

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM_{2.5}中碳质组分时空分布特征与来源 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM_{2.5}中有机物的污染特征及来源解析 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM_{2.5}中水溶性有机气溶胶 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N₂O产生特性 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析

赵志瑞^{1,2,3}, 张佳瑶^{1,2*}, 李铎¹, 李方红¹

(1. 河北地质大学水资源与环境学院, 石家庄 050031; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境生物技术重点实验室, 北京 100085; 3. 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 石家庄 050031)

摘要: 为探究生物膜对城市尾水的净化特征, 通过采用联合生物膜生态浮床技术, 考察生物膜长度、水力停留时间(HRT)及生物膜覆盖面积对含氮尾水的净化特征. 结果表明, 生物膜为1/2水深长度时, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和TN的去除率分别可达到90.82%、62.7%和81.96%, 氮去除率较高, 而生物膜长度为整个河道水深时, NH_4^+ -N的去除率最高只有22.07%, NO_3^- -N和TN的浓度变化不明显. 在HRT为6 d时, NH_4^+ -N和TN的去除率最高分别可达到82.01%和62.88%, 最低分别为55.24%和46.82%; 当HRT为12 d时, NH_4^+ -N和TN的去除率最高分别可达81.4%和79.93%, 但最低分别达到了8.73%和17.23%, 对比发现, HRT为6 d时氮的去除效率较高且稳定. 在生物膜覆盖面积为10%时, 一个运行周期内 NH_4^+ -N去除率呈下降趋势, 而覆盖面积为20%时, 去除率呈上升趋势; TN在10%和20%的膜覆盖面积条件下去除率分别为62.88%和71.09%.

关键词: 含氮尾水; 生物膜; 生态浮床; 脱氮菌; 去除率

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0809-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201905150

Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed

ZHAO Zhi-rui^{1,2,3}, ZHANG Jia-yao^{1,2*}, LI Duo¹, LI Fang-hong¹

(1. School of Water Resources and Environment, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Hebei Province Key Laboratory of Sustainable Use and Development of Water Resources, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The purification characteristics of nitrogenous tail water were investigated using a biofilm ecological floating bed technology to study biofilm length, hydraulic retention time (HRT), and biofilm coverage area with the aim to explore the purification characteristics of biofilm on urban tail water. Results show that the removal rates of NH_4^+ -N, NO_3^- -N, and TN were 90.82%, 62.7%, and 81.96%, respectively, at the half water depth to the suspended biofilm. The removal rate of NH_4^+ -N was only 22.07%, and the concentration changes of NO_3^- -N and TN were not obvious throughout the whole water depth to the suspended biofilm. When the HRT was 6 days, the removal rates of NH_4^+ -N and TN could reach 82.01% and 62.88%, respectively, whereas the lowest rates were 55.24% and 46.82%, respectively. When the HRT was 12 days, the removal rates of NH_4^+ -N and TN reached up to 81.4% and 79.93%, respectively, whereas the lowest rates were 8.73% and 17.23%, respectively. In contrast, the nitrogen removal efficiency was high and stable when the HRT was 6 days. When the coverage area was 10%, the removal rate was decreased in one operation cycle. When the coverage area was 20%, the removal rate showed an upward trend. Under the conditions of 10% and 20% biofilm coverage area, the removal rates of TN were 62.88% and 71.09%, respectively.

Key words: nitrogenous tail water; biofilm; ecological floating bed; denitrifying bacteria; removal rate

目前,我国的一些地区水质环境差、水环境隐患多、生态受损重等问题较为突出,群众健康受到严重损害,影响经济社会的可持续发展^[1]. 为了切实加大水污染的防治力度,确保国家水质安全,文献[2]中提出:截至到2020年,全国严重污染水体要有大幅度减少,水环境质量要得到阶段性改善. 京津冀区域人均占有水资源量只有全国平均水平的10%,属于水资源短缺十分严重的地区. 另外,该地区长期处于“有河皆干,有水皆污”的局面. 在文献[3]中显示,七大流域的国控断面Ⅳ、Ⅴ类和劣Ⅴ类地表水比例依然达到了35.8%.

我国北方地区雨量较小,地表水体生态基流较为匮乏,除了短暂的雨季,大部分水源来自城市污水处理厂尾水. 尾水的水量比较稳定,但现有污染物浓

度限值远高于地表水Ⅳ类标准,水中含有的有机无机氮磷,排入河道后由于温度高水流缓慢,会引起地表水体富营养化及黑臭现象等^[4,5]. TN是限定污水处理厂尾水回用的主要因素,而氮在尾水中主要以无机氮(NH_4^+ -N和 NO_3^- -N)的形式存在. 因此,如何去除城市污水处理厂尾水中的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N,是尾水强化净化的关键步骤^[6].

生物治理技术具有操作简单、运行费用低、不

收稿日期: 2019-05-20; 修订日期: 2019-08-26

基金项目: 河北省重点研发计划项目(18273615D); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-006); 河北省创新能力提升计划项目(19454209D); 河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2019118)

作者简介: 赵志瑞(1974~),女,博士研究生,副教授,主要研究方向为水处理及环境微生物, E-mail: zhiruizh@163.com

* 通信作者, E-mail: 2419682961@qq.com

产生二次污染且效果显著等优点,目前已成为氮污染治理与控制的重要方法^[7,8]. 其中的生物膜修复技术^[9]是使微生物附着生长在纤维膜表面,形成生物膜^[10],当污水流经生物膜表面时,污染物被膜上的微生物吸收转化,从而使污水得以净化. 该技术将天然过程与人工过程完美结合,已成为污染水体治理领域的研究热点^[11,12]. 但目前多数研究只局限于对浮床植物的筛选^[13]以及构建预负载高效污染物降解与转化微生物的生态浮床,强化微生物对水体中污染物的降解能力^[14],另一方面主要集中在利用微生物和水生植物的协同作用达到净化污水的目的^[15],却忽视了微生物在河道不同深度所处的微环境不同,以致于影响生物膜对水体的降解效果. 其次,水体流速较大会损害生态浮床整体的稳定性,同时,生态浮床的大面积覆盖将会造成溶解氧含量的下降,影响微生物的生长繁殖,从而影响生态浮床的净化效果^[15].

因此,试验以模拟的城市污水处理厂一级 B 出水为研究对象,选用性质稳定且透气性较好的聚丙烯纤维膜作为微生物载体,将生物浮床安装在模拟河道中,试图增加生物膜在河道中的长度、延长微生物的作用时间^[16]、提高水体中生物膜覆盖面积,考察生物膜长度、HRT 及生物膜覆盖面积对生物膜生态浮床处理含氮尾水的影响,实现水体中微生物生态系统的原位调控,强化水体自净能力,以期为地表富营养化水体的治理提供理论依据^[17,18].

1 材料与方 法

1.1 试验用水

按照污水处理厂一级 B 出水标准配制模拟污水厂尾水,初始水质指标测定结果见表 1. 试验过程全部采用 HJ 标准测定 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 等水质指标.

表 1 尾水初始水质指标/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Tail water initial water quality index/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

水质指标	DO	COD	NH_4^+	NO_3^-	TN
初始浓度	6.23	54.18	2.7	2.1	5.4

1.2 水样测定方法

氨氮浓度测定采用纳氏试剂分光光度法^[19],所用仪器装置为上海棱光技术有限公司出产的 22PC06119 型可见分光光度计. 硝酸盐氮浓度的测定所用紫外分光光度计是上海 UNICO 电子公司出产的 UV-2802,主要包括由光源、单色器、吸收池、检测器和信号处理器等部件组成,测定方法及注意事项见标准^[20]. 总氮浓度测定采用紫外分光光度

法^[21],所用仪器装置为 UV-2802 型紫外分光光度计. 试验过程中主要用鼓风干燥箱(101 型)对玻璃器皿进行干燥以及 FA2104N 型分析天平对药品进行称量. 用葡萄糖($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, AR)、磷酸氢二钾(KH_2PO_4 , AR)以及硫酸铵 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, AR] 配制试验用水.

1.3 浓度计算

测定水样中氨氮的吸光度,用超纯水代替水样作为空白,空白溶液和其他铵标准使用溶液按与样品相同的步骤测定吸光度. 水中氨氮的浓度按式(1)计算:

$$\rho_{\text{N}} = \frac{A_{\text{s}} - A_{\text{b}} - a}{b \times V} \quad (1)$$

式中, ρ_{N} 表示水样中氨氮的质量浓度(以 N 计), $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; A_{s} 表示水样的吸光度; A_{b} 表示空白试验的吸光度; a 表示校准曲线的截距; b 表示校准曲线的斜率; V 表示试料体积(mL).

测定水样中硝酸盐氮、总氮的吸光度,空白溶液和其他硝酸钾标准使用溶液制得的校准系列完成全部分析步骤,测定方法见标准^[20,21],用紫外分光光度计于波长 220 nm 和 275 nm 处测定吸光度后,分别按下式求出除空白外其他校准系列的校正吸光度 A_{r} 和空白的校正吸光度 A_{b} 及其校正吸光度 A_{s} .

$$\left. \begin{aligned} A_{\text{s}} &= A_{\text{s}220} - 2A_{\text{s}275} \\ A_{\text{b}} &= A_{\text{b}220} - 2A_{\text{b}275} \\ A_{\text{r}} &= A_{\text{s}} - A_{\text{b}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $A_{\text{s}220}$ 表示标准溶液在 220 nm 波长的吸光度; $A_{\text{s}275}$ 表示标准溶液在 275 nm 波长的吸光度; $A_{\text{b}220}$ 表示空白溶液在 220 nm 波长的吸光度; $A_{\text{b}275}$ 表示空白溶液在 275 nm 波长的吸光度.

总氮计算:按式(2)中计算标准溶液的 A_{r} 值与相应地总氮含量(μg)绘制标准曲线,再根据水样 A_{r} 值,在校准曲线上查出相应地总氮含量(μg),总氮质量浓度 c_{N} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)按下式计算:

$$c_{\text{N}} = \frac{A_{\text{r}} - a}{b \times V} \quad (3)$$

式中, A_{r} 表示试样校正吸光度; V 表示试样体积 mL; a 表示校准曲线的截距; b 表示校准曲线的斜率.

硝酸盐氮计算:按式(2)中计算硝酸盐氮标准溶液的 A_{r} 值与相应的硝酸盐氮质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)绘制标准曲线,根据求得的水样吸光度 A_{r} 值,从校准曲线中查得相应的硝态氮质量浓度.

1.4 试验装置构建

1.4.1 模拟河道反应器

本试验所用装置为模拟的河道反应器,设定反

应器长、宽和高分别为 18、0.5 和 0.5 m, 坡度为 10‰。模拟河道反应器由有机玻璃制成, 设有进水区、反应区和出水区, 进水区与反应区之间用挡水板隔开。

具体设计见图 1 与图 2。

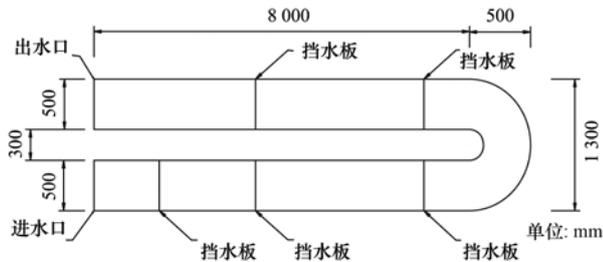


图 1 模拟河道平面图

Fig. 1 Simulated river course plan

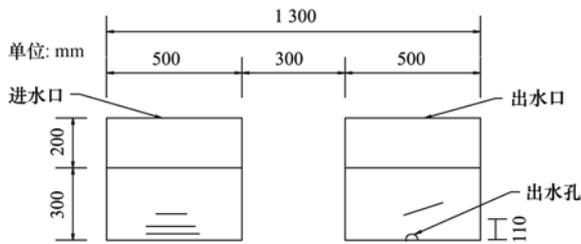


图 2 模拟河道剖面

Fig. 2 Simulated channel profile

(1) 进水口处设置有高度为 300 mm 的挡板, 形成存水槽以保证河道内的水流稳定, 避免进水对河道内产生过大搅动。

(2) 每条河道配置一台蠕动泵, 以便设定不同的进水流量。河道每隔 4 m 设置一个高度不同的挡板, 使河道内水流动过程中产生跌水为河道内的水加氧, 模拟真实环境。

(3) 河道底端铺设底泥, 模拟真实河床同时便于生物膜的形成。出水口设置高度为 300 mm 的挡板, 河道内的水在挡板上方溢流而出, 形成稳定水面。

1.4.2 生物浮床

浮床床体为聚乙烯板, 其 4 个角各有一个圆孔用来连接已经喷上菌胶液的纤维膜(图 3)。纤维膜采用聚丙烯材料, 它具有很强的散热性能, 对水的阻力较小, 布水、布气性能好, 有益于微生物的生长, 同时又具有切割气泡的作用。根据河道深度, 按照比例截取生物膜长度。中间为直径 10 cm 的小孔, 用于后期栽培植物, 美化河道环境。

1.5 运行工况

试验采用连续式进水方式, 由蠕动泵固定流速通入河道, 河道出水由相同流速的蠕动泵抽出, 以保证河道中水体的流动性和水量的一致性。试验采用

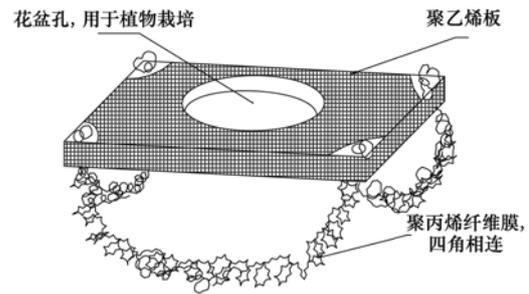


图 3 生物膜生态浮床装置结构

Fig. 3 Structure of ecological biofilm floating bed device

3 种工况, 各运行 3 个周期。工况 1 在河道反应器内通入污水处理厂尾水, 将生态浮床上悬挂不同长度生物膜(1/2 水深、1 倍水深)运行, 生态浮床覆盖面积为河道的 10%, 温度为 25℃, 时间为 10 d; 工况 2 模拟污水处理厂尾水, 在不同 HRT(6 d 和 12 d) 条件下运行, 控制生物浮床生物膜长度为 1/2 水深, 膜覆盖面积为 10%, 温度为 25℃; 工况 3 模拟污水处理厂尾水, 在不同生物浮床覆盖面积(0%、10% 和 20%) 条件下运行, 控制河道生物浮床挂膜长度为 1/2 水深, HRT 为 6 d, 温度为 25℃, 运行 2 个周期。

2 结果与讨论

2.1 悬挂式生物膜对含氮尾水的净化特征及影响分析

图 4 表示工况 1 运行条件下空白河道与悬挂生物膜河道对含氮尾水中氮素的去除效果分析。

从图 4(b) 可以看出, 空白河道的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度有一定的上升趋势, 但变化不太明显。悬挂 1/2 水深生物膜的河道内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在前 3 d 处于下降趋势, 浓度从 $0.098 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.009 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而在第 5 d 时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值上升到了 $0.522 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之后又降低到 $0.062 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 到第 7 d 后趋于稳定, 说明 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值在第 5 d 出现较大波动, 但整体变化不明显。而整体水深悬挂生物膜的河道在第 3 d 和第 7 d $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度出现拐点, 浓度值分别为 $0.498 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.601 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 河道内初始 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值为 $0.639 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在第 9 d 时已经上升到 $1.093 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体来看浓度处于上升趋势。结果表明, 在空白河道内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值有所上升主要是因为河道内微生物的自身代谢较弱^[22, 23], 随着时间的增加, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 不断积累。在悬挂生物膜的河道, 水中氮素的转化在缺氧条件下主要进行的是氨化作用, 有学者研究表明: 氨化作用对溶解氧要求很广泛, 厌氧或好氧条件下均可进行^[24]。而硝化及反硝化细菌主要是好氧自养型细菌, 由于河道下部溶解氧浓度较低并且悬浮类有机物及藻类较少^[25, 26], 从而影响 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的转化。Cooper 等^[27] 的研究

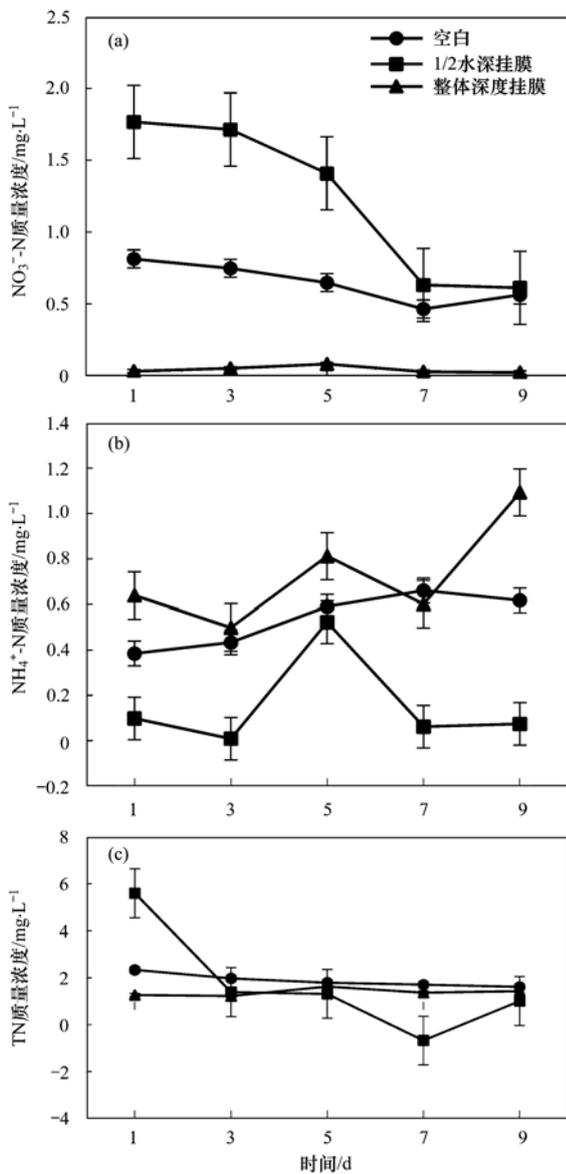


图4 悬挂1/2水深及整体水深长度生物膜对水中氮素的去除效果

Fig. 4 Removal of nitrogen from water by biofilm at half water depth and entire water depth

指出,DO含量下降,氨氮转化的效率不超过15%.因此,整体挂膜河道中的 NH_4^+ -N浓度出现上升趋势.

由图4(a)和4(c)可以看出:悬挂1/2水深生物膜的河道内的 NO_3^- -N和TN都呈下降趋势,且 NO_3^- -N值从 $1.77\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 $0.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降解率达到了62.7%,TN值从 $5.60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 $1.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降解率达到了81.96%.空白河道和整体水深悬挂生物膜的河道则变化不太明显.说明在河道上部溶解氧要大于河道底部,悬挂1/2水深生物膜的河道内硝化细菌有较优越的溶解氧环境,繁殖较快, NO_3^- -N的去除效果要明显大于其他两个河道.此前一些研究指出:系统中硝酸盐积累量的减少和增加主要由好氧段硝酸盐的生成量与好氧段同步硝化

反硝化^[28]以及后续缺氧段反硝化脱氮量共同作用的结果.氧的可利用性会影响AOB的分布,DO浓度过高对硝化速率的影响不大,但浓度过低则会造成硝化速率降低^[29].生物膜悬挂到河道底部时,河道底部溶解氧浓度较低从而抑制了生物膜上硝化作用,在河道1/2水深处水环境中具有合适的溶解氧.因此,河道内悬挂1/2水深的生物膜对河道内氮素的去除较明显.

2.2 生物浮床在不同HRT下对含氮尾水的净化特征分析

图5表示工况2运行条件下空白河道与不同HRT河道对含氮尾水中氮素的去除效果分析.

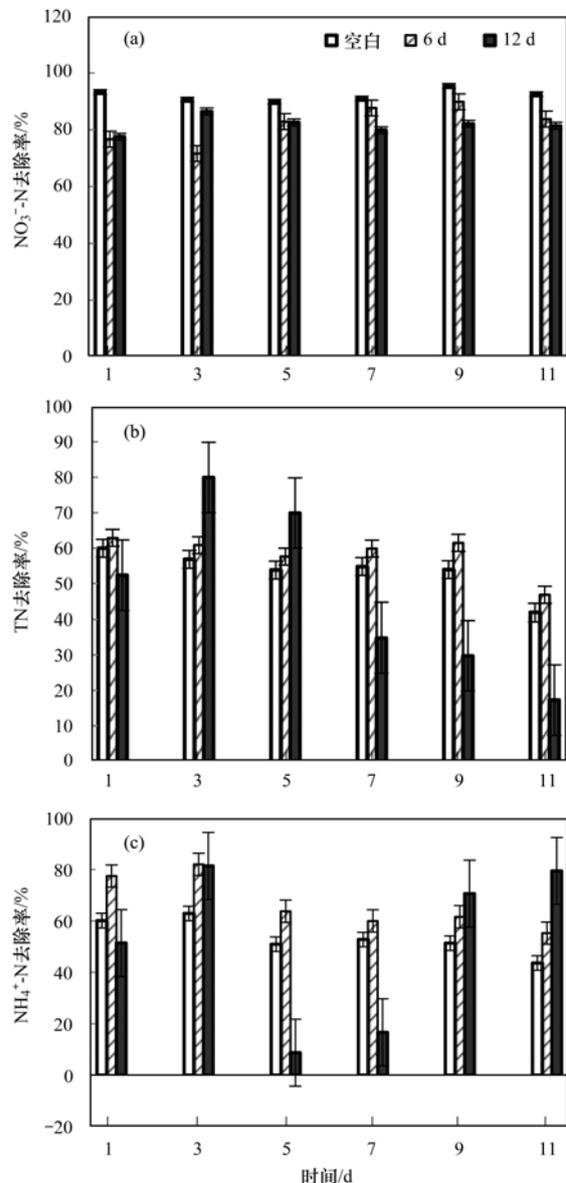


图5 不同HRT对含氮尾水中氮素的去除效果分析

Fig. 5 Analysis of removal effect of nitrogen in nitrogen-containing tail water at different HRT

由图5(a)可以看出,在不同HRT条件下 NO_3^- -N去除率均维持在80%~90%,而空白河道的

NO_3^- -N去除率达到了90%以上,这与苑泉等^[16]的研究HRT分别为12、8和4h时,对 NO_3^- -N去除率影响不大,均能达到90%以上的结果相一致.说明在不同HRT条件下,附着微生物生物浮床的同步硝化反硝化作用对于 NO_3^- -N的去除效率都较高,且空白河道 NO_3^- -N的去除主要依靠河道内藻类和其他微生物代谢^[30].从图5(b)和5(c)可以看出,在HRT为6d时,TN的去除率总体维持在60%左右, NH_4^+ -N去除率能达到70%左右,而在HRT为12d时, NH_4^+ -N及TN的去除率波动性较大,TN的去除率最高可达79.93%,最低到17.23%, NH_4^+ -N的去除率最高可达81.4%,最低到8.73%.有研究表明,HRT较长会使生物膜脱落,填料上附着态微生物转化为悬浮态微生物^[14].试验结果说明,当HRT为6d时,生态浮床上的微生物可充分与水体接触且相对稳定,能较好地发挥作用,对于去除水中氮素的去除效果更明显.

2.3 生物浮床在不同覆盖面积下对含氮尾水的净化特征

图6表示工况3运行条件下空白河道与不同生物膜覆盖面积河道对含氮尾水中氮素的去除效果分析.

由图6(b)可以看出:在生物浮床覆盖面积为10%时,覆盖面积较小,微生物数量少,而水中 NH_4^+ -N的去除效率在逐步降低,且和空白河道变化趋势相同,说明当生物量较小时,随着时间的增加,水中的硝化细菌的转化效率减弱^[31],但在生物浮床覆盖面积为20%时,在初期由于微生物浓度的急剧增加,产生了一定的抑制作用,使得 NH_4^+ -N去除效果有所下降,但随着时间的增加,水中 NH_4^+ -N的去除效率在不断增加,去除率达到了87.62%.有学者研究表明,成倍加入人工挂膜的浮床对于水中 NH_4^+ -N的去除有很明显的作用^[18].因此,生物浮床覆盖面积为河道的20%时对水中 NH_4^+ -N的去除效果较好.从图6(c)可以看出,在生物浮床覆盖面积为10%和20%时,TN最高去除率分别为62.88%和71.09%,但在覆盖面积为10%时TN的去除率是呈下降趋势,而覆盖面积为20%时TN的去除率是呈上升趋势的.而从图6(a)结果中不难发现, NO_3^- -N的去除效率都达到80%以上,但覆盖生物浮床河道去除率是呈现上升趋势.结果表明,由于生物浮床的覆盖面积增加,作用于水体的氨化、硝化和同步硝化反硝化细菌的生物量相应地增加,活性增强^[32],因此,当生物浮床面积为20%时对含氮尾水中氮素的去除具有明显效果.

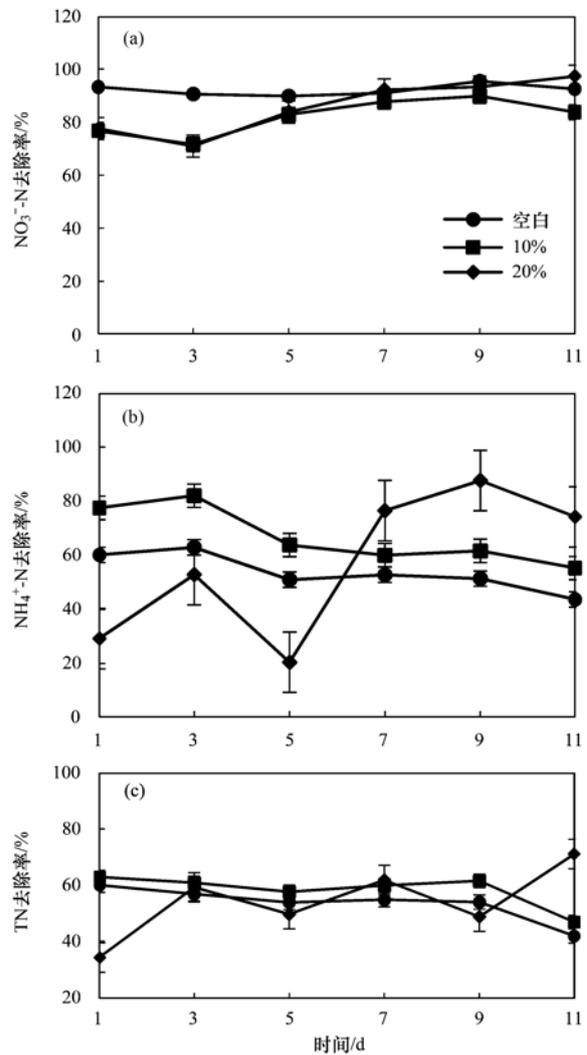


图6 不同生物浮床覆盖面积对含氮尾水中氮素的去除效果分析
Fig. 6 Analysis of removal effect of nitrogen on nitrogenous tail water with different biological floating bed coverage extent

3 结论

(1)在河道反应器内悬挂不同长度生物膜(1/2水深和1倍水深)运行条件下,悬挂1/2水深生物膜的河道内硝化细菌有较优越的环境, NO_3^- -N的去除效果要明显大于空白河道和整体水深挂膜河道,对含氮尾水中氮素有较明显的去除效果.

(2)在控制生物浮床生物膜长度为1/2水深,膜覆盖面积为10%,温度25℃,不同HRT(6d,12d)运行条件下,不同HRT对 NO_3^- -N去除率影响不大,当HRT为6d时,生态浮床上的微生物可充分与水体接触且相对稳定,能较好地发挥作用,对于去除水中氮素的去除效果更明显.

(3)在控制河道生物浮床挂膜长度为1/2水深,HRT为6d,温度为25℃,不同生物浮床覆盖面积(0%、10%和20%)运行条件下,生物浮床覆盖面积为20%时,对含氮尾水中氮素的去除具有明显效果.

参考文献:

- [1] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [2] 国务院. 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知; 国发[2015]17号[A]. 2015-04-16.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2018 年中国环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019.
- [4] 王耀辉. 城市污水处理厂尾水再生利用现状及工艺探讨[J]. 东莞理工学院学报, 2013, **20**(1): 95-99.
Wang Y H. Regeneration and reuse technologies of current situation of treated water from urban sewage treatment plant[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2013, **20**(1): 95-99.
- [5] 池素玮. 城市污水处理厂氮磷达标排放新方法的研究[J]. 给水排水, 2008, **34**(S1): 170-173.
- [6] 吕鹏翼, 罗金学, 韩振飞, 等. 生物膜技术在污染河流原位修复中的应用及研究进展[J]. 水处理技术, 2017, **43**(11): 1-7.
Lv P Y, Luo J X, Han Z F, *et al.* Application and research progress of biofilm technology in polluted river in-situ bioremediation[J]. Technology of Water Treatment, 2017, **43**(11): 1-7.
- [7] Cao G H, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater[J]. Bioresource Technology, 2013, **128**: 604-611.
- [8] Ławniczak Ł, Marecik R, Chrzanowski Ł. Contributions of biosurfactants to natural or induced bioremediation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97**(6): 2327-2339.
- [9] 李孟洋. 污水处理厂尾水深度处理工艺研究[J]. 低碳世界, 2016, (17): 4-6.
- [10] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix[J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, **8**(9): 623-633.
- [11] 杨宇. 采用生物膜法处理城镇污水的应用研究[J]. 科技展望, 2016, **26**(33): 48.
- [12] Sheng G P, Yu H Q. Formation of extracellular polymeric substances from acidogenic sludge in H₂-producing process[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **74**(1): 208-214.
- [13] 王超, 王永泉, 王沛芳, 等. 生态浮床净化机理与效果研究进展[J]. 安全与环境学报, 2014, **14**(2): 112-116.
Wang C, Wang Y Q, Wang P F, *et al.* Research review on the purification mechanism and effect by eco-floating bed method[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, **14**(2): 112-116.
- [14] 张丽艳, 郭玲. 探讨千屈菜生物浮床载带异养硝化-好氧反硝化菌对水体中氮磷的去除效果[J]. 中国资源综合利用, 2019, **37**(5): 157-159.
Zhang L Y, Guo L. Study on the removal effect of *Lythrum salicaria* L. for nitrogen and phosphorus in waterbody on ecological floating bed with heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacteria [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, **37**(5): 157-159.
- [15] 王郑, 崔康平, 许为义, 等. 组合型生态浮床处理农家乐污水[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(1): 455-460.
Wang Z, Cui K P, Xu W Y, *et al.* Combined ecological floating bed for farmhouse wastewater treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(1): 455-460.
- [16] 苑泉, 王海燕, 刘凯, 等. HRT 对城市污水厂尾水反硝化深度脱氮的影响[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(6): 987-993.
- Yuan Q, Wang H Y, Liu K, *et al.* Effects of HRT on denitrification for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(6): 987-993.
- [17] Wang M, Zhang D Q, Dong J W, *et al.* Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate—A review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, **57**: 293-311.
- [18] 赵志瑞, 李铎, 万敬敏, 等. 城市污水脱氮及尾水污染防治[M]. 北京: 地质出版社, 2017. 64-65.
- [19] HJ 535-2009, 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法[S].
- [20] HJ/T 346-2007, 水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法(试行)[S].
- [21] HJ 636-2012, 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S].
- [22] Cao W P, Zhang H H, Wang Y M, *et al.* Bioremediation of polluted surface water by using biofilms on filamentous bamboo [J]. Ecological Engineering, 2012, **42**: 146-149.
- [23] Herrero M, Stuckey D C. Bioaugmentation and its application in wastewater treatment: a review[J]. Chemosphere, 2015, **140**: 119-128.
- [24] Yuan Q, Wang H Y, Hang Q Y, *et al.* Comparison of the MBBR denitrification carriers for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(18): 13970-13979.
- [25] 杨航, 黄钧, 刘博. 异养硝化-好氧反硝化菌 *Paracoccus pantotrophus* ATCC 35512 的研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2008, **14**(4): 585-592.
Yang H, Huang J, Liu B. Advances in research of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification strain *Paracoccus pantotrophus* ATCC 35512[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2008, **14**(4): 585-592.
- [26] Guo L Y, Chen Q K, Fang F, *et al.* Application potential of a newly isolated indigenous aerobic denitrifier for nitrate and ammonium removal of eutrophic lake water [J]. Bioresource Technology, 2013, **142**: 45-51.
- [27] Cooper P, Griffin P, Humphries S, *et al.* Design of a hybrid reed bed system to achieve complete nitrification and denitrification of domestic sewage[J]. Water Science and Technology, 1999, **40**(3): 283-289.
- [28] Pai S L, Chong N M, Chen C H. Potential applications of aerobic denitrifying bacteria as bioagents in wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 1999, **68**(2): 179-185.
- [29] Carter J P, Hsiao Y H, Spiro S, *et al.* Soil and sediment bacteria capable of aerobic nitrate respiration [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, **61**(8): 2852-2858.
- [30] 朱静平, 程凯, 孙丽. 水培植物净化系统不同氮磷去除作用的贡献[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(5): 175-178.
Zhu J P, Cheng K, Sun L. Contribution of different roles on total nitrogen and total phosphorus removal in aquatic plants purification system[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(5): 175-178.
- [31] Robertson L A, Kuenen J G. Aerobic denitrification: a controversy revived[J]. Archives of Microbiology, 1984, **139**(4): 351-354.
- [32] Reungoat J, Escher B I, Macova M, *et al.* Biofiltration of wastewater treatment plant effluent: effective removal of pharmaceuticals and personal care products and reduction of toxicity[J]. Water Research, 2011, **45**(9): 2751-2762.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. (1005)