外, 过曝气量可能会将活性污泥中较大的菌胶团冲散, 使菌胶团结构被破坏, 系统生物除磷性能

破坏, 即系统失效.

图 2(b1)中, 控制 DO 分别为 2、1、0.5、0.2、0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 5 个工况下, R_2 系统的厌氧释磷量随 DO 浓度降低相应减小, 但各工况下除磷率仅在改变 DO 浓度初期略有降低, 之后快速回升至 100% 并实现磷的稳定去除. 因此, 逐渐降低 DO 浓度 EBPR 系统除磷率几乎不受影响, 工艺除磷性能高效稳定. DO 浓度长期处于超低状态, 微生物代谢处于相对缓慢的状态, 长时间的驯化进而影响同工况厌氧时期释磷量, I 阶段到 V 阶段厌氧末期平均释磷量由 $45.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $22.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但除磷率均稳定, 可见若有足够的好氧时间, 在 $\text{DO} = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时便可将磷高效去除. 还可看出, 在超低溶解氧浓度下 ($\text{DO} = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 除磷率最低为 94.1%, 对比 DO 分别为 1、0.5、0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的各条件, 该工况除磷性能尤为稳定, 说明 EBPR 系统在超低 DO 条件下仍能实现高效除磷, 该结果与王荣昌等的相同^[12], 但与其给出的 DO 为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时系统便发生恶化并最终失效不同, 分析认为, 这与其采用的高磷负荷(进水磷为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、低碳磷比 ($\text{C/P} =$

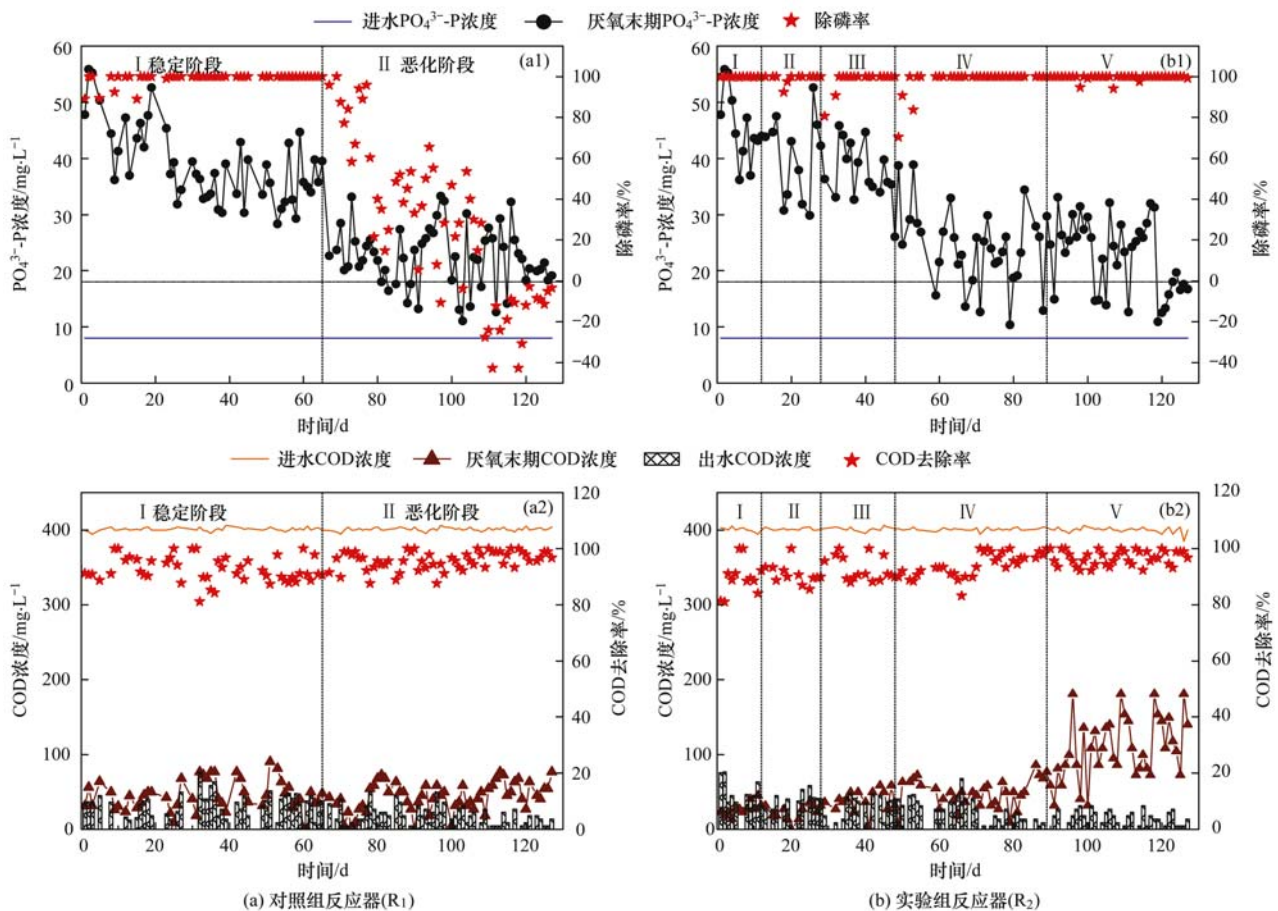


图 2 不同 DO 条件下系统 PO_4^{3-} -P、COD 去除性能

Fig. 2 PO_4^{3-} -P, COD removal performance of system under different DO levels

13) 有关^[10].

由图 2(a2) 与 2(b2) 中可得, R_1 与 R_2 反应器在整个实验阶段(127 d)对 COD 去除率均高于 80.9%, 出水 COD 浓度平均值为 $23.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明不同 DO 浓度对 COD 的去除影响甚微, 类似的研究结论也有报道^[13]. 由图 2(a2) 发现, R_1 反应器厌氧末期 COD 浓度从稳定阶段到恶化阶段未发生明显变化, 但图 2(a2) 中却发现, R_2 反应器厌氧末期 COD 浓度随着 DO 浓度的下降逐渐上升, 由此可得, 不同 DO 浓度下, COD 最终去除影响较小, 但 COD 厌氧阶段的降解速率随 DO 浓度下降而下降.

2.2 不同 DO 条件下 EBPR 系统出水磷浓度达标分析

图 3 为不同 DO 条件下系统的出水 TP 浓度. 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-

2002) 规定一级 A 标准中总磷(以 P 计)排放应 $\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由图 3(a) 可见, 对照组反应器 R_1 在其稳定阶段出水磷的达标率为 92.0%, 该阶段初期系统因刚启动出水有 4 d 未达标; 恶化阶段, R_1 出水总磷均远远大于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明此时聚磷菌在好氧阶段过量吸磷特性大大减弱, 结合 Patel 等^[14] 的研究, 分析认为在长期过曝气状态下, 聚磷菌内 PHB 消耗殆尽, 微生物处于饥饿状态, 吸磷停止, 该工况有 53 d 未达标, 达标率仅为 7.0%. 由图 3(b) 可见, 控制 DO 分别为 2、1、0.5、0.2、0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 5 个工况下, 实验组反应器 R_2 不达标天数仅为 6 d, 达标率为 94.6%. 其中超低 DO 浓度($\text{DO} = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 100% 达标, 除磷效果高效稳定. 说明 EBPR 系统在长期过曝气状态下会逐渐失效, 但在低 DO 条件下可以长期高效稳定运行.

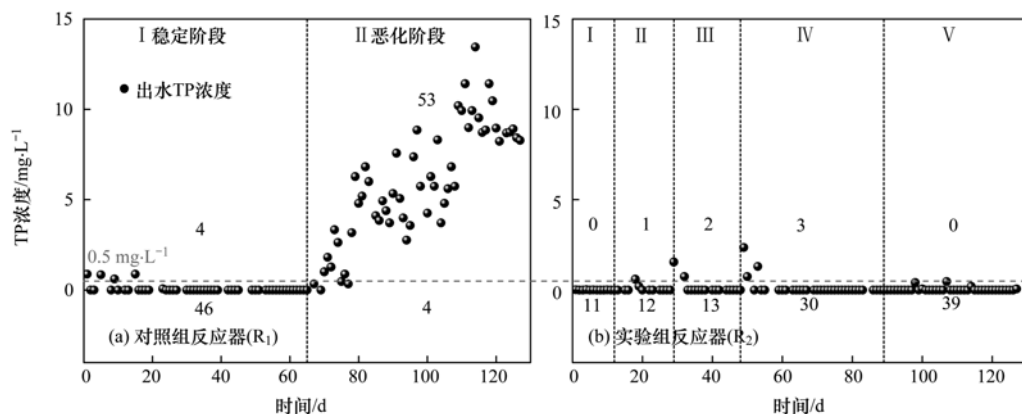


图 3 不同 DO 条件下系统的出水 TP 浓度

Fig. 3 Effluent TP concentration under different DO levels

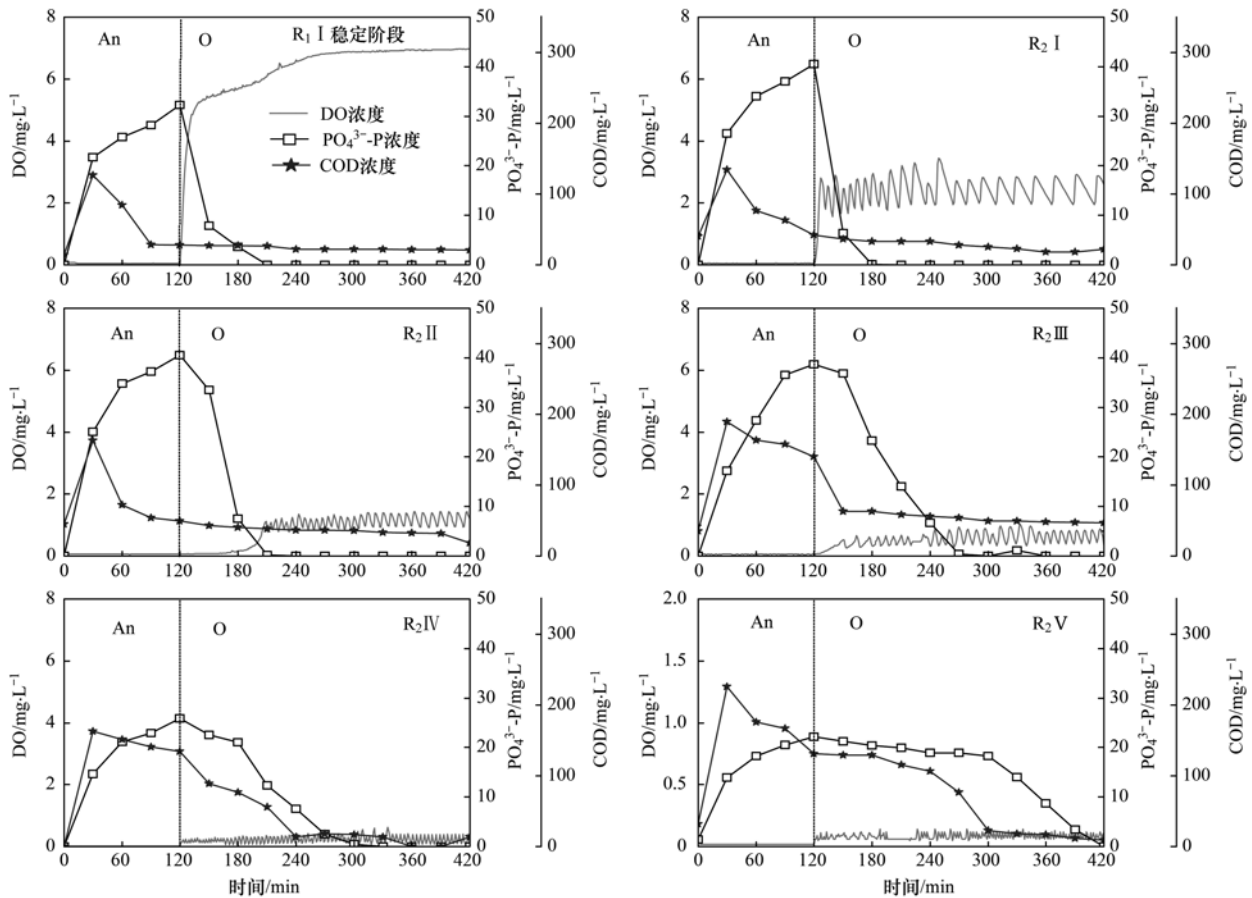
2.3 不同 DO 条件下 EBPR 系统典型周期的污染变化规律

图 4 为不同 DO 条件下典型周期内 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 DO 的浓度变化规律. 从中可知, 稳定阶段的 R_1 系统和 $\text{DO} = 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (阶段 I) 时的 R_2 系统内有机物在厌氧段(2 h)内均消耗完毕. 随着 DO 浓度分别降低至 1、0.5、0.2、0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 降解速率逐渐变慢且厌氧段释磷量呈递减趋势, 对应厌氧末期磷浓度分别为 40.5、40.5、38.7、25.9、22.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 尤其是 $\text{DO} = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的工况下, 厌氧 30 min 时系统内 COD 仍有 $225.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 残留. 分析认为, 降低 DO, 聚磷菌的氧利用率降低, 经过一段时间驯化后其活性随之降低, 进而导致厌氧段释磷速率减小, 而聚磷菌以利用 COD 为底物进行释磷活动, 因此 COD 消耗量逐渐减少, 最终导致释磷量降低.

由图 4 还可以看出, 随着 DO 浓度降低, 对应吸磷时间逐渐延长, R_1 系统稳定阶段和 R_2 系统 I 阶段的吸磷过程可在 60 min 内完成, R_2 系统 II、III、IV、V 阶段的吸磷时间则分别为 90、150、180、270 min, 对应好氧吸磷速率变慢. 此外, 在好氧末期 R_1 系统稳定阶段和 R_2 系统 I 至 V 阶段磷均得以完全去除(出水 $\text{TP} = 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 说明在不同 DO 条件下 EBPR 系统可实现磷的高效去除, 从节约能耗方面考虑, 超低 DO 浓度生物除磷具有可行性.

2.4 不同 DO 条件下 EBPR 系统的吸磷速率

图 5 为不同 DO 条件下 EBPR 系统的比吸磷速率. 其中比吸磷速率为典型周期内每半小时中最大比吸磷速率, 偏差棒为各个工况比吸磷速率的偏差. DO 浓度为 0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其比吸磷速率最不稳定, 这与图 3(b) 中的出水情况吻合; DO 浓度在 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 偏差最小, 比吸磷速率较稳

图4 不同DO条件下典型周期内COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和DO的浓度变化规律Fig. 4 Variations of COD, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and DO concentration during typical cycles under different DO levels

定. 对不同DO条件下的比吸磷速率整理分析, 发现比吸磷速率可能遵循 Monod 方程. 该 Monod 方程用以描述 EBPR 系统好氧条件下的比吸磷速率, 如下式:

$$V = V_{\max} \times \frac{S_0}{K_0 + S_0} \quad (1)$$

式中, K_0 为氧饱和常数, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是比吸磷速率为最大比吸磷速率一半时的 DO 浓度; S_0 为 DO 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为比吸磷速率 (以 VSS 计), $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; $V_{\max}$ 为最大比吸磷速率 (以 VSS 计), $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 其中, $V_{\max}$ 与 K_0 值不能直接确定, 采用参数优化方法计算可得: $V_{\max} = 1.95419 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, $K_0 = 0.24713 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [15, 16]. 与所得 Monod 方程计算数据比较得出, 比吸磷速率基本遵循 Monod 动力模型. 此外, DO 浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下时, 系统的好氧吸磷速率逐渐上升, 尤其是 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下的 DO 对比吸磷速率影响较大; 而 $\text{DO} = 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时比吸磷速率接近最大值, DO 越高对比吸磷速率几乎无影响.

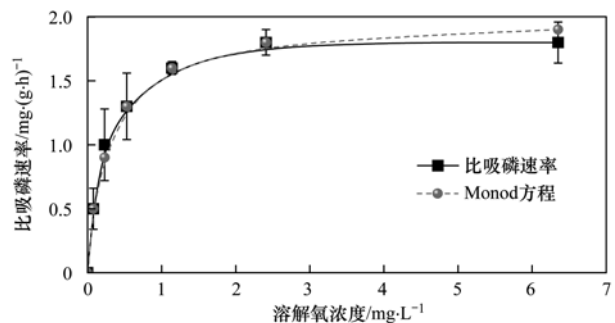


图5 不同DO条件下比吸磷速率

Fig. 5 Specific phosphate uptake rate under different DO levels

2.5 不同DO对系统污泥沉降性能的影响

图6为不同DO条件下EBPR系统污泥沉降性能的影响. 由图6(a)可知, R_1 系统在稳定阶段时SVI较为稳定, SVI平均值为 $70 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; 恶化阶段SVI逐渐降至 $23.4 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 由图6(b)可知, R_2 系统在DO浓度分别为2、1、0.5、0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, SVI基本稳定不变, 平均值为 $61.5 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 污泥沉降性能良好. 当 $\text{DO} = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI持续上升至 $193.9 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 但排水澄清, 污泥发生微膨胀 [17, 18].

污泥沉降性能直接影响工艺稳定高效运行, 当前 50% 污水厂运行受污泥膨胀的制约^[19,20]. 王建芳等^[21]研究发现, 低 DO 浓度 ($0 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和低进水磷浓度 ($2.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 两种因素综合作用会引发非丝状菌膨胀, 另有部分学者研究表明, 低 DO 浓度或低温 (12°C) 单因素条件下会引起丝状菌膨胀^[22,23]. 本研究中, 反应器 R_2 降至超低 DO = $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 发现 R_2 污泥微膨胀, 分析得 R_2 污泥因此而发生丝状菌微膨胀. 本实验证明超低溶解氧工况微膨胀情况下, 既保证反应器低耗运行效果也防止污泥流失, 可实现污水节能处理, 因此超低溶解氧工况具有可行性, 与彭永臻等^[24]提出的低溶解氧污泥

微膨胀节能理论与方法相同.

正常污泥的 f 值应在 $0.5 \sim 0.7$, f 越大即污泥中有机性固体组分比重越大. Lu 等^[25]的研究表明, f 值可表征活性污泥微生物中的含磷量, f 值越大表示微生物含磷量越小. 由图 6(a) 可知, 对照组反应器 R_1 稳定阶段 f 的平均值为 0.66 , 污泥活性较好; 恶化阶段 f 值持续上升, 表明污泥中微生物体内含磷量逐渐降低, 即微生物的聚磷能力在逐渐降低, 进而除磷性能逐渐恶化. 由图 6(b) 可知, 实验组反应器 R_2 在控制 DO 分别为 2 、 1 、 0.5 、 0.2 、 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 5 个工况下, f 平均值为 0.66 且波动较小. 分析结果可知, 逐渐降低 DO 浓度对于污泥活性几乎无影响.

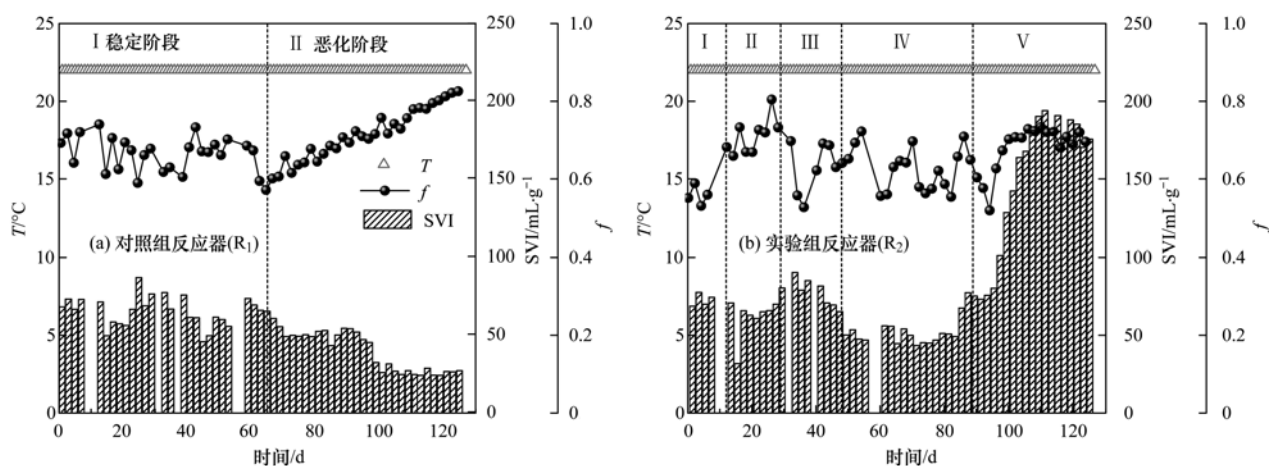


图 6 不同 DO 条件下 EBPR 系统污泥沉降性能的影响

Fig. 6 Sludge sedimentation performance of the EBPR under different DO levels

3 结论

(1) EBPR 系统中, DO 对 COD 去除影响甚微, 但是好氧段 DO 浓度越低, COD 利用速率也随之降低, 从而引起污泥厌氧释磷量下降.

(2) 当 DO = $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 比吸磷速率接近最大值, 之后升高 DO 对比吸磷速率几乎无影响; 而 DO 低于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 尤其是低于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下对比吸磷速率影响较大, 因此, 将 EBPR 系统 DO 控制在 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 可兼顾高效吸磷及避免过量曝气, 为最优工况.

(3) 长期高 DO 浓度会导致 EBPR 系统除磷性能恶化, 而逐渐降低 DO 浓度不影响系统的稳定除磷, 即使降至超低 DO 浓度 ($0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 引发污泥微膨胀, 出水总磷仍能 100% 达到一级 A 排放标准, 因此, 微好氧条件下的 EBPR 系统节能除磷具有可行性.

参考文献:

[1] 陈利德, 王偲. 浅议污水厂的磷回收[J]. 环境工程,

2004, 22(4): 26-27.

- [2] Doyle J D, Parsons S A. Struvite formation, control and recovery [J]. Water Research, 2002, 36(16): 3925-3940.
- [3] 赵永宏, 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]. 环境科学技术, 2010, 33(3): 92-98.
- [4] Zhang Z J, Li H, Zhu J, et al. Improvement strategy on enhanced biological phosphorus removal for municipal wastewater treatment plants: full-scale operating parameters, sludge activities, and microbial features [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(7): 4646-4653.
- [5] Mulkerrins D, Dobson A D W, Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters [J]. Environment International, 2004, 30(2): 249-259.
- [6] 向沙, 陈洪波, 李晓明, 等. 溶解氧对好氧/延长闲置 SBR 除磷性能的影响 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1019-1025.
- [7] Chen H B, Wang D B, Li X M, et al. Effect of dissolved oxygen on biological phosphorus removal induced by aerobic/extended-idle regime [J]. Biochemical Engineering Journal, 2014, 90: 27-35.
- [8] 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.

- [9] 陈滢, 彭永臻, 杨向平, 等. 低溶解氧 SBR 除磷工艺研究[J]. 中国给水排水, 2004, **20**(8): 40-42.
- [10] 马娟, 李璐, 俞小军, 等. 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[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 597-603.
- [11] 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.
- [12] 王荣昌, 司书鹏, 郑翔, 等. 溶解氧浓度对连续流活性污泥工艺反硝化除磷的影响[J]. 化工学报, 2011, **62**(6): 1708-1715.
- [13] 陈燕, 刘国华, 范强, 等. 不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2610-2616.
- [14] Patel J, Nakhla G. Interaction of denitrification and P removal in anoxic P removal systems[J]. Desalination, 2006, **201**(1-3): 82-99.
- [15] 高春娣, 王淑莹, 彭永臻, 等. DO 对有机物降解速率及污泥沉降性能的影响[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(5): 12-15.
- [16] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z G. Free nitrous acid inhibition on anoxic phosphorus uptake and denitrification by poly-phosphate accumulating organisms[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2007, **98**(4): 903-912.
- [17] 左金龙, 王淑莹, 彭永臻, 等. 低溶解氧污泥微膨胀污染物去除性能的研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(8): 1345-1349.
- [18] 王中玮, 彭永臻, 王淑莹, 等. 不同运行方式下低溶解氧污泥微膨胀的可行性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2347-2352.
- [19] 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 等. 低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1070-1074.
- [20] Novák L, Larrea L, Wanner J, *et al.* Non-filamentous activated sludge bulking caused by *Zoogloea* [J]. Water Science and Technology, 1994, **29**(7): 301-304.
- [21] 王建芳, 赵庆良, 林估侃, 等. 低溶解氧和磷缺乏引发的非丝状菌污泥膨胀及控制[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 545-550.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 彭永臻, 郭建华, 王淑莹, 等. 低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法的发现、提出及理论基础[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3342-3347.
- [25] 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.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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