

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽娟, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 郭玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小峰, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响

张顺, 田晴*, 汤曼琳, 李方

(东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 为能提高生物除磷系统的除磷/回收磷效率, 研究采用厌氧/好氧交替式生物滤池 (AABF) 处理低碳磷比废水, 观察利用周期性扩增进水碳源进行磷回收时, 生物滤池除磷效率及生物膜内微生物特性的变化。通过分析生物滤池除磷效率变化, 生物膜多聚物染色、扫描电镜 (SEM) 观察以及荧光原位杂交 (FISH) 技术分析生物滤池系统实施周期性磷回收对生物膜内微生物菌群形态与组成的影响。结果发现, 生物滤池在先后经历 3 次生物蓄磷-磷回收 (PB-PR) 的运行操作过程中, 生物滤池除磷效率分别由磷回收前的 60.3%、82.9%、86.6% 提高到磷回收后的 87.2%、91.2%、93.5%; 生物滤池生物膜内优势菌群形态逐渐由大球菌演变为小球菌、杆菌与丝状菌; 经过连续 3 个周期的 PB-PR 操作, 生物滤池底部生物膜中聚磷菌所占比例由 43% 提高至 70%; 聚磷菌群在生物膜内混合菌群中的比例随着上流式生物滤池高度的增加而不断提高。结果表明, 采用周期性的碳源扩增与回收磷的操作, 可以提高生物滤池除磷效率; 引起生物滤池生物膜内微生物菌群形态与组成发生变化, 促进聚磷菌成为优势菌群。

关键词: 生物滤池; 碳源扩增; 磷回收; 微生物群落; FISH

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0979-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.023

Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System

ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, LI Fang

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: To improve the phosphorus (P) removal/recovery efficiency of a biological P removal system, the study used an alternating anaerobic/aerobic biofilter system to treat synthetic domestic sewage with a low carbon (C) to P ratio. The effects of using periodical carbon source amplification for P recovery on the P removal efficiency and the microbial characteristics within the biofilm were investigated. Intracellular storage polymer dyeing, scanning electron microscopy (SEM) observation and fluorescence *in situ* hybridization (FISH) methods were employed to characterize the changes of microbial communities in the biofilm during three continuous operation cycles of P bio-accumulating-P recovery (PB-PR). The results showed: through three cycles of operation process of PB-PR, the P removal efficiency of biofilter was increased from 60.3%, 82.9%, 86.6% (before P harvesting) to 87.2%, 91.2%, 93.5% (after P harvesting), respectively; the dominant microbial community morphotypes within the biofilter transformed from big cocci to small cocci, bacilli and filamentous and the group of phosphate-accumulating organisms (PAOs) got rising predominance, which was increased from 43% to 70% after three times of PB-PR; the proportion of PAOs in the biofilm increased unceasingly with the height of the up-flow biofilter. The results showed that the periodical carbon source amplification could improve the P removal efficiency of the biofilter and help the PAOs to become the dominant bacteria within the biofilm.

Key words: biofilter; carbon source amplification; phosphorus recovery; microbial community; FISH

磷是水体富营养化的直接诱因^[1,2], 也是一种不可更新、难以替代的自然资源^[3,4]。在此情况下, 开发污水磷回收工艺已成为各国专家的研究热点^[5]。2012 年 9 月在哈尔滨举办的 IWA 有关废水氮、磷去除与回收的国际会议加速了磷回收技术的研发与应用。

在实际工程中, 污水强化生物除磷-磷回收 (enhanced biological phosphorus removal- phosphorus recovery, EBPR-PR) 工艺多基于活性污泥法系统, 其普遍面临碳源 (COD) 不足、污泥膨胀以及污泥容易流失等问题^[6]; 生物膜法的特点在于微生物固着生

长, 结合紧密、不会出现污泥膨胀、剩余污泥量少等优点^[7], 利用附着生长的生物膜法 EBPR 工艺能够有效避免活性污泥法的各项弊端。郝晓地等^[8]已证实磷回收能够强化低碳源污水脱氮除磷效果, 如果将生物膜法 EBPR 工艺与磷回收联用, 处理效果势必会进一步提高。但目前生物膜法 EBPR 工艺的

收稿日期: 2013-07-06; 修订日期: 2013-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20906011); 留学回国人员科研启动基金项目 (11W11329); 上海市自然科学基金项目 (102R1401200)

作者简介: 张顺 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理, E-mail: 871306454@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: tq2004@dhxu.edu.cn

研究仅限于运行条件、处理效果优化等方面,针对生物膜法除磷/蓄磷-磷回收联用工艺的研究及报道非常有限,仅有日本 Kodera 等^[9]新近报道了利用改良生物膜法进行厌氧/好氧交替富集废水中磷用于磷回收的探索性研究. 而国内仅有王凤蕊等^[10]报道了利用生物滤池技术进行生物除磷/蓄磷,并正在研究与开发生物膜法蓄磷-磷回收的联用工艺.

在生物膜法 EBPR 工艺中,主要是应用聚磷菌(phosphate-accumulating organisms, PAOs)^[11]厌氧释磷/好氧超量吸磷的生理特性,达到去除水体中磷元素的目的^[12]. 所以生物膜中聚磷菌的种类及数量决定了强化除磷工艺的除磷效率^[13,14]. 过去人们常用菌种分离培养鉴定法^[15~17]来研究生物膜中的微生物菌群,但这种方法对一些培养条件苛刻或不能被培养的细菌却没有多大作用,最重要的是它不能精确地反映混合菌群的组成和多样性. 荧光原位杂交技术(fluorescence *in situ* hybridization, FISH)的发展为这方面的研究提供了有力的工具,应用 FISH 技术对聚磷菌进行研究在一定程度上可以真实地反映出聚磷菌在生物膜内部的组成和空间分布情况. 它已成为检测聚磷菌最有效的途径之一^[18~20].

因此,本研究在厌氧/好氧交替式生物滤池(AABF)蓄磷、除磷过程中,采用周期性扩增产水碳源进行磷回收时,生物滤池除磷效率的变化,并通过多聚物染色、扫描电镜(SEM)观察及荧光原位杂交(FISH)技术考察磷回收对生物滤池生物膜内微生物菌群的形态与组成的影响.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置为交替式厌氧/好氧生物滤池(AABF),整套装置主要由生物滤柱、进水水箱、中间水箱、控制箱、电磁阀以及空气压缩机等组成. 实验装置主体生物滤池为有机玻璃材质的滤柱,高 2.1 m,内径 100 mm,壁厚 8 mm,填料为粒径 2~4 mm 的石英砂,其装填高度为 1.15 m,总填充量为 3.75 kg(干重),生物滤池运行初期的孔隙率为 28.9%,实际水位 1.2 m,水面高出石英砂层约 0.05 m,顶部设置电磁阀用来控制生物滤池与空气的连通状态. 滤柱上共设置有 10 个取样口,分别为 5 个水样取样口和 5 个生物膜取样口,交替排列于滤柱柱体上,水样取样口与滤柱底座距离分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 m. 实验装置如图 1 所示.

进水水箱(C1)贮存人工配置的污水,厌氧阶

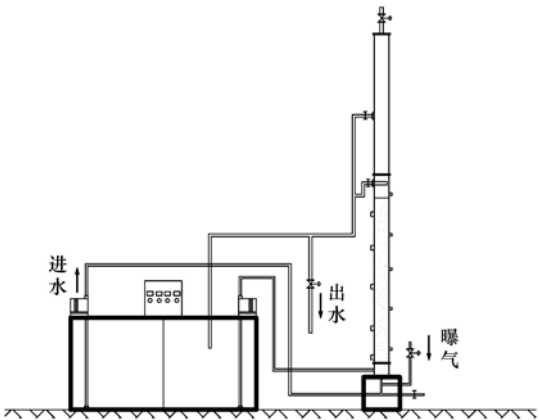
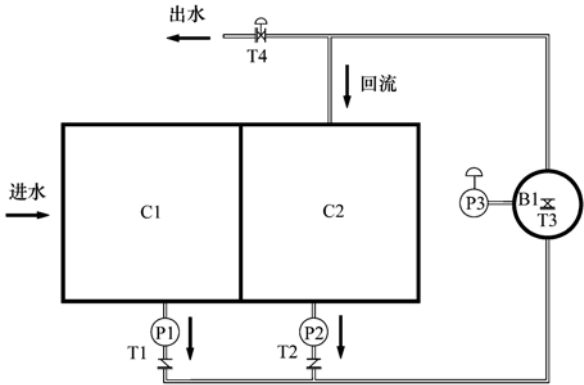


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic of the experimental system

段,C1 的出水流入上流式生物滤池(B1)经过厌氧释磷后排入中间水箱(C2),好氧阶段则将 C2 里的水重新回流到 B1 内进行好氧吸磷过程后排出,空气压缩机负责好氧阶段曝气,时间控制箱在设定好的时间条件下完成对各开关的开启与关闭. 整套系统的运行流程如图 2 所示.



C1. 进水水箱; C2. 中间水箱; B1. 生物滤池; P1. 厌氧进水水泵; P2. 好氧进水水泵; P3. 空气压缩机; T1~T4. 电磁阀

图 2 厌氧/好氧生物滤池运行流程图

Fig. 2 Schematic of the anaerobic/aerobic biofilter system

1.2 运行条件

实验采用模拟生活污水作为生物滤池的进水,进水配方如表 1 所示.

表 1 模拟生活污水进水组分

Table 1 Influent composition of the simulated sewage water	
成分	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
磷酸二氢钠($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	80
乙酸钠(CH_3COONa)	270
氯化钾(KCl)	4
碳酸氢钠(NaHCO_3)	50
硫酸镁($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	14
氯化钙(CaCl_2)	20
氯化铵(NH_4Cl)	47
三氯化铁(FeCl_3)	2

生物滤池厌氧/好氧交替循环周期(CD)为8 h,其中厌氧3 h,好氧5 h(前2 h内循环).进水流量为 $3.5\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,水力停留时间约为50 min.

连续监测3个生物蓄磷-磷回收(P bio-accumulating-P recovery, PB-PR)周期内生物滤池的进出水水质(每天监测一个CD),每隔10 d进行一次磷回收(采用扩增进水碳源方式诱导生物滤池内聚磷菌群充分释磷,形成高浓度的磷回收液、便于后续磷回收),磷回收时配水方案如表2所示.磷回收方式为:进水→静置1 h→排水,重复数次,收集磷回收液进行结晶实验来回收污水中的磷^[21].

表2 磷回收时进水组分

Table 2 Influent composition during the P recovery process	
成分	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
磷酸二氢钠($\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	80
乙酸钠(CH_3COONa)	1 350
氯化钾(KCl)	20
碳酸氢钠(NaHCO_3)	250
硫酸镁($\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	14
氯化钙(CaCl_2)	20
氯化铵(NH_4Cl)	47
三氯化铁(FeCl_3)	4

1.3 监测项目与分析方法

实验中监测的项目包括:生物滤池进、出水(包括生物滤池沿程出水)TOC、TP、电导率、ORP、pH、温度、生物膜MLSS和MLVSS、生物膜含磷量等^[10].

1.4 参数含义及计算方法

$$\eta_{\text{pr}} = \text{TP}_{\text{pr}}/\text{TP}_{\text{ca}} \times 100\%$$

式中, η_{pr} 为磷回收时磷释放率(%); TP_{ca} 为每个PB-PR周期内蓄磷总量(mg); TP_{pr} 为磷回收时释放磷量(mg).

$$\eta_{\text{TP}} = (\text{TP}_i - \text{TP}_e)/\text{TP}_i \times 100\%$$

式中, η_{TP} 为总磷去除率(%); TP_i 为每天进入生物滤池的磷量(mg); TP_e 为每天流出生物滤池的磷量(mg).

$$\eta_{\text{TOC}} = (\text{TOC}_i - \text{TOC}_e)/\text{TOC}_i \times 100\%$$

式中, η_{TOC} 为TOC去除率(%); TOC_i 为每天进入生物滤池的TOC量(mg); TOC_e 为每天流出生物滤池的TOC量(mg).

1.5 生物膜特性分析

1.5.1 多聚物染色及SEM分析

生物膜样品的PHB检测采用苏丹黑+蕃红及尼罗红染色.经苏丹黑染色后,PHB颗粒呈蓝黑色,而细胞质等呈红色;经尼罗红染色后,细胞内PHB

发出橙色或浅红色的荧光^[22,23].生物膜样品中异染粒(poly-P)的检测采用阿氏(Albert)异染粒染色法,染色后,poly-P呈黑色,其他部分呈暗绿或绿色.多聚物染色样品用荧光显微镜(Nikon Eclipse 80i, Japan)观察,每个样品拍摄10~15张图片.扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(JEOL-5600SL, Japan)用于分析生物膜样品中的微生物群落形态.

1.5.2 FISH 分析

荧光原位杂交(FISH)技术用来分析生物滤池中聚磷菌(PAOs)的含量,实验所用探针均由生工生物工程(上海)股份有限公司提供.实验中所用到的寡核苷酸探针如表3所示.

表3 细菌和聚磷菌的寡核苷酸探针

Table 3 Oligonucleotide probes for bacteria and PAOs		
探针	序列(5'-3')	指示菌群
EUB 338- I	GCTGCCTCCCGTAGGACT	大多数细菌 ^[24]
PAO462	CCGTCATCTACWCAGGTATTAAC	PAO ^[24]
PAO651	CCCTCTGCCAAACTCCAG	PAO ^[24]
PAO846	GTTAGCTACGGCACTAAAAGG	PAO ^[24]
GAMA42a	GCCTTCCCACTTCGTTT	γ -Proteobacteria ^[25~28]

本实验中EUB338用异硫氰酸荧光素(FITC)标记,FITC激发后显绿色;PAO(462、651、846)及GAMA42a用Cy5标记(此为PAO混合探针,简记为PAO探针),Cy5激发后显红色^[26].EUB338探针用来检测全菌,PAO(462、651、846)探针用来检测 β -Proteobacteria中红环菌属(*Rhodocyclus*)相关的PAOs,GAMA42a探针用来检测 γ -Proteobacteria中假单胞菌属(*Pseudomonas*)相关的PAOs.杂交后样品用激光共聚焦显微镜LSM 510 META(Zeiss, Germany)观察,每个样品拍摄3~5张图片,拍摄的FISH图片用Image-Pro Plus 6.0(Media Cybernetics, America)软件来分析生物膜样品中聚磷菌所占的比例.

2 结果与分析

2.1 生物滤池运行状况

2.1.1 每个PB-PR周期内磷的变化情况

从图3中可以看出,每个PB-PR周期内的 TP_{ca} 分别较上个周期提高了42.4%和9.4%; TP_{pr} 分别较上个周期提高了14.8%和16.4%.综合分析:每个PB-PR周期内 TP_{ca} 增加,表现为每次实施磷回收后,生物滤池好氧段出水磷浓度减小,生物滤池运行状况变好.3次PB-PR操作中 η_{pr} 平均为37.7%,如果磷结晶实验时磷的沉淀效率按95.0%计算,则可

知本系统磷的总回收效率为 35.8%.

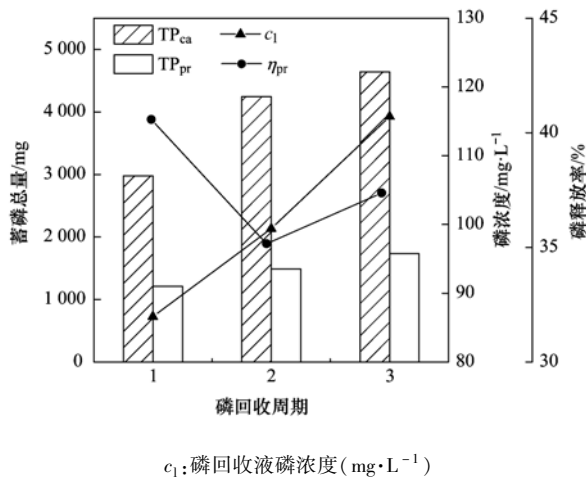


图 3 每个 PB-PR 周期内磷的变化情况
Fig. 3 Change of P in each PB-PR cycle

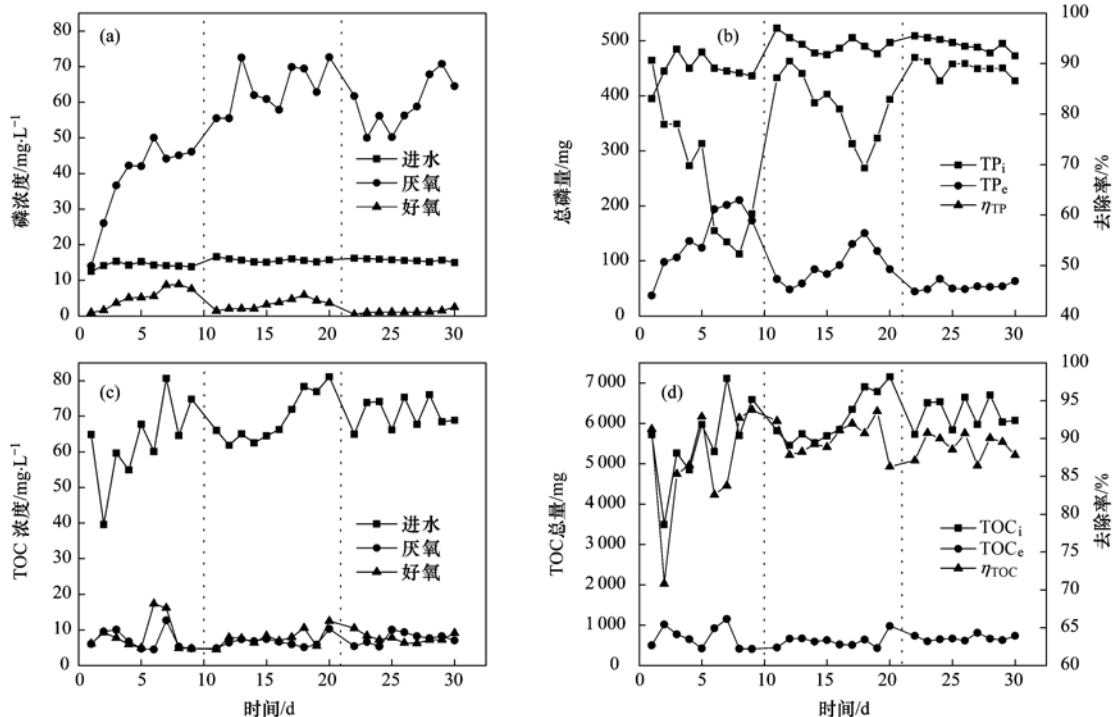
2.1.2 磷回收对磷、碳去除率的影响

从图 4(a)可以看出:在每个 PB-PR 周期内,生物滤池厌氧释磷液磷浓度不断升高,最高释磷量达到 $74.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;结合图 4(a)和图 4(b)可以看出:在每个 PB-PR 周期内,生物滤池出水中磷的浓度不断升高,生物滤池对磷的去除率也不断降低.经过 3 次 PB-PR 周期的运行,生物滤池好氧末出水磷浓度分别由磷回收前的 7.58、3.69、2.48

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小到磷回收后的 1.43、0.50、0.49 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; η_{TP} 分别由磷回收前的 60.3%、82.9%、86.6% 提高到磷回收后的 87.2%、91.2%、93.5%. 可以推断,周期性扩增进水碳源用于磷回收对于恢复聚磷菌的除磷能力是一个行之有效的手段.分析认为:磷回收促进吸磷饱和聚磷菌胞内的磷被释放出来,恢复其超量吸磷的能力. Yoshino 等^[29]的研究表明:在 BNR 系统中,排放部分污泥厌氧消化池中的上清液用于磷回收,可以提高 BNR 系统的除磷效率.从图 4(a)和图 4(b)中还可以看出,第 3 个 PB-PR 周期内,生物滤池出水磷浓度稳定在 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, η_{TP} 保持在 85.0% 以上.分析认为:随着生物滤池的不断运行,生物滤池内聚磷菌的数量不断增加,经过 10 d 运行,生物滤池内聚磷菌还未达到摄磷极限,因此能够保证系统的除磷效率.

从图 4(c)和 4(d)可以看出,厌氧、好氧阶段 TOC 的数据差别不大, η_{TOC} 均保持在 85.0% 以上,说明 TOC 的去除主要是在厌氧阶段.分析认为:厌氧阶段,PAOs 分解体内 poly-P 为能量吸收废水中的易降解碳源以合成胞内储能物质聚羟基烷酸 (PHAs);好氧阶段,PAOs 利用贮存的 PHAs 作为能源和碳源,吸收废水中的磷以合成 poly-P^[30].

2.1.3 生物滤池沿程出水中磷的变化情况



虚线位置为磷回收点

图 4 磷回收对磷、碳去除率的影响

Fig. 4 Effect of phosphorus recovery on the removal rate of P and C

图 5 为生物滤池 3 次磷回收前后沿程出水中磷的变化. 从中可以看出: 底部取样口的释磷和吸磷效果均比较差, 平均释磷量为 $29.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷的去除率平均为 34.8%; 而中部和上部取样口的平均释磷量分别为 $44.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $42.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷的去除率分别为 82.6% 和 83.3%. 生物除磷过程中的除磷效率往往取决于生物膜内的聚磷菌含量与数量, 因此分析认为: 下部生物膜中微生物活性较弱或者聚磷菌在生物膜菌群内所占比例较低, 中部生物膜中微生物活性和聚磷菌比例较高, 上部生物膜较少.

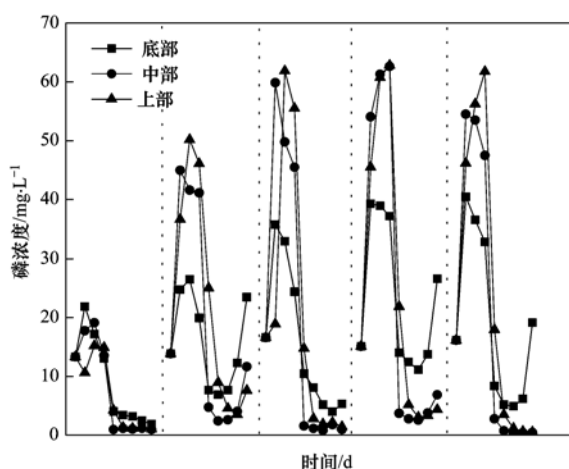


图 5 生物滤池沿程出水中磷的变化情况

Fig. 5 Change of effluent P along the height of biofilter

2.2 生物膜形态与组成变化分析

本研究在生物滤池运行期间的第 10 d、第 20 d 和第 30 d, 分别收集生物滤池厌氧/好氧阶段末不同取样口的生物膜样品, 并对收集的样品进行微生物特性分析.

2.2.1 微生物形态与组成在时间上的变化

从图 6 可以看出: 在生物滤池运行期间内, 微生物的形态与组成会发生较大变化. 图 6 (a1) 中微生物群落主要由大球菌构成, 图 6 (a2) 中则主要为小球菌及短杆菌, 图 6 (a3) 中微生物群落的细菌形态进一步变小, 结合紧密, 同时丝状菌增多[其余图同图 6(a) 的说明]. 这说明: 在蓄磷周期的开始阶段, 生物滤池内生物膜数量较少, 进水中的碳源和营养物质充足, 微生物在维持自身生长繁殖的同时吸收进水中的碳源和营养物质, 把它们转变为自身的能量存储物质贮存在自身体内, 因此微生物的形态较大. 随着生物滤池的运行时间的增加, 生物滤池内微生物数量不断增多, 生物滤池系统的有机负荷率 (F/M) 不断下降, 造成进水中的碳源和营养物质不

能满足微生物的生长与繁殖, 贮存在细胞体内的能量存储物质逐渐被消耗, 微生物的形体逐渐减小. 随着生物滤池的不断运行, 生物滤池内微生物数量不断增多, 同时微生物代谢产物不断积累, 生物膜内微生物菌群结合越来越紧密, 菌胶团内部呈细长丝状态的丝状菌的数量不断增多, 且丝状菌菌丝伸出菌胶团外, 以便能够获取污水中的营养物质^[31].

2.2.2 微生物形态与组成在空间上的变化

由图 6 (a) 的染色结果也可以看出: 在不同高度上, 生物滤池内微生物的形态结构也不太一样. 下层微生物菌落结合紧密, 存在大量的丝状菌, 菌群内分布有少量大球菌; 上层微生物菌落结构较下层松散, 丝状菌较少, 更多的是形态较小的球菌和杆菌. 生物滤池沿程不同高度微生物形态不一样也是由于不同高度微生物所获得的基质(有机物、氮、磷等)浓度不同, 所造成生长条件不一样引起的.

2.2.3 聚磷菌比例的变化

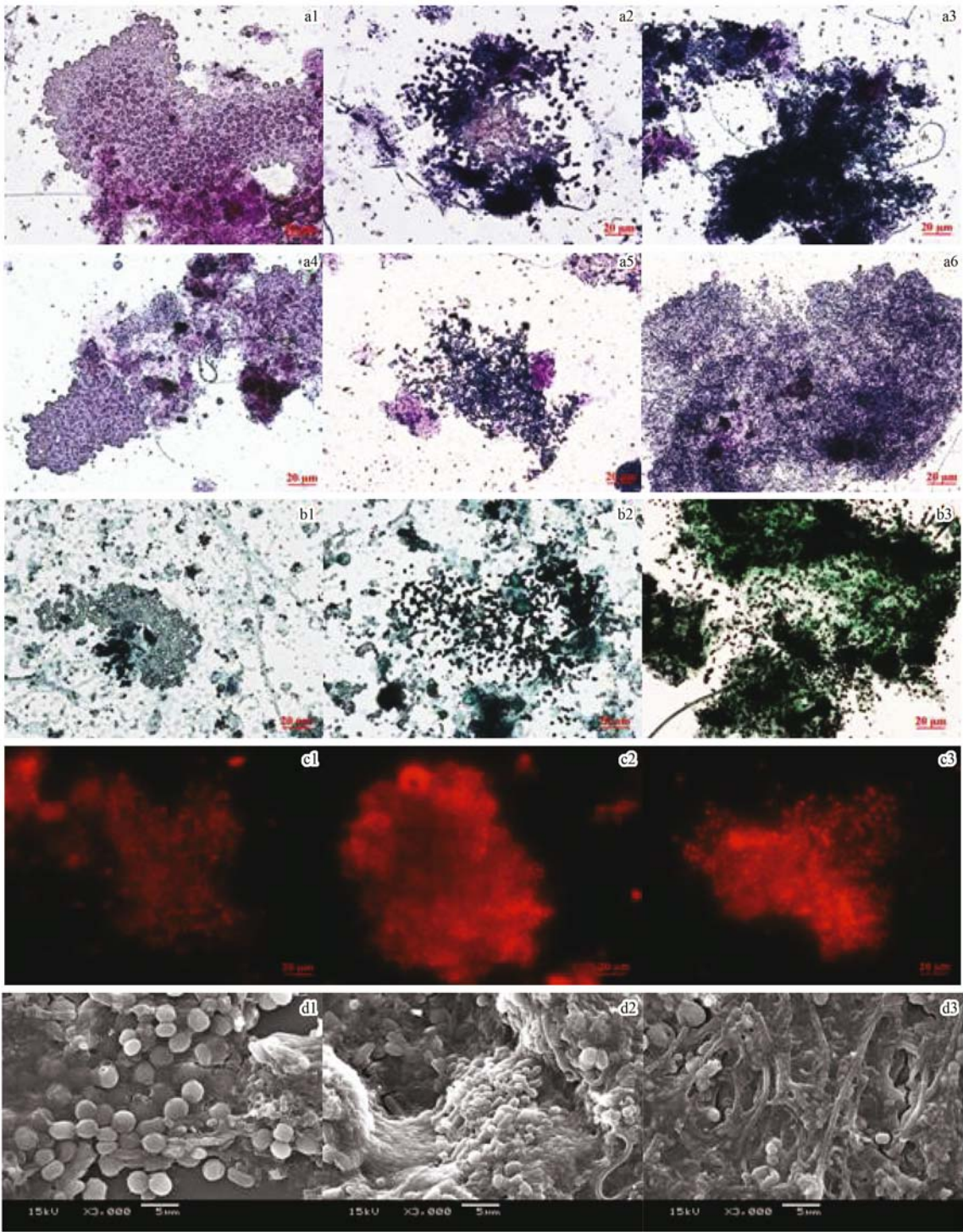
由图 6 (c) 可以观察到, 随着生物滤池生物 PB-PR 操作的不断运行, poly-P 颗粒不断地增多, 这说明生物滤池内聚磷菌数量在不断地增多, 聚磷菌的比例也在不断地增大^[32]. 由图 6 (a) 及图 6 (b) 的染色结果也能发现这一现象.

2.3 FISH 结果分析

图 7 为不同取样时间生物膜样品的 FISH 照片. 图中绿色荧光信号为 FITC 标记的 EUB338 探针杂交的结果, 红色荧光信号为 Cy5 标记的 PAO 探针杂交的结果, 图 7(a3) 为图 7(a1)、图 7(a2) 结合后的图, 其中黄色信号代表的是聚磷菌[其余图同图 7(a) 的说明]. 图 7 的 FISH 照片用 Image-Pro Plus 6.0 软件分析可知, 生物滤池底部生物膜中聚磷菌所占比例分别为 43%、54%、70%. 说明随着生物滤池的不断运行, 生物滤池内微生物数量不断增加, 聚磷菌所占比例也不断的增加, 生物滤池内的聚磷菌群不断地得到纯化; 这与图 3 中每个 PB-PR 周期内磷的吸收量也是相对应的. 第 3 个 PB-PR 周期, 生物滤池底部和中部生物膜中聚磷菌所占比例分别为 70%、80%. 说明生物滤池中部生物膜中聚磷菌的含量比底部生物膜中聚磷菌的含量高, 这与图 5 的结果也是相对应的.

3 结论

(1) 采用周期性的碳源扩增进行磷回收可以促进聚磷菌胞内所富集的磷被释放出来, 恢复聚磷菌超量吸磷的能力, 从而改善生物滤池的除磷效率.



图片矩阵中第 1、2、3 列分别代表第 10 d、第 20 d 和第 30 d 所取的生物滤池生物膜样品,第 1、3、4、5 行代表生物滤池底部取样口生物膜样品,第 2 行代表生物滤池中部取样口生物膜样品,(a) 代表生物膜样品的 PHB 染色照片,(b)、(c)、(d) 分别代表生物膜样品的 poly-P 染色、尼罗红染色及 SEM 照片

图 6 不同取样时间及取样口生物膜样品中 PHB、poly-P 染色及 SEM 照片

Fig. 6 PHB, poly-P staining and SEM images of bottom biofilm samples at different sampling times

(2) 周期性的碳源扩增能够引起生物滤池生物膜内微生物的形态与组成发生较大变化,促进聚磷菌逐渐成为优势菌群.

(3) 经过 3 个 PB-PR 周期的运行操作,聚磷菌在生物膜内混合菌群中的比例随着上流式生物滤池高度的增加而不断提高.

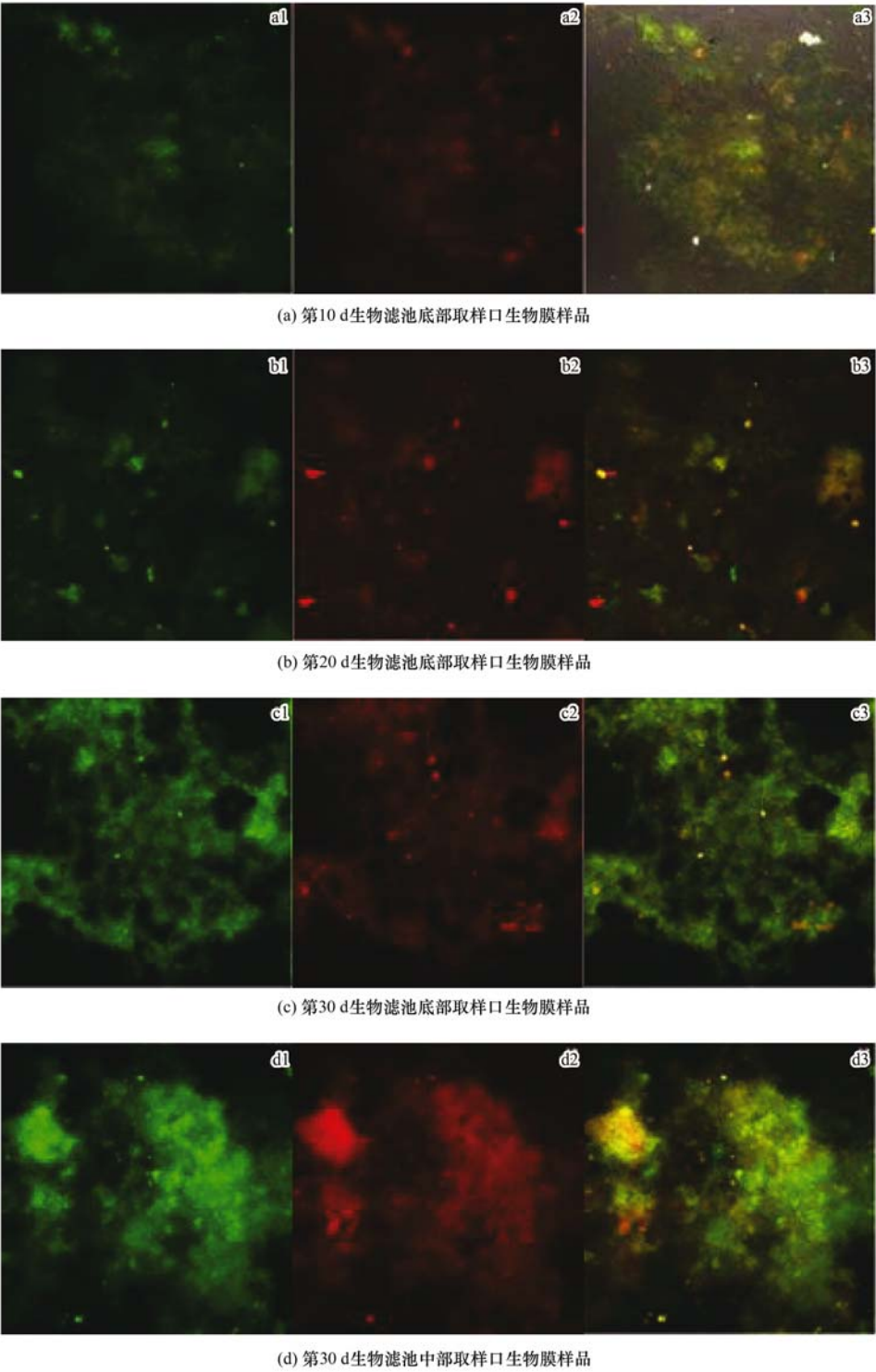


图 7 不同取样时间及取样口生物膜样品 FISH 照片

Fig. 7 FISH images of biofilm samples at different sampling times and sampling spots

参考文献：

[1] 郝晓地, 戴吉, 胡沅胜, 等. C/P 比与磷回收对生物营养物质去除系统影响的试验研究[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3098-3103.

[2] Trepanier C, Parent S, Comeau Y, *et al.* Phosphorus budget as a water quality management tool for closed aquatic mesocosms[J]. Water Research, 2002, 36(4): 1007-1017.

[3] 徐微, 杨贤明. 污水磷回收方法与技术概述[J]. 山西建筑, 2010, 36(20): 152-154.

[4] Cordell D, Drangert J O, White S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought [J]. Global Environmental Change, 2009, 19(2): 292-305.

[5] Kuroda A, Takiguchi N, Gotanda T, *et al.* A Simple method to

- release polyphosphate from activated sludge for phosphorus reuse and recycling[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2002, **78**(3): 333-338.
- [6] Mulkerrins D, Dobson A D W, Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters[J]. *Environment International*, 2004, **30**(2): 249-259.
- [7] Falkentoft C M, Arnz P, Henze M, *et al.* Possible complication regarding phosphorus removal with a continuous flow biofilm system: Diffusion limitation [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2001, **76**(1): 78-85.
- [8] 郝晓地, 衣兰凯, 付昆明. 侧流磷回收强化低碳源污水脱氮除磷效果的模拟与实验研究[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(1): 231-236.
- [9] Koda H, Hatamoto M, Abe K, *et al.* Phosphate recovery as concentrated solution from treated wastewater by a PAO-enriched biofilm reactor [J]. *Water Research*, 2013, **47**(6): 2025-2032.
- [10] 王凤蕊, 李一伟, 李东旭, 等. 厌氧/好氧交替式生物滤池除磷工艺中生物膜特性[J]. *水处理技术*, 2012, **38**(1): 96-100.
- [11] Arun V, Mino T, Matsuo T. Biological mechanism of acetate uptake mediated by carbohydrate consumption in excess phosphorus removal systems [J]. *Water Research*, 1988, **22**(5): 565-570.
- [12] Lai M W Y, Kulakova A N, Quinn J P, *et al.* Stimulation of phosphate uptake and polyphosphate accumulation by activated sludge microorganisms in response to sulfite addition[J]. *Water Science and Technology*, 2011, **63**(4): 649-653.
- [13] Hu Z R, Wentzel M C, Ekama G A. Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems[J]. *Water Research*, 2002, **36**(19): 4927-4937.
- [14] 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.
- [15] Morohoshi T, Yamashita T, Kato J, *et al.* A method for screening polyphosphate-accumulating mutants which remove phosphate efficiently from synthetic wastewater [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2003, **95**(6): 637-640.
- [16] Cai T M, Guan L B, Chen L W, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal with *Pseudomonas putida* GM6 from activated sludge[J]. *Pedosphere*, 2007, **17**(5): 624-629.
- [17] Chaudhry V, Nautiyal C S. A high throughput method and culture medium for rapid screening of phosphate accumulating microorganisms[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(17): 8057-8062.
- [18] 张勇, 宋吟玲. 荧光原位杂交法检测反应器中聚磷菌实验条件优化及应用[J]. *环境科学与管理*, 2008, **33**(2): 126-129.
- [19] Biesterfeld S, Russell P, Hgueroa L. Linking nitrifying biofilm structure and function through fluorescent *in situ* hybridization and evaluation of nitrification capacity[J]. *Water Environmental Research*, 2003, **75**(3): 205-215.
- [20] 亢涵, 王秀衡, 李楠, 等. 生物除磷系统启动期聚磷菌的 FISH 原位分析与聚磷特性[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 80-84.
- [21] 陶飞飞, 田晴, 李方, 等. 共存杂质对磷酸铵镁结晶法回收磷的影响研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(11): 2437-2441.
- [22] 任世英, 肖天. 聚磷菌体内多聚物的染色方法[J]. *海洋科学*, 2005, **29**(1): 59-63.
- [23] 王敬国. 尼罗红在测定细菌细胞中聚- β -羟基丁酸和其他脂类贮藏物质中的应用[J]. *微生物学报*, 1994, **34**(1): 71-75.
- [24] Crocetti G R, Hugenholtz P, Bond P L, *et al.* Identification of polyphosphate-accumulating organisms and design of 16S rRNA-directed probes for their detection and quantitation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(3): 1175-1182.
- [25] Kong Y, Xia Y, Nielsen J L, *et al.* Structure and function of the microbial community in a full - scale enhanced biological phosphorus removal plant[J]. *Microbiology*, 2007, **153**(12): 4061-4073.
- [26] 孙寓姣, 王勇, 黄霞. 荧光原位杂交技术在环境微生物生态学解析中的应用研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, **5**(11): 14-20.
- [27] Liu J R, Seviour R J. Design and application of oligonucleotide probes for fluorescent *in situ* identification of the filamentous bacterial morphotype *Nostocoida limicola* in activated sludge[J]. *Environment Microbiology*, 2001, **3**(9): 551-560.
- [28] Julie L Z, Jordan P, Myeong W K, *et al.* Involvement of *Rhodocyclus*-related organisms in phosphorus removal in full-scale wastewater treatment plants [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **63**(6): 2763-2769.
- [29] Yoshino M, Yao M, Tsuno H, *et al.* Removal and recovery of phosphate and ammonium as struvite from supernatant in anaerobic digestion[J]. *Water Science and Technology*, 2003, **48**(1): 171-178.
- [30] 肖凡, 顾国维. 生物强化除磷机理的探讨[J]. *环境科学与技术*, 2005, **28**(S1): 7-9.
- [31] Contreras E M, Giannuzzi L, Zaritzky N E. Use of image analysis in the study of competition between filamentous and non-filamentous bacteria [J]. *Water Research*, 2004, **38**(11): 2621-2630.
- [32] Serafim L S, Lemos P C, Levantesi C, *et al.* Methods for detection and visualization of intracellular polymers stored by polyphosphate-accumulating microorganisms [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2002, **51**(1): 1-18.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行