

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O₃ 浓度变化 王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)

南京北郊黑碳气溶胶的来源解析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何镓祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)

电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)

广西玉林市大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析 黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)

青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征 张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)

大气环境分区管理: 以广东省为例 杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)

基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例 温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁潇蕾, 苗松 (57)

基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ¹⁵N 和 δ¹⁸O 模拟 王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)

程河流域非点源污染负荷估算及其控制对策 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)

陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)

天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价 张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)

西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响 王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌 (109)

北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)

黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险 姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)

淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征 周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)

磷酸盐对铁锰复合氧化物膜去除地表水中氨氮的影响 卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)

K₂S₂O₈ 强化 g-C₃N₄ 薄膜光电催化降解 Cu(CN)₂ 并同步回收 Cu 党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)

以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B 蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)

氯化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能 马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)

铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除 曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)

水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态 马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)

阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响 任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)

典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征 赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)

水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响 许雯佳, 戚小英 (202)

环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性 戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)

AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟 曹特特, 王林, 李咏梅 (219)

磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)

碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)

容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响 吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)

DNBF-O₃-GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物 钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)

交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)

纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响 周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)

高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用 韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)

浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析 刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)

去除城市生活污水中有机络合态金属强化其厌氧生物制气 卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)

污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价 王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)

初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH₄ 和 N₂O 通量日变化特征 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)

3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响 武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)

有机质替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N₂O 排放的影响 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)

拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³C-CO₂ 脉冲标记 陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)

陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征 兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)

不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)

秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)

县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估 李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)

基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测 曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)

沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)

磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)

控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响 封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)

典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异 李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)

松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征 张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)

硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响 代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)

长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响 王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)

海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较 张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈焯, 付璐璐, 王勋功 (438)

鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系 袁丽娟, 廖且根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)

畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征 张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)

烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响 章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

《环境科学》征稿简则(17) 《环境科学》征订启事(26) 信息(160, 255, 338)

水力停留时间对活性炭生物转盘处理污染河水的的影响

许雯佳^{1,2}, 成小英^{1,2,3*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 无锡 214122; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215000)

摘要: 将生物转盘与活性炭网状填料相结合, 进行活性炭吸附实验并采用河水直接挂膜, 探究在盘片最佳转速下, 不同水力停留时间对活性炭生物转盘去除 NH_4^+ -N、TP、高锰酸盐指数以及生物膜特性的影响。结果表明, Freundlich 等温线显示活性炭对水中 NH_4^+ -N、TP、高锰酸盐指数有较好的吸附性能。盘片转速为 $3 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, NH_4^+ -N、TP、高锰酸盐指数去除率分别为 86.05%、81.28%、77.09%, 去除性能最佳。水力停留时间对去除 NH_4^+ -N、TP 存在显著线性相关 ($R^2 > 0.9$) 且去除率存在显著差异 ($P < 0.05$), 而对高锰酸盐指数不存在显著线性相关且去除率差异不显著 ($P > 0.05$)。HRT 对生物膜活性、蛋白多糖以及 S-EPS、LB-EPS、TB-EPS 三维荧光峰均有影响。

关键词: 活性炭生物转盘; 水力停留时间; 去除率; 生物膜; 胞外多聚物

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0202-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201705239

Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor

XU Wen-jia^{1,2}, CHENG Xiao-ying^{1,2,3*}

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China; 3. Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215000, China)

Abstract: The study combined activated carbon with a rotating biological contactor. The activated carbon adsorption experiments were conducted and the biofilm was formed by using the river water directly. The effects of different hydraulic retention times on the removal of NH_4^+ -N, TP, and permanganate index and on the biofilm properties were investigated at the optimum rotational speed of the disc. Experimental results are as follows. The Freundlich isotherm showed that activated carbon had better adsorption properties for NH_4^+ -N, TP, and permanganate index in water. When the disk speed was $3 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, the removal efficiency was the best, and the removal rates of NH_4^+ -N, TP and permanganate index were the best at 86.05%, 81.28%, and 77.09%, respectively. In addition, there was a significant linear correlation between the hydraulic retention time and the removal of NH_4^+ -N and TP ($R^2 > 0.9$), respectively. The removal rates of NH_4^+ -N and TP at different hydraulic retention times were significantly different ($P < 0.05$), but the permanganate index was not ($P > 0.05$). Hydraulic retention time had effects on the biofilm activity, protein and polysaccharide contents, and the three-dimensional fluorescence peaks of S-EPS, LB-EPS, and TB-EPS of the biofilm.

Key words: activated carbon biological disk; hydraulic retention time; removal rate; biofilm; EPS

我国是一个淡水资源紧缺的国家,且目前河湖水氮磷污染日益严重^[1]。生物转盘法因其具有耐冲击负荷、能耗低、便于管理维护、设施占地面积小、不存在二次污染等优点^[2],在处理生活污水、工业废水^[3]各污染物时具有较好的效果。然而,传统生物转盘因其难挂膜的^[4]特性少见用于处理污染物含量较低的污染河水。

生物转盘盘片作为微生物附着生长的载体是影响污染物去除效率的重要因素,传统的盘片材料比表面积小,挂膜性能差、挂膜生物量低等^[5,6]。而活性炭虽具有比表面积大、吸附能力强等特点^[7],但因其大多为块状、颗粒状、粉末状的特性,较多地应用于污染物的物理吸附,少见其作为微生物的载体尤其是用于生物转盘^[8-10]来生物处理污染河水。

本研究采用比表面积大、具有一定机械强度的新型网状活性炭填料,因其具有一定的舀水结构能增大与污染物的接触时间,是微生物良好的生存载体。将其负载在盘片表面,采用河水直接挂膜的方式来处理污染河水。水力停留时间作为影响污染物降解与去除效率、维持系统正常运行、发挥净化效果的重要参数,探究活性炭生物转盘不同水力停留时间下对 NH_4^+ -N、TP、高锰酸盐指数、生物膜特性的影响,以期污染水体原位修复工艺工程化应用提供技术支持,并为用于处理污染水体强化净化技

收稿日期: 2017-05-24; 修订日期: 2017-07-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07305003)

作者简介: 许雯佳(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为湖泊生态与环境治理, E-mail: 771565964@qq.com

* 通信作者, E-mail: 439174716@qq.com

术提供重要的发展方向。

1 材料与方法

1.1 实验材料和装置

反应器装置如图 1 所示,氧化槽有效容积为 10 L,盘片直径为 40 cm,盘片之间间隔 5 cm. 本实验采用填料取自南通海蓝洁净科技有限公司,是一种以 3~4 mm 孔径的铝蜂窝为基底,负载含量 50%~60% 的活性炭的填料,厚度为 5 mm、比表面积为 $1\ 200\ \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

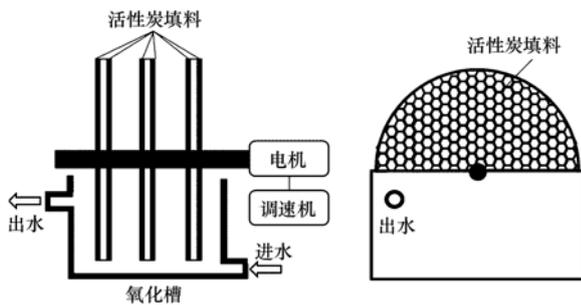


图 1 反应器装置示意

Fig. 1 Reactor installation diagram

1.2 实验水质和检测方法

实验用水取自江南大学校内河水,其 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN、高锰酸盐指数、TP 质量浓度分别为 0.2~2.4、1.0~3.8、3.6~10.6、0.06~0.9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 该水质

表 1 活性炭吸附实验模拟配水

Table 1 Simulated water distribution in the activated carbon adsorption experiment

污染物	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
$\text{NH}_4^+ \text{-N} / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2	5	7	10	20
$\text{TP} / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2	5	7	10	20
高锰酸盐指数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2	4	7	10	20

1.5 盘片挂膜启动及稳定

3 组反应器均采用河水直接挂膜. 挂膜期间,水力停留时间(HRT)为 12 h,转速为 $3\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 连续进水,定期监测进出水水质,当盘片表面出现一层薄的生物膜且高锰酸盐指数去除率达到 30% 以上,即可认为挂膜成功^[3].

1.6 控制变量和研究 HRT 的影响

分别设置活性炭生物转盘, HRT 为 12 h, 设置常转速 1、2、3、4 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 探求该生物转盘的最佳转速. 活性炭生物转盘在该最佳转速下, 分别设置 HRT 为 6、3、1.5 h, 探究各污染物的去除效率以及生物膜的特性差异. 采用 Origin8.5 软件制图以及 SPSS21.0 软件单因素方差法进行统计分析.

属于劣 V 类水以上. DO 为 $6.31 \sim 8.28\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度为 $18 \sim 24\ ^\circ\text{C}$, pH 呈近中性.

高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP 等均按文献[11]中标准方法测定. DO 采用梅特勒溶氧仪, pH 采用 pH 计测量.

1.3 生物膜指标测量方法

生物膜脱氢酶活性采用三苯基四氮唑氯化物(TTC)比色法^[12],以单位体积每 12 h 内产生三苯基甲胍(TF)的量作为 TTC-脱氢酶活性, $\mu\text{g} \cdot (\text{mL} \cdot 12\ \text{h})^{-1}$; 胞外多聚物(EPS)采用 NaCl 提取法^[13]; 蛋白采用考马斯亮蓝法测定^[14]; 多糖采用蒽酮-硫酸比色法测定^[15]; 采用 Hitachi F-7000 荧光分光光度计对 S-EPS、LB-EPS、TB-EPS 进行三维荧光光谱扫描.

1.4 活性炭填料吸附实验

取 200 mL $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (氯化铵配制)、TP (磷酸二氢钾配制)、COD (葡萄糖配制, 用高锰酸盐指数表征) 浓度如表 1 所示的 5 组模拟水, 每组分别放入 8×3 (设置 3 个平行) 个锥形瓶中, 加入 $3\ \text{cm} \times 25\ \text{cm} \times 5\ \text{mm}$ 的活性炭填料 (按实际活性炭生物转盘反应器处理 200 mL 水的量), 放入恒温振荡器中 (模拟实际反应器动态过程), 分别在 1.5、3、4.5、6、7.5、9、12、24 h (按实际水力停留时间设置) 取水样测量 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP、高锰酸盐指数质量浓度.

2 结果与讨论

2.1 水力停留时间(HRT)对活性炭填料吸附的影响

吸附实验得出结果, 在水力停留时间为 6 h 时, 各阶段吸附基本达到平衡, 利用活性炭吸附时, 常用 Freundlich 公式来表示平衡关系^[16], 绘制吸附等温线如图 2 所示. 依据 Freundlich 公式 $\ln Q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln c_e$. 得到如图 2 所示的各污染物吸附等温线. $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TP、高锰酸盐指数拟合所得直线 R^2 均大于 0.9, $1/n$ 分别为 0.4517、0.589、0.3716. Freundlich 模型参数 $1/n$ 与吸附作用力大小有关, $1/n$ 越大作用力越小, 吸附强度较弱, 表示条件不利于吸附^[17]. 一般认为 $1/n$ 的值在 0~1 之间, 其值的

大小表示浓度对吸附影响的强弱; $1/n$ 越小, 吸附性能越好且 $1/n$ 在 $0.1 \sim 0.5$ 之间为易于吸附, $1/n > 2$ 则难吸附. 由 $1/n$ 值可知 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、高锰酸盐指数均易于被活性炭填料吸附, 这增加了微生物的附着繁殖的有利条件. 此外, 活性炭吸附 TP 较之 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、高锰酸盐指数受溶液浓度影响较大.

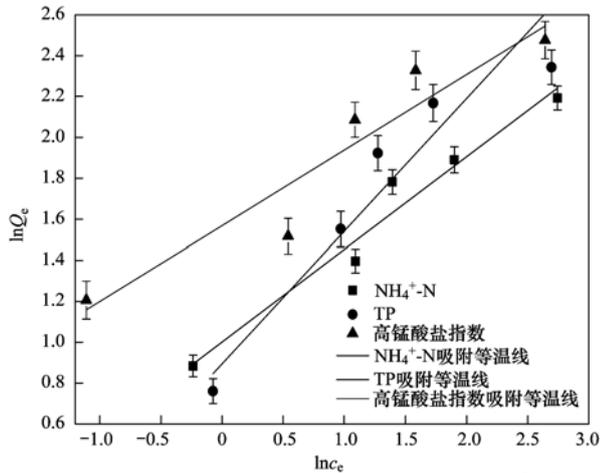


图 2 各污染物活性炭吸附等温线

Fig. 2 Isotherms of pollutants adsorbed on activated carbon

2.2 转速对各污染物的影响

由图 3 可知, 在转速为 $3 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、高锰酸盐指数平均去除率分别为 86.05%、81.28%、77.09%, 达到最高去除率.

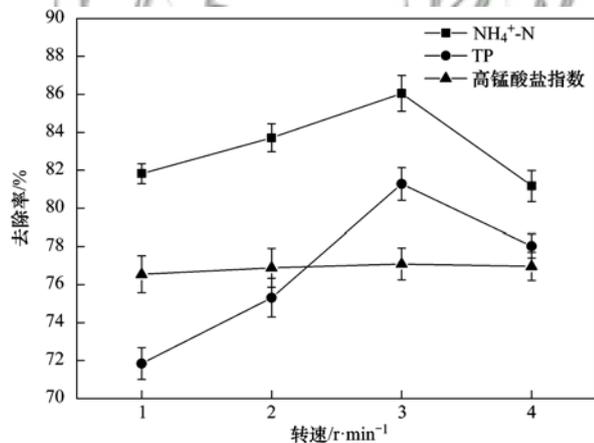


图 3 转速对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、高锰酸盐指数平均去除率的影响

Fig. 3 Effect of rotating speed on the removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP and permanganate index

2.3 水力停留时间 (HRT) 对各污染物去除效率的影响

2.3.1 反应器 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效率

如图 4 所示, 挂膜启动期间约前 30 d, 3 组反应器 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率差异性分析显示无显著性差异 ($P > 0.05$). 根据 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除情况挂膜启动期间大致

分为适应期、快速增长期和稳定期 3 个阶段. 前 11 d, 由于水中微生物含量较少且进水不稳定导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率波动较大. 11 ~ 20 d 活性炭生物转盘上负载了一定量的微生物, 微生物利用水中的污染物进行代谢繁殖进入快速增长期, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率快速升高. 20 d 后, 3 组反应器进入了挂膜稳定期, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率达 86.05%. 挂膜启动时间较长, 原因是污染河水中有机物等浓度较低且微生物含量较少, 活性炭生物转盘利用网状活性炭比表面积大的优势富集水中的微生物需要一定的时间. 第 31 d 分别设置 3 组反应器 HRT 为 1.5、3、6 h, 如图 4 所示 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率分别降至 57.87%、65.38%、71.59%, 且差异性分析显示在不同水力停留时间下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率存在显著性差异 ($P < 0.05$). 由图 5 的 HRT 与去除率相关性分析可知, $R^2 = 0.9833$ ($R^2 > 0.9$) 说明在一定水力停留时间下, HRT 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率呈显著线性相关. 分析去除率降低原因一是水力停留时间变短时, 微生物与污染物之间的接触几率与反应时间大大降低不能充分降解水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[3]; 二是 HRT 变短即水力负荷增大高锰酸盐指数升高, 导致了异养菌和硝化细菌对生存空间的竞争, 会影响硝化细菌的生存环境, 此外处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化细菌较之异养菌敏感, 导致系统处理效率下降^[18]. 同时, HRT 变短导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率波动明显增大, 也与硝化细菌较敏感有关.

2.3.2 反应器 TP 去除效率

如图 6 所示, 采用 SPSS 对挂膜启动过程 3 组反应器 TP 去除率进行差异性分析, 不存在显著性差异 ($P > 0.05$). 3 组反应器在连续进水前 15 d, TP 的平均去除率达 52.21%. 原因一方面是生物转盘上的活性炭填料对磷进行了物理吸附; 另一方面是生物转盘盘片的转动不断给反应器提供充足的溶解氧, 反应器不能达到厌氧状态, 虽然生物除磷中聚磷菌厌氧释放磷是好氧吸收和除磷的前提条件, 但尹军等^[19]提出厌氧条件下聚磷菌充分释放磷并不是决定除磷能力的必要条件, 陈洪波等^[20]也提出活性污泥接种到 SBR 反应器后直接进行曝气也能实现生物强化除磷. 河水是一个相对兼性的环境, 必然存在以聚磷菌为主的兼性异养菌. 在挂膜启动的过程中, 活性炭生物转盘对水中的聚磷菌等进行富集并利用水中的污染物进行代谢以及繁殖, 这也造成了 TP 前 15 d 去除率有波动且异养菌较之硝化细菌生长较快从而能有一定的 TP 去除. 15 d 后, 磷的物理吸附占有小部分, 主要是微生物的代谢作用降解

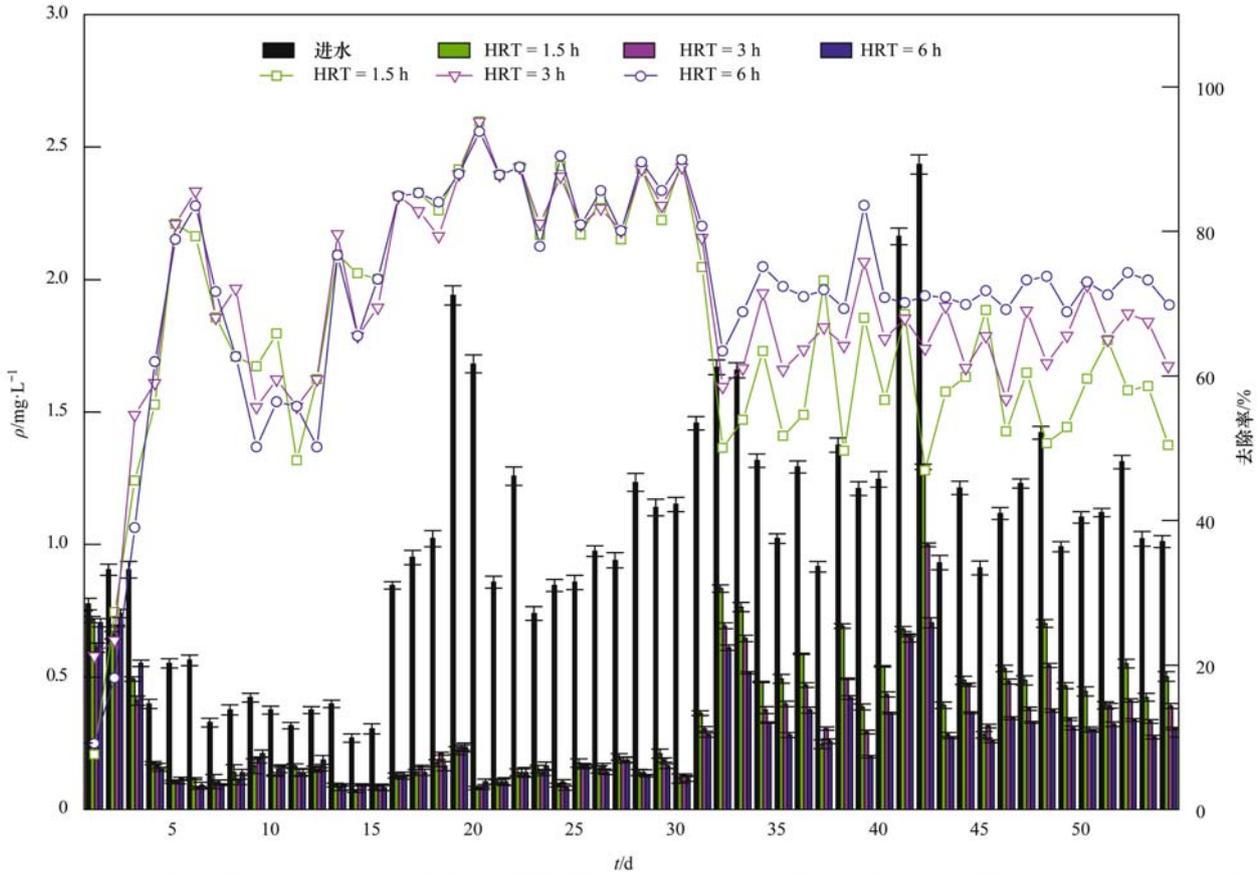


图4 HRT对NH₄⁺-N去除性能的影响

Fig. 4 Effect of HRT on the removal of NH₄⁺-N

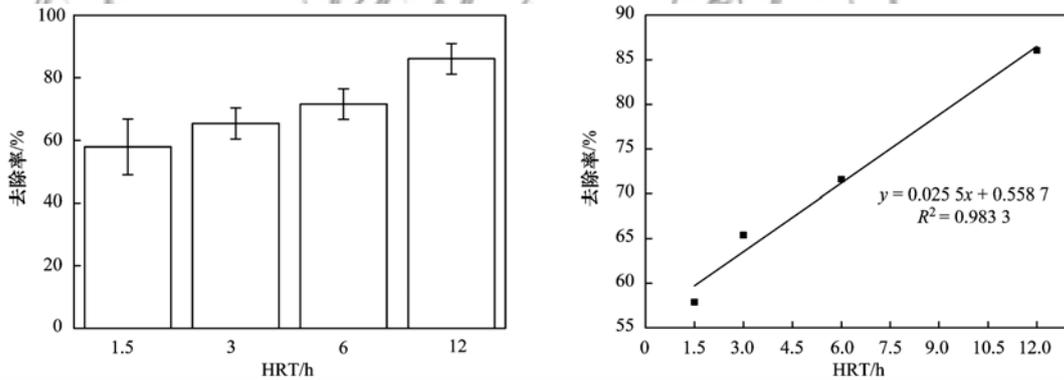


图5 不同水力停留时间下NH₄⁺-N平均去除率以及拟合曲线

Fig. 5 Average removal rate of NH₄⁺-N and the fitting curve for different hydraulic retention times

了TP,由图6所示TP去除率在15~19 d急剧升高,原因是因为微生物进入了快速增长期,20 d后反应器TP去除率达到稳定为81.28%。第31 d设置了HRT分别为1.5、3、6 h,相应地TP去除率分别为54.41%、64.31%、69.79%。差异性分析显示,HRT为1.5 h的反应器分别与HRT为3、6 h的反应器,TP的去除率存在极显著差异($P < 0.01$),而HRT为3 h与HRT为6 h的反应器存在显著差异($P < 0.05$)。此外,如图7所示, $R^2 = 0.9368$ ($R^2 >$

0.9)说明在一定水力停留时间下,HRT与TP平均去除率呈显著线性相关。HRT差异性较大的原因是短时间内进水负荷超出了盘片上生物膜的接受处理能力,且较大的水流对生物膜造成冲击使原先被吸附在盘片表面的磷冲出系统导致磷去除效率降低^[21]。HRT变短去除率降低的原因一是HRT变短,水中的有机物等增加,使得异养菌能大量地繁殖;但同时由于污水与盘片接触时间变短,不能充分地吸附代谢磷而导致磷去除率降低;二是物理吸

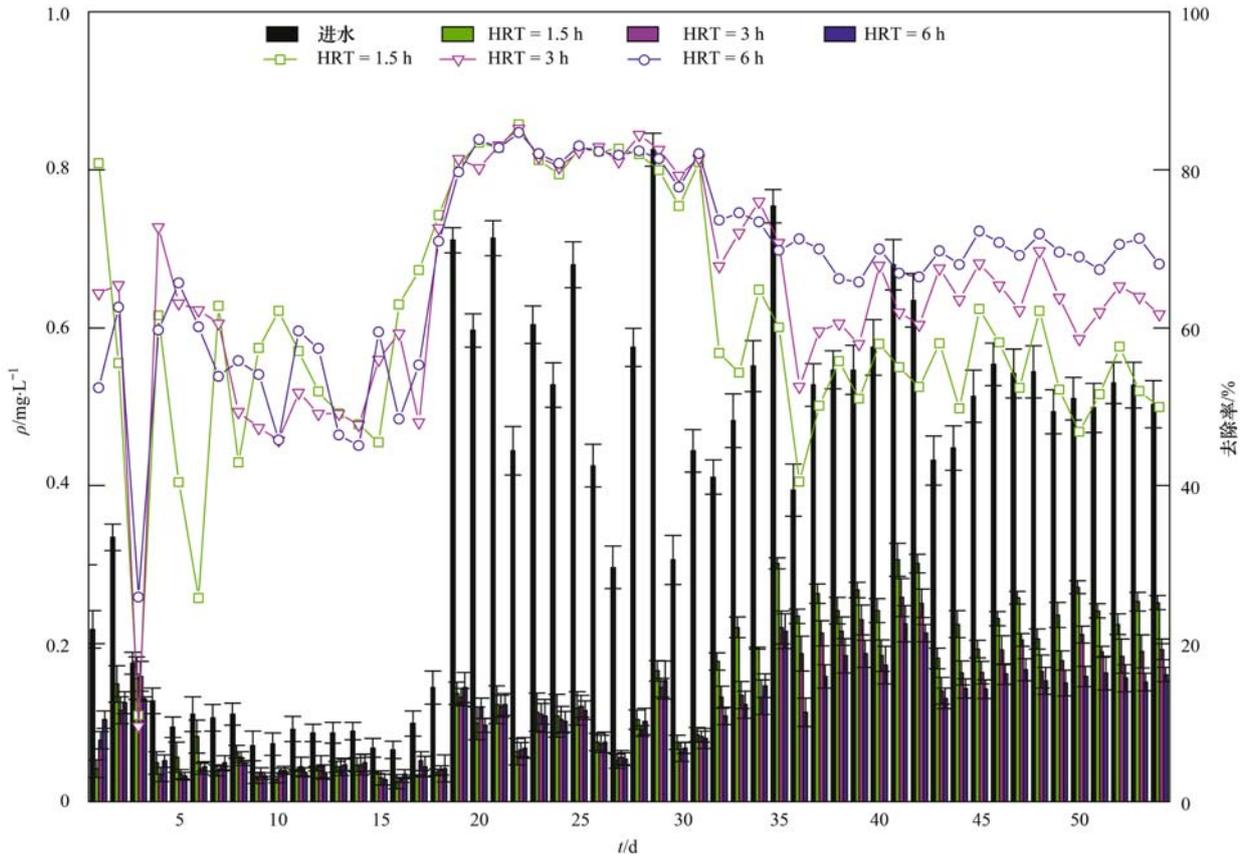


图6 HRT对TP去除性能的影响

Fig. 6 Effect of HRT on the removal rate of TP

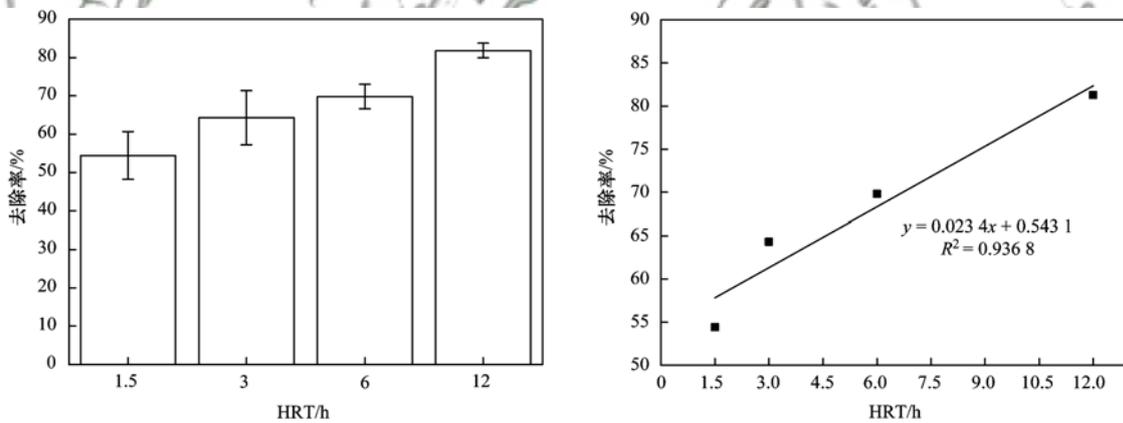


图7 不同水力停留时间下TP平均去除率以及拟合曲线

Fig. 7 Average removal rate of TP and the fitting curve for different hydraulic retention time

附较不稳定,过短的水力停留时间导致了磷容易脱落重新进入水体^[22];三是由于过短的水力停留时间对生物膜造成了一定的冲击,导致部分生物膜的脱落。

2.3.3 反应器高锰酸盐指数去除效率

如图8所示,对3组反应器在挂膜启动阶段进行差异性分析,无显著差异($P > 0.05$)。3组反应器运行0~15 d,该阶段为适应期,硝化细菌以及异养菌的生长均需要碳源,所以在适应期阶段反应器高

锰酸盐指数去除率较为稳定。15 d后微生物均进入快速增长期,需消耗大量的碳源直至挂膜成功,高锰酸盐指数平均去除率达77.09%。第31 d改变3组反应器的HRT分别为1.5、3、6 h,在31~36 d内,3组反应器高锰酸盐指数去除率先上升后下降,原因是本实验所用污染河水相对生活污水、工业废水高锰酸盐指数较低,缩短水力停留时间即具有更高的水力负荷,使得短时间内反应器中高锰酸盐指数急剧升高。硝化细菌等贫营养微生物在营养物竞争

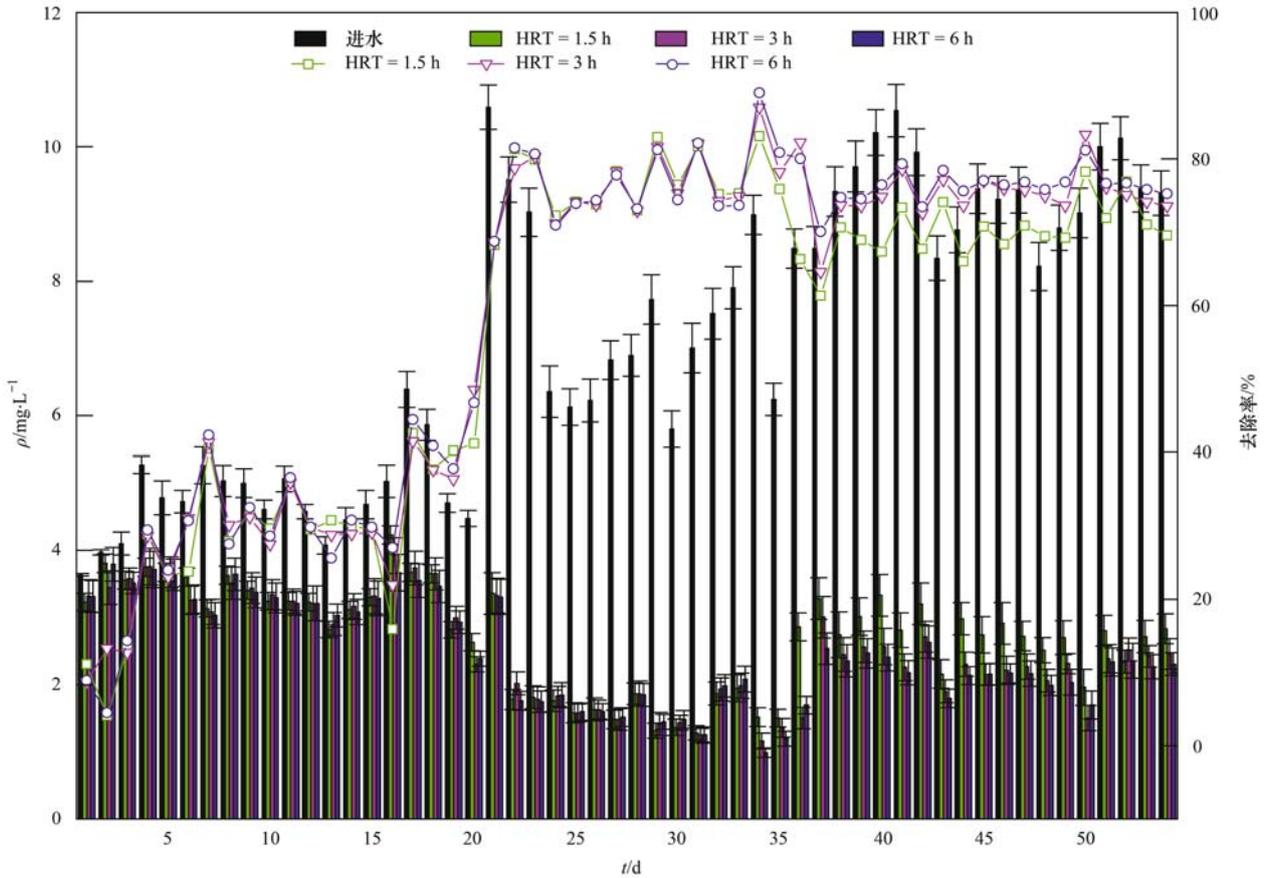


图 8 HRT 对高锰酸盐指数去除性能的影响

Fig. 8 Effect of HRT on the removal of the permanganate index

中具有较大优势,而高锰酸盐指数的升高对异养菌群更为适宜,这将使得大量的碳源被消耗从而高锰酸盐指数去除率升高. 但是随着 HRT 持续降低对反应器造成了一定的冲击使得高锰酸盐指数去除率下降. 37 d 后, 3 组反应器适应了 HRT 的变化, 高锰酸盐指数去除率分别为 71. 37%、75. 88%、76. 88%. SPSS 差异性分析显示, HRT 为 1. 5 h 和 6 h 的反应器高锰酸盐指数去除率存在显著差异 ($P < 0. 05$), 而 HRT 为 3 h 的反应器分别与 HRT

为 1. 5 h 和 6 h 的反应器高锰酸盐指数去除率不存在显著差异 ($P > 0. 05$). 此外由图 9 可知, $R^2 = 0. 5127$, 均表明在一定的水力停留时间下, 高锰酸盐指数去除率变化不显著, 与 HRT 不存在显著线性关系. 原因是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, 而缩短 HRT 相当于增加了底物浓度, 这使得异养菌能大量地繁殖. 此外生物转盘对高锰酸盐指数良好稳定的去除性能 (改变 HRT, 去除率变化不大) 可能

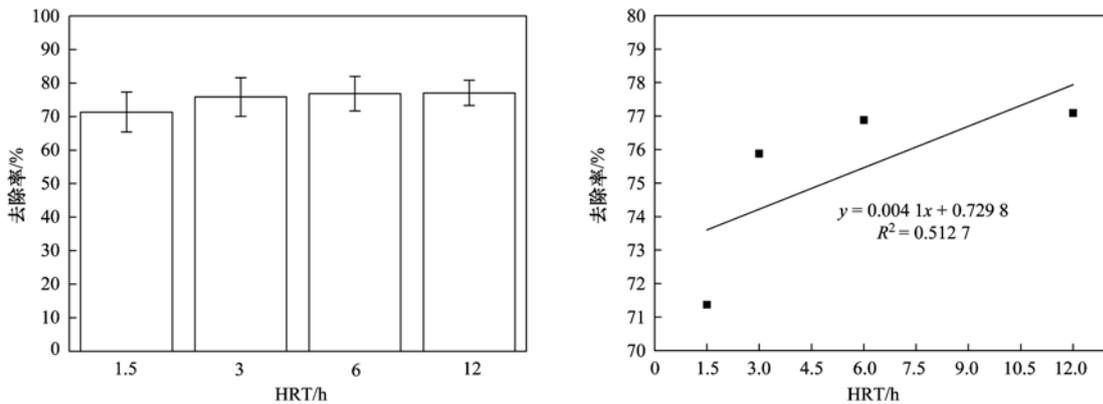


图 9 不同水力停留时间下高锰酸盐指数平均去除率以及拟合曲线

Fig. 9 Average removal rate of the permanganate index and the fitting curve for different hydraulic retention times

与活性炭盘片为微生物生长提供了稳定接触面和较好的生长环境^[21]有关。但当水力停留时间变短时,水流过快会导致部分的生物膜脱落流出从而高锰酸盐指数有些许下降但不明显,高锰酸盐指数去除率的变化趋势进一步吻合了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率的变化。

2.4 水力停留时间对生物膜的影响

2.4.1 HRT 变化对生物膜活性以及多糖(PS)和蛋白(PN)影响

由表 2 可知,在水力停留时间为 1.5、3、6 h

表 2 不同 HRT 下生物膜活性比较

水力停留时间/h	TSS/g	VSS/g	VSS/TSS/%	TTC-脱氢酶活性/ $\mu\text{g} \cdot (\text{mL} \cdot 12 \text{ h})^{-1}$
1.5	1.425	0.419 8	29.46	10.34 ± 0.17
3	1.41	0.440 6	31.25	11.09 ± 0.22
6	1.47	0.481 5	32.76	12.27 ± 0.11

Nielsen 等^[23]将 EPS 分为溶解性 EPS(S-EPS)和结合型 EPS(B-EPS),而 Ramesh 等^[24]提出 B-EPS 具有双电层结构,包括松散附着的 LB-EPS 以及紧密附着的 TB-EPS。且有研究表明^[25],EPS 的 70%~80% 是由蛋白质和多糖构成,余下的 20%~30% 来自于腐殖酸、核酸和脂类等。如图 10、11 所示,为不同水力停留时间下,EPS 中 3 个组分蛋白和多糖比较。从中可知,在 S-EPS 中,生物膜中蛋白和多糖的含量均随着 HRT 的延长而增多,原因是 S-EPS 为溶解性的胞外多聚物易受外界环境干扰,过短的 HRT 对生物膜造成冲击带走一部分 S-EPS。在 LB-EPS 中,蛋白和多糖的含量与 HRT 呈负相关,原因是松散型结合的 EPS 处于紧密型结合的 TB-EPS 和 S-EPS 之间,HRT 变短时较之 S-EPS 受到的冲击较少而对外界环境变化具有一定的缓冲作用^[26],且此时水中含有较多的有机物而胞外聚合物含有较为丰富的官能团(如羟基、羧基、氨基等),能大量地吸附水中的污染物。在 TB-EPS 中,由于这种 EPS 紧密地结合在细胞表面,HRT 缩短使得异养菌生长占有优势,且内层的 TB-EPS 基本不受到水力停留时间变短对其的冲击。此外 HRT 缩短导致微生物的大量死亡以及细胞自溶导致 EPS 中总的蛋白质、多糖等含量的增加^[25]。总 EPS 蛋白多糖含量与水力停留时间呈正相关,而周健等^[27]提出磷的去除能力与 EPS 的含量呈正相关,这与本实验结果 TP 去除率随 HRT 变短而下降相一致。

2.4.2 HRT 变化对 EPS 三维荧光光谱的影响

依据文献^[28]将三维荧光区域划分为: I. 芳

时,各污染物指标达到稳定阶段,反应器 HRT 为 6 h 时生物膜 VSS/TSS 的比值为 32.76%,TTC-脱氢酶活性为 $(12.27 \pm 0.11) \mu\text{g} \cdot (\text{mL} \cdot 12 \text{ h})^{-1}$ 。这表明水力停留时间为 6 h 时生物膜具有更高的活性。这一结果与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、高锰酸盐指数在 HRT 为 6 h 时去除率较高相一致。此外随着 HRT 的缩短,VSS/TSS 值变小,原因是水中污染物浓度较低,这导致活性炭生物转盘上的微生物膜较薄较易受到外界环境的影响,而过快的流速会对反应器上的生物膜造成一定的冲击,造成生物膜的脱落。

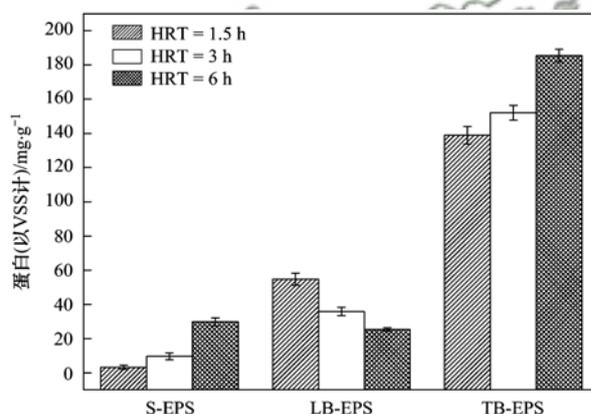


图 10 不同 HRT 下生物膜各组分 EPS 蛋白比较

Fig. 10 Comparison of proteins in various kinds of EPS in biological membranes under different HRT conditions

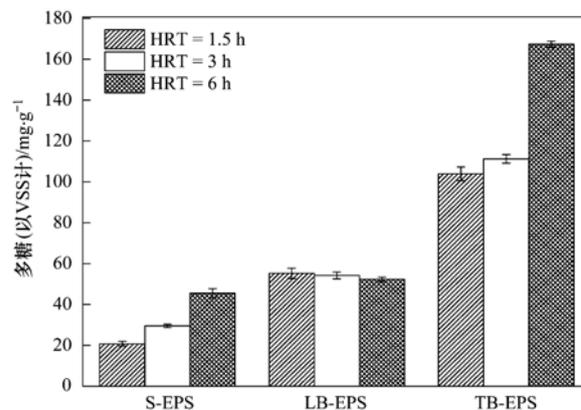


图 11 不同 HRT 下生物膜各组分 EPS 多糖比较

Fig. 11 Comparison of polysaccharides in various kinds of EPS in biological membranes under different HRT conditions

香族蛋白质 I、II. 芳香族蛋白质 II、III. 富里酸、IV. 溶解性微生物产物、V. 腐殖酸 5 类。如图 12

(a) ~12(c) 为不同水力停留时间活性炭生物转盘上生物膜 S-EPS 的三维荧光扫描图,图 12(d) ~ 12(f) 为不同水力停留时间活性炭生物转盘上生物膜 LB-EPS 的三维荧光扫描图,图 12(g) ~ 12(i) 为不同水力停留时间活性炭生物转盘上生物膜 TB-EPS 的三维荧光扫描图. 从中可知不同水力停留时间下均有 Peak S1、Peak L1、Peak T1 为溶解性微生物产物; Peak S2、Peak L2、Peak T2 为芳香族蛋白质 II; Peak S3、Peak L3、Peak T3 为芳香族蛋白质 I. 结果表明 S-EPS 以及分别位于生物膜外层和内层的 LB-EPS、TB-EPS, 组分和物质结构基本相同^[29], 均由蛋白质和溶解性微生物产物构成. HRT 为 1.5 h 和 3 h 时均有 Peak T4 (类溶解性微生物产物), 而 HRT 为 6 h 时荧光峰消失, 产生了峰的偏移, 李志华等^[30] 提出这与高锰酸盐指数、 NH_4^+ -N 的去除率有相关性, 这与实验结果 HRT = 6 h 时高锰酸盐指数、 NH_4^+ -N 具有较高的去除效率相一致. 同时图 12 中腐殖质的峰较低, 不为主要峰. Mopper 等^[31] 曾指出类腐殖质荧光代表老化的溶解有机物, 这表明了生

物膜的腐殖程度较低, 均具有较高的活性, 从而说明活性炭生物转盘能很好富集水中的微生物.

由表 3 可知, 随着水力停留时间的延长, Peak S1、Peak T1 荧光强度变强, 原因是 HRT 适量延长增加了生物膜与污水的接触时间, 使得微生物能大量的繁殖. 而 Peak S2、Peak S3、Peak L2、Peak T2、Peak T3 荧光强度均先变强后变弱, 变强的原因一是 HRT 的适量延长, 有利于微生物分泌蛋白, 二是微生物数量增多导致衰老和死亡细胞增多, 而破碎降解这些细胞是溶解有机物类蛋白荧光的一个重要来源^[32]. 变弱的原因是过长的 HRT 会使得微生物大量繁殖导致从外界摄取的营养物质不足, 从而消耗自身 LB-EPS 中的蛋白供给生命活动. Peak L1、Peak L3 峰值随 HRT 的异常变化, 可能是由于 LB-EPS 处于外层较易变化的 S-EPS 和内层不易改变的 TB-EPS 之间, 改变 HRT 的同时造成了两边 EPS 对其的影响. 同时 HRT 较长时微生物消耗自身储存的 LB-EPS 中溶解性微生物代谢产物、蛋白类物质和腐殖酸类物质^[26]. 实际上 EPS 中荧光峰所代表

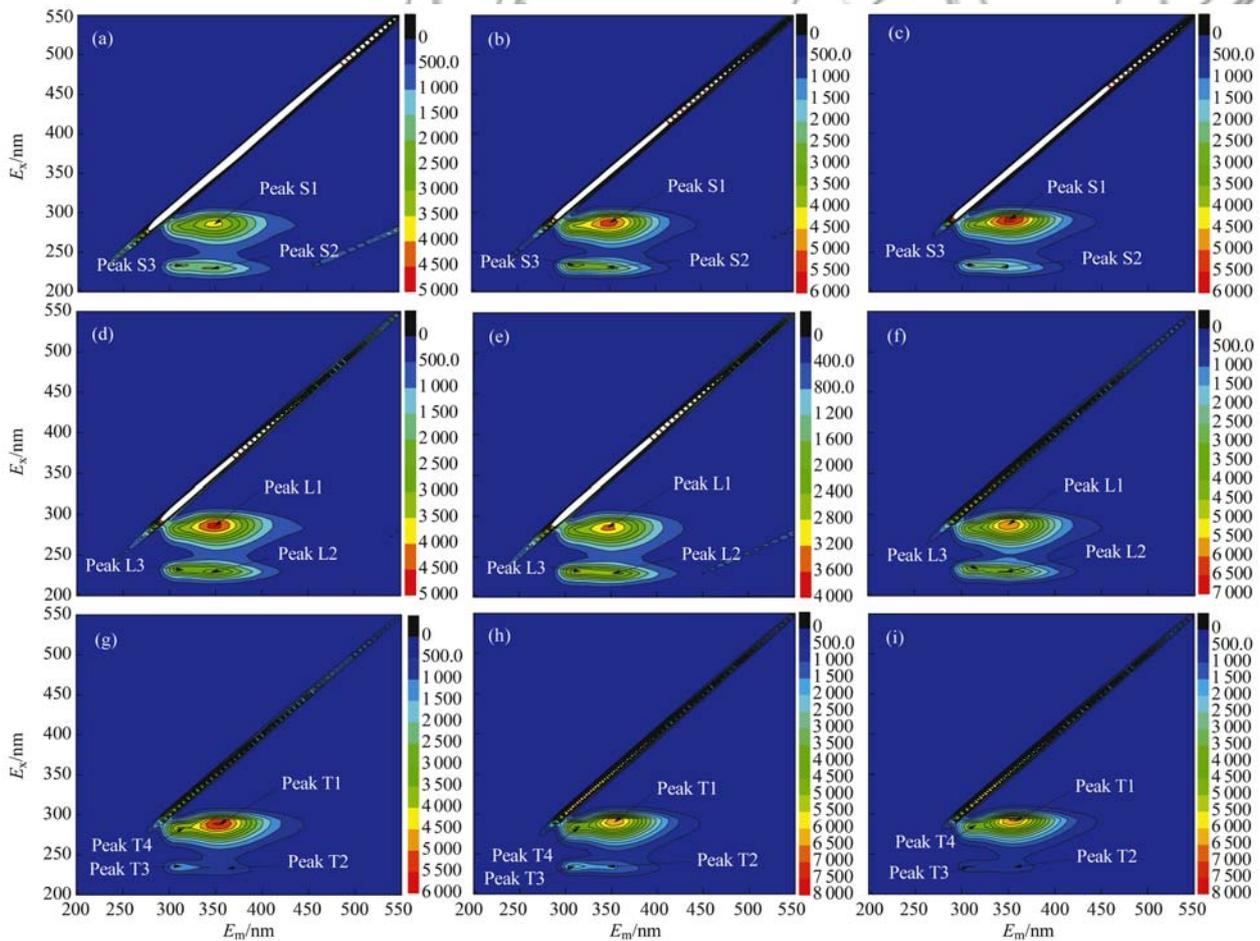


图 12 不同 HRT 下生物膜各组分 EPS 三维荧光图

Fig. 12 Three-dimensional fluorescence in various kinds of EPS in biological membranes under different HRT conditions

表 3 不同 HRT 下生物膜各组分 EPS 三维荧光峰值

Table 3 Three-dimensional fluorescence peak in various kinds of EPS in biological membranes under different HRT conditions

项目	指标	HRT = 1.5 h		HRT = 3 h		HRT = 6 h	
		E_x/E_m	荧光强度	E_x/E_m	荧光强度	E_x/E_m	荧光强度
S-EPS	Peak S1	280.0/345.0	3 693	285.0/345.0	5 284	285.0/345.0	5 585
	Peak S2	225.0/340.0	2 091	225.0/345.0	2 739	225.0/345.0	2 001
	Peak S3	230.0/310.0	2 052	230.0/310.0	3 287	230.0/310.0	2 399
LB-EPS	Peak L1	285.0/345.0	4 656	280.0/345.0	3 300	285.0/350.0	5 936
	Peak L2	225.0/340.0	3 213	225.0/345.0	2 774	225.0/340.0	3 604
	Peak L3	230.0/315.0	2 901	225.0/315.0	2 596	230.0/310.0	3 331
TB-EPS	Pea kT1	285.0/350.0	5 603	285.0/350.0	6 398	290.0/355.0	6 627
	Peak T2	225.0/340.0	894.2	225.0/350.0	1 493	225.0/340.0	644.5
	Peak T3	230.0/305.0	1 424	230.0/305.0	2 369	230.0/305.0	1 037
	Peak T4	280.0/310.0	4 091	280.0/310.0	4 537	280.0/310.0	—

的溶解性代谢产物、蛋白类等物质是影响水质中高锰酸盐指数和 NH_4^+ -N去除率的重要因素。

3 结论

(1) 活性炭生物转盘对污染河水中的微生物有很好的吸附及富集作用, 能实现水中低污染条件下的快速直接挂膜。且能较好地吸附降解水中的污染物, 达到地表水 I、II 类水的标准。转速对活性炭生物转盘有影响, 转速为 $3 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 各污染物去除率达到最佳。

(2) 水力停留时间对污染物去除率各有影响, 不同 HRT 之间 NH_4^+ -N、TP 去除率存在显著差异 ($P < 0.05$), 而高锰酸盐指数去除率不存在显著性差异 ($P > 0.05$)。此外, NH_4^+ -N、TP 去除率与 HRT 存在显著线性关系 ($R^2 > 0.9$), 而高锰酸盐指数不存在显著线性关系。

(3) 水力停留时间对 VS/TS、多糖以及蛋白有影响, 这三者表征了生物膜的活性。在一定 HRT 范围内, HRT 越长, VS/TS 越大, 生物膜活性越高。S-EPS、TB-EPS 中多糖和蛋白与 HRT 呈正相关, 而 LB-EPS 中多糖和蛋白与 HRT 呈负相关。

(4) 水力停留时间主要对生物膜 EPS 三维荧光中类芳香族蛋白质 I、类芳香族蛋白质 II、类溶解性微生物产物的峰值造成较大的影响, 从而影响水质中高锰酸盐指数和 NH_4^+ -N以及 TP 的去除效率。

参考文献:

[1] 卢创新, 黄章富, 王淑君, 等. 城市污染河湖的综合整治技术及应用研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(5): 111-114.
Lu C X, Huang Z F, Wang S J, et al. Comprehensive renovation technology of urban polluted rivers and lakes and its application [J]. Environmental Science and Management, 2014, 39(5): 111-114.

[2] 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.

[3] 王文东, 刘荟, 马翠, 等. 一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3858-3863.
Wang W D, Liu H, Ma C, et al. Enhanced pollutant removal performance of an integrated biological settling tank from micro-polluted water bodies [J]. Environmental Science, 2016, 37(10): 3858-3863.

[4] 唐云鹭, 刘东方, 于清, 等. 填料-生物转盘处理有机模拟污水[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2121-2126.
Tang Y L, Liu D F, Yu J, et al. Packed rotating biological contactor system for treatment of simulated organic wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(6): 2121-2126.

[5] 张黎. 生物转盘污水处理技术研究进展及展望[J]. 农业与技术, 2015, 35(2): 30, 61.
Zhang L. Research on progress and prospect of biological turntable wastewater treatment technology [J]. Agriculture and Technology, 2015, 35(2): 30, 61.

[6] 冯迪, 王京城, 姜彬慧, 等. 网状生物转盘-生物接触氧化法处理高浓度生活污水的实验研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1502-1506.
Feng D, Wang J C, Jiang B H, et al. Treatment of high concentration domestic wastewater by netlike rotating biological contactor & biological contact oxidation process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(7): 1502-1506.

[7] 王晏山, 张洪林. 活性炭吸附和膜分离技术在水处理中的应用比较[J]. 北方环境, 2004, (4): 65-67.

[8] 王丁明, 曹国凭, 贾云飞, 等. 活性炭吸附技术在水处理中的应用[J]. 北方环境, 2011, (11): 190-191.

[9] Zheng Z M, Obbard J P. Removal of surfactant solubilized polycyclic aromatic hydrocarbons by *Phanerochaete chrysosporium* in a rotating biological contactor reactor [J]. Journal of Biotechnology, 2002, 96(3): 241-249.

[10] Guimarães C, Porto P, Oliveira R, et al. Continuous

- decolourization of a sugar refinery wastewater in a modified rotating biological contactor with *Phanerochaetechrysosporium* immobilized on polyurethane foam disks [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(2): 535-540.
- [11] 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.
- [12] 张金莲, 贺锋, 梁威, 等. Zn^{2+} 、 Co^{2+} 和 Mn^{2+} 对人工湿地基质生物膜的影响[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(2): 158-162.
- Zhang J L, He F, Liang W, *et al.* Effects of Zn^{2+} , Co^{2+} and Mn^{2+} on the substrate quality biofilms in the integrated vertical-flow constructed wetland [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(2): 158-162.
- [13] 杨春雪. 嗜热菌强化剩余污泥水解及短链脂肪酸积累规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Yang C X. Enhanced effects of thermophiles on waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids production [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [14] Fr/olund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, **43**(4): 755-761.
- [15] Ludwig T G, Goldberg H J V. The anthrone method for the determination of carbohydrates in foods and in oral rinsing [J]. *Journal of Dental Research*, 1956, **35**(1): 90-94.
- [16] 蒋展鹏. 环境工程学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [17] Fytianos K, Voudrias E, Kokkalis E. Sorption-desorption behaviour of 2, 4-dichlorophenol by marine sediments [J]. *Chemosphere*, 2000, **40**(1): 3-6.
- [18] 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 & Waste Water*, 2007, **23**(17): 15-18.
- [19] 尹军, 王建辉, 王雪峰, 等. 污水生物除磷若干影响因素分析[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(4): 6-11.
- Yin J, Wang J H, Wang X F, *et al.* Influencing factors of biological phosphorus removal in sewage treatment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(4): 6-11.
- [20] 陈洪波, 王冬波, 李小明, 等. 单级好氧生物除磷工艺处理生活污水[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(7): 1203-1209.
- Chen H B, Wang D B, Li X M, *et al.* Biological phosphorus removal of domestic wastewater by single-stage oxic process [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(7): 1203-1209.
- [21] 王文东, 马翠, 刘荟, 等. 水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4727-4733.
- Wang W D, Ma C, Liu H, *et al.* Effects of hydraulic loading rate on the removal of pollutants from an integrated biological settling tank [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4727-4733.
- [22] 宋冬, 刘珊, 何义亮, 等. 城市污水处理厂含铝污泥回流除磷分析[J]. *应用化工*, 2015, **44**(12): 2301-2304.
- Song D, Liu S, He Y L, *et al.* Analysis of phosphorus removal by recycling of aluminum sludge in sewage treatment plant [J]. *Applied Chemical Industry*, 2015, **44**(12): 2301-2304.
- [23] Nielsen P H, Jahn A, Palmgren R. Conceptual model for production and composition of exopolymers in biofilms [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(1): 11-19.
- [24] Ramesh A, Lee D J, Hong S G. Soluble microbial products (SMP) and soluble extracellular polymeric substances (EPS) from wastewater sludge [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **73**(1): 219-225.
- [25] 曹秀芹, 赵自玲. 胞外聚合物 (EPS) 构成的影响因素分析 [J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(S2): 420-424, 471.
- Cao X Q, Zhao Z L. Analysis of influencing factor on the component of extracellular polymeric substance (EPS) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(S2): 420-424, 471.
- [26] 黄兴, 孙宝盛, 孙井梅, 等. 贫营养条件下 EPS、SMP 和微生物多样性的研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1468-1474.
- Huang X, Sun B S, Sun J M, *et al.* EPS, SMP and microbial biodiversity under the oligotrophic environment [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(5): 1468-1474.
- [27] 周健, 栗静静, 龙腾锐, 等. 胞外聚合物 EPS 在废水生物除磷中的作用 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(9): 1758-1762.
- Zhou J, Li J J, Long T R, *et al.* Study on the action of extracellular polymeric substances (EPS) in biological phosphorus removal from wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(9): 1758-1762.
- [28] Sun J, Guo L, Li Q Q, *et al.* Structural and functional properties of organic matters in extracellular polymeric substances (EPS) and dissolved organic matters (DOM) after heat pretreatment with waste sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **219**: 614-623.
- [29] 姚萌, 罗红元, 谢小青, 等. 城市污水厂活性污泥胞外聚合物的三维荧光特性分析 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(1): 94-99.
- Yao M, Luo H Y, Xie X Q, *et al.* Three dimensional excitation-emission fluorescence spectra of expolymer substances in activated sludge of WWTP [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(1): 94-99.
- [30] 李志华, 刘毅, 张芹, 等. 活性污泥胞外聚合物在污水处理过程中的荧光特性 [J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(7): 3172-3176.
- Li Z H, Liu Y, Zhang Q, *et al.* Fluorescence characteristics of extracellular polymeric substances in activated sludge during wastewater treatment processes [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(7): 3172-3176.
- [31] Mopper K, Schultz C A. Fluorescence as a possible tool for studying the nature and water column distribution of DOC components [J]. *Marine Chemistry*, 1993, **41**(1-3): 229-238.
- [32] 任保卫, 赵卫红, 王江涛, 等. 胶州湾围隔实验中溶解有机物三维荧光特征 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 712-718.
- Ren B W, Zhao W H, Wang J T, *et al.* Three-dimensional fluorescence characteristic of dissolved organic matter in marine mesocosm experiment in Jiaozhou Bay, China [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(4): 712-718.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNBf-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)