

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



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一字, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

3 种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程

刘铭羽^{1,2}, 夏梦华^{1,2}, 李远航^{1,2}, 陈坤^{1,3}, 赵聪芳^{1,3}, 李希^{1*}, 李裕元¹, 吴金水¹

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410006)

摘要: 养殖场直排废水负荷高, 易造成湿地植物无法生长、处理效率低等问题. 为使养殖废水通过前端生态治理技术, 出水达到湿地植物耐受范围, 探索高效利用作物秸秆, 降低污染负荷的可行性, 开展野外控制实验, 对比分析了三大粮食作物秸秆——麦秸、稻草和玉米秆对猪场废水 N、P 的吸附去除效率. 三级基质池各填充 12.5 kg 干秸秆, 设定连续式进水, 水力停留时间 7 d. 结果表明, 在进水 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TP 平均质量浓度分别为 1 652.83、371.31、303.51、0.67 和 65.22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 麦秸对 COD、TN 和 TP 的去除效果最好, 去除率分别为 32.1%、40.9% 和 33.3%, 稻草对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果最好, 去除率达到 43.4%. 经 180 d 处理后 3 种基质材料木质素、纤维素和半纤维素均未完全分解. 各种基质材料木质素降解速率低于纤维素与半纤维素, 且稻草中木质素和纤维素降解最快, 麦秆中半纤维素降解最快. 结果表明, 麦秆和稻草对去除高浓度养殖废水污染物效果均好于玉米秆, 并且建议基质材料更换周期为 5 个月, 可为生物基质材料运用于养殖废水处理提供数据支撑.

关键词: 麦秸; 稻草; 玉米秆; 养殖废水; 纤维素

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3650-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201812171

Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials

LIU Ming-yu^{1,2}, XIA Meng-hua^{1,2}, LI Yuan-hang^{1,2}, CHEN Kun^{1,3}, ZHAO Cong-fang^{1,3}, LI Xi^{1*}, LI Yu-yuan¹, WU Jin-shui¹

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410006, China)

Abstract: The direct discharge of wastewater from pig farms can restrict wetland plant growth meaning that constructed wetlands (CWs) have generally low treatment efficiency. The treatment of farming wastewater using pre-ecological treatment technologies can be used to ensure that effluent concentrations reach the tolerable limits of wetland plants. This study focused on the efficient use of crop straw for reducing the pollution load of swine wastewater. Using field-scale pilot tests, wheat straw, straw, and corn stalk were used as test biological matrix pool fillers to treat the farming wastewater. Continuous intake of wastewater and a hydraulic retention time of 7 days was adopted. When the average concentrations of COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and TP in the influent were 1 652.83 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 371.31 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 303.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and 65.22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, wheat straw had the greatest removal effect on COD, TN, and TP, achieving a removal rate of 32.1%, 40.9%, and 33.3%, respectively. The removal efficiency of straw on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was highest, reaching 43.4%. After 180 days, the lignin, cellulose, and hemicellulose of the three matrix materials were not completely decomposed. The degradation rate of lignin was lower than for cellulose and hemicellulose; the degradation of lignin and cellulose in the straw was fastest; and the degradation hemicellulose in wheat straw was fastest. The results show that wheat straw and straw offer a higher efficiency treatment for swine wastewater than corn stalk, and the suggested replacement cycle period is five months. These results provide initial data to support the application of biological matrix materials in the treatment of swine wastewater.

Key words: wheat straw; straw; corn stalk; farming wastewater; cellulose

养殖废水为畜禽养殖场产生的尿液、粪便及围栏冲洗水, 由于一般工艺无法低成本、高效率去除其中的污染物, 畜禽废水的治理已经成为养殖业持续良性发展的瓶颈. 人工湿地集中净化养殖废水有诸多优势, 解决了工业化处理模式运行成本高等缺陷. 但是随着养殖业发展, 养殖规模逐渐扩大, 其有机物含量较高, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 SS 质量浓度高达 5 000 ~ 10 000、1 ~ 500 及 1 000 ~ 5 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 等^[1], 养殖废水原液直接排入人工湿地会导致植物

死亡, 去除效率低等现象, 如何使养殖废水经过前期生态处理, 使出水达到湿地植物耐受范围的研究较少. 此外, 冬季湿地系统中多数植物停止生长甚至死亡, 导致人工湿地的净化能力降低. 因此采用

收稿日期: 2018-12-21; 修订日期: 2019-02-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800100); 河南省重大科技专项(161100310600)

作者简介: 刘铭羽(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业面源污染与流域农田环境工程, E-mail: liumingyu16@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: lixi@isa.ac.cn

耐受低温环境的前期生态处理, 有助于弥补冬季湿地植物的不足^[2].

结合国内外对养殖废水处理研究, 发现基质填料是污染物净化的功能主体, 是生态治理的重要环节. 传统基质材料价格低、易获取, 但有机物的累积会导致湿地基质堵塞, 影响基质材料对磷的吸附能力, 增加后期管理与维护成本, 令广大养殖户难以接受. 同时, 许多研究表明, 向基质池投加不同类型的液体有机碳源如甲醇、乙醇或乙酸等, 可为反硝化提供碳源^[3]. 但与液态碳源相比, 固体有机物质可以避免反硝化过程碳源过量或不足量的问题, 易于控制剂量且价格低廉^[4]. 如 Liu 等^[5]的研究发现, 聚(丁二酸丁二醇酯)/竹粉(PBS/BP)作为碳源可有效去除循环水产养殖系统中硝酸盐, 且没有亚硝酸盐和低氮积累, 同时添加竹粉可降低经济成本. 而针对农村地区高负荷畜禽养殖废水的 C/N 比较低的情况, 来源广、成本低的农作物秸秆可作为基质材料的首选. 虽然秸秆高温煨烧而成的生物炭具有较优的吸附性能, 可用于污水处理并有降低污水中的氨氮和磷酸盐的作用^[6, 7], 在短时间内就能达到很好去除效果, 其作用原理主要在于其疏松多孔的生物质炭结构易于促进微生物的大量繁殖, 但是由于有机碳源不足缩短了基质材料的使用与更换周期, 因此生物炭更适合与湿地植物搭配填充促进植物根系生长^[8]. 玉米秆、稻草与麦秸等木质纤维类物质, 纤维素、木质素和半纤维素, 纤维素所占比例最大, 约为 40%, 这 3 种成分的质量占植物纤维质原料总质量的 80% ~ 95%. 因此, 未加工的玉米秆、稻草、麦秸、芦苇、软硬木材等生物基质材料也可在微生物的作用下转化, 释放出单糖为反硝化提供碳源, 还可作为基质填料中微生物生长的载体提升脱氮效率, 并且渗透系数高^[9, 10]. 同时, 作物秸秆与水生植物茎叶类似, 其表面的附着层为反硝化作用提供了微环境和物质基础^[11].

因此, 选用作物秸秆作为基质池填料的前期生态处理既能满足广大养殖户对污水治理的需求, 又能降低管理难度. 李裕元等^[12]的研究发现, 稻草对养猪场废弃物中 N、P 和 COD 有极好的处理效果, 在长江中下游广大亚热带地区有很好地推广应用前景. 南北方地区耕地类型存在差异, 主要农作物不尽相同. 为了就地取材, 降低成本, 现研究比较大三大粮食作物秸秆——稻草、麦秸和玉米秆对养殖废水处理效果及基质材料降解过程, 以期秸秆应用于养殖废水处理提供科学依据, 并对减少农副产品对生态环境的污染具有重要的科学意义和实践价值.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外控制实验位于湖南省长沙县金井镇(112°56' ~ 113°30'E、27°55' ~ 28°40'N), 实验小区地处典型亚热带湿润季风气候区. 年平均气温 17.5℃, 气温在 -5.2 ~ 40.1℃ 范围内, 无霜期 274 d. 降水集中于 4 ~ 10 月, 多年降雨量在 1 200 ~ 1 500 mm^[13].

1.2 实验设计

实验小区设置 4 个处理, 稻草、麦秸、玉米秆与空白对照, 各处理由 3 个同等大小基质池串联(长 × 宽 × 深: 100 cm × 50 cm × 50 cm) 组成, 每级基质池内填充 12.5 kg 大小均匀风干处理的作物秸秆, 每个处理 3 次重复(空白对照设置两个重复). 进水由蠕动泵连续泵入基质池内, 水力停留时间为 7 d(图 1). 实验观测于 2017 年 9 月开始, 2018 年 3 月结束.

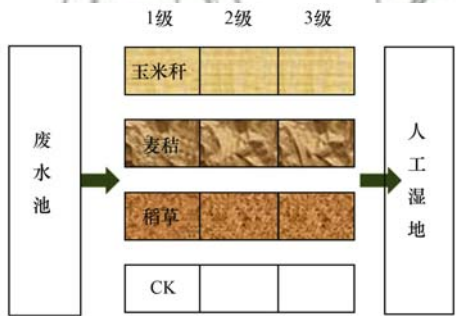


图 1 实验小区示意

Fig. 1 Schematic diagram of the test set-up

1.3 实验材料

稻草、玉米秆取自中国科学院长沙农业环境站附近牛场, 并从河南省开封市采购麦秸, 3 种秸秆常规营养成分含量见表 1.

表 1 秸秆常规营养成分含量/g·kg⁻¹

Table 1 Typical nutrient contents of the different straw types/g·kg ⁻¹			
项目	稻草	麦秸	玉米秆
干物质	863.3	834.8	810.5
中性洗涤纤维	706.8	684.3	672.1
酸性洗涤纤维	550.8	523.8	515.9
酸性洗涤木质素	107.0	77.7	84.5
纤维素	352.4	354.7	350.0
半纤维素	156.0	160.5	156.2
粗灰分	91.4	91.4	81.4

本实验进水取自白沙乡大花养猪场经过厌氧处理的沼液废水, 水质具有一定的波动性, 各主要污染物成分(COD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和TP)质量浓度变化范围分别为 1454.49 ~ 1851.17、308.73 ~ 433.89、259.81 ~ 347.21、0.40 ~ 1.27 和 53.17 ~

77.27 mg·L⁻¹.

1.4 样品采集与分析

1.4.1 养殖废水的采集与分析

每周收集基质池进水和出水的水样各 200 mL. 取 100 mL 左右的水样进行离心, 取上清液放入干净的采样瓶中, 用于 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的测定, 剩余的水样(未离心的水样)用于 COD、总氮、总磷的测定. 分析测定指标包括: pH、温度(*T*)、氧化还原电位(*Eh*)、溶解氧(*DO*)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、TP 和 COD. 物理指标(pH、*T*、*Eh* 和 *DO*)用便携式 *DO* 测定仪对每次进水前的进水和收集后的瞬时出水进行测量, 水样中 NH₄⁺-N 的浓度直接用流动注射仪(AA3, 德国 SEAL 公司)测定; TN 浓度采用碱性过硫酸钾消解-流动注射仪法(GB11894-89); TP 浓度测定采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法(GB 11893-89); COD 浓度测定采用重铬酸盐法(GB 11914-89)^[14].

1.4.2 基质材料的采集与分析

基质材料样品每月采集一次. 总计采集 7 次(含背景值), 共 165 个样品. 取预先填埋于基质池中的白色尼龙网袋, 清洗后放于信封袋内, 于 105℃ 烘箱中杀青 30 min, 然后于 80℃ 下烘至恒重, 称干重. 将剩余样品研磨、过筛(40 目)处理后装于自封袋保存. 进行纤维素、木质素、半纤维素的测量. 使用 FT12 自动纤维分析仪, 采用中性、酸性洗涤纤维测定步骤^[15]. 后经 72% 硫酸溶液浸泡, 除去酸性洗涤木质素, 置于 550℃ 马弗炉中灰化 3h 得到粗灰分.

1.5 数据处理与统计

1.5.1 水质指标计算方法

各污染指标去除率(*r*)、进水负荷(*m*₀)、出水负荷(*m*₁)及去除负荷(*p*)分别采用如下公式计算:

$$r = \frac{(c_1 - c_2)}{c_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$m_0 = c_1 \times Q \quad (2)$$

$$m_1 = c_2 \times Q \quad (3)$$

$$p = m_0 - m_1 \quad (4)$$

式中, *c*₁ 和 *c*₂ 为基质池进、出水浓度(mg·L⁻¹); *Q* 为基质池进水流量(L·d⁻¹).

1.5.2 纤维素、木质素和半纤维素含量计算方法

通过中性、酸性洗涤纤维质量间接计算纤维素、半纤维素及酸性洗涤木质素(ADL)含量. 中性洗涤纤维(NDF)包括纤维素、半纤维素、木质素(ADL)、硅酸盐, 酸性洗涤纤维(ADF)包括纤维素、木质素、硅酸盐. 各纤维成分质量分数计算公式如下:

$$\text{NDF} = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{ADF} = \frac{m_3 - m_2}{m} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{半纤维素} = \text{NDF} - \text{ADF} \quad (7)$$

$$\text{纤维素} = \text{ADF} - \text{CZ} \quad (8)$$

$$\text{ADL} = \text{CZ} - \text{粗灰分} \quad (9)$$

式中, *m*₁ 为纤维袋和 NDF 的质量(g); *m*₂ 为纤维袋的质量(g); *m* 为样本质量(g); *m*₃ 为纤维袋重和 ADF 的质量(g); CZ 为经 72% H₂SO₄ 处理后的残渣的质量(g); 粗灰分为马弗炉灼烧后残余物质质量(g).

1.5.3 数据处理与统计

采用 Excel 2013 进行数据分析, OriginPro 8 作图, 并用 SPSS 19 进行 one-way ANOVA 单因素方差分析, 在显著性水平 *P* < 0.05 或 0.01 下表示差异显著. 水样数据及基质材料样品均在重复实验中取平均值与标准差.

2 结果与讨论

2.1 3 种基质材料去除效果分析

经基质池处理后出水 COD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 质量浓度分别下降到 1115.78 ~ 1146.01、223.36 ~ 263.99、167.08 ~ 200.12、0.34 ~ 0.41 和 43.67 ~ 47.51 mg·L⁻¹ 均低于对照处理, 对照组出水 COD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 与 TP 质量浓度分别为 (1459.2 ± 150.9)、(306.9 ± 27.6)、(251.3 ± 13.7)、(0.59 ± 0.12) 和 (62.8 ± 12.8) mg·L⁻¹. 经基质池处理后, 废水浓度降至绿狐尾藻人工湿地耐受范围, 适宜绿狐尾藻生长以便其资源化利用^[16].

从图 2~6 可以看出, 实验开展后 0~5 周不同基质材料对不同污染物的去除差异不大, 这有可能跟基质材料刚投加到废水中, 各基质材料表面附着微生物需驯化一段时间有关. 总体上, 稻草对 COD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 质量浓度分别降低到 (1115.78 ± 161.28)、(226.77 ± 46.80)、(171.39 ± 31.56)、(0.41 ± 0.16) 和 (43.75 ± 10.41) mg·L⁻¹, 麦秸对 COD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 质量浓度分别降至 (1146.01 ± 218.59)、(223.36 ± 50.88)、(167.08 ± 39.91)、(0.30 ± 0.13) 和 (43.67 ± 9.05) mg·L⁻¹, 玉米秆对 COD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 质量浓度分别处理至 (1124.86 ± 161.66)、(263.99 ± 50.52)、(200.12 ± 34.75)、(0.34 ± 0.10) 和 (47.51 ± 9.93) mg·L⁻¹.

实验 5 周后, 稻草及麦秸对污染物去除率呈现

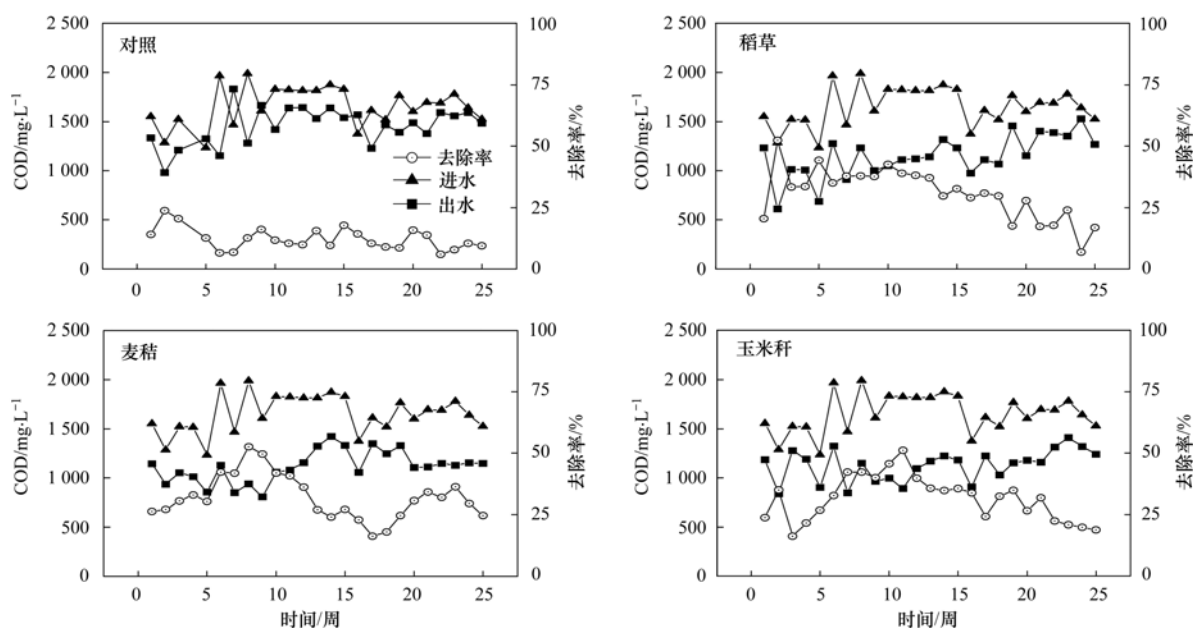


图2 基质池 COD 进出水浓度及去除率动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in COD in inlet and outlet water and its removal rate in the matrix pools

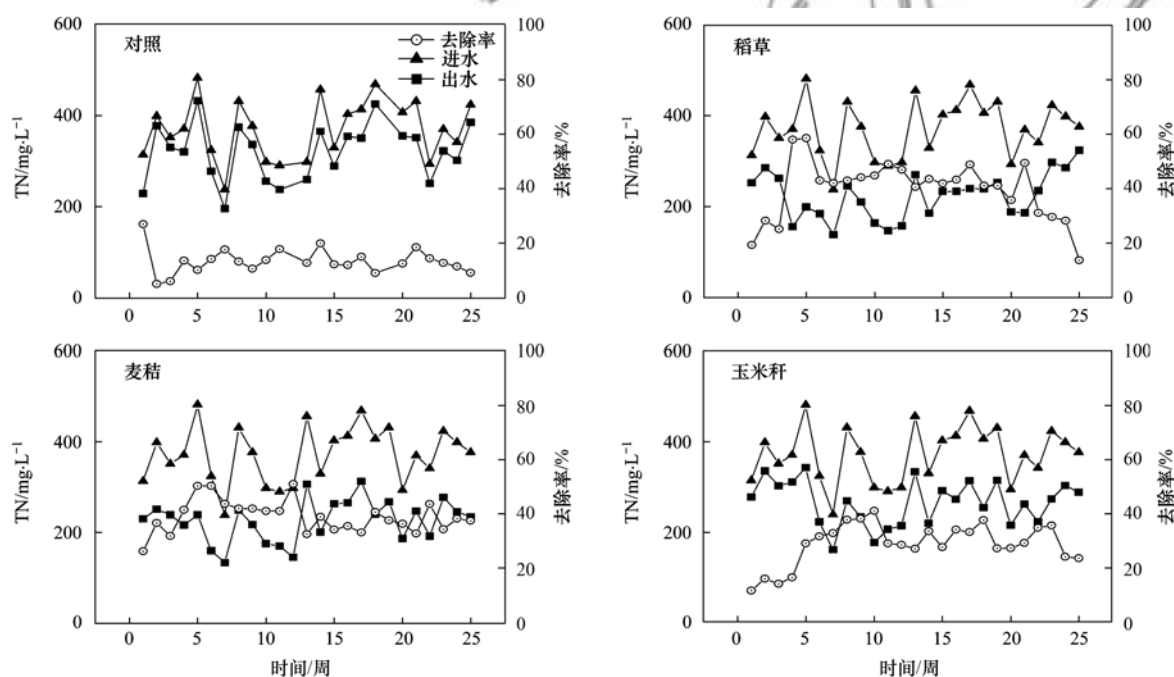
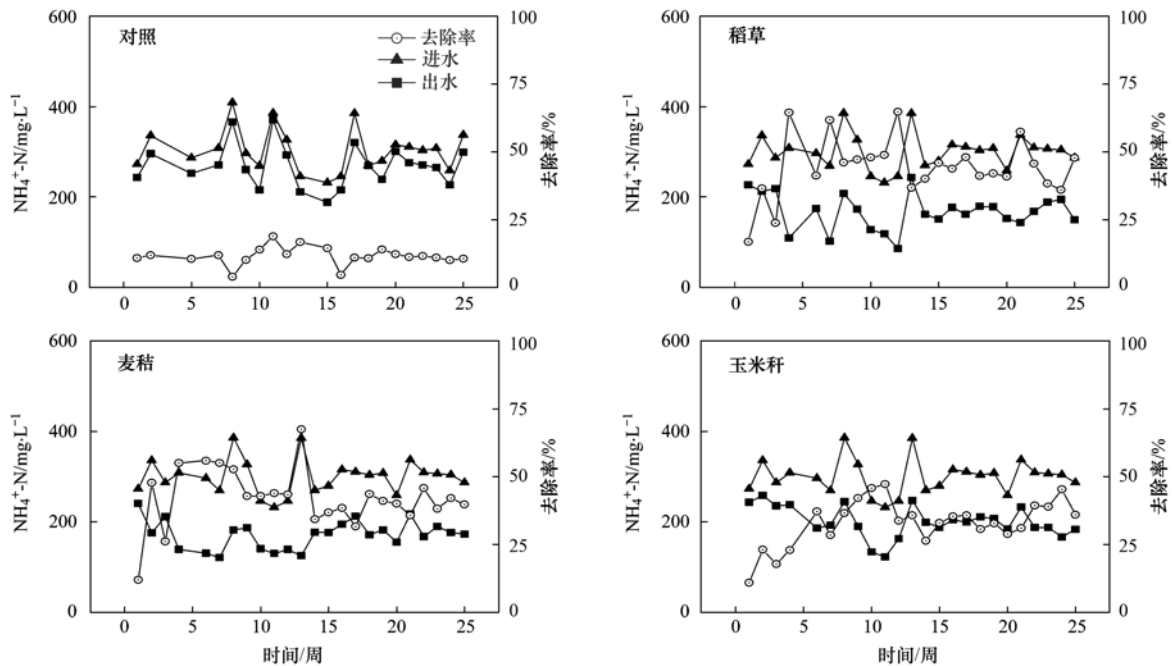
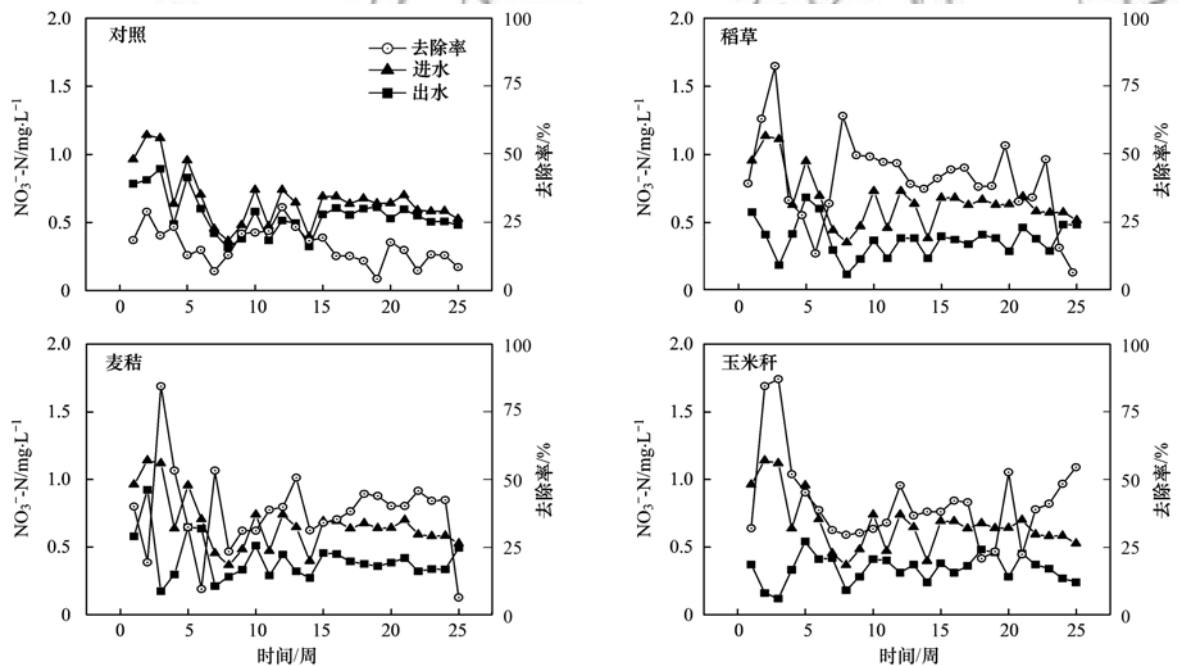


图3 基质池 TN 进出水浓度及去除率动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in TN in inlet and outlet water and its removal rate in the matrix pools

升高-降低-平稳下降的变化趋势, 11 ~ 12 月处理效率逐渐升高达到极大值. 玉米秆对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 去除率缓慢增长, 这有可能与材料表面性质及木质素、纤维素分解效率等相关. 从植物学的角度分析, 玉米秆的外皮部, 木质素含量最高, 韧皮坚硬, 外皮部分细胞壁木质化程度较高^[17], 需要更充分的时间用于微生物的繁殖与纤维素的分解, 因此玉米秆对污染物去除率在 12 月前后达到极大值. 进入 12 月后期受温度影响去除率大幅下降. 次年 3 月温度回升后去除率趋于稳定.

经过 6 个月实验周期, 秸秆材料作为基质材料处理高浓度养殖废水效果明显, 麦秸对 COD、TN、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 TP 平均去除率分别为 32.1%、40.9%、42.2%、38% 和 33.3%; 稻草对 COD、TN、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 TP 平均去除率分别为 30.8%、39.7%、43.4%、40.7% 和 32.7%; 玉米秆对 COD、TN、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 TP 平均去除率分别为 31.6%、28.8%、41.7%、31.56% 和 27.1%, 而对照组对 COD、TN、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 TP 平均去除率分别为 12.25%、13.55%、11.96%、16.40% 和 11.26%.

图 4 基质池 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进出水浓度及去除率动态变化Fig. 4 Dynamic changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in inlet and outlet water and its removal rate in the matrix pools图 5 基质池 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 进出水浓度及去除率动态变化Fig. 5 Dynamic changes in $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in inlet and outlet water and its removal rate in the matrix pools

自然条件下未添加秸秆材料的对照组, 底泥微生物参与硝化反硝化作用, 且存在氨挥发可少量去除污染物. 不同秸秆生物基质材料对 TN 和 TP 的去除能力大小为麦秸 > 稻草 > 玉米, 氨氮的去除能力为稻草 > 麦秸 > 玉米秆, 而对 COD 的去除能力则为麦秸 > 玉米秆 > 稻草.

2.2 生物基质池逐级去除效率分析

各级基质池对污染物去除均有贡献. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 与 TP 质量浓度总体呈递减趋势, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD

与 TN 在一级基质池递减量最大, 占递减量的 58.5%、65.5% 和 63.2%; TP、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占总递减量的 65.6%、74.7%. 由于麦秸、稻草、玉米秆三者均为作物秸秆, 短期内 3 种秸秆材料在一级、二级基质池内的处理效果存在差异但不显著, 而在前两级处理效果的基础上, 废水经第三级基质池时产生显著差异, 见图 7. 添加生物基质材料对养殖废水有较好的去除效果. 随时间变化, 受环境因素及生物基质材料自身变化的影响, 稻草材料对各指标去

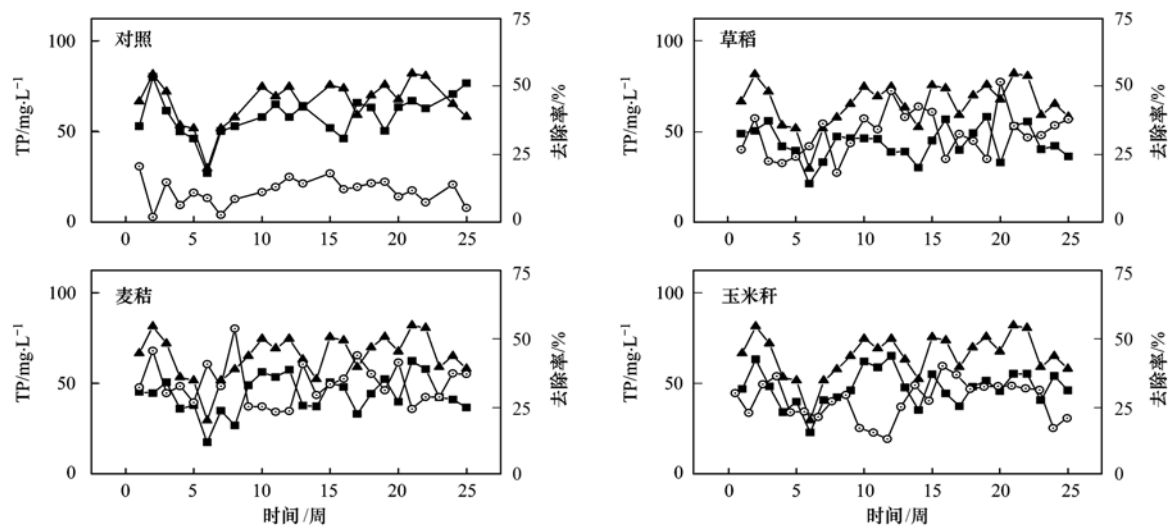


图 6 基质池 TP 进出水浓度及去除率动态变化

Fig. 6 Dynamic changes in TP in inlet and outlet water and its removal rate in the matrix pools

除效果的变化幅度最大。

2.3 污染物去除效果与环境因子间相关性分析

基质池系统中 pH、Eh 及 DO 的变化特征见图

8. 本实验期间, 养殖废水流经基质池过程中 Eh 和 DO 的变化范围为 $-37.4 \sim -29.3 \text{ mV}$ 和 $0.04 \sim 0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 两者均表现出随梯级的增加而不断

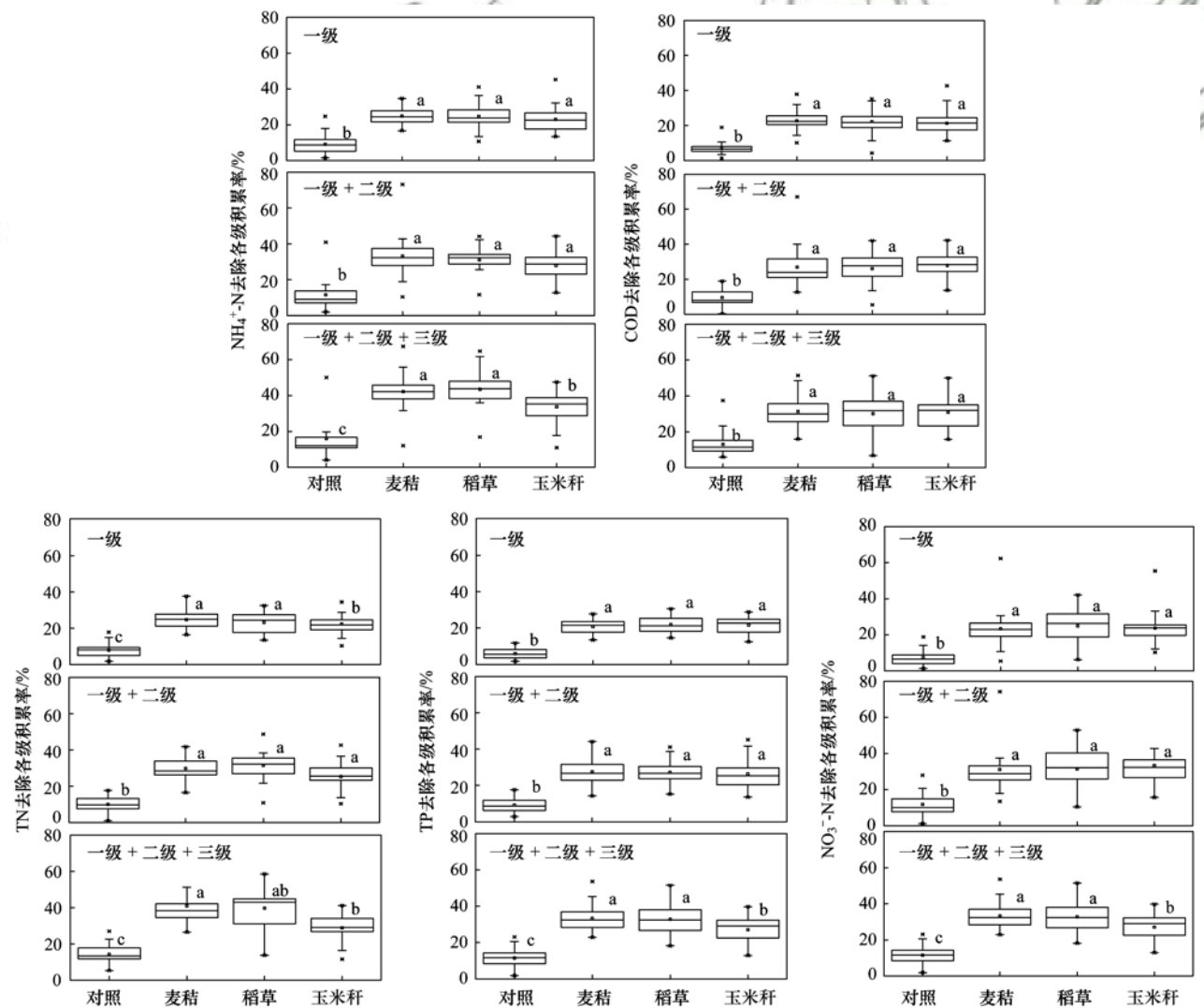
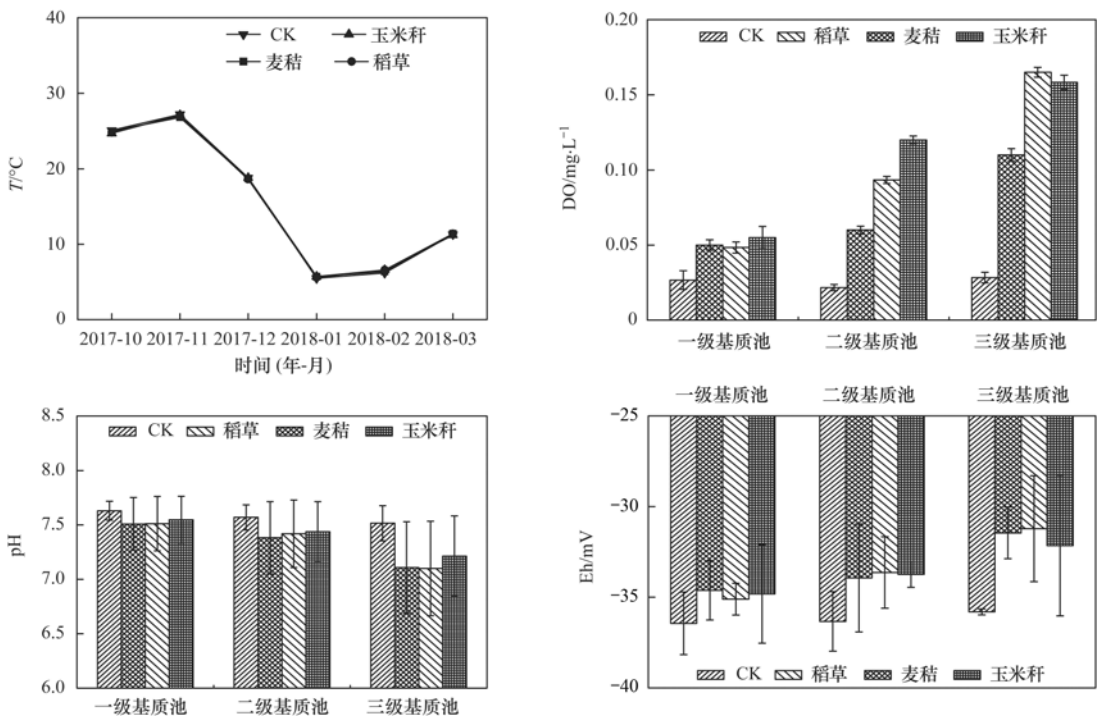


图 7 生物基质材料去除率逐级差异性分析

Fig. 7 Stepwise difference analysis of the removal rate of the biological matrix materials



图中数据为平均值 ± 标准差 (n = 6)

图 8 主要水质理化指标分析

Fig. 8 Analysis of the main physical and chemical indicators of water quality

上升的变化趋势. 废水流经基质池前后 $DO < 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 长期处于厌氧条件, 经基质池处理后, 废水中溶解氧逐渐增加. 系统中 pH 值的变化范围为 7.05 ~ 7.74, 呈弱碱性条件. 随着湿地梯级的增加缓慢降低. 各级基质池 Eh、pH 及 DO 差异显著 ($P < 0.05$). 将水体 TN、TP 去除效果与水环境因子 (pH、Eh 及 DO) 进行 Pearson 分析 (表 2), 结果表明养殖废水污染物去除效率受 Eh 值、DO 浓度影响较大, TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率均与 DO 呈正相关 ($P <$

0.01), 与 Eh、pH 负相关 ($P < 0.01$). 说明 DO 是影响其去除效果的重要因素. 实验过程中, 水中的溶解氧质量浓度不高于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 徐伟锋等^[18]的研究表明, 当人工湿地基质内的溶解氧小于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 有利于污水中硝态氮的去除. Liu 等^[19]的研究也发现高 DO 能提高湿地系统中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除率. 由于当湿地系统中 DO 浓度增加时, 好氧硝化细菌的硝化速率增强, 进而有更多的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 被氧化, 湿地系统中 TN 去除率随之增高.

表 2 生物基质材料去除效果与环境因子间相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between the removal effects of the biological matrix materials and environmental factors

	指标	pH	Eh	DO	<i>T</i>	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TP	COD
环境因子	pH	1								
	Eh	0.950 **	1							
	DO	-0.922 **	-0.838 *	1						
	<i>T</i>	-0.371	-0.547	0.259	1					
去除率	NH ₄ ⁺ -N	-0.592	-0.373	0.745	0.071	1				
	NO ₃ ⁻ -N	0.119	-0.101	-0.279	0.321	-0.710	1			
	TN	-0.688	-0.623	0.885 *	0.126	0.826 *	-0.737	1		
	TP	0.388	0.412	-0.278	-0.778	-0.323	-0.299	0.080	1	
	COD	-0.800	-0.855 *	0.854 *	-0.688	0.139	0.138	-0.408	-0.452	1

1) * * 表示在 0.01 水平下极显著相关, * 表示在 0.05 水平下显著相关

养殖废水湿地 TN、TP 浓度与 Eh、DO 显著负相关 ($P < 0.01$), 与 pH 显著正相关 ($P < 0.01$). 赵发敏等^[20]的研究表明当 pH 值大于 7 或小于 5 时, 氨氮的去除率迅速下降, pH 值对吸附除磷的影响不明显, 基本上与本实验结果一致. 温度对吸附除

磷的影响表明, 在 35℃ 时, 达到吸附平衡后最优. 尽管基质池内溶解氧质量浓度低至 $0.05 \sim 0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时对聚磷菌释磷过程仍有抑制作用. 聚磷菌厌氧释磷、好氧吸磷, 溶氧含量过低也抑制了好氧吸磷的进程^[21]. 温度与各污染物去除效率相

关性较弱是由于秸秆材料投加正值夏季高温期, 高温条件会抑制人工湿地对污染物的去除; Zhang 等^[22]的研究指出, 硝化反硝化是湿地系统 N 去除的主要途径, 而高温 ($>30^{\circ}\text{C}$) 则抑制反硝化速率, 从而降低湿地对 N 的去除. 投加前期各污染物去除效率随纤维素的分解而缓慢上升, 但同时温度的上升削弱了秸秆材料硝化反硝化作用. 总体上, 生物基质材料对氮磷去除效率较为稳定.

2.4 降解周期比较与分析

2.4.1 生物基质材料木质素、纤维素及半纤维素含量变化分析

从图 9 可以看出, 各基质材料干物质、木质素、纤维素与半纤维素质量分数变化. 稻草、麦秸与玉米秆中干物质由初始的 86.33%、83.48% 和 81.05% 降至 20.62 ~ 28.79%、30.75 ~ 37.55% 和 38.78 ~ 47.07%. 同级基质材料纤维素降解分解速率要高于木质素及半纤维素. 纤维素及半纤维素质量分数前期下降较快, 4 ~ 5 个月后趋于平缓. 且随秸秆分解,

各处理间差值逐渐变大. 实验运行 6 个月时稻草、麦秸、玉米秆中木质素、纤维素和半纤维素质量分数分别由初始时的: 稻草 7.57%、35.2%、15.6% 下降至 3.3% ~ 5.78%、12.3% ~ 13.7%、4.9% ~ 5.8%; 麦秸 7.8%、35.5%、16.1% 下降至 6% ~ 7.2%、13.5% ~ 17.6%、4.4% ~ 5.9%; 玉米秆 8.5%、35%、15.7% 下降至 6.8% ~ 7.4%、15.3% ~ 18.8%、4.8% ~ 5.9%. 分析发现, 同级间木质素、纤维素分解速率为: 稻草 > 麦秸 > 玉米秆; 半纤维素: 麦秸 > 玉米秆 > 稻草. 湿地中碳源主要源于纤维素的分解, 纤维素下降趋于平缓时, 应对秸秆材料进行补充更新. 在实验进行 5 个月左右时干物质与纤维素分解速率下降, 提议 5 个月为更新周期, 与国内外众多研究结果较为一致^[10].

2.4.2 生物基质材料成分变化差异分析

为探究各级基质池内纤维成分降解速率是否产生差异, 取各纤维成分的月平均含量进行分析 (见表 3). 每级基质池内秸秆材料初始成分相同, 与废

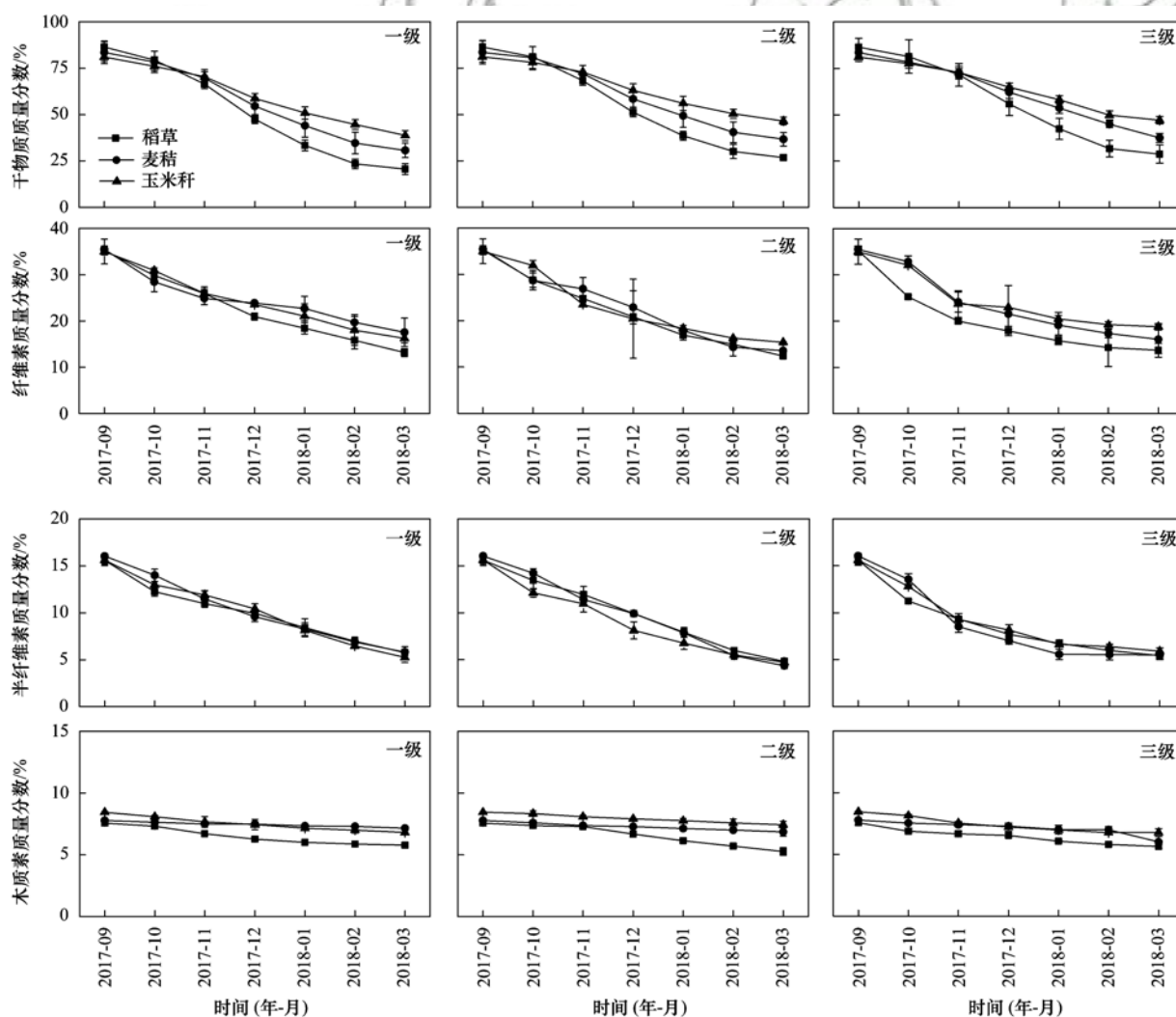


图 9 生物基质材料纤维含量变化

Fig. 9 Changes in the fiber content of the biomatrix materials

表 3 生物基质材料成分逐级差异性分析¹⁾

Table 3 Stepwise difference analysis for the composition of the biological matrix materials

项目	秸秆	一级	二级	三级
木质素/%	稻草	6.5 ± 0.14B	6.57 ± 0.29C	6.45 ± 0.12B
	麦秸	7.46 ± 0.13Aa	7.28 ± 0.05Bb	7.14 ± 0.04Ab
	玉米秆	7.52 ± 0.4A	7.94 ± 0.15A	7.41 ± 0.31A
纤维素/%	稻草	22.77 ± 0.54Ba	21.97 ± 0.28a	20.29 ± 0.47Bb
	麦秸	24.65 ± 0.36Aa	22.82 ± 0.61b	23.78 ± 0.33Aa
	玉米秆	24.39 ± 1.12A	22.98 ± 1.23	24.6 ± 0.51A
半纤维素/%	稻草	9.99 ± 0.33a	9.95 ± 0.42a	8.86 ± 0.21b
	麦秸	10.31 ± 0.24a	9.90 ± 0.31a	8.81 ± 0.61b
	玉米秆	10.12 ± 0.46a	9.12 ± 0.46b	9.25 ± 0.09b

1) 表中数据为平均值 ± 标准差 (n = 6), 同行不同字母 (大写) 表示不同处理间的差异; 同列不同字母 (小写) 表示同种处理不同级基质池间差异显著 (P < 0.05)

水反应后稻草与麦秸中纤维素及半纤维素含量逐级产生差异 ($P < 0.05$), 玉米秆中半纤维素含量产生差异 ($P < 0.05$), 但在细胞壁中, 纤维素被木质素和半纤维素包裹着, 而木质素有完整坚硬的外壳, 不易被微生物降解, 因此木质素质量分数变化量小于纤维素, 且前期木质素的分解速率较低, 受到限制^[23]. 在不同处理条件下, 同级秸秆中木质素、纤维素含量存在差异, 但由于初始含量各有不同, 说明差异性并没有随纤维的分解而消失. 相反, 细胞壁中的半纤维素较之木质素而言更易分解, 因此半纤维素是微生物较易攻破的防线, 导致各秸秆中半纤维素含量的差异逐渐减小. 有机物厌氧降解过程主要分为水解发酵、产氢产乙酸及产甲烷这 3 个阶段. 秸秆材料的厌氧降解需要不同阶段的微生物协同作用完成^[24]. 秸秆经长时间处理粗纤维可被有效降解, 表面有大量的微小孔隙分布, 是微生物降解秸秆后打通的孔道^[25].

3 结论

(1) 稻草、麦秸对 COD、氨氮、总氮和总磷有良好的去除效果 (COD > 30%、TN > 40%、TP > 30%). 玉米秆、稻草对硝氮去除效果较高 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$ > 40%). 生物基质材料对高负荷养殖废水去除效果显著.

(2) 实验进行 6 个月后, 秸秆中各成分均未完全分解. 纤维素, 半纤维素分解速率快于木质素. 稻草木质素和纤维素分解速率最快, 麦秸半纤维素分解速率最快, 且逐级差异显著 ($P < 0.05$).

(3) 秸秆中易分解成分的快速分解阶段大概为 5 个月左右, 残余成分主要为木质素, 因此在长沙地区秸秆的补充周期建议为 5 个月左右.

致谢: 感谢中国科学院长沙农业环境站对本研究的支持. 感谢课题组内老师对实验设计、实验开

展、数据处理及论文撰写的悉心指导, 在采样和实验方面提供帮助的孟岑、韩增、王丽莎和甘蕾等, 在此一并致谢!

参考文献:

[1] 马彦涛, 薛金凤. 养猪废水处理技术进展[J]. 环境与可持续发展, 2009, 34(5): 29-32.
Ma Y T, Xue J F. Advances in technology of piggery wastewater treatment[J]. Environment and Sustainable Development, 2009, 34(5): 29-32.

[2] 陈永华, 吴晓英, 陈明利, 等. 人工湿地污水处理系统冬季植物的筛选与评价[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1789-1794.
Chen Y H, Wu X F, Chen M L, et al. Selection of winter plant species for wetlands constructed as sewage treatment systems and evaluation of their wastewater purification potentials [J]. Environmental Science, 2010, 31(8): 1789-1794.

[3] Shen Z Q, Zhou Y X, Wang J L. Comparison of denitrification performance and microbial diversity using starch/polylactic acid blends and ethanol as electron donor for nitrate removal [J]. Bioresource Technology, 2013, 131: 33-39.

[4] Wang X M, Wang J L. Nitrate removal from groundwater using solid-phase denitrification process without inoculating with external microorganisms [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2013, 10(5): 955-960.

[5] Liu D Z, Li J W, Li C W, et al. Poly(butylene succinate)/bamboo powder blends as solid-phase carbon source and biofilm carrier for denitrifying biofilters treating wastewater from recirculating aquaculture system[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 3289.

[6] 孙丽丽, 李文英, 李夏, 等. 固废生物炭净化处理猪场废水研究初探[J]. 中国农学通报, 2015, 31(23): 122-126.
Sun L L, Li W Y, Li X, et al. Purification effect of solid waste biochar on intensive piggery wastewater[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(23): 122-126.

[7] 徐德福, 潘潜澄, 李映雪, 等. 生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3187-3193.
Xu D F, Pan Q C, Li Y X, et al. Effect of biochar on root morphological characteristics of wetland plants and purification capacity of constructed wetland [J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3187-3193.

- [8] 段婧婧, 薛利红, 尹爱经, 等. 添加生物炭的水芹湿地对农村低污染水的净化研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(2): 353-361.
Duan J J, Xue L H, Yin A J, *et al.* Rural low-pollution wastewater purification in *Oenanthe javanica* wetland with biochar addition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(2): 353-361.
- [9] Wang J L, Chu L B. Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process [J]. Biotechnology Advances, 2016, **34**(6): 1103-1112.
- [10] 周卿伟, 祝惠, 阎百兴, 等. 添加填料的人工湿地反硝化过程研究[J]. 湿地科学, 2017, **15**(4): 588-594.
Zhou Q W, Zhu H, Yan B X, *et al.* Process of denitrification in constructed wetlands with adding filler[J]. Wetland Science, 2017, **15**(4): 588-594.
- [11] Li X, Zhang M M, Liu F, *et al.* The significance of *Myriophyllum elatinoides* for swine wastewater treatment: abundance and community structure of ammonia-oxidizing microorganisms in sediments[J]. PLoS One, 2015, **10**(10): e0139778.
- [12] 李裕元, 刘锋, 吴金水, 等. 一种利用稻草处理养猪场废水的方法[P]. 中国专利: CN 201310314561.4, 2015-03-04.
- [13] 孟岑, 李裕元, 吴金水, 等. 亚热带典型小流域总氮最大日负荷(TMDL)及影响因子研究——以金井河流域为例[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 700-709.
Meng C, Li Y Y, Wu J S, *et al.* Study on total nitrogen TMDL and its contributing factors in typical subtropical watersheds: a case study of Jinjinghe watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 700-709.
- [14] 李红芳, 刘锋, 肖润林, 等. 水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(1): 157-163.
Li H F, Liu F, Xiao R L, *et al.* Effects of aquatic plants on phosphorus adsorption characteristics by sediments in ecological ditches[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(1): 157-163.
- [15] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. Journal of Dairy Science, 1991, **74**(10): 3583-3597.
- [16] 李远航, 刘洋, 刘铭羽, 等. 稻草—绿狐尾藻复合人工湿地技术处理养猪废水综合效益分析[J]. 农业现代化研究, 2018, **39**(2): 325-334.
Li Y H, Liu Y, Liu M Y, *et al.* Integrated benefit analysis of a combined constructed wetland using rice-straw and *Myriophyllum elatinoides* to treat swine wastewater[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, **39**(2): 325-334.
- [17] Duguid K B, Montross M D, Radtke C W, *et al.* Effect of anatomical fractionation on the enzymatic hydrolysis of acid and alkaline pretreated corn stover [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(21): 5189-5195.
- [18] 徐伟锋, 孙力平, 古建国, 等. DO 对同步硝化反硝化影响及动力学[J]. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(1): 8-10.
Xu W F, Sun L P, Gu J G, *et al.* Effect of DO simultaneous nitrification and denitrification and kinetic equation[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003, **16**(1): 8-10.
- [19] Liu F, Zhang S N, Wang Y, *et al.* Nitrogen removal and mass balance in newly-formed *Myriophyllum aquaticum* mesocosm during a single 28-day incubation with swine wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2016, **166**: 596-604.
- [20] 赵发敏. 人工湿地填料基质去除氨氮和磷最优配比及影响因素研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- [21] 徐伟锋, 陈银广, 顾国维, 等. A²/O 污水处理工艺中基质转化机理研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2228-2232.
Xu W F, Chen Y G, Gu G W, *et al.* Research on substrate transformation mechanism in A²/O process [J]. Environmental Science, 2006, **27**(11): 2228-2232.
- [22] Zhang S N, Liu F, Xiao R L, *et al.* Effects of vegetation on ammonium removal and nitrous oxide emissions from pilot-scale drainage ditches[J]. Aquatic Botany, 2016, **130**: 37-44.
- [23] 贾亚红. 植物缓释碳源用于人工湿地去除污水厂尾水中硝态氮的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [24] Zhou X, Wang X Z, Zhang H, *et al.* Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland[J]. Bioresource Technology, 2017, **241**: 269-275.
- [25] 陈广银, 郑正, 罗艳, 等. 碱处理对秸秆厌氧消化的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2208-2213.
Chen G Y, Zheng Z, Luo Y, *et al.* Effect of Alkaline treatment on anaerobic digestion of rice straw[J]. Environmental Science, 2010, **31**(9): 2208-2213.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)