

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO₂ 污染特征 王英, 李令军, 刘阳 (3685)

2008~2011年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析 杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)

沧州市大气污染特征观测研究 王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)

华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)

广州市交通主干道空气中苯系物的测量 叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)

基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究 黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)

柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性 胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)

九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征 余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)

南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价 舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)

天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究 李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)

北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)

云阳宗海湖的分布与来源 张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)

南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究 孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)

三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)

江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究 单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)

人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果 汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)

潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响 魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)

人工湿地处理含盐生活污水的特性研究 高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)

催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚 刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)

ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究 孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)

微波改性 MWNTs/TiO₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究 施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)

腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究 丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)

臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究 邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)

复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究 徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)

进水比例对水解反应器出水水质的影响研究 梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究 韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)

我国城市污水处理回用调查研究 郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)

快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征 姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)

黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探 马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)

半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应 卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)

广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素 孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)

酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究 王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)

淋洗条件下砂土和粉土水盐运移过程的监测研究 付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)

空气注射修复苯污染地下水模拟研究 樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)

不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性 张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)

上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应 陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)

耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究 吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)

高效降酚菌株 *Ochrobactrum* sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究 陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)

四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究 钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)

长期施用有机和无机肥对黑土 *nirS* 型反硝化菌种群结构和丰度的影响 尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)

三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究 何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)

多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因子研究 肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)

硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响 刘敬勇, 孙水裕 (3990)

关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究 纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)

第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文

稻田气溶胶 NH₃ 和气体 NO_x 排放在线测定研究 龚巍巍, 栾胜基 (4006)

一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制 文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)

基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究 孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)

涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别 丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)

人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析 曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)

基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌 林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)

消毒副产物生成的温度影响和动力学模型 张小璐, 杨宏伟, 王小任, 付静, 解跃峰 (4046)

一种厌氧微定量研究新方法 张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)

梧桐树叶作为反硝化碳源的研究 熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)

降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究 崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)

《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)

复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究

徐少娟, 孙培德*, 郑雄柳, 董毅

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012)

摘要: 以成熟除磷颗粒污泥为基础, 基于获得的最佳混合碳源配比, 通过正交试验研究了复合底物 $[m(C)/m(N)/m(P)]$ 对颗粒化 EBPR 系统稳定过程除磷特性的影响. 结果表明, R2 $[m(C)/m(N)/m(P) = 400:10:5]$ 、R3 $[m(C)/m(N)/m(P) = 600:10:10]$ 、R5 $[m(C)/m(N)/m(P) = 400:20:15]$ 系统发生了丝状菌颗粒污泥膨胀; R6 $[m(C)/m(N)/m(P) = 600:20:5]$ 系统因出现大量颗粒碎片导致沉降性能变差, 待颗粒碎片排出系统后恢复正常. R3、R8 $[m(C)/m(N)/m(P) = 400:30:10]$ 、R9 $[m(C)/m(N)/m(P) = 600:30:15]$ 系统的颗粒粒径从初始的 0.8 mm 逐渐下降至 0.3 mm, 其余系统则与初始相差不多. R1 $[m(C)/m(N)/m(P) = 200:10:15]$ 、R4 $[m(C)/m(N)/m(P) = 200:20:10]$ 和 R7 $[m(C)/m(N)/m(P) = 200:30:5]$ 系统在厌氧段消耗了 95% 的 COD, 释磷/吸磷速率分别在 $60 \sim 100 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $40 \sim 60 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 的范围内波动, 且相对稳定, 但其余系统的 COD 由主要在厌氧段消耗逐渐变为在好氧段消耗, 释磷/吸磷速率亦逐渐下降, 甚至有系统下降至 $0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. R1 ~ R9 系统的磷酸盐平均去除率分别是 83.5%、52.8%、7.1%、96.7%、19.7%、72.2%、79.7%、28.1% 和 48.7%. 对正交试验结果应用方差分析, 获得适合颗粒化 EBPR 系统稳定运行的最佳复合底物条件是 $m(C)/m(N)/m(P) = 200:20:15$.

关键词: 复合底物; EBPR; 颗粒污泥; 除磷特性; 正交分析

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3859-09

Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment

XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, DONG Yi

(School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Based on the mature granular sludge, effects of composite substrates $[m(C)/m(N)/m(P)]$ on the process of phosphorus removal in granule-based EBPR system was conducted by the optimal mixed-carbon sources ratio. Results showed that it was observed with the expanded filamentous bulking to granular sludge in the system of R2 $[m(C)/m(N)/m(P) = 400:10:5]$, R3 $[m(C)/m(N)/m(P) = 600:10:10]$ and R5 $[m(C)/m(N)/m(P) = 400:20:15]$. The presence of large amount of granular fragments led to the poor performance of R6 $[m(C)/m(N)/m(P) = 600:20:5]$, and it returned back after the particulate debris was removed off the system. The particle size of R3, R8 $[m(C)/m(N)/m(P) = 400:30:10]$ and R9 $[m(C)/m(N)/m(P) = 600:30:15]$ gradually decreased from 0.8 mm to 0.3 mm, and other systems were similar to the initial size. More than 95 percent of the COD was consumed in the anaerobic stage in R1 $[m(C)/m(N)/m(P) = 200:10:15]$, R4 $[m(C)/m(N)/m(P) = 200:20:10]$ and R7 $[m(C)/m(N)/m(P) = 200:30:5]$, and the phosphorus release/uptake rates fluctuated within the range of $60 \sim 100 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ and $40 \sim 60 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. However, the COD consumption was mainly occurred in aerobic stage in other systems, and the phosphorus release/uptake rates gradually declined, even decreased to $0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. Phosphate removal rate of each system was (from R1 system to R9 system) 83.5%, 52.8%, 7.1%, 96.7%, 19.7%, 72.2%, 79.7%, 28.1% and 48.7%, respectively. Finally, we also found that the optimal composite substrate condition for the granule-based EBPR system was the ratio of the $m(C)/m(N)/m(P) = 200:20:15$.

Key words: composite substrate; EBPR; granular-based sludge; phosphorus removal; orthogonal array

颗粒化强化生物除磷技术是污泥颗粒化技术和强化生物除磷 (enhanced biological phosphorus removal, EBPR) 技术的结合, 该技术既可以克服传统 EBPR 技术存在的如污泥容易膨胀、二次放磷和剩余污泥量大等缺点^[1], 又具有较强的脱氮除磷能力^[2-4]、较高的容积负荷^[5]和抵抗有毒有害物质的能力^[6,7]. 这是一种比较经济、环境友好和稳定运行

条件比较容易控制的技术, 可以很好地应对国家环保部门对污水总磷排放执行的严格标准. 近年来, 颗粒化 EBPR 技术的优点得到众多研究者的认同^[8-10], 开

收稿日期: 2012-01-04; 修订日期: 2012-03-27

基金项目: 浙江省重大科技专项 (2010C03003, 2011C13014)

作者简介: 徐少娟 (1986 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理与优化控制技术, E-mail: shaojuanxu@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: pdsun@126.com

展了一系列相关研究,并取得了一定的成果.

竺建荣等^[11]首次报道了以厌氧/好氧交替运行工艺成功培养出好氧颗粒污泥,颗粒粒径为 0.5 ~ 1.5 mm; Lin 等^[12]在 SBR 内采用不同的 $m(P)/m(COD)$ 比(1/100 ~ 10/100)培养出了除磷颗粒污泥,发现粒径大小随 $m(P)/m(COD)$ 的升高而降低,而颗粒结构则变得更加紧凑和密集;由阳等^[13]经 2 个月的培养获得了聚磷菌 (phosphate accumulating organisms, PAOs) 占总菌量 70% 左右的好氧颗粒污泥,对磷和 COD 去除率可分别达 100% 和 95% 以上; Wu 等^[14]对“颗粒化 EBPR 系统”进行了研究,发现成熟颗粒具有良好的微孔结构,小颗粒比大颗粒具有更高的比表面积,孔宽度和除磷活性; Winkler 等^[15]发现低温 (24℃) 较适合除磷颗粒污泥中 PAOs 的生长,而较高温度 (30℃) 则适合聚糖菌 (glycogen accumulating organisms, GAOs) 的生长; Graciela 等^[16]发现丙酸比乙酸更适合除磷颗粒污泥的长期培养. 但上述大部分研究是基于单一碳源的除磷颗粒污泥的形成过程,而在实际运行的 EBPR 工艺中,复杂的底物大部分会通过水解作用转化成乙酸或丙酸,并形成以乙酸和丙酸为主的混合碳源^[17]. 已有研究对由乙酸和丙酸组成的系列混合碳源对除磷颗粒污泥的形成及作用机制进行了系统地分析研究,获得了最佳混合碳源配比^[18]. 但到目

前为止,尚未见不同复合底物 [$m(C)/m(N)/m(P)$] 条件对颗粒化 EBPR 系统除磷特性影响的研究报道,尤其是针对系统的稳定过程.

因此,本研究以成熟的除磷颗粒污泥为接种污泥,基于获得的最佳混合碳源配比 [$n(\text{乙酸})/n(\text{丙酸}) = 1:3$], 并结合我国城镇污水低碳高氮磷的特点,采用小试规模的 SBR 进行正交试验,旨在探明不同复合底物条件对颗粒化 EBPR 系统稳定过程除磷特性的影响机制,以期得到适合颗粒化 EBPR 系统稳定运行的最佳复合底物条件,进而推动颗粒化 EBPR 系统工程化.

1 材料与方 法

1.1 试验设置和运行工况

试验所用 SBR 反应器由有机玻璃制成,有效容积为 10 L. 接种的成熟除磷颗粒污泥已在最佳混合碳源配比条件下培养 90 d. 各 SBR 反应器每天运行 4 个周期,每周周期 6 h,其中进水 5 min,厌氧搅拌 2.5 h,好氧曝气 3 h,沉淀 5 min,排水 5 min 和静置 15 min. 每周期进水 2.5 L,相应 HRT 为 24 h,系统污泥浓度控制在 $2\ 500\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,相应 SRT 为 7 d. 运行水温为 $(20 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$, pH 值为 7.5 ~ 8.0,好氧段 DO 为 $6 \sim 7\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 试验所用正交因素水平设计表如表 1 所示.

表 1 正交试验因素水平设计表 $L_9(3^4)$

Table 1 Orthogonal array of factors and levels $L_9(3^4)$

水平	因素			空白列
	A 碳源浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	B 氮源浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	C 磷源浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
1	200	10	5	
2	400	20	10	
3	600	30	15	

1.2 试验用水

试验用水采用人工配水. 各 SBR 反应器每周周期 2.5 L 进水中除加入不同量的碳源、氮源和磷源外,还需加入 150 mL A 液和 4 mL 微量元素液(表 2)满足微生物生长所需.

1.3 常规水质测试方法

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MLSS 等测定方法参考文献^[19],水样经定性滤纸过滤后测定. DO 和 pH 采用上海 JPBj-608 便携式 DO 测定仪和 PHBJ-260 便携式 pH 测定仪在线监测.

1.4 颗粒污泥粒径测定方法

试验过程中每隔 7 ~ 10 d 采集各系统中的活性污泥样品,采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定颗粒粒径.

表 2 试验人工配水组成/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Composition of synthetic wastewater/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

A 液		微量元素液	
ATU (硝化抑制剂)	0.008	$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.500
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.200	H_3BO_3	0.150
$\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.529	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.030
蛋白胨	0.010	KI	0.180
酵母浸出粉	0.010	$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.120
		$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.060
		$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.120
		$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.150
		EDTA	10.000

2 结果与讨论

2.1 复合底物对颗粒化 EBPR 系统沉降性能的影响 复合底物对颗粒化 EBPR 系统稳定过程除磷特

性试验总共运行了 40 d 左右,各系统 SVI 值随时间的变化如图 1 所示. 从中可知,R2、R3 和 R5 系统 SVI 最大值均超过 $200 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,发生了颗粒污泥膨胀. 经镜检,确定为由丝状菌大量生长引起的丝状菌污泥膨胀. 这可能是由较高的进水碳源浓度和不匹配的碳氮磷比例造成的. 从图 1 亦可知,R6 系统在运行的第 2 d 开始 SVI 逐渐上升至 $193 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,系统中出现大量颗粒污泥碎片影响了沉降性能,待颗粒碎片排出系统后,SVI 逐渐下降至 $60 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. R6 系统大量颗粒污泥碎片的出现,可能与系统进水碳源浓度过高而 N、P 浓度偏低有关,不匹配的碳氮磷比例破坏了正常颗粒污泥的结构. 其余系统的 SVI 相对较稳定.

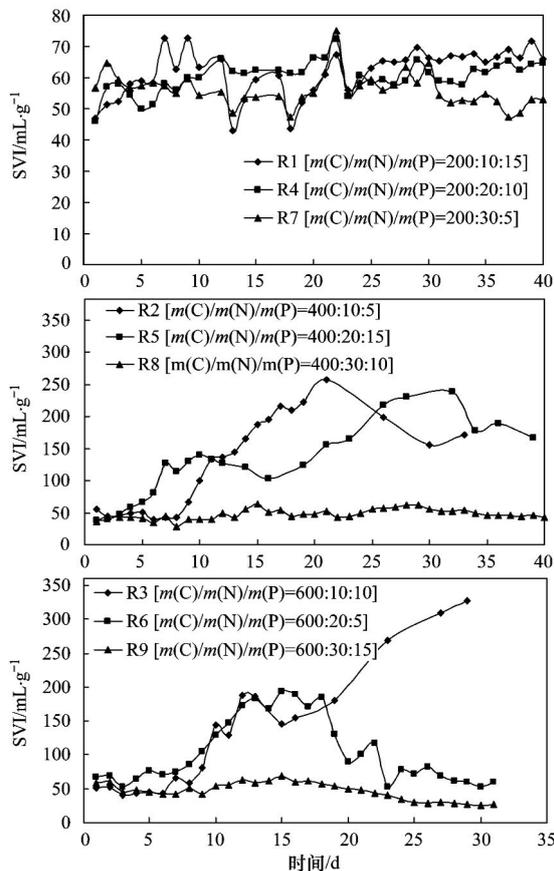


图 1 不同复合底物条件下各系统污泥 SVI 变化

Fig. 1 SVI profiles of sludge under different composite substrates

2.2 复合底物对颗粒化 EBPR 系统颗粒粒径的影响

试验初始,各系统接种相同的颗粒污泥,其颗粒粒径相同. 随试验的运行,不同复合底物条件培养的颗粒污泥粒径呈现不同的变化,如图 2 所示. 从中可知,接种污泥体积平均颗粒粒径为 0.8 mm ,比普通的好氧颗粒污泥要小^[20],而小颗粒具有良好的微孔特性^[14].

经不同复合底物条件处理后,各系统的颗粒粒径均有不同程度的下降,尤其是 R3、R8 和 R9 系统,在试验末期颗粒粒径下降至 0.3 mm 左右. 这可能是在较高负荷条件下运行,颗粒变得致密,从而使得体积平均颗粒粒径逐渐变小. R6 系统颗粒粒径下降是由于系统在高负荷运行下颗粒污泥发生了破碎,大量碎片的存在影响了体积平均颗粒粒径的测定,待大量的颗粒碎片排出系统后,体积平均颗粒粒径有所上升,于试验末期稳定. 进一步观察图 2 可知,高进水碳源浓度 ($600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下的颗粒粒径均在试验初期开始下降,且下降的速率随氮源负荷的增加而增加.

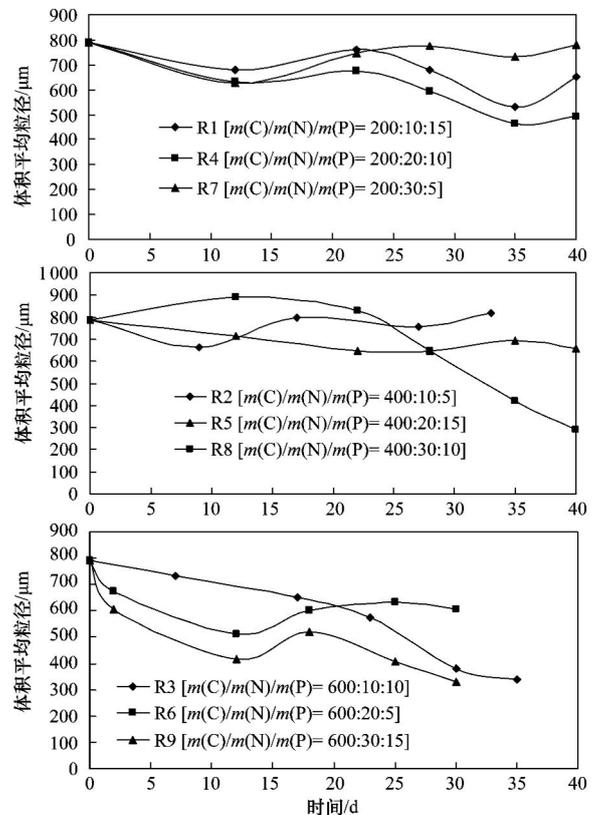


图 2 不同复合底物处理条件下颗粒粒径变化情况

Fig. 2 Situation for particle size changes under different composite substrates

不同复合底物试验条件下各系统末期颗粒粒径的分布范围见表 3,各系统颗粒粒径分布基本上符合正态分布,与以往的研究一致^[21,22]. 由表 3 可得,各系统颗粒粒径处于 $0.7 \sim 1.6 \text{ mm}$ 范围内,比传统的好氧颗粒污泥小^[23].

2.3 复合底物对颗粒化 EBPR 系统污泥形态结构的影响

试验初期,各反应器接种相同的成熟除磷颗粒污泥,形态如图 3 所示. 本试验接种的成熟颗粒污

泥为浅黄色,颗粒细小如砂砾,表面光滑,结构致密,形态基本为椭球形。

表 3 不同复合底物处理条件下各 SBR 系统末期颗粒粒径分布范围¹⁾

Table 3 Granular size distribution range of different SBR systems at the end of processing

SBR	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
$d(0.1)$	115.126	106.139	69.875	93.117	56.899	152.593	179.778	21.108	44.112
$d(0.5)$	556.144	834.246	243.367	365.595	581.192	513.308	738.028	172.215	309.826
$d(0.9)$	1351.512	1525.349	745.621	1116.562	1432.1	1205.262	1394.687	713.737	649.473

1) $d(0.1)$ 、 $d(0.5)$ 及 $d(0.9)$ 分别表示该颗粒粒径大小占颗粒总体的10%、50%及90%

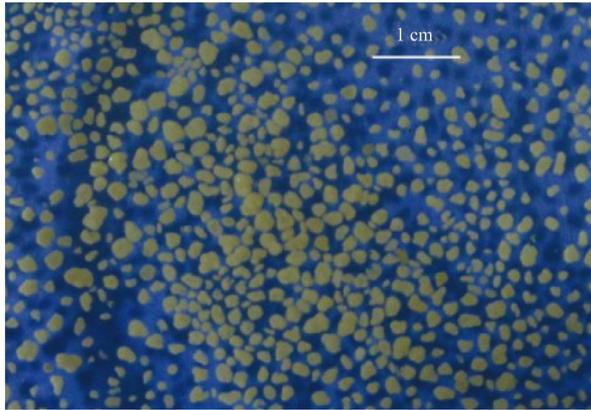


图 3 各 SBR 反应器接种的成熟颗粒污泥

Fig. 3 Mature granular sludge inoculated at the SBR reactors

经过不同的复合底物条件处理后,各系统的颗粒形态结构均发生了明显的变化,处理末期颗粒形态结构如图 4 所示(光学显微镜, CX31, Olympus)。由 2.1 节所述, R2、R3 和 R5 系统在处理过程中发生了丝状菌颗粒污泥膨胀,从图 4 亦可知, R2、R3、R5 系统颗粒污泥的表面生长了大量的丝状菌。其它系统的颗粒污泥表面则相对比较光滑,尤其是 R8 系统,颗粒表面非常光滑,且系统中颗粒碎片很少,为系统颗粒污泥良好的沉降性能提供了条件。类似地,可以观察到 R6 系统中有大量颗粒碎片,颗粒污泥有少部分解体。

2.4 复合底物对颗粒化 EBPR 系统磷酸盐去除率的影响

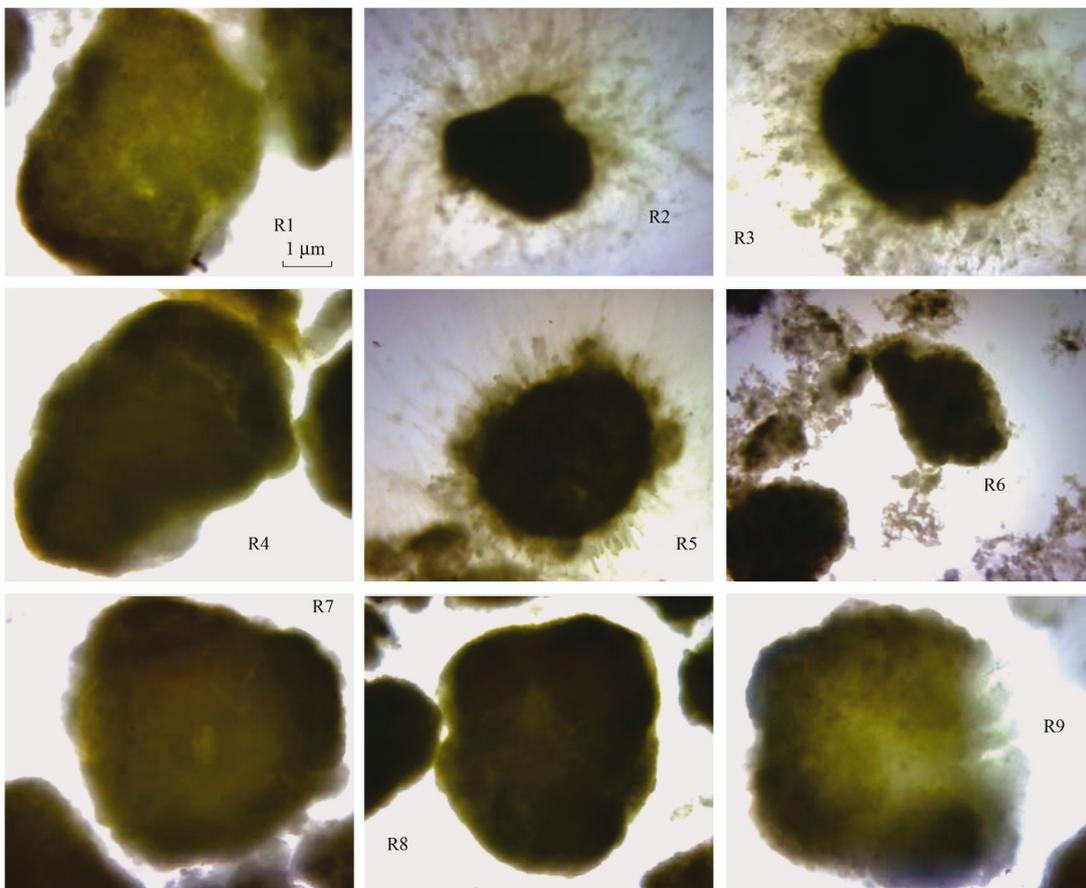


图 4 各 SBR 反应器处理末期颗粒污泥形态结构(×40)

Fig. 4 Granular sludge morphology at the end of SBR reactors (×40)

不同复合底物条件下处理的各个 SBR 系统磷酸盐去除率情况如图 5 所示. 从中可得, 经过不同复合底物处理后, 各系统的磷酸盐去除率均产生了显著性的差异. R1 和 R7 系统在试验初期均有良好的除磷能力, 期间除磷效果有波动, 但在试验末期有

逐渐恢复的趋势. R2、R6、R8 和 R9 系统经历 1~2 d 的适应期后有良好的除磷效果, 但随系统的运行, 除磷效果均逐渐恶化, 试验末期几乎没有除磷能力. R3 系统在整个运行过程中除磷效果很差, R4 系统则能一直维持较高的除磷能力.

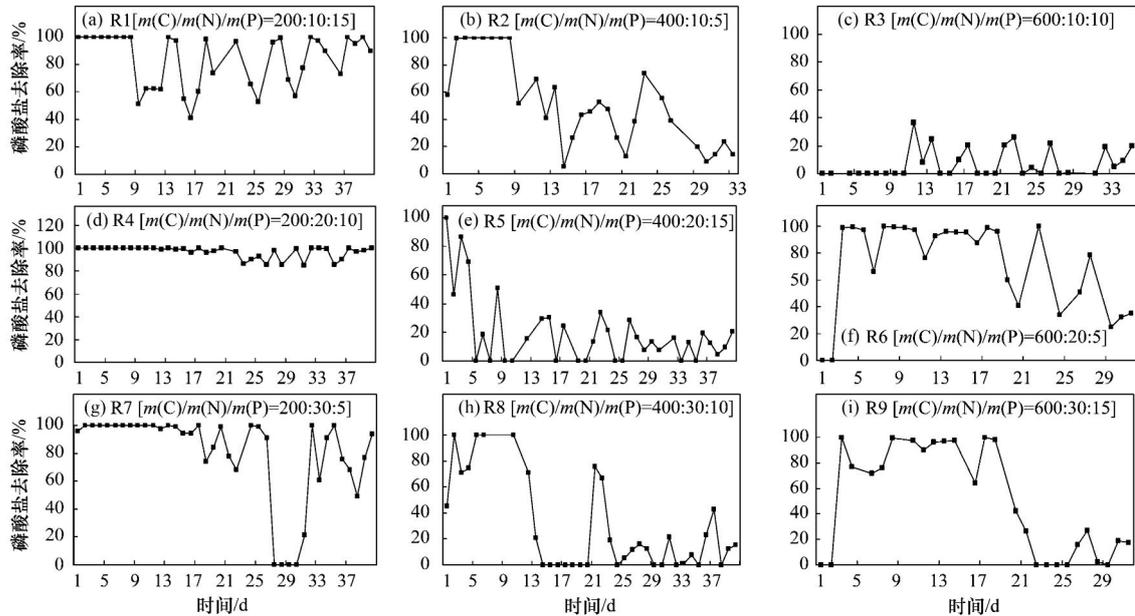


图 5 不同复合底物条件处理下各系统磷酸盐去除率

Fig. 5 Phosphate removal of every system under different composite substrates

由 2.1 节可知, R2、R3 和 R5 系统因较高的进水碳源浓度和不匹配的碳氮磷比例发生了丝状菌颗粒污泥膨胀, 对系统的除磷能力造成影响, 其中 R3 系统最严重. R6 系统经历 2 d 的适应期后, 磷酸盐去除率恢复正常, 但从第 19 d 开始呈波动下降趋势. 这是因为系统进水磷酸盐浓度只有 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在第 3~19 d 期间, 系统中大量颗粒碎片吸附了一定量的可溶性磷酸盐, 使得出水的磷酸盐含量很低, 表现出良好的磷酸盐去除情况. 第 19 d 之后, 系统中大量的颗粒碎片随出水排出, 磷酸盐去除率也逐渐下降. R8 和 R9 系统在试验中后期均出现系统除磷恶化, 这一方面可能是系统中高进水氨氮含量仅有部分能被微生物利用, 高氨氮残留量影响了微生物活性, 另一方面可能是较高的进水碳源浓度对系统磷酸盐的去除率产生一定的影响. 最终, R1~R9 系统磷酸盐平均去除率分别为 83.5%、52.8%、7.1%、96.7%、19.7%、72.2%、79.7%、28.1% 和 48.7%.

2.5 复合底物对颗粒化 EBPR 系统磷酸盐释放速率和吸收速率的影响

不同复合底物处理条件下各系统的厌氧释磷速

率/好氧吸磷速率变化情况如图 6 所示. 由图可知, R1、R4、R7 系统的厌氧释磷速率和好氧吸磷速率较稳定. 其余较高进水碳源浓度的系统, 初始的释磷/吸磷速率很大 [释磷速率最大值达 $180 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 吸磷速率最大值达 $135 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$], 但随系统的运行, 释磷/吸磷速率均逐渐减小. 试验末期, 除 R8 系统外其余系统的释磷/吸磷速率均接近 $0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$.

上述系统的释磷/吸磷速率在整个运行过程中呈现逐渐下降的趋势, 一方面是由于较高负荷条件下的 PAOs 在厌氧段不能完全消耗掉 COD, 势必会有残余的 COD 留到好氧段, 给其它异养菌的大量生长提供了机会, 且其它异养菌的生长速率大于 PAOs 的生长速率, 而系统控制污泥浓度在 $2500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 每天会排出大量的剩余污泥, 但系统中 PAOs 的含量有限, 这样会使大量 PAOs 排出系统外, 使得系统中占优势地位的 PAOs 逐渐被其他异养菌替代; 另一方面可能是由于功能微生物的减少, 厌氧段由释磷引起的能量合成量减少, 在好氧段没有足够的能量用于吸磷, 使得系统中功能微生物体内的多聚磷酸盐含量逐渐减少, 从而导致系统的磷释放/

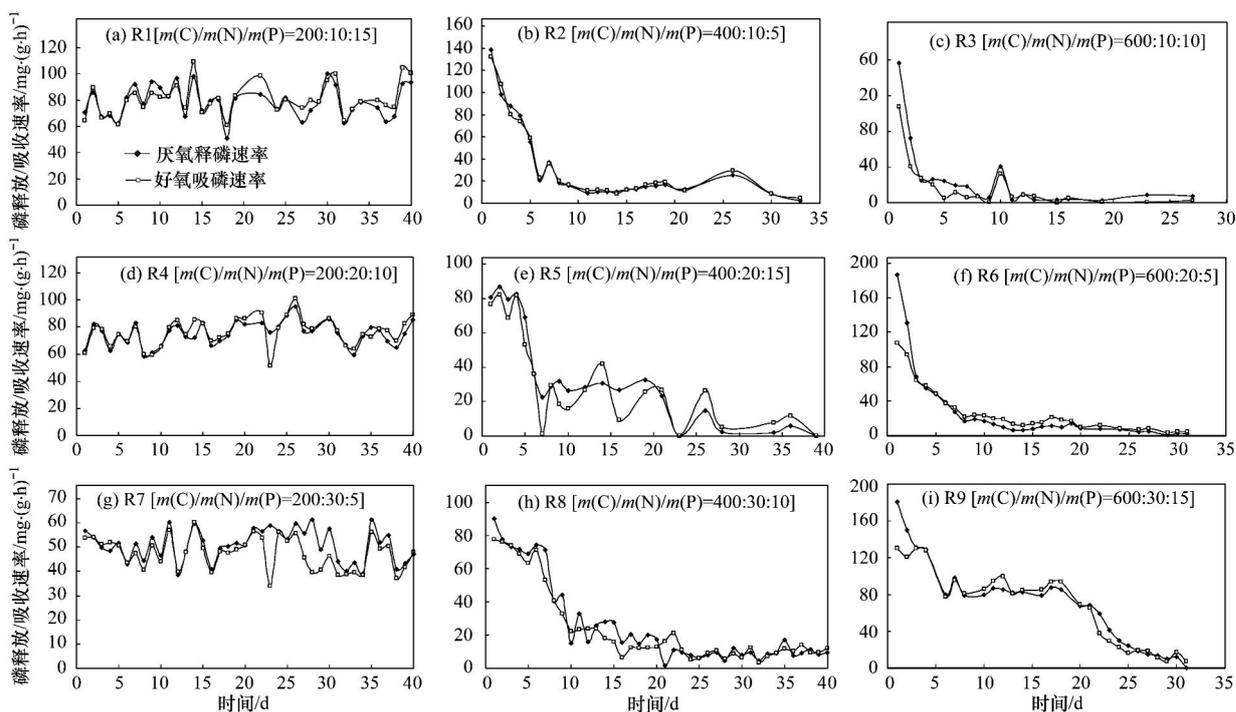


图6 各SBR反应器磷释放/吸收速率

Fig. 6 Phosphorus release/uptake rate of every SBR system

吸收速率逐渐下降。

2.6 复合底物对颗粒化EBPR系统氨氮去除的影响

不同复合底物处理的各系统氨氮去除率如图7所示。由图可知,R1、R2、R3系统因进水氨氮浓度较低($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)使得其在整个运行过程中均保持

较强的氨氮去除能力。R4、R7系统在运行初期氨氮去除率比较低,经过一段时间适应后均能有较高的氨氮去除率。R5、R8、R9系统的氨氮去除率在整个运行过程中均处于无规则的波动状态,总体去除率较低,周期末系统中氨氮残留量比较高。

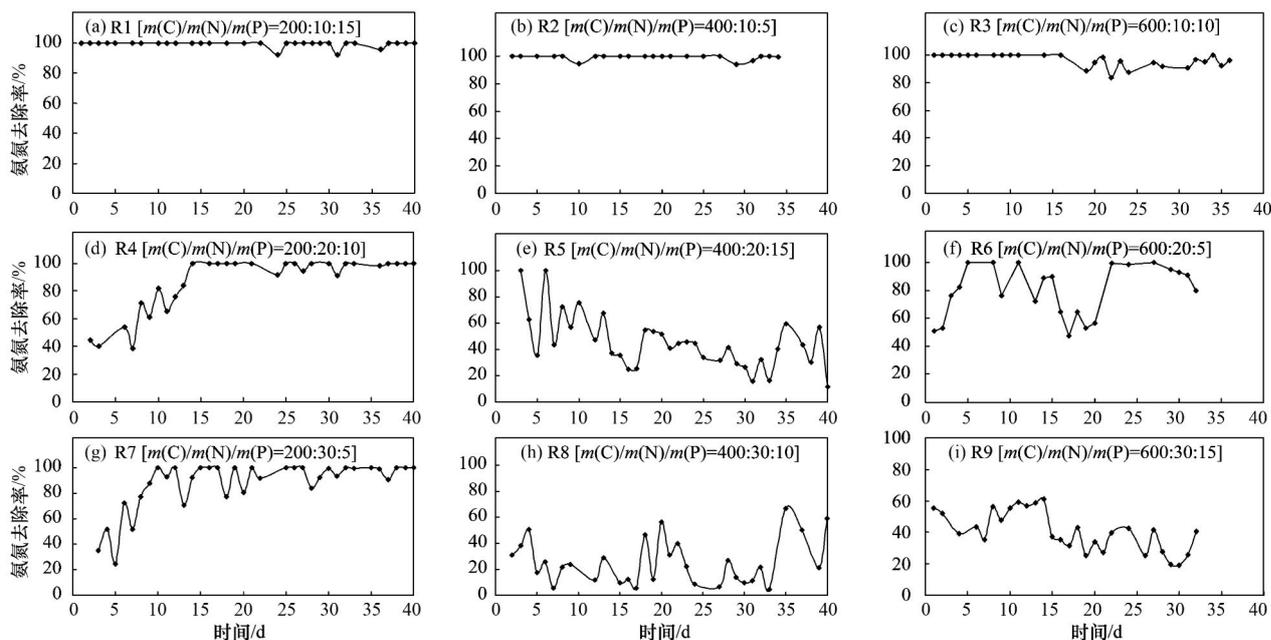


图7 各SBR反应器氨氮去除率

Fig. 7 Ammonia removal efficiency of SBR reactors

2.7 复合底物对颗粒化 EBPR 系统 COD 去除率的影响

不同复合底物处理条件下各系统 COD 去除率以及厌氧段 COD 消耗量占总消耗量的质量分数如图 8 所示. 从中可知, 各系统均具有较高的 COD 去

除能力. R1、R4、R7 系统 COD 主要在厌氧段消耗, 这与典型的 EBPR 系统工艺特征相符^[24,25], EBPR 系统中主要功能菌种为 PAOs 和 GAOs, 均主要在厌氧段利用碳源合成 PHA, 储存在体内作为好氧段的能源物质.

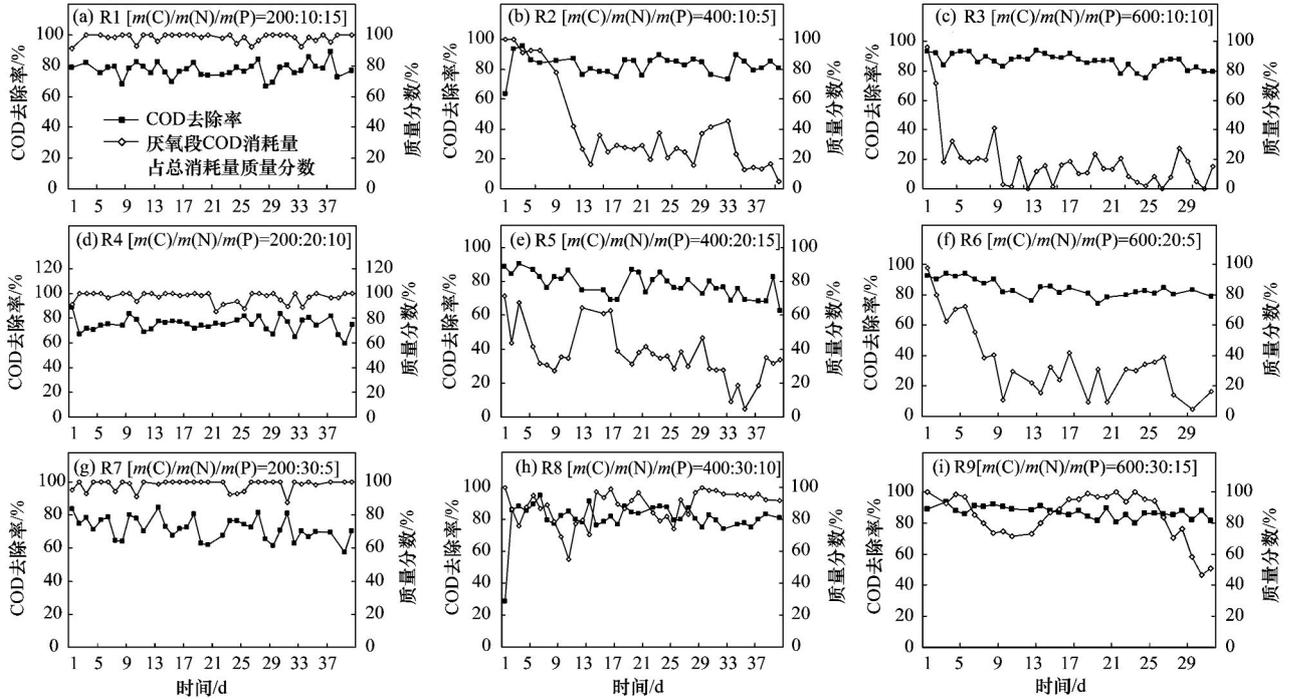


图 8 各 SBR 系统 COD 去除率及厌氧段 COD 消耗量占总消耗量质量分数
Fig. 8 COD removal efficiency of SBR systems and the anaerobic COD consumption percentage of total consumption

R2、R3、R5、R6 系统 COD 由主要在厌氧段消耗变为在好氧段, 说明此时系统中存在其他异养菌消耗剩余的 COD, 试验初始占优势的 PAOs 逐渐被其他异养菌取代, 进而影响系统的除磷能力, 严重的甚至造成 EBPR 系统崩溃. 这与 2.5 节分析结果一致.

R8 系统大部分 COD 在厌氧段消耗, 表明系统中其他异养菌的量相对较少. 结合 2.6 节分析可知, 这可能是系统高氨氮残留量不仅影响了功能菌

的生长还影响了其他异养菌的生长. R9 系统的 COD 于试验末期逐渐变为在好氧段消耗, 表明此时系统中功能菌种逐渐被其他异养菌所替代, 高氨氮残留量影响了系统功能菌的活性, 但对其他异养菌的影响较小.

3 复合底物对颗粒化 EBPR 系统影响的正交分析

3.1 正交试验结果

上述正交试验获得的结果如表 4 所示.

表 4 正交试验结果¹⁾
Table 4 Orthogonal test results

试验号	A	B	C	R(P)/%	R(N)/%	R(COD _总)/%	R(COD _厌)/%
R1	1(200)	1(10)	3(15)	83.5	99.4	77.4	98.2
R2	2(400)	1	1(5)	52.8	98.4	82.8	34.6
R3	3(600)	1	2(10)	7.1	96.4	86.4	17.6
R4	1	2(20)	2	96.7	86.4	74.9	97.1
R5	2	2	3	19.7	45.5	78.0	40.8
R6	3	2	1	72.2	79.7	83.6	34.4
R7	1	3(30)	1	79.7	87.5	72.0	98.2
R8	2	3	2	28.1	25.6	80.9	87.9
R9	3	3	3	48.7	40.7	86.9	84.6

1) R(P) 表示磷酸盐去除率; R(N) 表示氨氮去除率; R(COD_总) 表示总 COD 去除率; R(COD_厌) 表示厌氧段 COD 消耗量占总消耗量的质量分数, 下同

3.2 方差分析

采用方差分析方法来分析正交试验结果. 方差分析的正交试验结果如表 5 所示.

本试验考察的宏观指标有 4 个, 在此以 $R(P)$

为例作方差分析, 结果如表 6 所示.

由表 6 可得, 对 $R(P)$ 来说, 3 个因子的主次顺序为 $A > C > B$. 对 A、B、C 这 3 个因子进行多重比较, 结果如表 7 所示.

表 5 方差分析的正交试验结果

Table 5 Variance test results of orthogonal analysis

比较项目		A	B	C	空列	T 值
$R(P)/\%$	K1j	259.9	143.4	204.7	198.2	488.5
	K2j	100.6	188.6	131.9	183.8	
	K3j	128	156.5	151.9	106.5	
$R(N)/\%$	K1j	273.3	294.2	265.6	225.5	659.6
	K2j	169.5	211.6	208.4	204.7	
	K3j	216.8	153.8	185.6	229.4	
$R(\text{COD}_{\text{总}})/\%$	K1j	224.3	246.6	238.4	244.6	722.9
	K2j	241.7	236.5	242.2	241.9	
	K3j	256.9	239.8	242.3	236.4	
$R(\text{COD}_{\text{灰}})/\%$	K1j	293.5	150.4	167.2	216.3	593.4
	K2j	163.3	172.3	202.6	220.5	
	K3j	136.6	270.7	223.6	156.6	

表 6 方差分析表

Table 6 Results of variance analysis

变异来源	SS(平方和)	V(自由度)	MS(均方)	F 值
A	4 836.1	2	2 418.05	2.983
B	360.57	2	180.29	0.222
C	943.08	2	471.54	0.582
误差 e	1 621.29	2	810.65	

表 7 各因子各水平均值多重比较

Table 7 Multiple comparisons of each factor and level

因子	A1	A3	A2	B2	B3	B1	C1	C3	C2
X_i	86.6	42.7	33.5	62.9	52.2	47.8	68.2	50.6	44.0

多重比较最优水平组合为 A1B2C1, 用同样的分析方法可得. 对 $R(N)$ 而言, 最优水平组合为 A1B1C1; 对 $R(\text{COD}_{\text{总}})$ 而言, 最优水平组合为 A3B1C3; 对 $R(\text{COD}_{\text{灰}})$ 而言, 最优水平组合为 A1B3C3. 通过综合分析平衡后, 得出适合颗粒化 EBPR 系统稳定运行的最佳复合底物条件是 A1B2C3, 即: $m(C)/m(N)/m(P) = 200:20:15$.

4 结论

(1) R1、R4、R7 系统的释磷/吸磷速率在运行过程中比较稳定, 其余系统均为逐渐降低, 甚至有系统在试验末期降至 $0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$.

(2) R2、R3、R5 系统因较高的进水碳源浓度和不匹配的碳氮磷比例出现了不同程度的丝状菌颗粒污泥膨胀, 严重影响了系统的除磷能力.

(3) R1、R4、R7 系统的 COD 主要在厌氧段消耗, R2、R3、R5、R6 系统由主要在厌氧段消耗变为在好氧段消耗, 系统中的功能微生物逐渐被好氧异养菌替代. R8 系统 COD 主要在厌氧段消耗但其除磷效果不理想, 表明高氨氮残留量不仅影响了功能微生物的活性, 还影响了其他异养菌的活性. R9 系统在试验末期 COD 消耗由主要在厌氧段消耗变为在好氧段消耗, 表明高氨氮残留量仅影响功能菌的活性.

(4) R1 ~ R9 系统磷酸盐平均去除率分别为 83.5%、52.8%、7.1%、96.7%、19.7%、72.2%、79.7%、28.1% 和 48.7%.

(5) 正交试验的方差分析结果表明, 适合颗粒化 EBPR 系统稳定运行的最佳复合底物条件是 $m(C)/m(N)/m(P) = 200:20:15$.

参考文献:

- [1] 高景峰, 郭建秋, 毕环宇, 等. 间歇式除磷好氧颗粒污泥反应器的快速启动[J]. 环境工程, 2008, **26**(1): 15-18.
- [2] Adav S S, Lee D J, Show K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: recent advances[J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(5): 411-423.
- [3] 杨新萍, 韩娇, 周立祥. Ca^{2+} 在好氧颗粒污泥形成中的作用[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1269-1273.
- [4] 涂响, 苏本生, 孔云华, 等. 城市污水培养好氧颗粒污泥的中试研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2118-2123.
- [5] 刘小英, 赵红梅, 彭党聪, 等. SBR 中生物除磷颗粒污泥的反硝化聚磷研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2254-2259.
- [6] 彭永臻, 吴蕾, 马勇, 等. 好氧颗粒污泥的形成机制、特性及应用研究进展[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 273-281.
- [7] Wu C Y, Peng Y Z, Wang R D, *et al.* Understanding the granulation process of activated sludge in a biological phosphorus removal sequencing batch reactor[J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(8): 767-776.
- [8] Zhang B, Ji M, Qiu Z G, *et al.* Microbial population dynamics during sludge granulation in an anaerobic-aerobic biological phosphorus removal system[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2474-2480.
- [9] Gebremariam S Y, Beutel M W, Christian D, *et al.* Research advances and challenges in the microbiology of enhanced biological phosphorus removal—A critical review[J]. *Water Environment Research*, 2011, **83**(3): 195-219.
- [10] 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.
- [11] 竺建荣, 刘纯新. 好氧颗粒活性污泥的培养及理化特性研究[J]. 环境科学, 1999, **20**(2): 38-41.
- [12] Lin Y M, Liu Y, Tay J H. Development and characteristics of phosphorus-accumulating microbial granules in sequencing batch reactors[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, **62**(4): 430-435.
- [13] 由阳, 彭轶, 袁志国, 等. 富含聚磷菌的好氧颗粒污泥的培养与特性[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2242-2248.
- [14] Wu C Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal by granular sludge: from macro to micro scale[J]. *Water Research*, 2010, **44**(3): 807-814.
- [15] Winkler M K H, Bassin J P, Kleerebezem R, *et al.* Selective sludge removal in a segregated aerobic granular biomass system as a strategy to control PAO-GAO competition at high temperatures[J]. *Water Research*, 2011, **45**(11): 3291-3299.
- [16] Graciela G G, Christof H. Dynamics of microbial community structure of and enhanced biological phosphorus removal by aerobic granules cultivated on propionate or acetate[J]. *Applied and Environment Microbiology*, 2011, **77**(22): 8041-8051.
- [17] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale[J]. *Water Research*, 2007, **41**(11): 2271-2300.
- [18] 蒋涛. 颗粒化 EBPR 系统混合碳源分子水平作用机制及模型构建研究[D]. 浙江: 浙江工商大学, 2011.
- [19] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 201-284.
- [20] Wang Q, Du G C, Chen J. Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force[J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39**(5): 557-563.
- [21] Su K Z, Yu H Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(8): 2818-2827.
- [22] Wilen B M, Balmer P. The effect of dissolved oxygen concentration on the structure, size and size distribution of activated sludge flocs[J]. *Water Research*, 1999, **33**(2): 391-400.
- [23] Wang Z W, Liu Y, Tay J H. The role of SBR mixed liquor volume exchange ratio in aerobic granulation[J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(5): 767-771.
- [24] Mino T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process[J]. *Water Research*, 1998, **32**(11): 3193-3207.
- [25] 彭永臻, 刘智波, Takashi M. 污水强化生物除磷的生化模型研究进展[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(4): 1-5.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4-n-Nonylphenol in Soil	JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU-Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujiang Watershed	DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Marteella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人