

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 张维,唐翔宇,鲜青松(41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH₄ 与 CO₂ 浓度日动态 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川(52)
河南鸡冠洞 CO₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水质的响应特征 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH 和络合剂对五价铈在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe²⁺)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 刘晋仙,李磊,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒(343)
苾、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李响,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云(368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad(374)
卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程

郑莹^{1,2}, 潘杨^{1,2,3*}, 周晓华¹, 廖烜弘^{1,2}, 孟璇^{1,2}, 夏健伟⁴

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009; 4. 苏州市环境应急与事故调查中心, 苏州 215002)

摘要: 采用挂式尼龙作为生物载体的新型生物膜反应器处理合成废水, 探讨短时间内在该常规生物膜上富集培养高浓度聚磷菌的可行性, 并从反应器运行效率、除磷速率以及聚磷菌的富集状态等方面进行验证。反应器启动运行 10 d 后, 好氧阶段正磷酸盐去除率稳定在 95% 以上, COD 出水浓度均在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 并在该处理水平稳定运行了 50 d。运行培养 48 d 后, 吸磷及释磷速率由相同的 $3.4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 分别提高到 $8 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $6 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 好氧和厌氧周期由相同的 6 h 分别缩短到 2 h 和 3 h。运行培养 50 d 经荧光原位杂交法 (FISH) 测定, 污泥中聚磷菌的丰度从原泥的 48.96% 提高到 70%, 杂交图中的聚磷菌以大块团聚态出现, 由直接显微镜法测得生物膜厚度约为 $28.9 \mu\text{m}$, 证明生物膜上聚磷菌群已处于动力学增长末期即生物膜已经成熟。经过 50 d 的强化培养, 能够在常规尼龙填料上富集占总菌 70% 的高浓度聚磷菌, 使得本反应器能高效去除水中的磷与有机物。

关键词: 生物膜; 除磷; 聚磷菌; 尼龙填料; 富集; FISH

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0276-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607082

Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization

ZHENG Ying^{1,2}, PAN Yang^{1,2,3*}, ZHOU Xiao-hua¹, LIAO Xuan-hong^{1,2}, MENG Xuan^{1,2}, XIA Jian-wei⁴

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Environment Biotechnology Research Institute, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environment Science and Engineering, Suzhou 215009, China; 4. The Environment Emergency and Accident Investigation Center of Suzhou, Suzhou 215002, China)

Abstract: Using the hanging nylon as a biological carrier, a novel biofilm reactor was adopted to treat synthetic wastewater, and the feasibility of cultivating and enriching a high concentration of PAOs on this conventional biofilm within a short time was investigated, which was proved from the aspects of reactor's operational efficiency, the rate of phosphorus removal and the condition of PAOs enrichment. After 10d of operation, the rate of orthophosphate removal was higher than 95% in aerobic phase and the concentration of effluent COD was $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ or less in the reactor, which was operated steadily for 50 d at this treatment level; after 48 d of operation, the reactor's phosphorus uptake rate and release rate were increased from $3.4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ and $3.4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ to $8 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ and $6 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively, and the aerobic and anaerobic cycles were shortened from equally 6 h to 2 h and 3 h, respectively. The fluorescence in situ hybridization (FISH) test found that the PAOs' abundance was increased from the original 48.96% to 70% on the 50th day, meanwhile the PAOs showed reunite chunk state in hybrid figure, the thickness of biofilm measured by direct microscopic process was about $28.9 \mu\text{m}$, which all proved that the PAOs in biofilm were at the end of the growth kinetics and the biofilm was mature. By hardening culture for 50d, a high concentration of 70% in full organisms of PAOs could be enriched in the conventional nylon filler, enabling the reactor to show a high efficiency in removal of phosphorus and organic matter from sewage.

Key words: Biofilm; phosphorus removal; PAOs; nylon filler; enrichment; FISH

磷作为一种重要的资源同时具有稀缺性和污染性的双重特性, 若排放的污水中含有过量的磷会导致水体富营养化等问题, 影响水体生态系统的健康发展, 如发展到饮用水水源地区还会严重威胁人类的生活^[1]。因此, 有必要管控污水中的磷使其利于磷资源的良性循环: 即减少污水中磷含量, 保证水资源环境不受危害, 实现生态的可持续发展。现有的大部分污水处理厂使用强化生物除磷 (EPBR) 工艺去除污水中的磷, 从生命周期角度看, 合适的污水除磷

工艺要兼顾当地情况和其他环境影响, 如全球变暖、臭氧层破坏等^[2]。使用 EBPR 工艺过程中无法避免

收稿日期: 2016-07-13; 修订日期: 2016-08-17

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重大项目 (14KJA610001); 江苏省研究生创新项目 (SLJX15_0637); 苏州科技大学研究生创新项目 (SKCX15_036); 江苏省“333”学术带头人培养工程项目 (331491201); 水处理材料与技术协同创新中心项目; 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401108)

作者简介: 郑莹 (1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染治理, E-mail: 350449185@qq.com

* 通信作者, E-mail: panyang@mail.usts.edu.cn

产生大量的剩余污泥,若处理不当会产生生物毒性^[3],在污泥处理过程中也会产生多余的温室气体^[4].

生物膜法曾以其效率高和运行成本低等优点被广泛用于污水的有机物去除及脱氮工艺,且将生物膜法工艺用于废水脱氮,对缓解当前水体富营养化、废水处理设施用地紧张等问题有积极作用,拥有较大的发展潜力^[5].生物膜上的生物世代时间长、生物量大^[6],如能在常规生物载体上富集聚磷菌,通过微生物富集方式实现对磷酸盐的高效去除,将为磷的去除与管控提供新途径.有研究表明,用厌氧/好氧交替式生物滤池处理低碳磷比废水,最优出水 TP 质量浓度为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[7];还有研究采用了厌氧预酸化-间歇曝气生物滤池处理生活污水,可以有效去除污水中的有机物和磷酸盐,TP 出水平均浓度 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 85.2%^[8].上述研究中的除磷生物膜多使用曝气生物滤池的形式,存在容易堵塞、需要定期反冲洗和对进水的悬浮固体浓度要求严格等局限,工艺发展缓慢且受限.

本研究以常规填料挂式尼龙作为生物膜载体形成厌氧/好氧交替生物膜反应器,控制合适条件并在生物膜上富集聚磷菌,使废水中的磷和 COD 等污染物得以高效稳定地去除.该新型生物膜工艺与强化生物除磷和化学除磷法相比,剩余污泥产生量极少,大大减少了温室气体的排放量,是更为可持续的除磷方法;该工艺的原理为简单的生物接触氧化法,无需复杂的条件控制,简单易行.本研究并没有对反应器厌氧阶段做详细分析,这是由于生物膜培养成熟后将在厌氧阶段进行磷回收工作,同时完成磷的去除与富集,符合未来处理污水节能环保、资源回收的理念.

1 材料与方法

1.1 反应器装置

将挂式尼龙填料浸没在苏州市某污水处理厂好氧段氧化沟取回的污泥中曝气 24 h,使污泥在填料上附着.反应器置于 DF-101s 恒温水浴加热磁力搅拌锅中,保持恒温和底部的匀速搅拌.使用 3 台 DZ-2X 水泵分别完成好氧进水、厌氧进水以及排水的工作,用一台 250 W 小型空压机提供软管和曝气石放入反应器中提供好氧阶段的曝气.

反应器的主体由 2 串尼龙填料挂在一个 2 L 的容器中组成,装置流程如图 1:好氧阶段,提升泵 1 将好氧进水泵入反应器,并由空压机提供曝气条件,

反应完成后提升泵 3 将反应器中溶液排出;厌氧阶段,提升泵 2 将厌氧进水泵入反应器,反应完成后同样由泵 3 将溶液排出.与其他生物除磷工艺中只有一种进水的模式不同,本工艺采用厌氧/好氧阶段泵入不同进水,使反应器中生物膜适应运行模式,在完成生物膜培养工作后通过厌氧阶段使用同一回收液富集磷的浓溶液进行磷资源的回收.

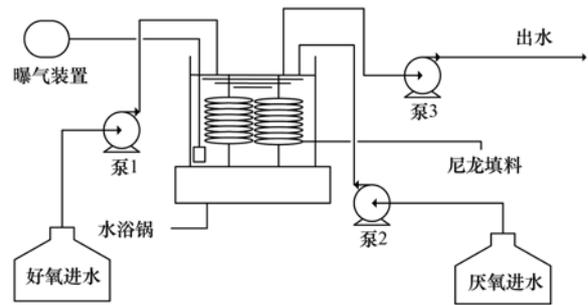


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Experimental device

1.2 进水和运行条件

1.2.1 进水条件

使用合成废水作为进水,其中好氧基质即为好氧进水,厌氧基质与水以 1:9 的比例混合作为厌氧进水.通常采用乙酸钠或丙酸钠作为模拟废水碳源,邱春生等^[9]研究表明,乙酸钠比丙酸钠更能促进聚磷菌的代谢,故选取易于吸收的乙酸钠作为碳源.合成废水的水质主要指标为:好氧基质中, $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD, $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$, $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 少量 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{EDTA} \cdot 2\text{Na}$ 和微量元素,加入 NaHCO_3 调节进水 pH 至 7.5;厌氧基质中, $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD, $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 自然 pH 值,少量 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{EDTA} \cdot 2\text{Na}$ 和微量元素^[3].

1.2.2 运行时间和条件

相关研究表明,生物膜反应器厌氧/好氧交替时间设定 12 h 可得到较好的处理效果^[10],厌氧和好氧阶段各设置为 6 h.反应器进水流量 $119 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,进水时间约 15 min,保持容器底部转子时刻转动使反应器中的溶液处于均匀混合状态.

合成废水的 COD 浓度设置为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 符合苏南地区的实际情况^[11].有研究表明,溶解氧在生物膜反应器液相和生物膜相及膜内部存在一个传递过程,因此生物膜法与传统活性污泥法相比需要更多的曝气量,相同情况下提高曝气量能使出水的含磷量更低^[12];另一方面,曝气量的增加也会打破原先在生物膜有效生物量^[13],综合考虑将本工艺好氧

阶段的曝气量控制在 $(3 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 部分聚磷菌在培养环境中适应的 pH 范围为 6~9, 还有部分聚磷菌 pH 生长范围为 6~8^[14], 偏碱性的环境中聚磷菌会有更好的表现^[15], 结合实际废水的 pH, 将进水的 pH 调节至 7.5. 聚磷菌的生长温度范围为 10~35℃^[14], 温度越高微生物代谢活性越快^[16], 本实验在室温较低时, 通过水浴加热将温度控制在 25℃, 当温度高于 25℃ 时不对其进行温度控制.

1.3 分析方法

1.3.1 常规监测项目

水质监测指标有: COD 采用重铬酸钾法测定; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用钼锑抗分光光度法测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定; DO 采用 inlab OXI7300 溶氧仪测定; pH 采用 inlab OXI7300 pH 计测定; 其他参数均参照文献[17]的方法.

1.3.2 荧光原位杂交法

将生物膜上的污泥样品固定后于 -20℃ 保存. 实验采用 PAOmix 探针即 PA0462 探针、PA0651 探针和 PA0864 探针的混合; 全菌探针则采用 EUB338mix 探针即 EUB338 探针、EUB338-II 探针和 EUB338-III 探针的混合, 其中 PAOmix 和 EUB338mix 混合探针分别采用 CY3 和 FITC 作为荧光染料, 所杂交出的图片分别为橙红色和绿色, 详见表 1. 经过处理的载玻片均匀涂布已固定的污泥样品. 污泥样品在 46℃ 杂交 2.0 h. 将杂交好的载玻片置于 48℃ 清洗管中恒温振荡 20 min, 避光干燥 20 min. 用共聚焦显微镜 LeicaDM2500 (Leica 仪器有限公司) 观察, 并用其软件 LASCore 摄取图片和分析^[13].

1.3.3 直接显微镜厚度测量法

利用显微镜对生物膜表面以及载体表面两次对焦成像, 通过物镜的移动距离得到生物膜厚. 具体操作方法如下: 生物膜样品从反应器中取出后直接放

表 1 微生物 FISH 探针序列表

探针	基因序列(5'-3')	探针修饰	目标微生物
PA0462	CCGTCATCTACWCAGG GTATTAAC	CY3(红)	Accumulibacter
PA0651	CCCTCTGCCAAACTCCAG	CY3(红)	Accumulibacter
PA0864	GTTAGCTACGGCACTAAA AGG	CY3(红)	Accumulibacter
EUB338	GCTGCCTCCCGTAGGAGT	FITC(绿)	whole-cell
EUB338-II	GCAGCCACCCGTAGGTGT	FITC(绿)	whole-cell
EUB338-III	GCTGCCACCCGTAGGTGT	FITC(绿)	whole-cell

置于显微镜观察平台上并加以固定, 选定观察倍数(一般为 100 倍)后对生物膜表面进行对焦, 直到获得清晰图像, 记下此时的显微镜微调刻度数; 继续通过微调钮调节物镜对载体表面进行对焦直至获得对载体表面的清晰图像, 记下此时的微调钮读数; 经校正后, 两次成像时微调钮读数之差即为所测生物膜厚^[19].

2 结果与讨论

2.1 反应器处理效能评价

选取挂式尼龙作为生物膜填料, 根据填料情况与实验目的采取活性污泥挂膜法进行挂膜^[20]. 取苏州某城市污水处理厂好氧段氧化沟中的污泥作为接种污泥, 挂膜阶段将尼龙填料浸没于接种污泥中曝气 24 h, 待污泥在填料上附着后转移至厌氧/好氧交替运行的反应器中. 启动阶段, 由于曝气的冲刷和搅拌的扰动, 刚挂上填料附着不稳的污泥会脱落下来, 留在填料上的污泥则逐渐适应反应器中的水力条件, 在填料上形成稳定附着的生物膜. 为监测反应器的运行状况, 连续测量进水、出水的 COD 和正磷酸盐浓度, 如图 2. 反应器运行 10 d 后, 厌氧好氧出水均在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 好氧阶段出水磷浓度接近零, 在该处理水平连续稳定运行了 50 d. 处理效率优于

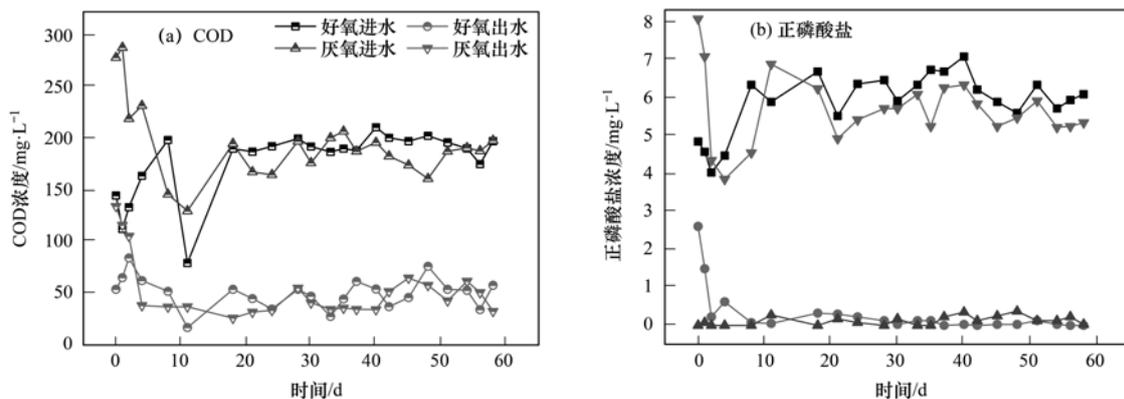


图 2 常规数据监测曲线

Fig. 2 Conventional data monitoring curves

现有的曝气生物滤池工艺^[3,7,8],且稳定性好。

本实验所使用的挂式尼龙生物填料和现有的序批式 SBBR 反应器中的悬浮填料相比,挂膜稳定时间从 25 d 缩短到了 10 d 左右,具有较高的运行效率^[12]。本工艺适合中国苏南地区的水质,在进水条件为较低的 COD 进水浓度和不超过 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷含量时都能达到良好的处理效果。

2.2 反应器运行速率评价

在培养阶段,测量厌氧、好氧段正磷酸盐的沿程浓度,制作磷的释放和吸收速率变化曲线观察反应器内聚磷菌的富集效能。根据反应器运行总时长,选取反应中 0、0.5、1、1.5、2、3、4、5、5.5 h 时刻的出水作为沿程测样点,磷的吸收与释放速率统一用浓度差比时间差算出并作为后一个时间点的速率值,如公式(1)所示:

$$v_{t_2} = \frac{c_2 - c_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

式中, t_1 表示时间为时刻 1(h), t_2 表示时间为时刻 2(h); c_1 表示在时刻 1 的磷浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), c_2 表示在时刻 2 的磷浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); v_{t_2} 表示在时刻 2 的吸磷或释磷速率 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ ^[22]。图 3(a)为好氧吸磷速率曲线,不同时间段的曲线均在 1 h 达到最高速率,培养时间由前到后对应的最高吸磷速率分别为 3.4、3.4、4.05、7.8、9.25、8 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$;随

着培养时间的增长,吸磷速率逐渐增大,在第 40 d 的吸磷速率高于 48 d,可能是进水的磷浓度较高刺激了释磷速率的增长所致。吸磷速率降到零表示反应结束,从 25 d 及之前到 48 d,反应所需时间从 4 h 缩短为 2 h,而传统 SBR 法除磷所需的时间为 3 h^[21],序批式移动床生物膜反应器所需的 240 min 曝气时间^[22],证明本反应器中聚磷菌富集程度的提高。图 3(b)为释磷速率曲线,不同时间段均在一开始的 0.5 h 达到最大值,培养时间由前到后对应的最高释磷速率分别为 3.4、4.2、3.25、4.15、6.75、6.1 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$,第 40 d 的释磷速率有质的提高,同样由于进水磷浓度的差别导致第 48 d 的速率值略低于第 40 d,已无更多增长。从 40 d 及之前到 48 d,反应所需时间从 4 h 缩短为 3 h,与 SBR、厌氧/好氧交替生物滤池等工艺厌氧段所需时间保持一致^[21,23]。

图 3(c)与 3(d)描述了吸磷和释磷浓度变化,可直观地体现反应器内的效能变化情况。反应器启动时进水磷负荷设置较低,逐渐提升到 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随培养时间的加长,斜率增大、反应加快,好氧段吸收与厌氧段释放磷的量成正比;也能看出随着培养时间的增长,浓度达到最值的时间即反应时间在缩短。

2.3 聚磷菌富集情况的分子生物评价

为了考察聚磷菌在生物膜反应器启动前后的变

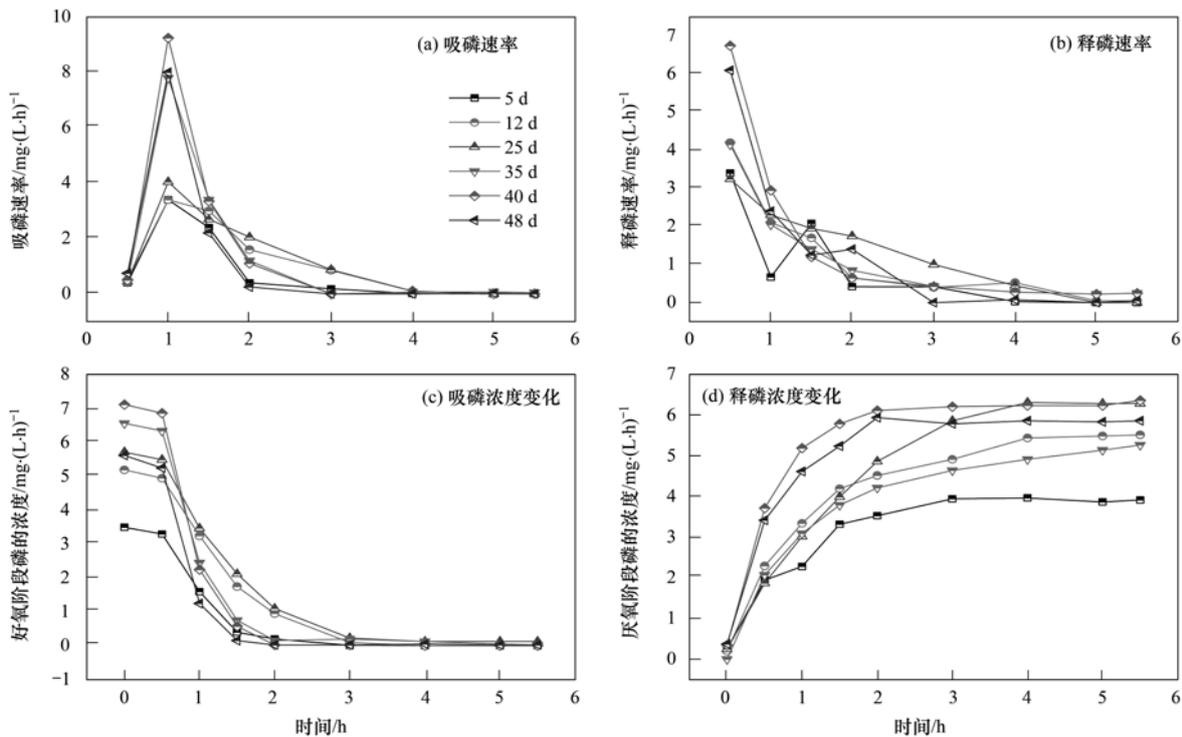
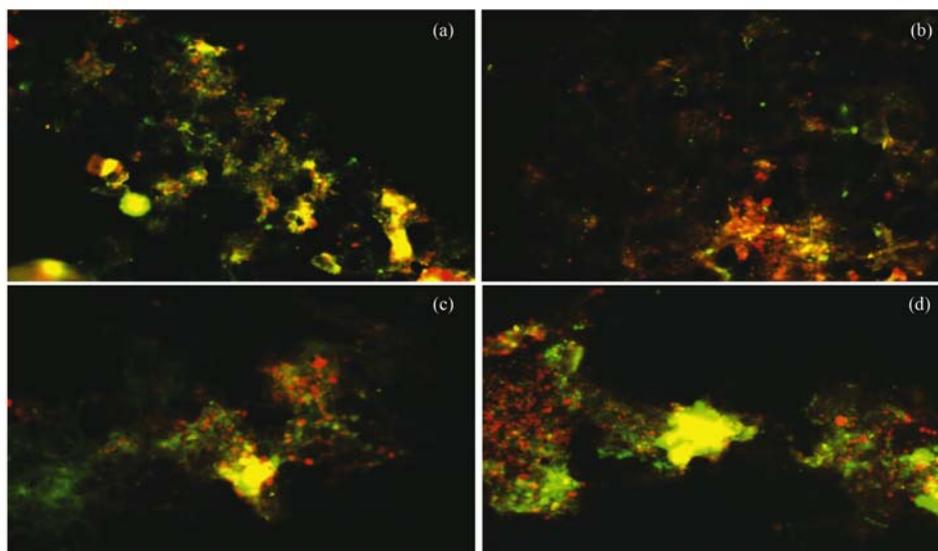


图 3 聚磷菌富集情况速率分析

Fig. 3 Rate analysis on the enrichment of PAOs

化情况,利用 FISH 技术分析从原接种泥到培养 20、35、50 d 泥样中聚磷菌的丰度,杂交图如图 4,其中亮黄色是 CY3 标记的荧光探针 PAOmix (红色) 和

FITC 标记的 EUBmix (绿色) 叠加色,通过生物图像分析软件 LASCORE 计算荧光强度得到聚磷菌占总菌的比例.



(a)原接种泥样; (b)20 d; (c)35 d; (d)50 d

图 4 荧光原位杂交图

Fig. 4 Fluorescence in situ hybridization images

数据显示,从原接种泥到培养 20、35、50 d 泥样中 *Accumulibacter* 含量分别为 48.96%、58%、64.47% 和 70%,经过 50 d 的富集,聚磷菌占全菌的比例从 48.96% 上升到 70%,培养后污泥内聚磷菌含量较原接种污泥所代表的传统活性污泥法有了很大提升,与王凤蕊等^[24]研究培养的除磷/蓄磷生物滤池中聚磷菌 72.5% 的丰度相近,远高于周律等^[22]在序批式移动床生物膜反应器上测得的 21% 和 16% 数值,说明本实验在该生物膜上富集了较高浓度的聚磷菌.从图 4 不难看出,随着时间的增长,其中红色部分的比例逐渐增加,这是生物膜上菌胶团形成使得聚磷菌黏结在一起所致,其中红色的聚磷菌由分散的个体逐渐变成较大的团聚结构紧密分布在菌体中,该现象在邹海明等^[25]

和亢涵等^[26]的研究中均有出现;从生物增长动力学的角度看,这是一个聚磷菌从快速增殖期经过积累到动力学增长末期的过程^[19].对照上述速率曲线图看,图 4(b)中 20 d 聚磷菌仍在快速繁殖,故速率上升并不明显;图 4(c)中 35 d 速率曲线有了很大的提升,对照此时的菌体明显增大,是积累期的表现;第 50 d,红色部分以大团聚体状紧密聚集在一起,对照速率曲线发现系统的速率也逐渐达到稳定.

2.4 聚磷菌富集情况的膜厚度评价

在运行 55 d 的生物膜反应器中截取一小段载体填料,进行直接显微镜法厚度测量.在生物膜表面各处测量 10 次,取平均值作为生物膜的观察厚度,表 2 中是测得的生物膜厚度.

表 2 生物膜厚度测量

Table 2 Thickness measurement of the biofilms

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
膜厚/ μm	30	33	47	27	32	18	28	32	18	24

上述数据取平均值得反应器中生物膜的厚度约为 28.9 μm .已知在动力学增长末期,活性生物量达到最大值,生物膜反应器中的液相达到稳定状态,此时生物膜一般很薄,一般不超过 50 μm ^[19],由此可

以判断生物膜反应器上的微生物正处动力学增长末期.该值远低于开始挂膜时的膜厚,从反应器其他方面的效能来看生物膜逐渐成熟,因此生物膜的发展会经历一个由厚到薄的过程,在此过程中,真正有效

的聚磷菌被高度富集。

3 结论

(1)本反应器运行 10d 后,出水的正磷酸盐去除率稳定在 95% 以上,COD 浓度在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,在该处理水平下稳定运行 50 d,实现对废水中磷和有机物的高效去除。

(2)培养过程中磷的吸收和释放速率逐渐增大,在第 48 d 达到最大吸磷及释磷速率,从最初相同的 $3.4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 分别提高到 $8 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $6 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,证明培养过程中聚磷菌不断富集,反应器效率提高。

(3)本研究的新生物膜反应器经过培养,在好氧阶段和厌氧阶段反应所需时间从 6 h 分别缩短到 2 h 和 3 h,高于其他形式反应器的处理效率。

(4)经 FISH 测得聚磷菌丰度达到最大值(70%),在第 35 d 和第 50 d 的杂交图上聚磷菌以团聚态出现,运用直接显微镜法测得生物膜平均厚度为 $28.9 \mu\text{m}$,表明聚磷菌已到动力学增长末期即生物膜已成熟。

参考文献:

- [1] Desmidt E, Ghyselbrecht K, Zhang Y, *et al.* Global phosphorus scarcity and full-scale p-recovery techniques: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, **45**(4): 336-384.
- [2] Bradford-Hartke Z, Lane J, Lant P, *et al.* Environmental benefits and burdens of phosphorus recovery from municipal wastewater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(14): 8611-8622.
- [3] Kodera 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.
- [4] 王凯军,余杰. 中国城市污水污泥处理处置问题探讨[A]. 见:中国环境保护产业协会. 2005 中国国际水处理技术高级专家论坛论文集[C]. 北京:中国环境保护产业协会, 2005. 23-27.
- [5] 刘智晓,崔福义,王树涛,等. 生物膜工艺实现高效除磷的关键问题及技术路线[J]. *给水排水*, 2009, **45**(4): 44-49. Liu Z X, Cui F Y, Wang S T, *et al.* Technical route and key problems in biological phosphorous removal by biofilm process with high efficiency [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, **45**(4): 44-49.
- [6] 戚韩英,汪文斌,郑昱,等. 生物膜形成机理及影响因素探究[J]. *微生物学通报*, 2013, **40**(4): 677-685. Qi H Y, Wang W B, Zheng Y, *et al.* Mechanism of biofilm formation and analysis of influencing factors [J]. *Microbiology China*, 2013, **40**(4): 677-685.
- [7] 孙健. 新型连续交替式厌氧/好氧生物滤池蓄磷及磷回收工艺的研究[D]. 上海:东华大学, 2013. 20-22. Sun J. Study on phosphorous bio-accumulation and recovery in the novel continuous alternating anaerobic/aerobic biofilter system [D]. Shanghai: Donghua University, 2013. 20-22.
- [8] 郑蓓,龙腾锐. 厌氧预酸化-间歇曝气生物膜系统的生物除磷性能[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1227-1232. Zheng B, Long T R. Performance of biological phosphorus removal in anaerobic pre-fermentation and intermittent aerated biofilm system treating domestic wastewater [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(5): 1227-1232.
- [9] 邱春生,聂海伦,孙力平,等. 不同碳源条件下聚磷菌代谢特性[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(6): 2191-2197. Qiu C S, Nie H L, Sun L P, *et al.* Metabolic properties of phosphorus-accumulating organisms at different carbon sources [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(6): 2191-2197.
- [10] 张成,秦华星,王康伟,等. 补充碳源对交替式厌氧/好氧生物滤池生物蓄磷/回收磷的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(8): 3602-3608. Zhang C, Qin H X, Wang K W, *et al.* Effects of carbon source supplement patterns on phosphorus bio-accumulation and harvesting from an alternating anaerobic/aerobic biofilter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(8): 3602-3608.
- [11] 赵小风,黄贤金,张兴榆,等. 区域 COD、SO₂ 及 TSP 排放的空间自相关分析:以江苏省为例[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1580-1587. Zhao X F, Huang X J, Zhang X Y, *et al.* Application of spatial autocorrelation analysis to the COD, SO₂ and TSP emission in Jiangsu province [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(6): 1580-1587.
- [12] 蒋山泉,翟俊,肖海文,等. 序批式生物膜(SBBR)工艺同步脱氮除磷研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2008, **40**(1): 64-68. Jiang S Q, Zhai J, Xiao H W, *et al.* Study on simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal in new sequencing batch biofilm reactor system [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2008, **40**(1): 64-68.
- [13] 荣宏伟,彭永臻,张朝升,等. 曝气量对 SBBR 生物除磷的影响研究[J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(5): 72-76. Rong H W, Peng Y Z, Zhang C S, *et al.* Study on effect of aeration rate on biological phosphorus removal in sequencing batch biofilm reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, **24**(5): 72-76.
- [14] 吴云,范丙全,隋新华,等. 适应非胁迫的高效聚磷菌筛选及聚磷特性研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3172-3178. Wu Y, Fan B Q, Sui X H, *et al.* Screening of two phenanthrene-utilizing and high-effective phosphorus-accumulating bacteria and their effects on phosphorus-accumulating characteristics [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(11): 3172-3178.
- [15] 周明璟,纪树兰,崔丹红,等. 厌氧/好氧交替快速筛选聚磷菌及其生理特性的研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(10): 1838-1844. Zhou M J, Ji S L, Cui D H, *et al.* Quick screening of polyphosphate-accumulating strains and its characteristics [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(10): 1838-1844.
- [16] 苗志加,薛桂松,翁冬晨,等. 不同温度及厌氧/好氧运行条件对聚磷菌衰减特性的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, **35**(2): 113-117, 123.

- Miao Z J, Xue G S, Weng D C, *et al.* Effect of different temperature and anaerobic/aerobic conditions on the decay characteristics of PAOs[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, **35**(2): 113-117, 123.
- [17] DIN 38410-1-1987, 德国检验水、废水和污泥的标准方法. 水的生物学-生态学分析(M组). 流动水(M1)生物学检验计划和程序(M1)的通用信息[S].
DIN 38410-1-1987, German standard methods for the examination of water, waste water and sludge; biological-ecological analysis of water (group M); general information on planning and procedure in the biological examination of flowing waters (M1)[S].
- [18] 陈晓杰. 污泥转移 SBR 工艺中聚磷菌菌群特性研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014. 34-36.
Chen X J. A study on characteristics of polyphosphate-accumulating bacteria community structure in sludge-Shifting SBR process [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2014. 34-36.
- [19] 刘雨, 赵庆良, 郑兴灿. 生物膜法污水处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 23-25.
Liu Y, Zhao Q L, Zheng X C. Biofilm wastewater treatment technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. 23-25.
- [20] 程晓玲, 郑俊, 程晓虎. 交替曝气两级生物滤池除磷工艺挂膜启动研究[J]. *新技术新工艺*, 2009, (11): 77-80.
Cheng X L, Zheng J, Cheng X H. Research on film formation and start-up of phosphorus removal in two-stage biological filter by alternating aeration[J]. *New Technology & New Process*, 2009, (11): 77-80.
- [21] 孙培德, 蒋涛, 钟晓. 城镇污水厂生物除磷工艺优化理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012. 48-57.
Sun D P, Jiang T, Zhong X. Theory and practice of biological phosphorus removal process optimization in urban wastewater treatment plant biological phosphorus removal process optimization [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012. 48-57.
- [22] 周律, 方国锋, 姜丽丽. 序批式移动床生物膜反应器脱氮除磷特性及机理[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, **53**(5): 647-653.
Zhou L, Fang G F, Jiang L L. Nitrogen and phosphorus removal mechanisms in a sequencing batch moving bed biofilm reactor [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, **53**(5): 647-653.
- [23] 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.
Wang F R, Li Y W, Li D X, *et al.* Characteristics of the biofilm in an alternating anaerobic/aerobic biofilter system for phosphorous removal[J]. *Technology of Water Treatment*, 2012, **38**(1): 96-100.
- [24] 王凤蕊, 张顺, 田晴, 等. 碳源调控下除磷/蓄磷生物滤池的生物膜特性分析[J]. *微生物学通报*, 2013, **40**(12): 2227-2236.
Wang F R, Zhang S, Tian Q, *et al.* Biofilm characteristics of an anaerobic/aerobic biofilter varied with carbon source regulation [J]. *Microbiology China*, 2013, **40**(12): 2227-2236.
- [25] 邹海明, 吕锡武, 顾倩. 低温环境下聚磷微生物的富集驯化研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, **41**(7): 70-77.
Zou H M, Lv X W, Gu Q. Acclimation of microorganisms responsible for phosphorus removal at low temperature [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2014, **41**(7): 70-77.
- [26] 亢涵, 王秀衢, 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.
Kang H, Wang X H, Li N, *et al.* Characterization of phosphate-accumulating organisms in starting-up EBPR by FISH analysis [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 80-84.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172