

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

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

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放	何吉成(1)
北京上甸子站气相色谱法大气 CH ₄ 和 CO 在线观测方法研究	汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)
2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子	朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)
广东东江流域多氯萘的大气沉降研究	王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)
塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征	段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)
紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究	王灿,席劲瑛,胡洪营,姚远(32)
春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征	丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)
春季胶州湾海水汞的形态研究	许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)
丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素	蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)
塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化	陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)
某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟	马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)
北京市城市降雨径流水质评价研究	侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)
重庆市路面降雨径流特征及污染源解析	张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)
沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究	陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)
Pd/TiO ₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究	张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)
pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响	冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)
给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究	陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)
安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价	宋大平,庄大方,陈巍(110)
染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析	曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)
间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究	谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)
pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响	庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)
硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究	吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)
农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用	徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)
高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究	廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)
活性污泥对四环素的吸附性能研究	陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)
加油站油类污染物自然衰减现场试验研究	贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)
生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法	宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)
利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数	王晓玲,尹军,高尚(175)
数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响	董峰,张捍民,杨凤林(181)
不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响	刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)
间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究	曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)
鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究	陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)
北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估	陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)
外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究	杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)
赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建	朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究	别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)
纳米 TiO ₂ 对短裸甲藻的毒性效应	李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)
苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险	李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)
电子废物拆解区农业土壤中 PCNs 的污染水平、分布特征与来源解析	王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)
洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险	刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)
湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价	刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)
广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律	项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)
缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究	吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)
可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复	付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)
胡敏酸对汞还原能力的测定和表征	江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)
Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响	黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)
油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究	张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)
利用 PCR-DGGE 分析未开发油气田地微生物群落结构	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)
黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与 AMF 群落多样性研究	封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)
鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析	张健,关连珠,颜丽(323)
杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响	赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)
《环境科学》征稿简则(7)	
《环境科学》征订启事(19)	
信息(47,70,202,304)	

间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究

曾龙云^{1,3}, 杨春平^{1,2*}, 郭俊元^{1,3}, 罗胜联²

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 南昌航空大学环境与化学工程学院, 南昌 330063; 3. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

摘要: 通过间歇曝气、连续进水的运行方式使生物膜系统交替处于厌氧/好氧状态, 据此研究了不同进水挥发性脂肪酸 (volatile fatty acids, VFAs) 质量浓度、运行周期以及反冲洗条件下生物滤池的生物除磷性能. 实验中以模拟生活污水为处理对象, 滤池水力停留时间为 1.3 h, 进水流速为 $5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 气水比为 8:1, 进水平均 COD 负荷、氨氮负荷和磷酸盐负荷分别为 4.7、0.41 和 $0.095 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$. 结果表明, 在一个运行周期内生物滤池能有效实现释磷和吸磷; 当进水 VFAs 质量浓度 (以 COD 计) 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、运行周期为 6 h 时, 生物滤池除磷性能最佳, 曝气阶段滤池出水磷去除负荷可达 $0.059 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 同时 COD 和氨氮的去除负荷分别为 $3.8 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.28 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 出水平均磷、COD 和氨氮质量浓度为 1.8、43.6、8.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 滤池中存在一定程度的氮流失; 中止反冲洗使生物滤池除磷性能迅速下降, 2 d 后滤池除磷效率低于 40%, 随即恢复反冲洗使滤池除磷效果出现短暂增强, 再经 2 d 反冲洗后除磷效率又回到原有水平. 可见, 在间歇曝气、连续进水的运行方式下生物滤池成功实现了生物除磷并具有较好的磷负荷去除效果, 充足而稳定的进水 VFAs 质量浓度、适当的运行周期以及较高频率的反冲洗有利于滤池的生物除磷性能.

关键词: 间歇曝气; 生物滤池; 生物除磷; 负荷; 反冲洗

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0197-06

Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter

ZENG Long-yun^{1,3}, YANG Chun-ping^{1,2}, GUO Jun-yuan^{1,3}, LUO Sheng-lian²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 3. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: Under intermittent aerated and continuous fed operation where the biofilm system was subjected to alternated anaerobic/aerobic condition, the effect of influent volatile fatty acids (VFAs) concentrations, operation cycle and backwash on the biological phosphorus removal performance of the biofilter was studied. In the experiment, synthetic domestic wastewater was used, and the influent velocity was $5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ with gas versus liquid ratio of 8:1 and hydraulic retention time (HRT) of 1.3 h, resulting in average COD, ammonium and phosphorus load of 4.7, 0.41 and $0.095 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ respectively. Results show that, ① effective release and uptake of phosphorus was achieved in a operation cycle; ② when influent VFAs was $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (calculated by COD value) and operation cycle was 6 h the filter performed best in phosphorus removal, the phosphorus loading removal rate can be as much as $0.059 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ at the aerated phase with those of COD and ammonium being $3.8 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ and $0.28 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ respectively, and with average effluent phosphorus, COD and ammonium concentrations being 1.8, 43.6 and $8.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which shows nitrogen loss also happened; ③ the pause of backwash decreased the phosphorus removal performance rapidly with the removal efficiency lower than 40% in two days, but the consequent daily backwash operation gave a short improvement on the phosphorus removal, which disappeared in another two days. Thus, it is shown that biological phosphorus removal achieved with better phosphorus loading removal performance in the biofilter under intermittent aerated and continuous fed operation, and that sufficient and stable influent VFAs concentration, proper operation cycle, and more frequent backwash favored the performance.

Key words: intermittent aeration; biological filter; biological phosphorus removal; load; backwash

曝气生物滤池 (biological aerated filter, BAF) 是一种新型的污水处理技术, 它不仅抗冲击负荷能力强、氧传输效率高、去除 COD 和脱氮效果好, 还具有无污泥膨胀、占地面积小、操作简单以及便于现有污水处理工艺的后期改建等优点^[1~5]. 在传统运行方式下, 由于滤池内部不存在交替的厌氧/好氧条件, 曝气生物滤池等生物膜系统中除磷效果并不理想, 对磷酸盐去除率 < 20%^[6~9].

在生物除磷过程中, 聚磷微生物 (phosphorus accumulating organisms, PAOs) 先在厌氧条件下利用胞内聚磷酸盐的分解提供能量, 吸收 VFAs 并转化

收稿日期: 2011-02-14; 修订日期: 2011-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50778066); 国家科技支撑计划重大项目 (2006BAJ04A13)

作者简介: 曾龙云 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: zly493417100@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: chunpingyang@gmail.com

为聚羟基烷酸 (polyhydroxyalkanoates, PHAs), 在随后的好氧阶段降解 PHAs 提供能量以超量吸收磷^[10,11]. 基于此原理, 近年来国内外的一系列研究通过改进运行工艺在生物滤池中成功实现了生物除磷, 主要形式有: 间歇曝气、间歇进水的反应器^[12~14], 周期性改变水流方向和曝气对象的连续流系统^[2,15,16], 以及厌氧预酸化-间歇曝气生物膜系统^[17]. 这些研究有的取得了较高的除磷效率, 但仍存在系统负荷较低、运行方式复杂等问题. 其中, Shanableh 等^[15]在研究中发现不同的运行周期会改变反应器中的微环境, 这可以促进或抑制释磷、吸磷和反硝化过程, 因而对生物滤池中磷和氮的去除和转化有着重要影响; 郑蓓等^[17]通过开发新的生物膜除磷系统和运行方式, 将生物膜中富集的磷由厌氧释磷液排出, 延长了系统的运行周期、减少了反冲洗次数, 并取得了良好的运行效果. 在此之外的相关研究中, Fdz-Polanco 等^[18]发现在进水 COD/NH₄⁺-N > 4 时, 好氧异养菌会大量聚集于生物滤池底部进水口附近, 这会使进水中的 VFAs 被大量消耗而减少 PAOs 对 VFAs 的利用率; Morgenroth 等^[19]建议, 为有效实现生物除磷, 应该对生物膜系统采用有规律而强烈的反冲洗使生物膜变薄.

本研究提出对单个生物滤池采用间歇曝气、连续进水的运行方式实现生物除磷, 在提高生物滤池的负荷和简化运行的同时, 这样可以在滤池内提供交替的厌氧/好氧条件使生物膜系统中富集较多的 PAOs, 通过 PAOs 好氧吸磷后进行反冲洗排出富磷污泥, 最终提高生物滤池的除磷性能. 在此运行方式下, 实验选取进水 VFAs 含量、运行周期以及反冲洗 3 个关键因素展开研究, 这不仅能明确各因素对生物滤池除磷性能的影响, 还可以为多级生物滤池组合运行实现同步生物脱氮除磷提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验所用生物滤池如图 1 所示, 由有机玻璃制成, 总高度约为 1.6 m, 内径 0.1 m. 底部是配水室, 气、液在这里混合均匀并进入滤池. 配水室上方是用来支撑滤料的托板, 板上均匀打孔, 孔直径约为 5 mm. 滤料底部是直径约为 3~6 cm 的砾石组成的高 20 cm 的承托层, 滤料层高 80 cm, 滤料采用萍乡市环球化工填料有限公司生产的陶粒填料, 粒径 4~6 mm, 密度 1.8~2.0 g·m⁻³, 比表面积 500~750 m²·m⁻³.

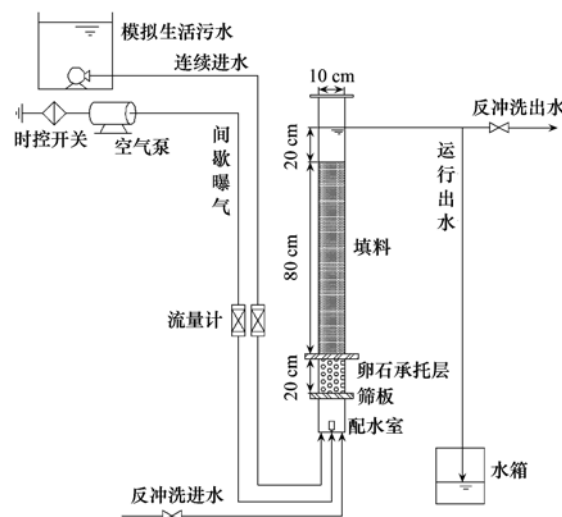


图 1 反应器示意

Fig. 1 Schematic of the reactor

1.2 模拟生活污水

实验用水为模拟生活污水, 进水 COD、氨氮和 PO₄³⁻-P 平均浓度分别为 244、22 和 5 mg·L⁻¹. VFAs 用乙酸、丙酸按 C-mol 比 (碳原子数摩尔比) 1:1 配制, pH 用碳酸钠-碳酸氢钠混合液调至 6.5~7.5. 每 L 模拟污水中配加 0.6 mL 营养液, 营养液配制参照文献[10]的方案.

1.3 实验方法

接种污泥取自长沙第二污水处理厂, 实验在接种并驯化 1 个月后开始. 整个实验中保持进水流速为 5 L·h⁻¹, 气水比为 8:1, 滤池内水力停留时间约 1.3 h. 进水由水泵将模拟污水连续从生物滤池底部泵入, 气水同向, 曝气采用间歇方式, 由空压机串联时控开关实现. 一个周期由停曝段和曝气段组成, 进水是连续的, 停曝段出水和曝气段出水水质不同, 前者 PO₄³⁻-P 浓度将上升且 COD、氨氮去除率较低, 后者将吸收 PO₄³⁻-P 且对 COD 和氨氮去除率较高. 实验中不同阶段运行条件设置如表 1 所示, 在 I~III 阶段只改变进水 VFAs 浓度; IV 阶段补充进水 VFAs 浓度, 在生物滤池除磷性能恢复后, 先停止、再启动反冲洗以观察前后除磷效率变化; V~VI 阶段改变运行周期. 在运行周期为 8 h 和 6 h 时, 停曝段和曝气段时长相等, 在运行周期为 5 h 时, 停曝段和曝气段时长不相等, 分别为 2 h 和 3 h. 除 IV 阶段外, 装置每天进行一次反冲洗, 操作方法采用气水联合反冲洗, 操作参照文献[20]的方法.

在待测周期开始前, 水箱被洗净以盛装生物滤

池出水,停曝段和曝气段的出水分别装入不同水箱. 在停曝段和曝气段结束前 10 min 取水样代表各段的出水,通过测定 COD、氨氮、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、硝酸盐氮和

亚硝酸盐氮浓度分析生物滤池运行效果. 在Ⅳ阶段观察期间,周期内每小时取出水测定,以显示滤池除磷性能变化.

表 1 生物滤池反应器不同阶段运行参数

Table 1 Operational parameters of the biofilter at different stages

参数	I 阶段	II 阶段	III 阶段	IV 阶段	V 阶段	VI 阶段
进水 VFAs 浓度(以 COD 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	100	150	50	100	100	100
周期/h	8	8	8	8	6	5

1.4 分析方法

COD 用环宝 MS-3 型微波消解 COD 测定仪测定,pH 用雷磁 pHS-25 型数字 pH 计测定. 氨氮、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮用国标法测定^[21].

2 结果与讨论

2.1 生物滤池对 COD 和氨氮的去除

I ~ III 和 V ~ VI 阶段生物滤池的进水、停曝段出水和曝气段出水情况如图 2 所示. 在停曝段滤池能去除相当一部分 COD 和氨氮,但曝气段的去除效果更佳,实验中不同阶段对 COD 和氨氮的去除性能无明显变化. 各阶段停曝出水 COD 和氨氮平均浓度分别为 $72 \sim 105 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $12.6 \sim 13.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均去除率分别为 $56.3\% \sim 70.9\%$ 和 $33.4\% \sim 45.3\%$; 曝气出水 COD 和氨氮平均浓度分别为 $40 \sim 51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7.8 \sim 9.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均去除率分别为 $79.2\% \sim 83.6\%$ 和 $56.3\% \sim 64.2\%$. 此外,实验中所有情况下出水中均未检测到明显的硝酸盐氮和亚硝酸盐氮(硝酸盐氮 $< 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝酸盐氮更低).

在生物脱氮污水处理中,用于同化作用的氨氮对 BOD 最大去除比例为 $0.041^{[7]}$,由此可见滤池内存在一定程度的氮流失. 与异养微生物相比,硝化细菌生长速率慢并且对溶解氧亲和能力低^[22],生物滤池处于厌氧/好氧交替的状态不利于其大量生长繁殖,因此硝化性能有限,不能将氨氮大量转化为硝态氮. 生物膜是一个复杂的生态系统,随着膜内深度的变化,底物和微生物的分布随之改变^[23,24],可以推测在生物膜内溶解氧和底物的浓度梯度下应该发生了同步硝化反硝化反应,使进水的一部分氨氮最终通过反硝化以氮气的形式除去.

2.2 生物滤池对磷的去除

从图 2 中可以看出,在间歇曝气、连续进水的运行方式下,停曝段和曝气段分别可以实现有效地释磷和吸磷. 在不同阶段设置的运行条件下,滤池出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度变化明显: I 阶段停曝段出水和曝

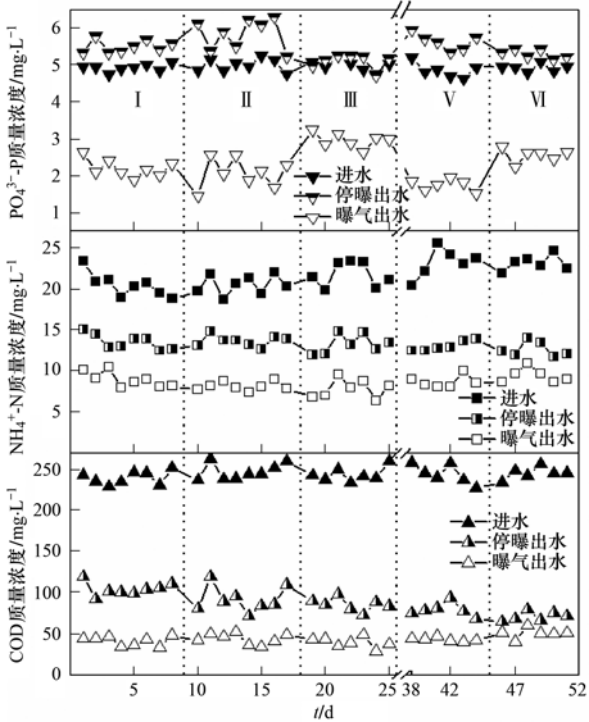


图 2 不同阶段生物滤池进、出水变化

Fig. 2 Variations of influent and effluent of the biofilter at different stages

气段出水的平均值分别为 $5.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相对进水平均释磷率和吸磷率分别为 11.7% 和 55.2% ; II 阶段进水 VFAs 质量浓度增加后磷的释放和吸收都有所增强,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均值分别变为 $5.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均释磷率和吸磷率分别为 17.1% 和 58.4% ; III 阶段进水 VFAs 质量浓度减少后除磷性能明显下降; V 阶段进水 VFAs 质量浓度恢复后,运行周期缩短为 6 h,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均值分别为 $5.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均释磷率和吸磷率分别为 16.0% 和 63.9% ; VI 阶段运行周期进一步缩短后,除磷效率再次下降.

从以上结果可以看出,进水中 VFAs 的质量浓度(以 COD 计)从 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后生物滤池对磷的去除性能有所提升,但也应注意到

停曝段和曝气段出水中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度都出现了更大的波动. 这期间每天进行1次反冲洗,反冲洗后会使得滤池中微生物大量减少,PAOs与聚糖菌(glycogen accumulating organisms, GAOs)之间的种群关系发生改变. 在这种频繁更新生物膜的情况下,进水中VFAs的质量浓度增加后,生物膜系统中的GAOs可能有机会大量繁殖进而与PAOs竞争底物,使生物滤池的除磷性能受到影响. 当VFAs质量浓度(以COD计)下降到 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,有限的VFAs会被聚集于生物滤池底部的普通异养菌消耗掉大部分导致PAOs对VFAs的吸收不足,滤池除磷性能受到抑制. 在进水中VFAs的质量浓度(以COD计)为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,运行周期从8 h缩短为6 h后,除磷效果有所增强,而停曝段继续缩短1 h后却产生了相反的结果. 这与郑俊^[2]和Shanableh^[15]等的结果相似,可见适当缩短运行周期有利于增强生物滤池的除磷性能,而太短的周期使厌氧/好氧条件交替过于频繁,不利于PAOs充分释磷和储存PHAs,使除磷性能下降. 因此在本实验的运行方式下,应提供充足而稳定的进水VFAs质量浓度和适宜的运行周期来维持生物滤池的除磷性能.

2.3 反冲洗对除磷性能的影响

在Ⅲ阶段除磷性能下降后,Ⅳ阶段进水VFAs质量浓度(以COD计)调回到 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,生物滤池除磷性能逐渐恢复. 待去除效率稳定后记录下周期内每小时出水磷质量浓度,再停止反冲洗,开始观察生物滤池除磷效率的变化,结果如图3所示.

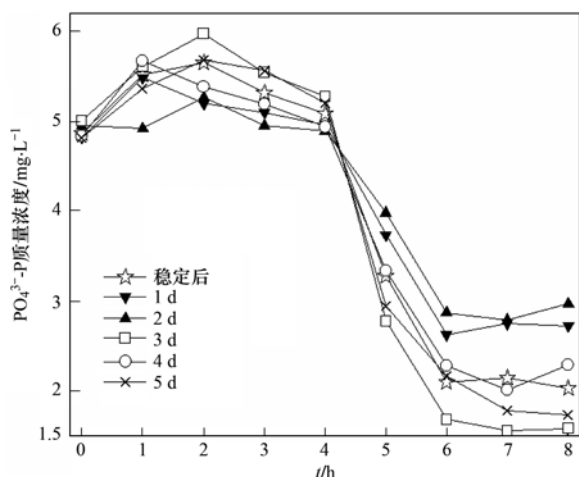


图3 反冲洗前后生物滤池出水磷的周期变化

Fig. 3 Periodic change of effluent phosphorus before and after backwash

在停止反冲洗前,运行周期内出水磷质量浓度

呈现明显的变化规律:停曝段出水磷质量浓度逐渐上升,到达最大值再逐渐下降接近进水浓度;曝气段开始后出水磷质量浓度迅速下降,之后基本保持稳定. 停止反冲洗后第1 d,停曝段磷的释放和曝气段磷的吸收都明显下降;到第2 d除磷性能进一步下降,曝气段出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度 $>3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除效率 $<40\%$. 至此启动对生物滤池每天进行反冲洗,第3 d除磷效果出现提升,释磷和吸磷都有所增强;第4、5 d基本回到原有水平.

在反冲洗停止后,滤池的连续运行会导致生物膜增厚,过滤阻力明显增大,滤池内气水分布和传质效率受到严重影响^[25],这会减弱溶解氧和VFAs在整个生物膜中的充分扩散,不利于厌氧/好氧条件的交替和PAOs对VFAs的吸收利用,因而除磷性能明显下降. 反冲洗开始后,由于之前累积变厚的生物膜使滤池内阻力增大,反冲洗压力也会相应增强,这会使反冲洗后生物膜更薄,滤料也更加疏松,有利于溶解氧和VFAs在生物膜中的扩散,所以第3 d除磷效果出现提升. 之后的反冲洗每天进行,生物膜的厚度和填料间的间隙相对固定,因而除磷性能也回到原有水平. 可见,正如Morgenroth等^[19]的建议,较高频率的反冲洗可以保持较薄的生物膜,有利于提高生物滤池的除磷效率.

2.4 与文献中生物滤池除磷性能比较

文献中生物滤池除磷实现最佳磷负荷去除量时的部分运行参数列于表2中. 与其他同类研究相比,本实验运行方式下滤池的水力停留时间较短而进水COD和磷负荷较高,同时负荷的去除量也较大. 但是滤池对磷的去除率并不高,而停曝段出水的磷也需要进一步处理. 因此,生物滤池在间歇曝气、连续进水的运行方式下,可以采取适当延长水力停留时间,多个生物滤池组合运行以及与其他工艺联合运行的方法来实现磷的整体去除并提高去除效率. 另外,实验中生物滤池对氨氮也有一定去除效果,并且出水中一直没有硝态氮累积,这一特点或许有助于该运行方式在脱氮除磷中得到应用.

3 结论

(1)在间歇曝气、连续进水的运行方式下,生物滤池在一个运行周期内能进行有效的释磷和吸磷,从而成功实现生物除磷.

(2)不同进水VFAs浓度和运行周期对生物滤池的COD和氨氮去除效率无明显影响,两者在实验中停曝段平均去除率分别为 $56.3\% \sim 70.9\%$ 和

表 2 文献中生物滤池最佳磷负荷去除性能对比

Table 2 Comparison of optimal phosphorus load removal performances of biological filters in literatures

反应器描述	污水性质	水力停留 时间/h	进水 COD 负荷 /g·(L·d) ⁻¹	COD 去除负荷 /g·(L·d) ⁻¹	进水 TP 负荷 /g·(L·d) ⁻¹	TP 去除负荷 /g·(L·d) ⁻¹	出水 P 浓度 /mg·L ⁻¹	文献
厌氧预酸化-间歇 曝气生物膜系统	实际污水	4.6	1.4	1.0	0.024	0.021	0.72	[17]
交替曝气 两级生物滤池	实际污水	1.8	5.1	未给出	0.064	0.051	0.94	[2]
2 个曝气生物滤池串联,周期 性改变进水流向和曝气对象	人工配制污水	1.1	1.1	>0.90	0.18	0.074	5.0	[15]
单个生物滤池间歇 曝气间歇进水	人工配制污水	4.0	1.8	1.7	0.03	0.024	1.0	[13]
单个生物滤池间歇 曝气、连续进水	人工配制污水	1.3	4.7	3.8	0.095	0.059	1.8	本研究

33.4%~45.3%,曝气段分别为 79.2%~83.6% 和 56.3%~64.2%,并且出水中一直无硝态氮累积,生物滤池内存在一定程度的氮流失。

(3) 当进水 VFAs 浓度(以 COD 计)为 100 mg·L⁻¹、周期为 6 h 时,生物滤池除磷性能最佳,平均释磷率和吸磷率分别为 16.0% 和 63.9%,曝气段磷去除负荷为 0.059 g·(L·d)⁻¹,出水 PO₄³⁻-P 浓度为 1.8 mg·L⁻¹。与文献中生物滤池除磷研究相比,本研究中最佳磷负荷去除量相对较高。

(4) 反冲洗对生物滤池除磷性能有着直接的影响,实验中应保持较高频率的反冲洗以避免生物膜太厚影响底物在生物膜中的扩散。

(5) 在本实验运行方式下,充足而稳定的进水 VFAs 浓度以及适当长度的运行周期有利于生物滤池的除磷性能。

参考文献:

[1] 李汝琪, 钱易, 孔波, 等. 曝气生物滤池去除污染物的机理研究 [J]. 环境科学, 1999, **20**(6): 49-52.

[2] 郑俊, 程晓玲, 汪荣. 交替曝气时间对两级生物滤池除磷的影响 [J]. 中国给水排水, 2008, **24**(23): 29-32.

[3] Ryu H D, Kim D, Lim H E, *et al.* Nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater in four-stage biological aerated filter system [J]. Process Biochemistry, 2008, **43**(7): 729-735.

[4] 邓康, 黄少斌, 胡婷. 曝气生物滤池好氧反硝化脱氮的研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2945-2949.

[5] 陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. 内循环对 A²/O-曝气生物滤池工艺脱氮除磷特性影响 [J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 193-198.

[6] Wang B Z, Li J, Wang L, *et al.* Mechanism of phosphorus removal by SBR submerged biofilm system [J]. Water Research, 1998, **32**(9): 2633-2638.

[7] 郑俊, 吴浩汀. 曝气生物滤池工艺的理论及工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 98, 132.

[8] Li J, Xing X H, Wang B Z. Characteristics of phosphorus removal from wastewater by biofilm sequencing batch reactor (SBR) [J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, **16**(3): 279-285.

[9] Ha J H, Ong S K. Nitrification and denitrification in partially aerated biological aerated filter (BAF) with dual size sand media [J]. Water Science and Technology, 2007, **55**(1-2): 9-17.

[10] 张超, 陈银广, 刘燕. 不同丙酸/乙酸长期驯化的活性污泥对 EBPR 的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2548-2552.

[11] 黄荣新, 张杰, 谌建宇. 反硝化除磷脱氮系统中 DPB 的驯化富集培养 [J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1252-1256.

[12] Gonçalves R F, Rogalla F. Biological phosphorus removal in fixed films reactors [J]. Water Science and Technology, 1992, **25**(12): 165-174.

[13] Chiou R J, Ouyang C F, Lin K H, *et al.* The characteristics of phosphorus removal in an anaerobic/aerobic sequential batch biofilter reactor [J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(1): 57-65.

[14] 顾丹亭, 傅金祥, 李微. 曝气/间歇曝气两级生物滤池去除 COD 和 TP 研究 [J]. 中国给水排水, 2007, **23**(21): 70-72.

[15] Shanableh A, Abeyasinghe D, Hijazi A. Effect of cycle duration on phosphorus and nitrogen transformations in biofilters [J]. Water Research, 1997, **31**(1): 149-153.

[16] Pak D, Chang W. Factors affecting phosphorous removal in two biofilter system treating wastewater from car-washing facility [J]. Water Science and Technology, 2000, **41**(4-5): 487-492.

[17] 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.

[18] Fdz-Polanco F, Méndez E, Urueña M A, *et al.* Spatial distribution of heterotrophs and nitrifiers in a submerged biofilter for nitrification [J]. Water Research, 2000, **34**(16): 4081-4089.

[19] Morgenroth E, Wilderer P A. Controlled biomass removal-the key parameter to achieve enhanced biological phosphorus removal in biofilm systems [J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(7): 33-40.

[20] 郭俊元, 杨春平, 曾龙云, 等. 回流比水力负荷对前置反硝化生物滤池工艺处理污水的影响研究 [J]. 环境科学学报,

- 2010, **30**(8): 1615-1621.
- [21] 国家环境保护总局. 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. 246-248, 259-261, 271-274, 279-281.
- [22] Gieseke A, Arnz P, Amann R, *et al.* Simultaneous P and N removal in a sequencing batch biofilm reactor: insights from reactor- and microscale investigations [J]. *Water Research*, 2002, **36**(2): 501-509.
- [23] Falkentoft C M, Harremoës P, Mosbæk H. The significance of zonation in a denitrifying, phosphorus removing biofilm [J]. *Water Research*, 1999, **33**(15): 3303-3310.
- [24] Hibiya K, Nagai J, Tsuneda S, *et al.* Simple prediction of oxygen penetration depth in biofilms for wastewater treatment [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2004, **19**(1): 61-68.
- [25] 李军, 刘伟岩, 杨晓冬, 等. 曝气生物滤池应用和研究中的几个关键问题 [J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(14): 10-14.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址:北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjcx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert ...	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene ...	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, JIN Yun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《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1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 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. 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行