ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 37 卷 第 12 期
2016 年 12 月 15 日

目 次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 …… 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 …… 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 …… 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的季节变化及来源分析 …… 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 …… 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 …… 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}C$ 观测的大气 CO_2 来源解析 …… 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 …… 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 …… 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 …… 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 …… 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 …… 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 …… 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 …… 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 …… 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 …… 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 …… 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 …… 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 … 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 …… 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 …… 卓海华, 孙志伟, 谭凌智, 吴云丽, 兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 …… 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 …… 张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 …… 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 …… 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征 …… 郭卉, 虞敏达, 何小松, 罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 … 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 朱亚鹏, 李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 …… 沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 …… 赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO_2 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 …… 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 …… 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 …… 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N_2H_4 下 SBR 中硝化微生物特性 …… 肖芃颖, 张代钧, 卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 …… 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 …… 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 …… 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 …… 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 …… 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO_2 排放的综合影响 …… 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 …… 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 …… 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 …… 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 …… 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征 …… 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-菲对蜈蚣草根部不同碳基团的影响 …… 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 …… 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净,Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 …… 孙航, 蒋煜峰, 石磊平, 慕仲锋, 展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 …… 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李藜,宋波(4867)
Mg-Al-Me(Me = La,Ce,Zr)复合氧化物制备及其除氟性能 …… 汪爱河,周康根,刘行, 陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 …… 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 …… 王春峰, 陈冠飞, 朱艳臣, 姚丹, 皇晓晨, 王连军(4891)
《环境科学》第 37 卷(2016 年)总目录 …… (4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性

王文东[1,2],马翠[1],刘荟[1],范银萍[1],刘国旗[1],张珂[1]
(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院,西安 710055; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所,嘉兴 314006)

摘要: 本研究将生物转盘和平流式沉淀池设计理念相结合,开发出对水中致浊物质、有机组分、氨氮和总磷具有同步去除性能的一体式生物净化-沉淀池,考察了进水水力负荷对其污染物净化性能的影响规律. 结果表明,在特定转盘转速和水质条件下,浊度、有机组分和氨氮的平均去除率随水力负荷的增大均呈先相对稳定后下降趋势,浊度和有机组分与氨氮平均去除率分别在 0.036 g·(m²·d)⁻¹与 0.064 g·(m²·d)⁻¹时达到最大. 与浊度、有机组分和氨氮不同,水力负荷对总磷的去除效果影响较大,进水水力负荷在 0.064 m³·(m²·d)⁻¹时,总磷平均去除率最差,适当减小或增大水力负荷,均有助于除磷过程的进行. 进一步研究发现,硝化和除磷过程对水相中的有限碳源及溶解氧存在竞争关系. 沿水流方向,盘片表面的微生物具有良好的种群配合和沿程分布特点,保证了在不利水力负荷条件下,工艺仍具有一定的去污效果,在微污染水体的强化净化处理中具有一定的应用前景.

关键词: 微污染; 生物转盘; 沉淀池; 水力负荷; 生物相
中图分类号: X131.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)12-4727-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201605214

Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank

WANG Wen-dong[1,2], MA Cui[1], LIU Hui[1], FAN Yin-ping[1], LIU Guo-qi[1], ZHANG Ke[1]
(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Department of Environmental Technology and Ecology, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China)

Abstract: Based on the designing concepts of rotating biological disk and settling tank, a hybrid biological purification and settling tank was developed to achieve simultaneous removal of turbidity causing materials, organic matters, NH_4^+-N, and TP. Experimental results showed that under certain rotary speed and water quality conditions, the removal rates of both turbidity and organic matters and NH_4^+-N were relatively stable first and then started to decrease with the increase of hydraulic loading rate. The highest value was achieved at 0.036 g·(m²·d)⁻¹ and 0.064 g·(m²·d)⁻¹ respectively. Compared with turbidity and TOC and NH_4^+-N, the removal rate of TP was greatly influenced by hydraulic loading rate. The average TP removal was the worst at 0.064 g·(m²·d)⁻¹. Appropriately decreasing or increasing the hydraulic load was helpful to the phosphorus removal process. Further study showed that nitrification and dephosphorization processes competed for the limited carbon source and DO in the water phase. Along the flow direction, the surface of the disc populations of microorganisms with good coordination and distribution along the characteristics ensured that the process still had certain decontamination effect under the condition of unfavorable hydraulic load, which indicated that the biological settling tank had a capacity in resisting organic loading rate shock and could be used in enhancing pollutant removal in treating micro-polluted water.

Key words: micro-polluted water; rotating bio-disc; settling tank; hydraulic loading rate; biophase

近年来水质性缺水现象非常严重. 许多城市虽然水资源丰富,但是水源水受到了严重的污染,主要表现为氨氮浓度上升,溶解氧下降,有机污染加重,源水水质呈下降趋势[1,2]. 然而,以混凝-沉淀-过滤-消毒为代表的传统净水工艺对有机物和氮磷等溶解性污染物的去除效果十分有限,易引起微生物在管网中的二次繁殖,存在生物安全风险. 因此,通过新工艺开发或现有工艺优化,控制有机物和氮磷在处理出水中的含量,是当前水质净化面临的主要问题之一. 许多学者根据水质特点及供水水质的要求提出了各种微污染水源水的给水处理工艺,主要包括强化常规处理[1,3,4]、预处理技术[5~7]和深度处理技术[8~11]. 生物转盘技术因具有生物量大、生物相分级、耐冲击负荷能力强、污泥量少、动力消耗低、维护管理方便等优点[12~14],目前已被广泛研究和应用. 与生物转盘工艺相比,平流式沉淀池具有相近的水力停留时间,但污染物去除功能相对单一. 笔者结合两工艺自身特点,提出一体式生物净化沉淀技术,并通过实验室小试研究,探讨了该技术在不同

收稿日期: 2016-05-27; **修订日期**: 2016-07-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(21007050); 陕西省重大科技成果转化引导专项(2016KTCG01-17); 陕西省青年科技新星项目(2014KJXX-66)
作者简介: 王文东(1980~),男,副教授,主要研究方向为水处理理论与技术,E-mail: wdwang_xauat@hotmail.com

水力负荷下对微污染源水中浊度和有机物、氨氮、总磷的去除规律,以期为微污染源水的处理和现有饮用水净化工艺技术改造提供理论和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验用水

试验用水取自西安市主要供水水源黑河水库以及校园污水排污口,其中,校园污水用量约占试验总用水量的7%. 试验期间水温为 27 ~ 35℃,水质指标见表 1.

表 1 原水水质

Table 1 Raw water quality

项目	范围	均值
pH	6.6 ~ 7.2	6.9
浊度/NTU	6.70 ~ 8.20	7.50
TOC/mg·L^{-1}	4.76 ~ 5.72	5.24
氨氮/mg·L^{-1}	1.94 ~ 2.50	2.22
TP/mg·L^{-1}	0.11 ~ 0.24	0.18

1.2 试验装置

实验室所用一体式生物净化-沉淀装置,如图 1 所示. 其主体材质为有机玻璃,尺寸 400 mm × 110 mm × 100 mm,总容积 4.4 L,分上下两个功能区,上部分为转盘区,下部为沉淀区. 转盘区采用单轴单级的连接方式,盘片直径在 100 mm 左右,浸没面积占盘片总面积的 40%. 转轴贯穿盘片形心,并固定在两端支架上,转速控制在 3.0 r·min^{-1}. 试验用水经混凝处理后进入一体式生物净化-沉淀装置. 混凝条件如下: 原水投加 5.0 mg·L^{-1}的聚合氯化铝(PACl)后,在 200 r·min^{-1}的搅拌强度下反应 1.0 min; 而后,在 50.0 r·min^{-1}的搅拌强度下反应 15 min. 混凝出水在装置上部与转盘表面的生物膜接触、吸附并最终净化去除,转盘区老化脱落的生物膜连同混凝絮体进入下部沉淀区,定期排放.

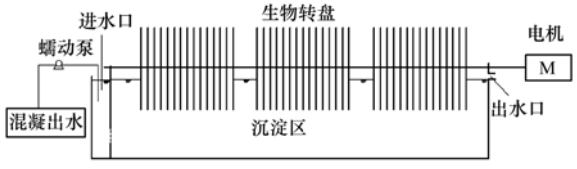


图 1 试验装置流程示意

Fig. 1 Flow chart of the experimental system

1.3 试验方法

装置挂膜成功后,在连续稳定运行的条件下逐次改变系统的水力负荷,每次改变后均留有 1 ~ 2 周的观察期. 待系统再次稳定后,连续监测进、出水浊度,以及 TOC、NH_4^+-N、TP 含量,后续特定水力负荷条件下所得浊度和有机组分(以 TOC 计,下同)、NH_4^+-N、TP 的残留量和去除率数据,均为连续监测数据的平均值. 此外,分别对进、出水端的盘片表面上生物膜进行镜检,以评价一体式生物净化-沉淀池在不同水力负荷条件下对污染物的去除性能.

1.4 分析方法

装置出水的温度、pH 和浊度分别采用水银温度计、玻璃电极法和浊度计(HI93703-11,HANNA,意大利)测定; 总有机碳(TOC)采用总有机碳分析仪(TOC-5000A,岛津,日本)测定; 氨氮采用纳氏试剂分光光度法(普析 TU-1901 紫外可见分光光度计)测定; 总磷采用钼酸铵分光光度法(普析 TU-1901 紫外可见分光光度计)测定[15]; 微生物镜检采用荧光显微镜(Nikon90i)分析.

2 结果与讨论

2.1 盘片的挂膜

本试验采用直接挂膜的方式,利用河水作为挂膜用水. 挂膜期间,维持进水水温 27 ~ 35℃,pH 在 7.0 左右,生物转盘转速 3.0 r·min^{-1},在水力负荷为 0.064 m^3·(m^2·d)$^{-1}$的条件下连续运行 40 d 后,盘片表面形成一层构造均匀、薄且致密的生物膜,系统运行稳定,可认为挂膜成功. 在特定的进水水质条件和系统运行工况条件下,出水中残留的污染物浓度相对稳定,后续特定有机负荷条件下所得浊度、有机组分、NH_4^+-N、TP 的残留量和去除率数据,均为连续监测数据的平均值.

2.2 水力负荷对浊度去除效果的影响

控制进水水温、pH 和转盘转速分别在 27 ~ 35℃、7.0 和 3.0 r·min^{-1},待系统运行稳定后,改变系统水力负荷考察处理出水中污染物含量的变化情况. 由图 2 可知,系统水力负荷最低[0.036 m^3·(m^2·d)$^{-1}$]时,一体式生物净化-沉淀池对水中致浊物质的去除效果最好,平均去除率约为 78.0%(图 2). 随着系统水力负荷增加,浊度的平均去除率呈逐渐下降的趋势. 但在水力负荷 ≤ 0.064 m^3·(m^2·d)$^{-1}$时,上述变化趋势并不显著. 这可能是因为较低的水力负荷对沉淀过程的干扰相对较小,系统易形成沉淀性较强的絮体,从而处理出水中浊度物质的残留量相应较小. 但水力负荷 > 0.064 m^3·(m^2·d)$^{-1}$ 时,混凝后形成的絮体在一体式生物净化-沉淀池中还未完全沉淀,此时浊度的去除主要依靠生物转盘上微生物对难沉淀的微小悬浮颗粒及污染物质的吸附、降解作用[6],出水浊度偏大,浊度

的平均去除率下降.

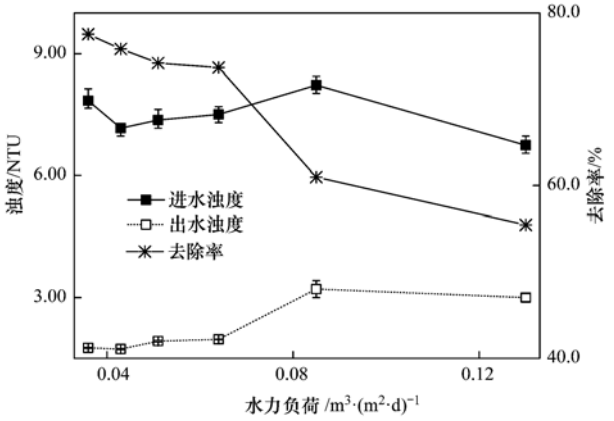


图 2　水力负荷对浊度去除效果的影响

Fig. 2　Turbidity removal performance at different Hydraulic loading rates

2.3　水力负荷对营养物质去除效果的影响

2.3.1　有机组分

图 3 为不同水力负荷下有机组分(以 TOC 计,下同)的去除情况. 从中可知,水力负荷在 0.036 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$时,TOC 的去除效果最佳,此时系统 TOC 平均去除率为 58.07%,处理出水中有机组分的残留量约为 2.09 $mg\cdot L^{-1}$. 随着水力负荷的增大,TOC 的平均去除率呈逐渐下降的趋势. 在水力负荷增大至 0.13 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$时,TOC 的平均去除率最低,仅为 52.30%. 分析认为:系统在较低水力负荷条件下,生物膜与污染物的平均接触时间较长,有利于有机组分被充分降解. 但当水力负荷过大时,微生物与污染物的平均接触时间缩短,导致有机组分作为碳源的利用效率不高[11]. 同时水力负荷过大,对微生物的生长和繁殖造成较大冲击,易使盘片表面部分生物膜脱落,系统生物量降低,进而影响生物转盘的污染物降解功能[16~18].

在水力负荷从 0.036 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$增大至 0.13 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$时,装置处理出水中的 TOC 残留量呈现一定程度的上升趋势,但绝对增加量并不显著,这一性能从有机组分的去除率上观察则更为明显. 这可能是由于河水在迁移过程中本身具有自净作用[4]. 刘辉[10]研究表明,在水质较好的水库中低分子有机物占总有机物 40.00% ~50.00% 左右. 根据动力学原理[3~5],在反应时间一定时底物浓度越低,其反应速度越慢,对底物的降解程度越小. 生物转盘对有机组分良好稳定的去除性能可能与盘片为微生物生长提供了稳定接触面和较长的生长时间有关. 同时也说明水力负荷对生物膜内异养菌群总量的影响不大,只是对菌群起到了重新分布的作用,使其更适应相应水力负荷环境. 表明一体式生物净化沉淀装置对系统进水中的水力负荷波动具有一定的抗冲击能力.

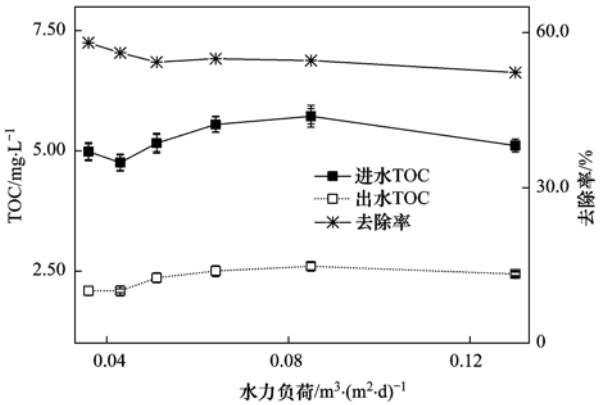


图 3　水力负荷对 TOC 去除效果的影响

Fig. 3　Organic pollutant removal performance at different Hydraulic loading rates

2.3.2　NH_4^+-N

不同水力负荷下处理出水中NH_4^+-N的残留量和去除率如图 4 所示. 从中可知,在较低水力负荷条件下,随水力负荷的增大,NH_4^+-N的平均去除率变化并不显著. 在水力负荷≤0.064 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$时,$NH_4^+$-N的平均去除率为 82.60% ~83.33%,出水NH_4^+-N质量浓度在 0.325 ~0.425 $mg\cdot L^{-1}$之间波动(图 4). 这可能是因为水力负荷较低时,系统中可供微生物利用的碳源相对不足,反硝化菌与其他异养菌竞争有限碳源时更具优势[19,29]. 同时由于硝化菌与反硝化菌的生长也需要碳源,结合图 3,水力负荷在 0.064 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$以下时,处理出水中平均 TOC 残余量 <2.50 $mg\cdot L^{-1}$,硝化菌、反硝化菌因可利用碳源减少,亦不能最大限度地发挥脱氮作用[20]. 但当水力负荷 >0.064 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$时,$NH_4^+$-N的平均去除率随水力负荷的增大呈快速下降趋势. 这可能是由于硝化菌属自养型细菌,生长速率低于降解有机物的异养型微生物,且异养型微生物成为优势菌种后,会包裹和覆盖硝化菌,导致溶解氧、氨氮的传质效果减弱[9]. 同时,硝化细菌对环境极为敏感,水力负荷过大,还会影响硝化细菌的生存环境,导致系统处理效率下降[21,22].

2.3.3　总磷

图 5 为不同水力负荷下总磷的去除情况. 从中可知,在水力负荷为 0.064 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$时,一体式生物净化-沉淀池对 TP 的平均去除效果最差,平均去除率仅为 60.96%,处理出水中 TP 的残留量约为

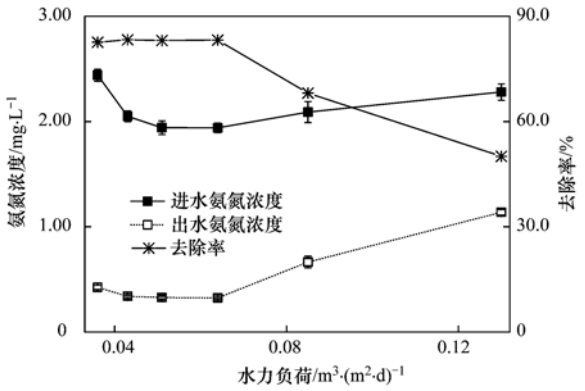


图 4 水力负荷对氨氮去除效果的影响

Fig. 4 NH_4^+-N removal performance at different hydraulic loading rates

0.073 mg·L^{-1}. 适当减小或增大水力负荷均有利于提高系统对 TP 的去除效果. 当水力负荷 < 0.064 m^3·(m^2·d)$^{-1}$时,随着水力负荷的增大,TP 平均去除率呈先缓慢上升后快速下降的趋势. 这可能与水力负荷较小时,污水在一体式生物净化-沉淀池中停留时间较长,微生物与污染物接触充分,有利于系统中污染物更有效地降解[23~26]. 在低营养状态下,提高系统水力负荷,硝化菌与聚磷菌竞争有限碳源和溶解氧,系统中易形成厌氧区域,致使聚磷菌在好氧环境下过量吸收的磷又重新释放有关. 但当水力负荷 > 0.064 m^3·(m^2·d)$^{-1}$时,随着水力负荷的增加,总磷的平均去除率再次上升,这可能是因为适当提高水力负荷,进水中有机组分含量相对增加,提高了系统的有机负荷,缓解了体系中碳源不足的问题. 但继续增大水力负荷,污水的流速过大,微生物与污染物接触不能充分,同时,水力负荷过大,对生物膜的冲击使原先被吸附在盘片表面的磷冲出系统,反而造成总磷去除率下降[27].

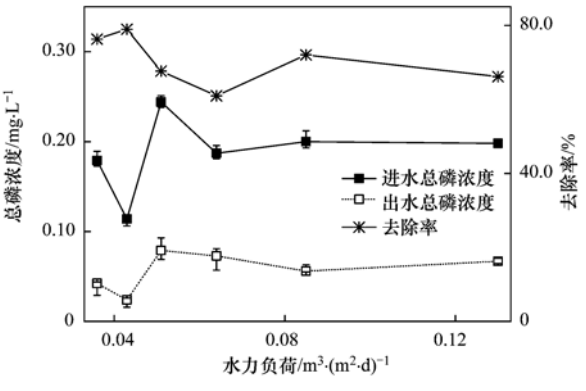


图 5 水力负荷对总磷去除效果的影响

Fig. 5 TP removal performance at different Hydraulic loading rates

总的来说,水力负荷越小,微生物与污染物接触越充分,污染物去除效果越好. 但水力负荷过小,低浓度的有机组分、氮磷会抑制微生物的生物活性. 在达到要求的出水效果的前提下,适当增大系统水力负荷,可以减小占地面积和基建投资,提高经济效益. 建议将一体式生物净化-沉淀池的水力负荷控制在 0.064 m^3·(m^2·d)$^{-1}$. 此时,系统对浊度、TOC、NH_4^+-N和总磷的平均去除率分别为 73.70%、54.98%、83.24% 和 60.96%,具有良好的悬浮物、有机物以及氮磷同步去除功能.

2.4 生物相分析

微生物在污水的生化处理中起决定性作用,其种群的组成与数量很大程度上影响着出水质量,同时也揭示了微生物对外界环境变化的反应机制. 为此本试验在水力负荷为 0.064 m^3·(m^2·d)$^{-1}$的运行条件下,对一体式生物净化-沉淀池进水端和出水端盘片表面生物膜的生长状态进行长期观察,以了解特定水力负荷对微生物的影响机制.

观察发现,进水端生物膜生长速度较快,生物膜内部呈灰褐色,如图 6(a),膜易脱落; 出水端生物膜呈淡黄褐色,如图 6(b),生物膜质密、较薄. 分析认为当生物膜厚度增加到一定程度时,生物膜内部微生物活性降低,新陈代谢下降,附着力减弱,在冲击负荷的影响下生物膜易脱落; 出水端有机底物特别是易降解有机物的浓度大幅降低,生物膜生长缓慢[30]. 从进水端盘片表面生物膜的镜检结果[图 6(b)、图 6(c)]和出水端盘片表面生物膜的镜检结果[图 6(e)、图 6(f)]可看出,进水端生物相非常丰富,有相当数量的丝状菌存在. 出水端原生动物、后生动物都非常活跃,数量和种类也很多. 对试验中后期进水端、中间段、出水端生物转盘表面的生物膜进行高通量测序,结果发现盘片表面生物相基本类似,生物膜中异养菌群数量在细菌总数中占绝对优势,优势菌种为变形菌门、拟杆菌门、放线菌门等. 沿水流方向,异养菌群总量变化不大[图 7(a)],沿程污染物的减少只是对菌群起到了重新分布的作用,使与环境条件相适应的微生物种群优势生长. 同时还发现盘片表面上固着或附着生长的原生动物、后生动物占绝大多数[31],其中钟虫、纤毛虫、鞘居虫等是原生动物的优势种群; 线虫、轮虫(多种)、环节动物等是后生动物的优势种群. 从空间分布看,如图 7(b),沿生物处理池进水端到出水端,微型动物的相对丰度呈逐渐增加趋势.

微生物种群的沿程变化和良好生长,使得污水

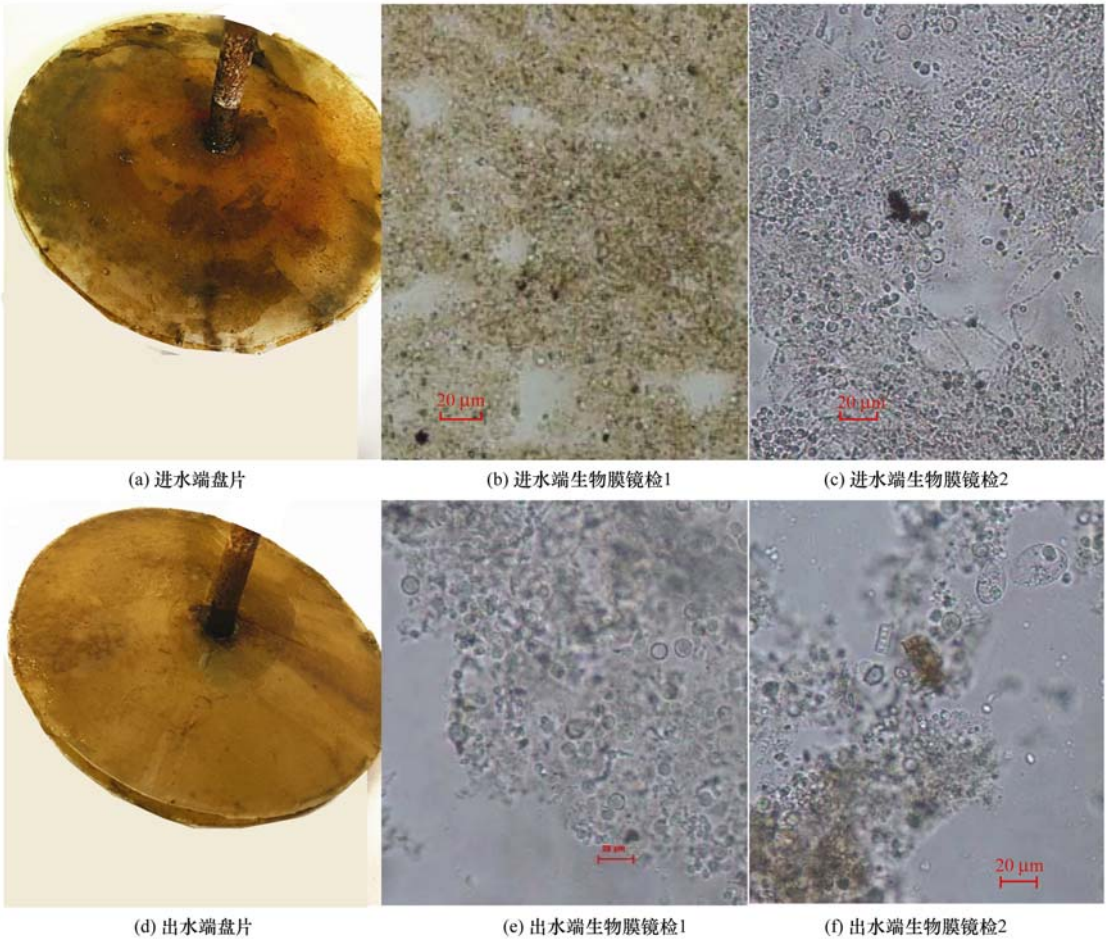
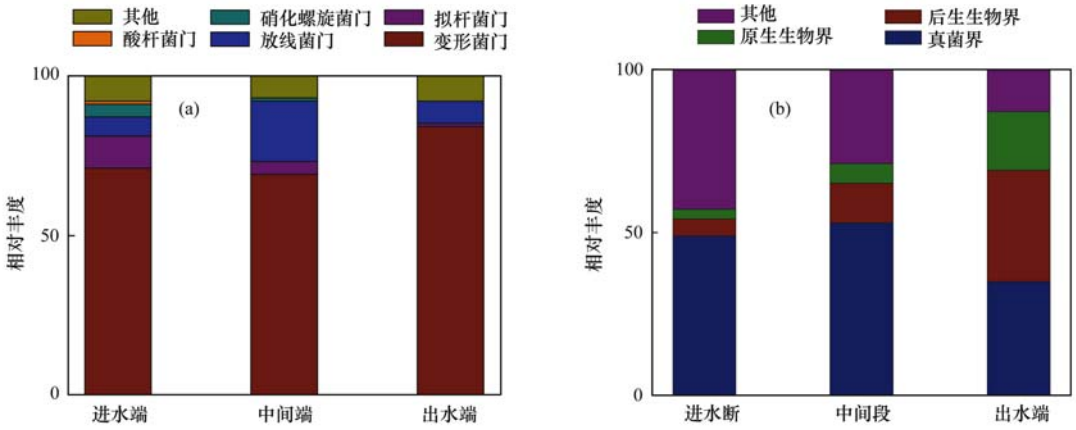


图 6　转盘区生物膜

Fig. 6　Biofilm on turntable area



(a)细菌相对丰度；(b)真核生物相对丰度

图 7　一体式生物净化-沉淀池沿程微生物的群落结构

Fig. 7　Community structure of the along integrated biological settling tank

中的污染物沿程得到逐步转化,并稳定降解. 有研究结果也表明[11,20,28],沿着流程的分布,各级生物膜的颜色、厚度、生物膜的微生物组成,种类与数量有着明显的不同,这样避免了不同种群间生态幅的过多重复,从而保证相应的微生物相拥有最佳的工作活性. 生物膜中生态体系发展完善,种群丰富,这也是生物膜在不同水力负荷条件下仍具有较高除污效率的主要原因,同时也体现了一体式生物净化-沉淀池具有很强的自我调节能力与环境适应能力.

3 结论

(1)本研究将生物转盘与平流沉淀池设计理念相结合,开发出一种一体式生物净化-沉淀工艺,实验室研究结果表明,在进水水力负荷较小时,转盘系统的设置对颗粒物的沉淀过程并无明显影响,出水浊度可控制在 1.8 NTU 左右. 同时,工艺对原水中的有机组分、NH_4^+-N和 TP 还有一定的同步去除功能. 当进水水力负荷在 0.064 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$,上述各项指标的平均去除率分别为 54.98%、83.24% 和 60.96%. 在进水水力负荷 < 0.064 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$ 时,随着水力负荷的上升,工艺对颗粒物、有机组分和氨氮的去除相对稳定,但总磷的去除性能将受到一定的影响; 而在进水水力负荷 > 0.064 $m^3\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$时,随着水力负荷的上升,工艺对总磷的去除性能略有增强,表明工艺具有一定抗冲击负荷能力.

(2)对生物转盘盘片表面生物膜进行分析,盘片表面呈现出与环境条件相适应的微生物种群,形成了良好的种群配合和沿程分布,体现了一体式生物净化-沉淀池具有很强的自我调节能力与环境适应能力.

(3)一体式生物净化-沉淀工艺在不同水力负荷条件下仍可实现有机物、氮磷以及致浊物质的同步去除. 考虑到组合工艺具有结构紧凑、占地面积省,处理效果稳定等优点,在微污染水体的强化净化处理中具有一定的应用前景.

参考文献:

[1] 熊水应, 李翠红. MBBR 工艺在微污染原水预处理中的应用[J]. 给水排水, 2010, **36**(7): 24-29.
Xiong S Y, Li C H. Application of MBBR in micro-polluted raw water pretreatment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, **36**(7): 24-29.

[2] 陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. 内循环对 A^2/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.
Chen Y Z, Peng Y Z, Wang J H, *et al*. Effect of internal recycle ratio on nitrogen and phosphorus removal characteristics in A^2/O-BAF process[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 193-198.

[3] 肖文胜, 徐文国, 杨桔材. 曝气生物滤池 Biostyr 处理微污染水源[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(1): 84-86.
Xiao W S, Xu W G, Yang J C. Treatment of micropolluted raw water with biological aerated filter[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **29**(1): 84-86.

[4] 邹浩春, 焦洁, 王正林, 等. BIOSMEDI 生物滤池预处理微污染原水的研究[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(21): 41-43.
Zou H C, Jiao J, Wang Z L, *et al*. Pretreatment of micro-polluted raw water by BIOSMEDI biofilter[J]. China Water & Wastewater, 2009, **25**(21): 41-43.

[5] 余冬冬, 金勇威, 迟莉娜, 等. 包埋固定化微生物处理微污染原水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(13): 85-88.
Yu D D, Jin Y W, Chi L N, *et al*. Study on treatment of micro-polluted raw water using embedded immobilized nitrobacteria [J]. China Water & Wastewater, 2008, **24**(13): 85-88.

[6] 张东, 许建华, 刘辉. 微污染原水的生物接触氧化预处理研究[J]. 中国给水排水, 2000, **16**(12): 6-9.
Zhang D, Xu J H, Liu H. Research on pretreatment of micro-polluted source water by biological contact oxidation process[J]. China Water & Wastewater, 2000, **16**(12): 6-9.

[7] 徐斌, 夏四清, 胡晨燕, 等. 微污染原水生物预处理中的硝化动力学[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(4): 15-18.
Xu B, Xia S Q, Hu C Y, *et al*. Kinetic model of nitrification in bio-pretreatment of micro-polluted raw water[J]. China Water & Wastewater, 2003, **19**(4): 15-18.

[8] 王劼, 刘阳, 江树志, 等. BAF 反冲洗过程中悬浮物浓度的变化规律[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(8): 99-102.
Wang J, Liu Y, Jiang S Z, *et al*. Study on change rules of SS concentration in backwashing of BAF [J]. China Water & Wastewater, 2011, **27**(8): 99-102.

[9] 唐奕, 李袁琴, 郭勇, 等. 两种载体用于生物转笼处理生活污水的比较[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(12): 174-177.
Tang Y, Li Y Q, Guo Y, *et al*. Comparison between two carriers used for treating domestic wastewater in biological rotating cage reactor[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(12): 174-177.

[10] 刘辉. BCO 与 BAC 联用处理微污染原水的研究[D]. 上海: 同济大学, 2001.

[11] 刘万义. 新型生物转筒处理餐饮污水技术的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2002.

[12] Alemzadeh I, Vossoughi F, Houshmandi M. Phenol biodegradation by rotating biological contactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2002, **11**(1): 19-23.

[13] Kapdan I K, Kargi F. Biological decolorization of textile dyestuff containing wastewater by *Coriolus versicolor* in a rotating biological contactor[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2002, **30**(2): 195-199.

[14] 杨蓉, 吕永涛, 王志盈. 生物转盘系统中短程硝化的实现[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(4): 70-73.
Yang R, Lv Y T, Wang Z Y. Realization of SHARON in rotating biological contactor[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **32**(4): 70-73.

[15] 国家环境保护局. 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. 279-281.

[16] 李军, 赵琦, 聂梅生, 等. 淹没式生物膜法除磷生物膜特性研究[J]. 给水排水, 2002, **28**(4): 23-26.
Li J, Zhao Q, Nie M S, *et al*. Study on submerged Bio-film for P-removal[J]. Water & Wastewater Engineering, 2002, **28**(4): 23-26.

[17] 魏东洋, 董磐磐, 李杰, 等. 新型载体生物转盘处理微污染河水效果研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 156-159.
Wei D Y, Dong P P, Li J, *et al*. Study on the effect of new carrier rotating biological contactor treatment of micro-polluted river water[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(S1):

156-159.

[18] 徐根良. 废水控制及治理工程[M]. 杭州：浙江大学出版社，1999.

[19] 陆少鸣，李芳，李少文. 高速给水曝气生物滤池应用于大型自来水厂的预处理[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2012，**40**(5)：65-70.
Lu S M，Li F，Li S W. Application of high-rate up-flow biological aerated filter to pretreatment for large-scale waterworks [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)，2012，**40**(5)：65-70.

[20] 张无敌，王海涛. 生物转盘处理食堂废水的研究[J]. 环境科学与技术，1996，(2)：8-11，27.

[21] 李彬，吕锡武，宁平，等. 自回流生物转盘/植物滤床工艺处理农村生活污水[J]. 中国给水排水，2007，**23**(17)：15-18.
Li B，Lv X W，Ning P，*et al*. Combined process of self-circulating rotating biological disk and aquatic plant filter bed for rural domestic wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater，2007，**23**(17)：15-18.

[22] 吕斌，覃将伟，曾庆福，等. 水力驱动生物转笼工艺中试研究[J]. 节水灌溉，2008，(7)：17-19，23.
Lv B，Qin J W，Zeng Q F，*et al*. Pilot-scale test of water driven rotating biological contactor with drum [J]. Water Saving Irrigation，2008，(7)：17-19，23.

[23] 龚琴红，田光明，吴坚阳，等. 垂直流湿地处理低浓度生活污水的水力负荷[J]. 中国环境科学，2004，**24**(3)：275-279.
Gong Q H，Tian G M，Wu J Y，*et al*. Hydraulic loading of vertical-flow wetland applied in low concentration sewage treatment[J]. China Environmental Science，2004，**24**(3)：275-279.

[24] 张黎. 不同水力负荷的垂直流湿地对生活污水处理效果研究[J]. 气象与环境学报，2008，**24**(6)：67-71.
Zhang L. Treatment effect of vertical flow wetland to domestic wastewater under different hydraulic loading [J]. Journal of Meteorology and Environment，2008，**24**(6)：67-71.

[25] 吴松，罗固源. 水力负荷及水力停留时间对泡板型浮岛脱氮效果的影响[J]. 三峡环境与生态，2008，**1**(1)：46-48.
Wu S，Luo G Y. Effect of hydraulic loading and HRT on nitrogen removal of foam board floating island [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges，2008，**1**(1)：46-48.

[26] 宋海亮，吕锡武，李先宁，等. 水生植物滤床处理太湖入湖河水的工艺性能[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2004，**34**(6)：810-813.
Song H L，Lü X W，Li X N，*et al*. Performance of aquatic plant filter bed for the treatment of Taihu Lake inflow water [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition)，2004，**34**(6)：810-813.

[27] 程慧艳，罗纨，贾忠华，等. 西安市污水土地处理系统水力负荷的模拟分析[J]. 水利学报，2005，**36**(2)：203-207.
Cheng H Y，Luo W，Jia Z H，*et al*. Simulation of hydraulic capacity of waste water land treatment system [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2005，**36**(2)：203-207.

[28] Fuchs S，Haritopoulou T，Wilhelmi M. Biofilms in freshwater ecosystems and their use as a pollutant monitor [J]. Water Science and Technology，1996，**34**(7-8)：137-140.

[29] 程继辉，吴鹏，程朝阳，等. 基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究[J]. 环境科学，2015，**36**(12)：4539-4545.
Cheng J H，Wu P，Cheng C Y，*et al*. Shortcut nitrosation-denitrifying phosphorus removal based on high-quality carbon source in combined process of CAMBR [J]. Environmental Science，2015，**36**(12)：4539-4545.

[30] 王磊，李海英，李雪娟，等. 低溶解氧对生物膜特性的影响研究[J]. 中国给水排水，2008，**24**(15)：15-19.
Wang L，Li H Y，Li X J，*et al*. Study on effect of low dissolved oxygen on biofilm characteristics [J]. China Water & Wastewater，2008，**24**(15)：15-19.

[31] 陈洪斌，梅翔，高廷耀，等. 受污染源水的生物预处理中试研究[J]. 同济大学学报，2001，**29**(10)：1240-1245.
Cheng H B，Mei X，Gao T Y，*et al*. Pilot-scale study on polluted raw water bio-pretreatment [J]. Journal of Tongji University，2001，**29**(10)：1240-1245.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 12

Dec. 15, 2016

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation ····· LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, *et al.* (4457)

Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing ····· QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, *et al.* (4467)

Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing ····· SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, *et al.* (4475)

Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou ····· WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, *et al.* (4482)

Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring ····· YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, *et al.* (4490)

Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City ····· ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, *et al.* (4504)

^{13}C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO_2 During Youth Olympic Games, Nanjing ····· XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, *et al.* (4514)

Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff ····· HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)

Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations ····· ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, *et al.* (4531)

Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure ····· XING Yi, WANG Cong, LU Pei, *et al.* (4538)

Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions ····· LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, *et al.* (4545)

Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds ····· LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, *et al.* (4552)

Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province ····· MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, *et al.* (4560)

Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake ····· GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, *et al.* (4570)

Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs ····· HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, *et al.* (4577)

Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir ····· YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)

Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Aantibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake ····· WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, *et al.* (4596)

Distribution Characteristics of *n*-alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi ····· YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, *et al.* (4605)

Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons ····· WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, *et al.* (4615)

Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization ····· ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, *et al.* (4626)

Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area ····· ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, *et al.* (4633)

Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake ····· LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, *et al.* (4644)

Simulation Experiment: Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media ····· ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)

Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example ····· LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, *et al.* (4662)

Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin ····· LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, *et al.* (4671)

Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China ····· GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, *et al.* (4680)

Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang: Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics ····· MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, *et al.* (4690)

Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs ····· SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)

Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration: Chemical Coagulation and Electrocoagulation ····· ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, *et al.* (4706)

Adsorption Mechanisms Analysis of EfOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO_2 Using QCM-D and AFM ····· JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, *et al.* (4712)

Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling ····· ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)

Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank ····· WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, *et al.* (4727)

Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N_2H_4 Addition ····· XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)

Start-up of Partial Nitritation AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition ····· LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, *et al.* (4741)

Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield ····· YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, *et al.* (4750)

Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor ····· ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, *et al.* (4760)

Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits ····· WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, *et al.* (4768)

Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) ····· LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, *et al.* (4773)

Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO_2 Emission from Soils of Summer-maize Field ····· YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, *et al.* (4780)

Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China ····· YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, *et al.* (4789)

Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis ····· YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, *et al.* (4800)

Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physyicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City ····· CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, *et al.* (4806)

Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin ····· LIU Fang, Tashpolat Tiyip, Ilyas Nurmamat, *et al.* (4815)

Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain ····· ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, *et al.* (4830)

Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of *Pteris vittata* L. Roots ····· LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, *et al.* (4841)

Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration ····· CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, *et al.* (4848)

Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures ····· SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, *et al.* (4857)

Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County ····· TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, *et al.* (4867)

Preparation of Mg-Al-Me(Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake ····· WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, *et al.* (4874)

Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal ····· FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, *et al.* (4882)

Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes ····· WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, *et al.* (4891)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：赵进才

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

赵进才　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2016 年 12 月 15 日　第 37 卷　第 12 期（卷终）

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 12　Dec. 15, 2016

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：120.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行