

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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>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, 陈璞琬, 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, 刘立志, 刘煊武, 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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>4</sub><sup>2-</sup>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<sub>2</sub>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影响 ..... 王一宇, 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, 卫晓锋, 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)

生物质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溶解性有机物的浸出规律 ..... 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM<sub>2.5</sub>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)

# 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

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 基质材料是影响粗放型绿色屋顶降雨出水水质的重要因素. 采用污水厂稳定污泥作为基质主要营养成分, 配合改良材料生物炭、双层基质结构, 构建5个绿色屋顶中试设施, 通过1a的现场实验, 考察设施出水水质控制效果. 结果表明将3%稳定污泥添加进粗放型绿色屋顶基质中, 出水总氮(TN)和硝氮( $\text{NO}_3^-$ -N)的年平均质量浓度为 $3.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 在上海当地降雨与气温条件下稳定污泥的使用不会导致TN和 $\text{NO}_3^-$ -N大量淋失; 为改善使用污水厂稳定污泥作为营养基质的设施的出水水质, 添加生物炭作为基质改良成分, 出水中TN和 $\text{NO}_3^-$ -N年平均质量浓度下降至 $2.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 吸附层的设置可降低出水总磷(TP)和化学需氧量(COD)浓度; 对各中试设施系统进行TN平衡分析表明, 经过一个汛期的使用, 基质中存留的TN占到初始量的55%以上, 污泥作为营养基质可以满足植物较长时间的生长需求. 添加生物炭后基质存留TN减少和出水 $\text{NO}_3^-$ -N浓度降低, 分别与落干期间矿化作用、降雨期间反硝化作用增强有关. 从污染物质量负荷的角度出发, 污泥不是营养物质N的污染源, 是P的污染源. 添加生物炭并设置双层结构能有效降低设施TN和COD出水负荷.

**关键词:** 粗放型绿色屋顶; 稳定污泥; 生物炭; 双基质层; 矿化; 反硝化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3612-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901244

## Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling

PENG Hang-yu, LI Tian\*, QI Yue, HE Yun-peng, HUANG Chu-yu, ZHANG Zhuo-ran

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Substrate type is an important factor affecting the quality of water deriving from rainfall onto extensively green roofed areas. Here, stabilized sludge was used as the main nutrient component of the substrate combined with biochar and a dual-substrate structure. Five green roof pilot facilities were constructed, and the effect of control measures on effluent quality was analyzed. The results showed that the stabilized sludge dosage was 3%, and the annual average mass concentrations of total nitrogen (TN) and nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ -N) were  $3.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $1.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . The use of stabilized sludge as a nutrient component under real rainfall and temperature conditions in Shanghai did not cause significant leaching of TN and  $\text{NO}_3^-$ -N. In order to further improve the quality of the effluent, biochar was used as an amendment measure. As a result, the concentrations of TN and  $\text{NO}_3^-$ -N in the effluent were decreased to  $2.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $1.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. Using an adsorption layer of pumice can alleviate the leaching of total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand (COD). For the total nitrogen budget of each pilot facility, the retained TN was about 55% of the original TN after one year of operation. Thus, stabilized sludge could be used as a nutrient substrate to meet the long-term requirements of plants. In the substrate with biochar, the retained TN in the substrate and the  $\text{NO}_3^-$ -N concentration in the effluent was decreased, which was related to the mineralization of organics during dry periods and the enhancement of denitrification during rainfall periods. Stabilized sludge was not a polluting source of N but was a source of P. Using biochar and a dual-substrate structure can effectively reduce the TN and COD load of the tested green roof facilities.

**Key words:** green roofs; stabilized sludge; biochar; dual-substrate structure; mineralization; denitrification

粗放型绿色屋顶是一种以雨水管理为主要使用目标, 投入使用后低维护或免维护的绿色基础设施. 粗放型绿色屋顶的理想基质应具有以下特性<sup>[1]</sup>: 有效吸收和滞留水分、高孔隙度、植物锚固功能, 较低的荷载要求, 满足植物长期生长. 已有研究表明, 绿色屋顶设施需要通过追肥以保障基质的长期营养供应<sup>[2]</sup>. 国外的商品化绿色屋顶基质通常使用堆肥作为营养成分, 通常存在出水营养物质浓度升高现象<sup>[3]</sup>; 也有研究使用商品化控释肥料来满足植物的营养需求, 后者提高了粗放型绿色屋顶

的使用成本<sup>[4]</sup>.

污水厂污泥经过稳定化处理以后, 仍富含氮、磷、微量元素和有机质等营养物质, 具有很好的提供养分和保持水分作用<sup>[5]</sup>. 稳定污泥用于园林绿化等用途, 可以降低污泥的处置成本, 已经受到广泛

收稿日期: 2019-01-29; 修订日期: 2019-03-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07207001)

作者简介: 彭航宇(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为面源污染控制, E-mail: penghangyu1994@163.com

\* 通信作者, E-mail: tianli@tongji.edu.cn

关注<sup>[6]</sup>。迄今稳定污泥应用于粗放型绿色屋顶对设施出水水质影响的研究较少,而且以模拟降雨的小试实验为主<sup>[7,8]</sup>,在实际降雨与气温分布下的应用效果尚未见报道。已有研究表明将一定量稳定污泥施用于模拟粗放型绿色屋顶中,植被覆盖率好,在不追肥的情况下,应用的第二年植物生长依然茂盛,但是绿色屋顶模拟设施的营养物质淋出问题显著<sup>[9]</sup>。

本文采用污水厂稳定污泥作为基质营养成分,配合改良材料生物炭、双层基质结构,与使用泥炭土,缓释肥的常用基质营养成分的设施比较,考察粗放型绿色屋顶在上海地区实际降雨下的出水水质,对各中试设施系统进行 TN 等污染物质量平衡核算,评价不同组成与结构的设施出水水质控制效果,以期为污水厂污泥的资源化利用提供可能的新途径。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验装置和基质组成

模拟绿色屋顶设施设立在同济大学校园内某建筑屋顶。共有置于角钢支架上的 6 个 1 m × 2 m, 深 0.3 m 的 PVC 盘呈 5% 的倾斜坡度放置,底部设有

出水口。模拟绿色屋顶设施结构从上至下依次为植被层、基质层、土工布、排蓄水层及 PVC 板。植被层选择景天科垂盆草。过滤层使用 200 g·m<sup>-2</sup> 的聚酯无纺布,防止介质层颗粒物随出水流失。排水层使用厚度约为 2.5 cm 的塑料排水板。设施出水收集于 100 L 水样桶中,桶内放置投入式液位计,配合数据记录仪可记录出水的流量过程,降雨数据通过置于屋顶的翻斗式雨量计记录。使用八通道土壤水分监测记录仪(ZS-265S 型,山东赞颂仪器有限公司)测定基质体积含水率。

各模拟绿色屋顶设施的基质组成见表 1。空白对照用于评价实验地点的干湿沉降负荷。各设施均以田园土,浮石与发酵木屑作为基质主要成分,根据设施基质层添加的营养成分,土壤改良剂或基质结构不同进行设施编号:设施 PS(peat)、SS(stabilized sludge)和 CRF(controlled release fertiliser)分别使用泥炭土,污水厂稳定污泥,缓释肥作为营养成分;设施 BC(biochar)添加生物炭作为土壤改良剂;BC/P(biochar/pumice)设置营养层与吸附层,营养层基质组成与 BC 一致,吸附层为浮石。除 PS 和 CRF 外,其余设施均添加给水厂污泥控制 P 淋出。

表 1 模拟设施的基质组成及主要参数

Table 1 Components and main characteristic of green roof pilot facility substrates

处理	填料厚度 /cm	填料组成(质量分数)	堆密度 /kg·m <sup>-3</sup>	TN 含量 /mg·g <sup>-1</sup>
PS	10	田园土 20% + 泥炭土 20% + 浮石 60%	618	1.43
SS	10	田园土 20% + 发酵木屑 5% + 污水厂稳定污泥 3% + 浮石 62% + 给水厂污泥 10%	591	1.45
CRF	10	田园土 20% + 发酵木屑 5% + 浮石 75% + 缓释肥	575	1.10
BC	10	田园土 20% + 发酵木屑 5% + 污水厂稳定污泥 3% + 浮石 60% + 给水厂污泥 10% + 生物炭 2%	600	1.33
BC/P	15	上层(5 cm): 田园土 20% + 发酵木屑 5% + 污水厂稳定污泥 3% + 浮石 60% + 给水厂污泥 10% + 生物炭 2% 下层(10 cm): 浮石	600	1.36
空白	/	无基质层与植被		

本文采用的污水厂稳定污泥为经厌氧消化的颗粒态污泥。根据厂方提供的数据其重金属含量低于《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》(GB/T 23486-2009)限值。各种基质配比均以浮石(上海小凡园林绿化有限公司)为无机轻质材料,参照文献<sup>[10]</sup>的方法其饱和导水率达到 0.04 cm·s<sup>-1</sup>,可避免短历时强降雨产生表面径流。浮石干堆积密度 539 kg·m<sup>-3</sup>,不同组成基质的浮石用量在 60% ~ 75%。考虑基质的肥效并同时保证其有机质总量不超过 FLL 的规定,污泥的用量选择质量分数为 3%。有研究采用 10% 体积比堆肥作为营养介质,为保证各设施营养水平相当,通过调整泥炭土与缓释肥的添加量使各设施 TN 含量为 1.12 ~ 1.43 mg·g<sup>-1</sup><sup>[11]</sup>。田园土、木屑作为基础介质有助于植

物扎根生长。给水厂污泥(闵行自来水厂)包含大量铝铁/等絮凝剂产物,对 P 具有良好的吸附效果<sup>[12]</sup>,用作 P 吸附介质。

### 1.2 取样与分析

2018 年 4 ~ 10 月间,监测到设施产生出水的降雨事件共有 14 场,其中,中雨(10 ~ 19.9 mm)7 场,大雨 3 场(20 ~ 49.9 mm),暴雨 4 场(50 ~ 100 mm),监测降雨事件的降雨特性见表 2。上述降雨事件包括了不同强度的降雨,水质监测结果具有代表性。本文使用的模拟绿色屋顶设施,在降雨量 ≤ 10 mm 条件下不产生出水。由于水样桶存储了所有出水水量,可以直接得到污染物事件平均浓度 EMC。监测水质指标包括:TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、COD 和 TSS,均采用国家标准方法进行测

定. 另外, 还测定了植物体中与土壤中 N 元素含量<sup>[13]</sup> (元素分析仪 Elementar, Vario EL III).

表 2 产流降雨事件的降雨特征

Table 2 Characteristics of the investigated rain events

编号	日期(月-日)	降雨历时/h	前期无雨时间/h	平均降雨强度/mm·h <sup>-1</sup>	降雨量/mm
1	03-25	20.00	72	0.65	13.0
2	04-06	14.00	216	1.04	14.5
3	04-14	14.00	160	2.00	28.0
4	04-24	11.00	192	5.92	65.1
5	05-04	10.87	87	2.84	30.8
6	06-19	11.25	51	1.62	18.2
7	07-02	6.32	18	2.80	17.7
8	07-08	21.35	131	2.44	52.2
9	07-23	20.47	88	2.39	49.0
10	08-16	23.43	83	4.61	107.9
11	08-20	4.33	26	5.15	22.3
12	08-24	20.67	26	2.75	56.9
13	09-20	3.00	48	5.80	17.4
14	10-15	6.00	120	3.22	19.3

采用 IBM SPSS 20 和 Origin Pro 8.0 软件进行数据处理. 结果表明, 在 0.05 水平下, 所有数据均符合正态分布. 由于数据方差不齐, 故统一采用单因素方差分析 (ANOVA) 中的 Games-Howell 检验 ( $\alpha = 0.05$ ) 对不同设施出水水质均值进行显著性分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 N、P、COD 及 TSS 出水特征

发生出水的监测降雨事件部分水质指标的监测结果以四分位表示 (图 1). 使用泥炭土, 稳定污泥, 缓释肥作为营养成分的设施 PS、SS 和 CRF 出水 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 年平均质量浓度无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 其中 SS 出水 TN 浓度为 3.27 mg·L<sup>-1</sup>, 说明稳定污泥的使用不会导致 N 大量淋出. 这与之前类似实验结果有明显差异, 沈庆然等<sup>[9]</sup>的实验污水厂稳定污泥以质量比 5% 添加进模拟粗放型绿色屋顶基质中, 在降雨间隔 6~7 d, 降雨强度 10.00 mm·h<sup>-1</sup> 人工模拟降雨条件下, 基质湿度始终保持在田间持水度, 出水 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度达 20~30 mg·L<sup>-1</sup>. 主要原因是实际降雨条件下次降雨量小, 间歇期较长, 基质含水率很低抑制了有机质的矿化, 营养物质不易随出水淋失<sup>[14]</sup>.

设施 BC 和 BC/P 出水 TN 年平均质量浓度为 2.16 mg·L<sup>-1</sup> 和 2.05 mg·L<sup>-1</sup>, 显著低于设施 SS 出水 TN 浓度 ( $P < 0.05$ ), 表明生物炭与双层基质结构能有效缓解污泥带来的 TN 淋出问题, 削减率分别达 33.9% 和 37.3%. 添加生物炭后设施出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), TN 浓度的削减可能与基质成分对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的吸附有关. 国外研究表明生物炭与浮石能通过吸附作用控制土壤中的

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋出<sup>[15~17]</sup>, 设施 SS、BC 和 BC/P 出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 年平均浓度分别为 1.61、1.38 和 0.97 mg·L<sup>-1</sup>, 说明生物炭的添加有效降低了出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度. 此外, 本研究设置的双层结构 BC/P 出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度显著低于设施 BC ( $P < 0.05$ ), 表明双层基质结构也能有效缓解 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失.

各设施出水 TP 浓度存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其中 SS、BC 和 BC/P 出水 TP 年平均质量浓度为 0.38、0.52 和 0.21 mg·L<sup>-1</sup>, 结果表明吸附层的设置有利于缓解 P 淋出. 生物炭的添加导致出水 TP 升高, 与 Pratiwi 等<sup>[18]</sup>的研究结果相似, 主要是因为不同生物质材料所制得生物炭含磷量差异较大, 实验采用的稻壳炭对于磷淋溶控制效果不佳.

设施 PS 和 SS 出水平均 COD 浓度分别为 92 mg·L<sup>-1</sup> 和 88 mg·L<sup>-1</sup>, 显著高于设施 CRF ( $P < 0.05$ ). Zhang 等<sup>[19]</sup>使用 30% 泥炭土作为粗放型屋顶主要营养成分, 出水 COD 浓度为 75~130 mg·L<sup>-1</sup>. 说明泥炭土与污泥易造成出水 COD 淋失. 设施 BC 和 BC/P 出水平均 COD 浓度为 78 mg·L<sup>-1</sup> 和 61 mg·L<sup>-1</sup>, BC/P 显著低于 BC ( $P < 0.05$ ), 表明吸附层的设置有利于缓解污泥带来的 COD 淋出问题.

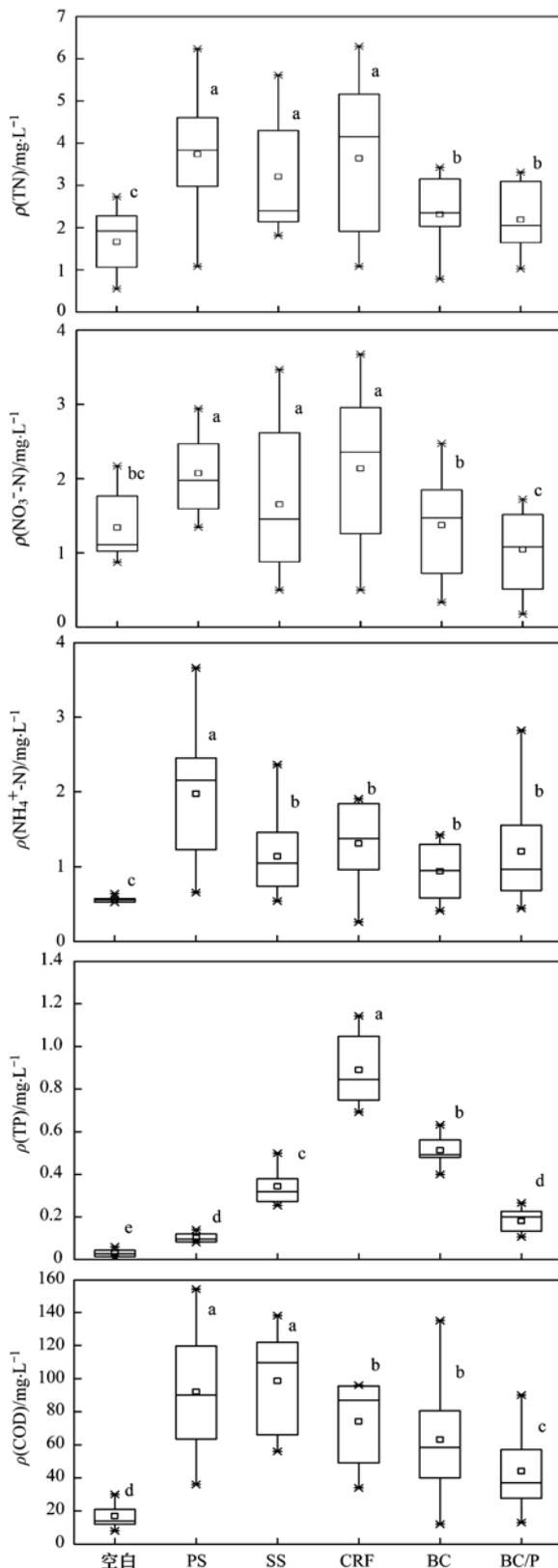
各设施 TSS 平均质量浓度均低于 20 mg·L<sup>-1</sup>, 本研究采用 200 g·m<sup>-2</sup> 聚酯无纺布作为过滤层, 有效地控制了颗粒物的流失.

### 2.2 粗放型绿色屋面中试装置氮平衡

按照式 (1) 建立 TN 平衡关系:

$$N_p + N_L + N_R + \text{差值} = N_t + N_M \quad (1)$$

式中,  $N_p$  为植物体吸收的 TN,  $N_L$  为各次出水 TN 质量总和,  $N_R$  为实验结束后土壤 TN 含量;  $N_t$  为各



图中标有不同小写字母者表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 标有相同小写字母者表示组间差异不显著 ( $P > 0.05$ )

图 1 各设施的 N、P 及 COD 的 EMC 浓度

Fig. 1 EMC concentrations of N, P, and COD

次降雨雨水 TN 质量和,  $N_M$  为各设施基质起始 TN 含量. 差值为系统中通过物理、生化作用流失 (除径流) 的 TN.

各设施 TN 质量平衡结果见图 2, 经过 1 a 的运行, 各设施出水淋出 TN 仅占设施初始值的 1.5%, 植物吸收 TN 占初始值的 2% ~ 8%. 设施 PS、SS 和 CRF 存留 TN 占初始值 80% 以上; 设施 BC 和 BC/P 存留 TN 占初始值的 55% 以上, 表明使用污水厂稳定污泥作为营养成分可以满足植物较长时间的的生长需求.

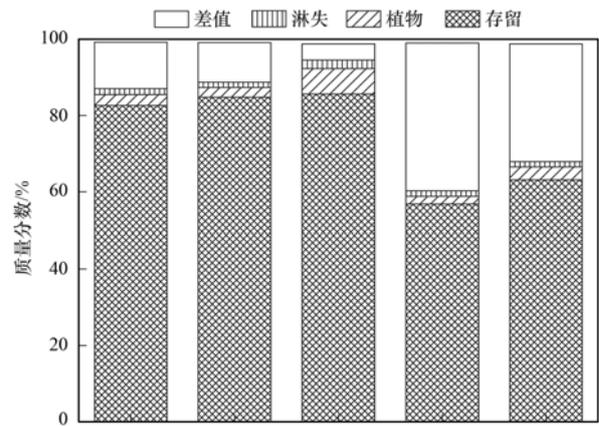


图 2 各中试装置 TN 平衡关系

Fig. 2 TN balance of each pilot facility

2018 年 9 月 20 日降雨事件出水  $\text{NO}_3^-$ -N 随降雨历时的变化过程见图 3, 由此比较使用污泥的设施 SS、BC 和 BC/P 出水  $\text{NO}_3^-$ -N 排放特征. 该场降雨雨量为 17.4 mm, 历时 180 min, 降雨量的分布比较稳定, 有利于出水  $\text{NO}_3^-$ -N 的排放规律的分析.  $\text{NO}_3^-$ -N 在降雨出水期间均逐步下降. 其中添加生物炭设施 BC, 因落干期矿化作用增强, 土壤中无机氮含量增加, 降雨初期出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度高于设施 SS; 随着降雨历时延长, 出水  $\text{NO}_3^-$ -N 下降至  $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 低于设施 SS, 原因是在降雨进水期间, 生物炭降低了基质的通气性, 为微生物反硝化作用创造了有利条件<sup>[20, 21]</sup>; 同时生物炭具有较大的比表面积, 为微生物提供了良好的生长环境, 有助于土壤微生物活性的恢复, 提高基质中的微生物量<sup>[22, 23]</sup>. 落干期矿化积累的  $\text{NO}_3^-$ -N 可能在降雨进水期通过微生物反硝化作用得到去除, 导致出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度明显降低. 设施 BC/P 出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度始终低于设施 SS 和 BC, 原因是吸附层的设置有效地降低了出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度.

TN 平衡结果发现 BC、BC/P 存留 TN 较 SS 明显减少, 这与添加生物炭后土壤持水性提高有关<sup>[24]</sup>. 选取设施 SS、BC 和 BC/P 作为考察对象, 4 ~ 5 月期间基质土壤含水率变化过程监测结果见图 4. 从中可知, 设施 SS 在落干期土壤含水率迅速下降到 10% 以下, 由于含水率较低, 不利于微生物生长, 有机质矿化作用受到抑制, 导致落干期基质中经矿化产生的无机氮减少. 添加生物炭可以提高设

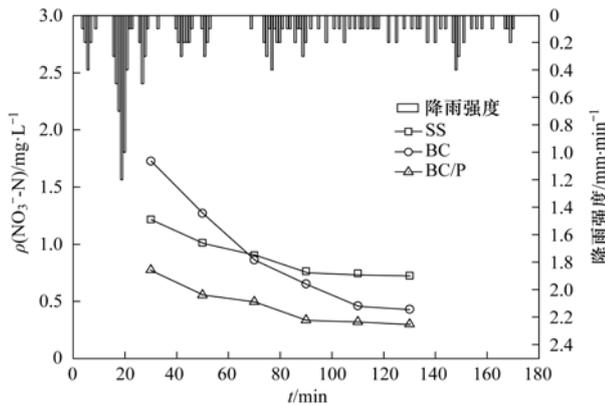
图3 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N出水浓度随降雨历时的变化

Fig. 3 Variation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentrations in effluent against rainfall duration

施的含水率, 双层结构进一步改善了设施持水性能<sup>[25]</sup>. BC、BC/P 在落干期中较长时段内保持基质含水率在 15% 以上, 有利于有机质矿化作用的进行<sup>[26]</sup>, 经矿化产生的无机氮在进水期间可通过反硝化作用从系统中流失, 导致存留 TN 减少.

对于使用生物炭后基质存留 TN 与出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 均降低的现象, 需进一步考察落干期与进水期微生物作用的影响, 以及不同时期有机质矿化与反硝化作用的差异.

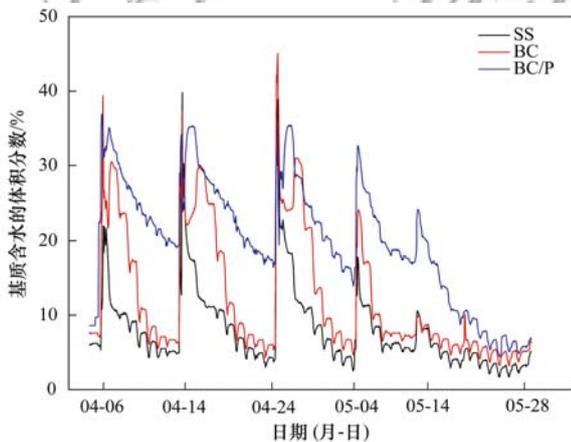


图4 4~5月3种设施基质含水率变化

Fig. 4 Substrate moisture content of three kinds of facilities from April to May

### 2.3 设施出水 N、P 污染负荷控制效果

绿色屋顶设施的污染负荷控制效果与设施水质水量控制效果有关. 粗放型绿色屋顶在上海地区实际降雨条件下有很好的滞留、削减水量的作用, 在监测期间, 累积降雨量达 819.85mm, 各设施出水与水量削减情况如表 3. 根据出水水量统计, 以及出水污染物的 EMC 浓度, 得到对应降雨事件污染物的次降雨负荷, 经求和得到各设施在研究期间污染物的质量负荷 (图 5). 对比空白设施, 除 PS 和 BC/P, 其他设施 TP 负荷均升高, 其中 CRF 出水 TP

污染负荷达 0.25 g·m<sup>-2</sup>, 说明使用缓释肥不利于设施出水 TP 负荷的控制; 各设施对 TN 负荷均有较好的削减效果, 其中 BC 和 BC/P 出水 TN 负荷均达 0.51 g·m<sup>-2</sup>, 削减效果显著; 添加生物炭和设置吸附层后, BC 和 BC/P 出水 COD 质量负荷均显著降低, 设施 SS 的出水 COD 负荷较空白设施增长 37.7%, 李田等<sup>[27]</sup> 监测结果表明, 沥青屋面降雨径流 COD 污染负荷达 39.77 g·m<sup>-2</sup>, 粗放型绿色屋顶出水 COD 污染负荷低于沥青屋面. 从质量负荷的角度出发, 稳定污泥、泥炭土和缓释肥均不是营养物质 N 的污染源, 是营养物质 P 的污染源, 这与 Wang 等<sup>[28]</sup> 得到的结果相近. 添加生物炭并设置吸附层能有效降低设施 TN 和 COD 出水质量负荷.

表3 各设施出水量与水量削减统计

Table 3 Statistics on the outflow and water reduction of each facility

项目	PS	SS	CRF	BC	BC/P
出水量/L	570.4	555.8	566.2	504.9	532.65
削减率/%	65.2	66.1	65.4	69.2	67.5

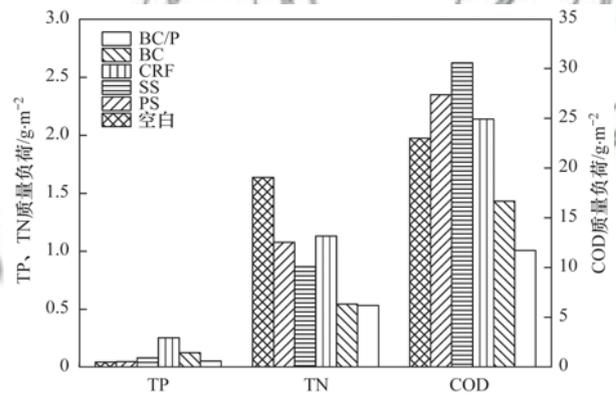


图5 绿色屋顶空白对照与各设施主要污染物质量负荷

Fig. 5 Pollution loads from different green roofs and the reference

### 3 结论

(1) 添加 3% 污水厂稳定污泥作为粗放型绿色屋顶基质营养成分, 出水 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 与泥炭土, 缓释肥作为营养成分的常用介质组分的效果无显著差异, 在上海当地实际降雨与气温条件下稳定污泥的使用不会导致 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 大量淋失.

(2) 对以稳定污泥作为基质营养成分的绿色屋顶, 基质中添加生物炭能有效缓解出水中 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的淋出, 浮石吸附层可减少 TP、COD 的淋出.

(3) 经过近一年运行, 各中试设施存留 TN 依然占初始 TN 55% 以上, 污水厂稳定污泥作为基质营养成分可以满足植物较长时间的生长需求. 添加生物炭后基质存留 TN 减少, 出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度降低, 分别与落干期有机质矿化作用与降雨期间反硝化作用增强有关.

(4) 从质量负荷的角度出发, 稳定污泥不是营

养物质 N 的污染源, 是营养物质 P 的污染源. 添加生物炭并设置双层结构能有效降低设施 TN、COD 出水质量负荷.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Carter T, Keeler A. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **87**(3): 350-363.
- [ 2 ] Clark M J, Zheng Y B. Plant nutrition requirements for an installed sedum-vegetated green roof module system; effects of fertilizer rate and type on plant growth and leachate nutrient content [ J ]. *HortScience*, 2013, **48**(9): 1173-1180.
- [ 3 ] Matlock J M, Rowe D B. Does compost selection impact green roof substrate performance? measuring physical properties, plant development, and runoff water quality [ J ]. *Compost Science & Utilization*, 2017, **25**(4): 231-241.
- [ 4 ] Emilsson T, Berndtsson J C, Mattsson J E, *et al.* Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems [ J ]. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(3): 260-271.
- [ 5 ] 刘学娅, 赵亚洲, 冷平生. 城市污泥的土地利用及其环境影响研究进展 [ J ]. *农学学报*, 2018, **8**(6): 21-27.  
Liu X Y, Zhao Y Z, Leng P S. Land use of municipal sludge and its environmental impacts: research progress [ J ]. *Journal of Agriculture*, 2018, **8**(6): 21-27.
- [ 6 ] 杨长明, 范博博, 荆亚超. 厌氧消化污泥对退化苗圃土壤的改良效果研究 [ J ]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, **46**(1): 74-80.  
Yang C M, Fan B B, Jing Y C. Effects of anaerobically digested sewage sludge addition on improvement of a degraded nursery garden soil [ J ]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, **46**(1): 74-80.
- [ 7 ] Chen H M, Ma J Y, Wang X J, *et al.* Effects of biochar and sludge on carbon storage of urban green roofs [ J ]. *Forests*, 2018, **9**(7): 413.
- [ 8 ] Vannucchi F, Pini R, Scatena M, *et al.* Deinking sludge in the substrate reduces the fertility and enhances the plant species richness of extensive green roofs [ J ]. *Ecological Engineering*, 2018, **116**: 87-96.
- [ 9 ] 沈庆然, 李田, 曹熠, 等. 基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 [ J ]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2953-2960.  
Shen Q R, Li T, Cao Y, *et al.* Extensive green roof substrate composition based on sludge recycling [ J ]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2953-2960.
- [ 10 ] Fassman E A, Simcock R, Voyde E. Extensive green (living) roofs for stormwater mitigation part 2: performance monitoring [ R ]. Auckland; Auckland Regional Council, 2010. 1-183.
- [ 11 ] Di Bonito R, Biagiotti D, Giagnacovo G, *et al.* Use of compost as amendment for soilless substrates of plants in green roof installations [ J ]. *Acta Horticulturae*, 2016, **1146**: 143-148.
- [ 12 ] 王建军, 李田, 张颖. 给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 [ J ]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4642-4647.  
Wang J J, Li T, Zhang Y. Water treatment residual as a bioretention media amendment for phosphorus removal [ J ]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4642-4647.
- [ 13 ] 王巧环, 任玉芬, 孟龄, 等. 元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳 [ J ]. *分析实验室*, 2013, **32**(10): 41-45.  
Wang Q H, Ren Y F, Meng L, *et al.* Simultaneous determination of total nitrogen and organic carbon in soil with an elemental analyzer [ J ]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2013, **32**(10): 41-45.
- [ 14 ] Dong D, Feng Q B, McGrouther K, *et al.* Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field [ J ]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(1): 153-162.
- [ 15 ] Pungrasmi W, Phinitthanaphak P, Powtongsook S. Nitrogen removal from a recirculating aquaculture system using a pumice bottom substrate nitrification-denitrification tank [ J ]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 357-363.
- [ 16 ] Wang X O, Tian Y M, Zhao X H. The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2017, **592**: 465-476.
- [ 17 ] Chen C, Yu Z B, Xiang L, *et al.* Effects of rainfall intensity and amount on the transport of total nitrogen and phosphorus in a small agricultural watershed [ J ]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, **212-213**: 268-271.
- [ 18 ] Pratiwi E P A, Hillary A K, Fukuda T, *et al.* The effects of rice husk char on ammonium, nitrate and phosphate retention and leaching in loamy soil [ J ]. *Geoderma*, 2016, **277**: 61-68.
- [ 19 ] Zhang W, Zhong X, Che W. Nutrient leaching from extensive green roofs with different substrate compositions: a laboratory study [ J ]. *Water Science & Technology*, 2018, **77**(4): 1007-1014.
- [ 20 ] Rahman M H, Islam M R, Jahiruddin M, *et al.* Influence of organic matter on nitrogen mineralization pattern in soils under different moisture regimes [ J ]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2013, **15**(1): 55-61.
- [ 21 ] Liu Q, Zhang Y H, Liu B J, *et al.* How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis [ J ]. *Plant and Soil*, 2018, **426**(1-2): 211-225.
- [ 22 ] Chen G H, Zhang Z R, Zhang Z Y, *et al.* Influence of biochar addition on the denitrification process and N<sub>2</sub>O emission in Cd-contaminated soil [ J ]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, **228**(1): 47.
- [ 23 ] Shen G Q, Ashworth D J, Gan J, *et al.* Biochar amendment to the soil surface reduces fumigant emissions and enhances soil microorganism recovery [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(3): 1182-1189.
- [ 24 ] Becker H, Aosaar J, Varik M, *et al.* The effect of Norway spruce stump harvesting on net nitrogen mineralization and nutrient leaching [ J ]. *Forest Ecology and Management*, 2016, **377**: 150-160.
- [ 25 ] Ahmed A S F, Raghavan V. Influence of wood-derived biochar on the physico-mechanical and chemical characteristics of agricultural soils [ J ]. *International Agrophysics*, 2018, **32**(1): 1-10.
- [ 26 ] Wang X O, Tian Y M, Zhao X H, *et al.* Hydrological performance of dual-substrate-layer green roofs using porous inert substrates with high sorption capacities [ J ]. *Water Science & Technology*, 2017, **75**(12): 2829-2840.
- [ 27 ] 李田, 陈昱霖, 顾俊青. 不同介质组成的粗放型绿色屋面降雨出流水质 [ J ]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, **43**(11): 1722-1727.  
Li T, Chen Y L, Gu J Q. Effluent quality of extensive green roofs with different substrates [ J ]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, **43**(11): 1722-1727.
- [ 28 ] Wang X C, Zhao X H, Peng C R, *et al.* A field study to evaluate the impact of different factors on the nutrient pollutant concentrations in green roof runoff [ J ]. *Water Science & Technology*, 2013, **68**(12): 2691-2697.

## CONTENTS

Characteristics of PM <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> , 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> Pollution in China .....	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM <sub>2.5</sub> 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> NPI .....	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 <sub>2</sub> 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 <sub>2.5</sub> Based on a Battery of Bioassays .....	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)