

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, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春秋季节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的影响 ..... 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)

## 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

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 植被是绿色屋顶的关键组成部分, 也是影响绿色屋顶径流量和水质的一个重要因素之一. 本文基于大花马齿苋(*Portulaca grandiflora*)、佛甲草(*Sedum lineare*)、高羊茅(*Festuca elata*)和无植被(对照组)这4种植被覆盖类型绿色屋顶2017年植物生长特征、降雨和径流过程的监测, 及对雨水和各绿色屋顶径流中营养元素( $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ -P)与重金属(Cr、Cd、Cu和Ni)的浓度检测, 定量分析了不同植被覆盖类型对绿色屋顶径流量和污染负荷的影响. 结果表明: ①大花马齿苋、佛甲草、高羊茅和对照组绿色屋顶的平均径流削减率分别为51.3%、41.5%、36.3%和33.0%, 大花马齿苋绿色屋顶径流削减率显著高于高羊茅和对照组绿色屋顶( $P < 0.05$ ); ②大花马齿苋和佛甲草绿色屋顶是 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ -P的汇, 且地上生物量更大的大花马齿苋绿色屋顶对营养元素的污染负荷削减率(分别为59.6%、99.9%、82.5%和25.7%)均高于佛甲草绿色屋顶(分别为52.5%、89.3%、75.3%和7.8%), 而高羊茅和对照组绿色屋顶是 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N的汇, 是 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ -P的源; ③大花马齿苋、佛甲草、高羊茅和对照组绿色屋顶均是DCd的汇, 污染负荷削减率分别为19.2%、41.5%、38.4%和31.1%, 但4组绿色屋顶均是DCr、DCu和DNi的源.

**关键词:** 绿色屋顶; 植被; 径流水质; 污染负荷; 营养元素; 重金属

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3618-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201902112

## Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs

ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong\*, ZHANG Ying, WU Si-ting

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** As a key component of green roofs, vegetation may have significant impacts on both the quantity and quality of runoff. In this study, the effects of vegetation on both the quantity and quality of runoff from green roofs are investigated through monitoring the rainfall and runoff processes of green roofs with four different types of vegetation cover (*Portulaca grandiflora*, *Sedum lineare*, *Festuca elata*, and a non-vegetated bed as control) during 2017. The growth characteristics of the vegetation were also monitored, and the nutrients ( $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NO}_2^-$ -N, and  $\text{PO}_4^{3-}$ -P) and heavy metals (Cr, Cd, Cu, and Ni) in the rainwater and runoff were measured. The results show that the average rainfall event-based runoff reduction rates for the four green roof types were 51.3%, 41.5%, 36.3%, and 33.0%, respectively. Furthermore, the runoff reduction rates of the green roof planted with *Portulaca grandiflora* were significantly higher than both the *Festuca elata* green roof and the non-vegetated bed ( $P < 0.05$ ). The green roofs planted with *Portulaca grandiflora* and *Sedum lineare* both acted as sinks for the nutrients. The *Portulaca grandiflora* green roof, which had a higher biomass, provides higher nutrient load reduction rates (59.6%, 99.9%, 82.5%, and 25.7% for  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NO}_2^-$ -N, and  $\text{PO}_4^{3-}$ -P, respectively) than the *Sedum lineare* green roof (52.5%, 89.3%, 75.3%, and 7.8%, respectively). The *Festuca elata* green roof and the non-vegetation bed acted as sinks for  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_2^-$ -N but were sources of  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{PO}_4^{3-}$ -P. All four of the green roofs were sinks for DCd, with pollution load reduction rates of 19.2%, 41.5%, 38.4%, and 31.1%, respectively. However, all the green roofs acted as the sources of DCr, DCu, and DNi.

**Key words:** green roof; vegetation; runoff quality; pollution load; nutrients; metals

随着城镇化快速推进, 道路、停车场、广场和屋顶等不透水面的面积比例逐渐增加<sup>[1]</sup>. 不透水面增加破坏了城镇流域的自然水循环, 易引发城市内涝和水体污染等环境问题<sup>[2-4]</sup>. 据统计, 屋面约占城市不透水面的40%~50%<sup>[5]</sup>, 在土地资源紧张, 环境问题突出的城镇地区建设绿色屋顶, 是增加城镇绿地面积, 缓解城市生态环境问题的有效途径之一<sup>[6]</sup>. 绿色屋顶具有增加城市生物多样性<sup>[7]</sup>, 降低城市热岛效应<sup>[8]</sup>, 改善空气质量<sup>[9]</sup>, 减少噪声<sup>[10]</sup>和调控径流<sup>[11]</sup>等多重生态环境功能.

国内外学者对绿色屋顶径流调控效益开展了大量实验和模拟研究<sup>[11, 12]</sup>, 而关于绿色屋顶径流水质的研究较为薄弱<sup>[13, 14]</sup>. 受植被、基质类型与厚

度、降雨、空气质量、周边环境、管理措施和使用年限等因素影响<sup>[15-18]</sup>, 绿色屋顶的水质变化非常复杂, 不同的研究者关于绿色屋顶对径流水质的影响尚未形成一致结论. 有研究表明<sup>[15, 16, 19]</sup>, 绿色屋顶能够滞留并吸收雨水中的污染物, 相对于普通屋顶, 绿色屋顶具有净化水质的功能. 另有研究指出绿色屋顶是部分污染物质(如COD、营养元素和重金属等)的释放源<sup>[17, 20, 21]</sup>, 盲目应用绿色屋顶可能

收稿日期: 2019-02-27; 修订日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609004); 国家水体污染控制与治理专项(2017ZX07102-001)

作者简介: 章孙逊(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持、绿色屋顶径流水质, E-mail: victor\_zsx@163.com

\* 通信作者, E-mail: zhangs@bjfu.edu.cn

会造成水体污染. 因此, 探究植被和基质等因素对绿色屋顶径流水质的影响是安全应用绿色屋顶的重要前提之一.

植被作为绿色屋顶审美价值的重要来源, 为绿色屋顶带来生机, 也丰富了屋顶的生物多样性<sup>[22]</sup>. 植被可通过截留雨水、蒸散耗水和改变生长基质的持水性能以影响绿色屋顶的径流量<sup>[11, 23]</sup>, 同时也可通过滞尘、根系吸收、根系分泌物、枯落物分解等因素影响绿色屋顶的径流水质. 因此, 是否种植植被<sup>[20, 24]</sup>和种植不同类型的植被<sup>[25, 26]</sup>都可能会对绿色屋顶径流水质产生重要影响. 然而, 当前绿色屋顶植物的选择主要关注植物的抗逆性、美观性<sup>[13]</sup>、覆盖度等特征<sup>[13, 27]</sup>以及植被对绿色屋顶雨水滞留能力<sup>[23]</sup>的影响, 关于植被对绿色屋顶径流水质影响的研究则十分有限. 此外, 国内有关绿色屋顶的实验研究植被选择单一, 文献<sup>[19, 28~31]</sup>均仅采用佛甲草一种植物, 缺乏关于不同类型植被对绿色屋顶径流量和水质影响的研究.

本研究基于对北京市 4 种不同植被覆盖类型绿色屋顶 2017 年植物生长特征、降雨和径流过程的监测, 以及对雨水和各绿色屋顶径流中营养元素与重金属浓度的检测, 定量分析不同植被覆盖类型对绿色屋顶径流量和污染负荷的影响, 并结合植物生长特征解析各绿色屋顶径流量和水质差异的原因, 以期为绿色屋顶的植物筛选及径流水质评估提供科学支撑, 并为海绵城市建设提供科学参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

在北京市海淀区北京林业大学林业楼楼顶搭建 4 个 1 m × 1 m 的实验绿色屋顶(图 1), 其中, 1 个为无植被覆盖对照(对照组), 另外 3 个分别种植佛甲草(*Sedum lineare*)、大花马齿苋(*Portulaca grandiflora*, 马齿苋)和高羊茅(*Festuca elata*). 绿色屋顶的植被层下方依次为生长基质层、过滤层、排水层和防水层. 生长基质由草炭土、碎木屑、沸石和浮石按比例混合, 孔隙度为 57.6%, 饱和导水率为 267 mm·h<sup>-1</sup>, 干容重为 0.55 g·cm<sup>-3</sup>. 过滤层为双层聚酯无纺布(300~400 g·m<sup>-2</sup>), 排水层为厚度为 10 cm 的陶粒(直径 10~35 mm), 选用 TPO 防水卷材作为防水层.

降雨过程由架设于绿色屋顶上方 2 m 处的 HOBO U30 小型自动气象站监测, 绿色屋顶径流量采用分辨率为 1 mm 的自记式雨量计监测. 雨量计

下方是 250 L 的 HDPE 集水桶, 用以收集绿色屋顶径流.

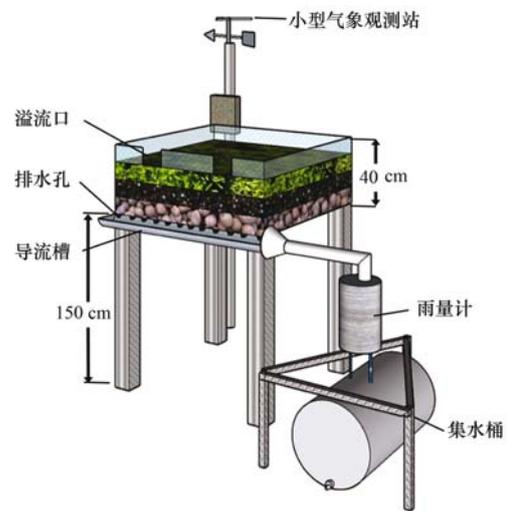


图 1 绿色屋顶实验设施结构示意图

Fig. 1 Structure of the experimental green roofs

### 1.2 数据采集、检测与分析

绿色屋顶产生的径流经雨量计并全部导入 HDPE 集水桶, 使用不锈钢盆收集雨水. 每场降雨结束后, 充分搅拌集水桶和不锈钢盆中收集的径流和雨水并采样装入 HDPE 取样瓶. 采样结束后, 测量集水桶中的径流量并排放. 排水完成后, 先用自来水, 后用去离子水冲刷清洗集水桶和不锈钢盆. 取样 1 h 内, 将所采水样放入冰箱冷冻储存, 定期分批进行水质检测.

雨水和绿色屋顶径流的水质检测指标包括营养元素(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)和溶解态重金属(DCd、DCr、DNi、DCu)等. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P的质量浓度检测采用法国 Alliance 公司生产的全自动化学分析仪(Smartchem 200); 使用 ICP-MS 测量水样中溶解态重金属的质量浓度.

在实验绿色屋顶随机取 10 个点定期测量植物高度, 计算平均株高, 并基于照相法测定植物覆盖度. 雨季结束后, 收取 20 cm × 20 cm 样方的地上部分植被, 先用浸泡法<sup>[32]</sup>, 测定植物最大雨水截留量, 再将植物置于 65℃ 的烘箱内烘干至恒重, 称重作为该植物地上部分生物量<sup>[33]</sup>.

本文使用单因素方差分析对比 4 组绿色屋顶径流中污染物平均浓度的差异性. 此外, 基于径流量和污染物浓度数据, 分别计算了各绿色屋顶的径流削减率( $D_r$ )和污染负荷削减率( $D_c$ ), 绿色屋顶径流削减率( $D_{ri}$ )可由式(1)计算.

$$D_{ri} = \frac{P_i \times S - V_i}{P_i \times S} \times 100\% \quad (1)$$

绿色屋顶污染负荷削减率( $D_c$ )可由下式计算:

$$D_c = \frac{\sum_{i=1}^n c_{pi} \times P_i \times S - \sum_{i=1}^n c_{ri} \times V_i}{\sum_{i=1}^n c_{pi} \times P_i \times S} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $S$  为绿色屋顶面积( $m^2$ );  $i$  为降雨场次;  $n$  为总降雨场次;  $P_i$  为第  $i$  场降雨的降雨量( $mm$ );  $V_i$  为第  $i$  场降雨的绿色屋顶径流量( $L$ );  $c_{pi}$  和  $c_{ri}$  分别为第  $i$  场降雨雨水和绿色屋顶径流中污染物浓度( $mg \cdot L^{-1}$  或  $\mu g \cdot L^{-1}$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 植物生长特征分析

2017 年 4~5 月进行绿色屋顶植物移植, 除移植初期适当灌溉和定期人工除杂草, 植物生长期未施加肥料和农药, 且未进行人工灌溉, 监测期内植物生长特征如表 1 所示. 高羊茅因不适应屋顶环

境, 在无养护模式开始后逐渐死亡, 故无法进行地上生物量和最大雨水截留量的测定. 高羊茅平均株高为 9 cm, 覆盖度约为 80%, 枯死茎叶覆在生长基质层表面. 佛甲草和马齿苋生长状况良好, 移植一个月后覆盖度均达 100%; 马齿苋的平均株高为 22 cm, 约是佛甲草的 3.14 倍, 地上生物量为  $1153 g \cdot m^{-2}$ , 约是佛甲草的 2.29 倍; 马齿苋最大雨水截留量为 0.54 mm, 略优于佛甲草.

### 2.2 绿色屋顶降雨和径流特征

依据已有的研究<sup>[11, 34]</sup>, 本文将前后间隔超过 6 h 的降雨视作两场降雨. 本研究选用 4 个实验绿色屋顶皆产生径流的 4 场降雨进行取样分析, 场降雨特征如表 2 所示. 依据《降水等级标准》(GB/T 28592-2012), 这 4 场降雨中包含 1 场中雨, 2 场大雨和 1 场暴雨. 其中 7 月 15 日降雨为 2017 年雨季最大降雨, 降雨量为 81.4 mm, 历时 8.7 h, 最大雨强为  $2.76 mm \cdot min^{-1}$ .

表 1 植物生长特征

Table 1 Growth characteristics of plants

植被覆盖类型	平均株高/cm	覆盖度/%	地上生物量/ $g \cdot m^{-2}$	最大雨水截留量/mm
佛甲草	7	100	503	0.50
马齿苋	22	100	1153	0.54
高羊茅	9	80	/	/

表 2 场降雨特征

Table 2 Characteristics of selected rainfall events

降雨日期 (月-日)	降雨量/mm	降雨历时/h	最大雨强 $/mm \cdot min^{-1}$	雨前干期/d	前场降雨量/mm
07-06	44.8	12.9	1.16	1.98	18.8
07-07	17.6	2.2	0.6	0.86	44.8
07-15	81.4	8.7	2.76	0.96	5.8
08-22	44.2	15.7	0.44	3.66	1.4

各绿色屋顶径流特征如图 2 所示, 除 7 月 7 日高羊茅绿色屋顶径流量高于对照组, 有植被覆盖的绿色屋顶径流量均低于对照组绿色屋顶, 其中, 马齿苋绿色屋顶径流量最少. 各绿色屋顶平均径流削减率如图 3 所示, 马齿苋绿色屋顶平均径流削减率(51.3%)显著高于( $P < 0.05$ )高羊茅(36.3%)和对照组(33.0%)绿色屋顶, 佛甲草绿色屋顶平均径

流削减率为 41.5%, 和其他 3 组绿色屋顶差异均不显著( $P > 0.05$ ).

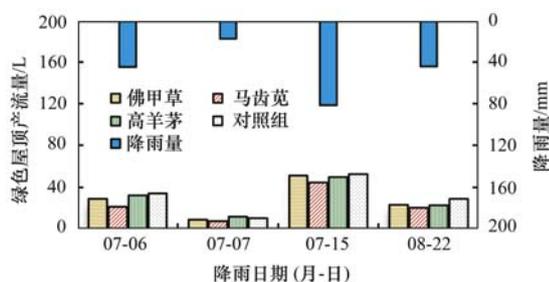


图 2 绿色屋顶产流特征

Fig. 2 Runoff characteristics of the green roofs

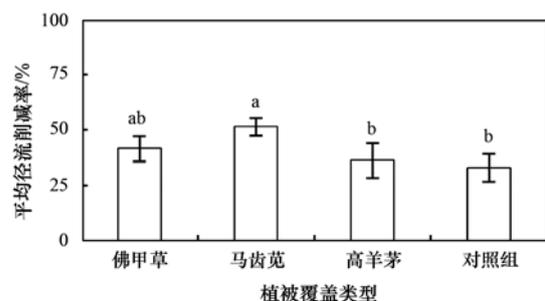


图 3 绿色屋顶平均径流削减率

Fig. 3 Average runoff reduction rate of the green roofs

### 2.3 植被对营养元素浓度和负荷影响

#### 2.3.1 铵态氮( $NH_4^+ -N$ )

如图 4(a) 所示, 各绿色屋顶径流中  $NH_4^+ -N$  浓度无显著差异, 且平均浓度均低于雨水 ( $0.63 mg \cdot L^{-1}$ ). 佛甲草、马齿苋和对照组绿色屋顶径流中

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度差异不大且均高于高羊茅绿色屋顶. 雨水和绿色屋顶径流中营养元素污染总负荷(总负荷)和总污染负荷削减率(总负荷削减率)如表4, 4组绿色屋顶径流的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总负荷均低于雨水(110.9

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ), 是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的汇. 高羊茅绿色屋顶对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 吸收效果最好, 总负荷削减率高达90.7%, 佛甲草和马齿苋绿色屋顶的总负荷削减率分别为52.5%和59.6%, 均高于对照组绿色屋顶(47.9%).

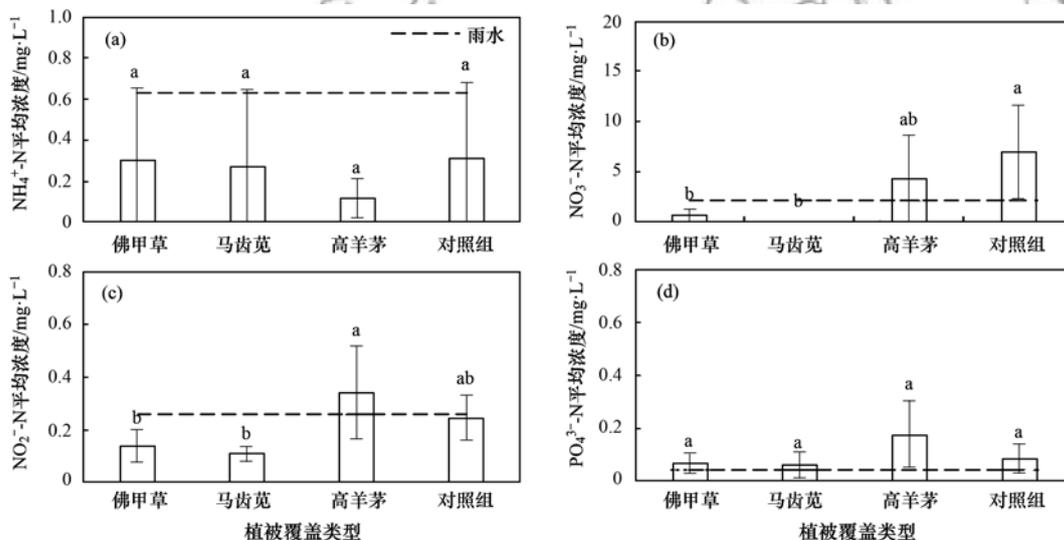
表4 不同植被覆盖类型绿色屋顶径流和雨水营养元素污染负荷

营养元素检测指标	雨水样	佛甲草		马齿苋		高羊茅		对照组	
	总负荷 $/\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$	总负荷 $/\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$	削减率 /%						
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	110.9	52.7	52.5	44.8	59.6	10.3	90.7	57.8	47.9
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	527.2	56.6	89.3	0.4	99.9	574.9	-9.1	982.7	-86.4
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	62.8	15.5	75.3	11.0	82.5	33.7	46.3	34.6	44.9
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	6.5	6.0	7.8	4.8	25.7	17.2	-162.9	9.1	-39.1

### 2.3.2 硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )

如图4(b)所示, 雨水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均浓度为 $2.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 高于佛甲草( $0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )和马齿苋( $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )绿色屋顶径流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均浓度, 但低于高羊茅( $4.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )和对照组( $6.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )绿色屋顶径流. 佛甲草和马齿苋绿色屋顶

径流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度显著低于对照组. 雨水带来的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总负荷为 $527.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ (表4), 佛甲草和马齿苋屋顶是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的汇,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总负荷削减率分别为89.3%和99.9%; 高羊茅和对照组绿色屋顶是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的源, 径流中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 污染负荷较雨水分别增加了9.1%和86.4%.



图中不同字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ ); 相同字母表示组间差异不显著( $P > 0.05$ ), 下同

图4 不同植被覆盖类型绿色屋顶径流和降雨采样中营养元素浓度特征

Fig. 4 Characteristics of nutrient concentrations in rainwater and the runoff from green roofs with different types of vegetation cover

### 2.3.3 亚硝态氮( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ )

高羊茅绿色屋顶径流中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 平均浓度为 $0.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 明显高于雨水和其它绿色屋顶径流[图4(c)]. 其中, 佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 平均浓度分别为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 显著低于高羊茅绿色屋顶; 对照组绿色屋顶径流中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 平均浓度为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 与其他三组绿色屋顶差异均不显著. 降雨产生的总 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污染负荷为 $62.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 高于各绿色屋顶径流中的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 总负荷(表4). 佛甲草、马齿苋、对照组和高羊茅绿色屋顶均是 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的汇, 总负荷削减率

分别为75.3%、82.5%、46.3%和44.9%.

### 2.3.4 磷酸态磷( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ )

如图4(d)所示, 4组绿色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 平均浓度均高于雨水( $0.046 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 高羊茅屋顶径流的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 平均浓度最高( $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 其次为对照组绿色屋顶( $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的平均浓度分别为 $0.072 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.065 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 4组绿色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 平均浓度差异不显著. 如表4, 佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 总负荷低于雨水中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 总负荷( $6.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ), 是 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的汇, 总

负荷削减率分别为 7.8% 和 25.7%，然而，高羊茅和对照组绿色屋顶是  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的源，径流中的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  总负荷较雨水分别增加了 162.9% 和 39.1%。

## 2.4 植被对溶解态重金属浓度和负荷影响

### 2.4.1 可溶性铬(DCr)

绿色屋顶径流和雨水中可溶性铬(DCr)平均浓度如图 5(a)所示, 4 组绿色屋顶径流中的 DCr 平均

浓度均高于雨水( $0.86 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )。对照组绿色屋顶径流中 DCr 平均浓度最低, 马齿苋绿色屋顶最高, 但各绿色屋顶径流中 DCr 浓度无显著差异。如表 5 所示, 佛甲草、马齿苋、高羊茅和对照组绿色屋顶 DCr 总负荷分别为 200.0、180.5、209.9 和 202.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 均高于雨水的 DCr 总负荷 ( $161.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), 这表明, 本研究所设置的 4 组绿色屋顶均是 DCr 的源。

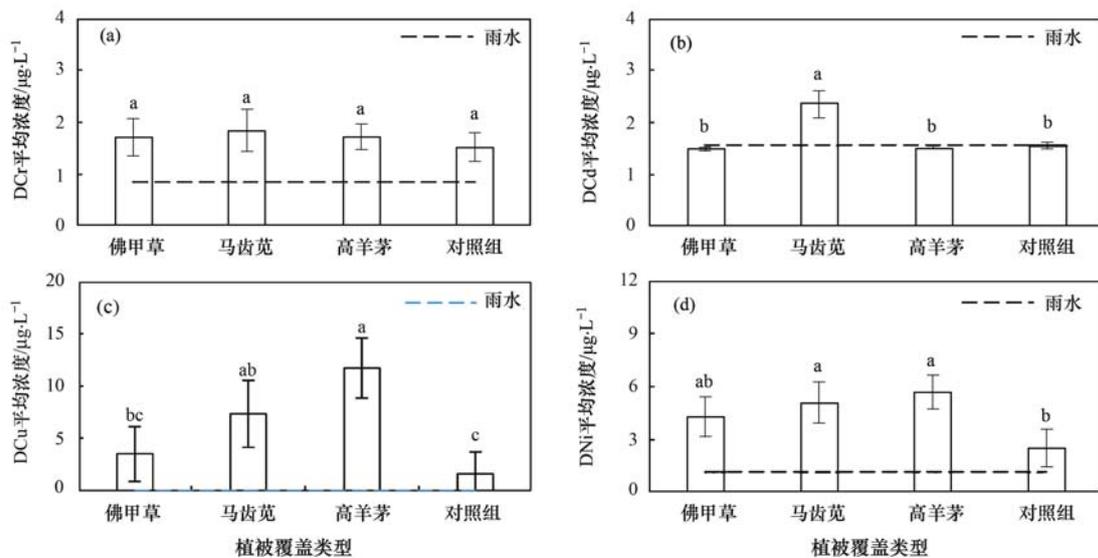


图 5 不同植被类型绿色屋顶径流和降雨采样中溶解态重金属浓度特征

Fig. 5 Characteristics of heavy metal concentrations in rainwater and the runoff from green roofs with different types of vegetation cover

### 2.4.2 可溶性镉(DCd)

如图 5(b)所示, 佛甲草、高羊茅和对照组绿色屋顶径流中可溶性镉(DCd)的平均浓度与雨水( $1.57 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )差异不大, 而马齿苋屋顶径流中 DCd 平均浓度为  $2.35 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 显著高于其他绿色屋顶。降雨

共产生  $290.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  的 DCd 污染负荷 (表 5), 高于各绿色屋顶径流 DCd 污染总负荷, 表明 4 组绿色屋顶均是 DCd 的汇。佛甲草绿色屋顶的 DCd 总负荷削减率最高 (41.5%), 依次高于高羊茅 (38.4%)、对照组 (31.1%) 和马齿苋 (19.2%) 绿色屋顶。

表 5 不同植被覆盖类型绿色屋顶径流金属元素污染负荷分析

Table 5 Pollution loads of heavy metals in rainwater and the runoff from green roofs with different types of vegetation cover

营养元素 检测指标	雨水样	佛甲草		马齿苋		高羊茅		对照组	
	总负荷 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	总负荷 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	削减率 /%	总负荷 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	削减率 /%	总负荷 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	削减率 /%	总负荷 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	削减率 /%
DCr	161.9	200.0	-23.4	180.5	-11.5	209.9	-29.7	202.6	-25.2
DCd	290.9	170.2	41.5	235.0	19.2	179.2	38.4	200.4	31.1
DCu	未检出	410.8	/	708.3	/	1368.6	/	243.3	/
DNi	257.7	480.4	-86.4	495.6	-92.3	655.1	-154.2	352.5	-36.8

### 2.4.3 可溶性铜(DCu)

研究期内降雨中均未检测出可溶性铜(DCu)。各绿色屋顶径流中 DCu 平均浓度对比见图 5(c), 高羊茅和马齿苋绿色屋顶径流中 DCu 平均浓度分别为  $11.72 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $7.34 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 显著高于对照组绿色屋顶 ( $1.60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )。佛甲草绿色屋顶径流中 DCu 平均浓度为  $3.48 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 显著低于高羊茅绿色屋顶, 但与马齿苋和对照组绿色屋顶无显著差异。4 种绿色屋顶均是 DCu 的源 (表 5), 其中, 对

照组屋顶径流 DCu 总负荷最低, 为  $243.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 高羊茅、马齿苋和佛甲草绿色屋顶径流 DCu 总污染负荷分别是对照组的 5.6、2.9 和 1.7 倍。

### 2.4.4 可溶性镍(DNi)

如图 5(d)所示, 绿色屋顶径流中 DNi 平均浓度均远高于雨水 ( $1.20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )。高羊茅和马齿苋绿色屋顶径流中 DNi 平均浓度分别为  $5.68 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $5.11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 显著高于对照组 ( $2.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )。佛甲草绿色屋顶径流中 DNi 平均浓度为  $4.29$

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 与各绿色屋顶均无显著差异. 降雨产生 DN<sub>i</sub> 总负荷为  $257.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  (表 5), 低于各绿色屋顶, 各绿色屋顶均是 DN<sub>i</sub> 的释放源. 其中, 对照组屋顶径流产生的 DN<sub>i</sub> 总负荷最低 ( $352.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), 高羊茅屋顶径流中 DN<sub>i</sub> 总负荷最高 ( $655.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), 马齿苋和佛甲草绿色屋顶径流 DN<sub>i</sub> 总负荷差异不大, 分别为  $495.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $480.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ .

### 3 讨论

本研究中, 马齿苋绿色屋顶的平均径流削减率最高 (51.3%), 依次高于佛甲草 (41.5%)、高羊茅 (36.3%) 和无植被对照组 (33.0%) 绿色屋顶. 绿色屋顶径流量受降水量、植物截留和蒸腾能力、基质蒸发量、基质雨水滞留能力等因素影响<sup>[23, 35]</sup>. 在高温雨季, 生物量最大的 C4 植物马齿苋蒸腾耗水强烈<sup>[11]</sup>, 能够快速消耗绿色屋顶基质层滞留的雨水, 迅速恢复其最大雨水滞留能力, 且马齿苋的雨水截留量 (0.54 mm) 也高于高羊茅和无植被绿色屋顶, 因此, 马齿苋绿色屋顶径流调控效益最强. CAM 代谢植物佛甲草的蒸腾耗水量和雨水截留量 (0.50 mm) 均少于马齿苋, 所以, 其平均径流削减率低于马齿苋. 由于高羊茅枯死后覆盖在其基质层表面, 虽仍有一定雨水截留作用, 但会抑制基质水分蒸发, 造成基质的雨水滞留能力更新较慢, 因此, 高羊茅绿色屋顶的平均径流削减率与对照组相近, 明显低于马齿苋和佛甲草绿色屋顶.

绿色屋顶的基质类型与厚度<sup>[20, 24]</sup>、植被层种类<sup>[25]</sup>、降雨间隔时间与降雨特征<sup>[19]</sup>、管理措施<sup>[36, 37]</sup>和周边环境<sup>[1]</sup>等因素均会对绿色屋顶径流水质造成影响. 本研究设置的 4 组绿色屋顶, 除植被覆盖类型差异外, 其余条件均相同, 且在实验监测期间未进行施肥和灌溉等维护, 因此, 各绿色屋顶径流中污染物浓度和负荷差异主要受植被覆盖类型影响. 马齿苋和佛甲草绿色屋顶径流中营养元素 ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ) 的平均浓度均低于无植被覆盖的绿色屋顶, 这与 Beecham 等<sup>[20]</sup>和 Vijayaraghavan 等<sup>[24]</sup>的实验结果相似. 植被吸收可能是绿色屋顶径流中营养元素浓度低于雨水的主要原因, 实验结果显示, 地上生物量最大的马齿苋绿色屋顶 ( $1\ 153 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 径流中 4 种营养元素的平均浓度均低于生物量较小的佛甲草 ( $503 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 绿色屋顶. 高羊茅在监测期无灌溉条件下逐渐枯死, 其对营养元素吸收作用较弱, 且固定在植物体内的磷元素随高羊茅的腐烂而释放到绿色屋顶径流中<sup>[38]</sup>, 因此, 高羊茅绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、

$\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的平均浓度均明显高于马齿苋和佛甲草绿色屋顶. 除植物的吸收和分解外, 绿色屋顶基质中阳离子交换固定和微生物活动, 也可能是造成绿色屋顶径流中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度低于雨水的原因<sup>[15]</sup>, 枯死高羊茅绿色屋顶基质内水分相对较多, 可能提供了更适合微生物生长和反应的环境, 使得高羊茅绿色屋顶径流中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均浓度最低.

对照组和高羊茅绿色屋顶径流中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的污染负荷低于雨水, 是  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的汇, 但其径流中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  平均浓度和污染负荷均明显高于雨水, 是  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的源. 绿色屋顶径流污染负荷同时受污染物浓度和径流量影响<sup>[22]</sup>, 虽然马齿苋和佛甲草绿色屋顶径流中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  平均浓度高于雨水, 但由于绿色屋顶出色的径流调控能力, 这两种绿色屋顶径流中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  总负荷均少于雨水, 是所测 4 种营养元素的汇.

当绿色屋顶径流中金属元素的浓度和雨水相近时, 绿色屋顶径流调控能力可以降低径流中金属元素的污染负荷<sup>[1]</sup>, 因此, 本研究所设置的 4 组绿色屋顶均是 DCd 的汇. 然而, 4 组绿色屋顶均是 DCr、DN<sub>i</sub> 和 DCu 的源, 说明建设绿色屋顶有可能增加了径流中重金属污染, 这与传统观念和前人的实验结果不同<sup>[24]</sup>. Rowe 指出<sup>[18]</sup>, 绿色屋顶径流水质会受使用年限影响, 新建的绿色屋顶基质中重金属元素含量较高, 可能是造成各组绿色屋顶径流中 DCr、DN<sub>i</sub> 和 DCu 的浓度均明显高于雨水的主要原因. 有植被覆盖的 3 组绿色屋顶径流中 DCr、DCu 和 DN<sub>i</sub> 的浓度均高于无植被对照组, 可能原因在于植物叶片富集大气沉降物<sup>[39]</sup>和根系分泌物等因素影响<sup>[40, 41]</sup>. 由于景天科植物佛甲草可能对金属有超富集作用<sup>[42, 43]</sup>, 佛甲草绿色屋顶产生的 DCu 和 DN<sub>i</sub> 污染负荷相对其他两种植被覆盖的绿色屋顶较低.

高羊茅不适应高温、干燥的屋顶环境, 在无养护的情况下枯死并覆盖在基质表面, 丧失景观价值且成为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、DCr、DCu 和 DN<sub>i</sub> 等污染物的释放源, 因此, 不适合用于北京地区粗放式绿色屋顶建设. 佛甲草和大花马齿苋在屋顶环境生长良好且对 N 和 P 有较好的吸附作用, 其中, 生物量更大的大花马齿苋绿色屋顶的径流调控和营养元素固定效果更好, 较适合作为屋顶绿化植物. 除径流调控和对径流水质影响外, 绿色屋顶的植物筛选还应综合考虑植物的生长特征、耗水机制、景观和食源功能、生物多样性和维护需求等因素<sup>[44, 45]</sup>.

## 4 结论

(1) 实验绿色屋顶均具有较好的径流调控功能, 平均径流削减率在 33.0% ~ 51.3% 之间; 其中, 马齿苋绿色屋顶径流削减率显著高于高羊茅和对照组绿色屋顶 ( $P < 0.05$ ), 而佛甲草绿色屋顶和其他 3 组绿色屋顶差异均不显著 ( $P > 0.05$ ).

(2) 马齿苋和佛甲草绿色屋顶是营养元素 ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ) 的汇, 二者对以上营养元素负荷削减率分别在 25.7% ~ 99.9% 和 7.8% ~ 89.3% 之间. 高羊茅和对照组绿色屋顶是  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的汇, 是  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的源.

(3) 生物量较大的马齿苋绿色屋顶对 N 和 P 的控制能力优于佛甲草, 且二者对 N 和 P 的污染负荷削减率均明显高于对照组.

(4) 实验绿色屋顶均是 DCd 的汇, 均是 DCr、DCu 和 DN<sub>i</sub> 的源.

### 参考文献:

- [1] Berndtsson J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(4): 351-360.
- [2] Kaye J P, Groffman P M, Grimm N B, *et al.* A distinct urban biogeochemistry? [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, **21**(4): 192-199.
- [3] Kuoppamäki K, Hagner M, Lehvävirta S, *et al.* Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **88**: 1-9.
- [4] Wang J, Zhang S H, Guo Y P. Analyzing the impact of impervious area disconnection on urban runoff control using an analytical probabilistic model [J]. *Water Resources Management*, 2019, **33**(5): 1753-1768.
- [5] Palla A, Gnecco I, Lanza L G. Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **379**(1-2): 193-204.
- [6] Guo Y P, Zhang S H, Liu S G. Runoff reduction capabilities and irrigation requirements of green roofs [J]. *Water Resources Management*, 2014, **28**(5): 1363-1378.
- [7] Vijayaraghavan K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **57**: 740-752.
- [8] Wong N H, Chen Y, Ong C L, *et al.* Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment [J]. *Building and Environment*, 2003, **38**(2): 261-270.
- [9] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, *et al.* Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **61**: 283-293.
- [10] Connelly M, Hodgson M. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs [J]. *Applied Acoustics*, 2013, **74**(10): 1136-1143.
- [11] 葛德, 张守红. 不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 5015-5023.
- [12] Ge D, Zhang S H. Impacts of vegetation on hydrological performances of green roofs under different rainfall conditions [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5015-5023.
- [13] Zhang S H, Guo Y P. Analytical probabilistic model for evaluating the hydrologic performance of green roofs [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, **18**(1): 19-28.
- [14] Vijayaraghavan K, Joshi U M. Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **194**: 121-129.
- [15] 陈小平, 黄佩, 周志翔, 等. 绿色屋顶径流调控研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(8): 2581-2590.
- [16] Chen X P, Huang P, Zhou Z X, *et al.* A review of green roof performance towards management of roof runoff [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(8): 2581-2590.
- [17] Todorov D, Driscoll C T, Todorova S, *et al.* Water quality function of an extensive vegetated roof [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 928-939.
- [18] 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)*, 2015, **43**(11): 1722-1727.
- [19] Li T, Chen Y L, Gu J Q. Effluent quality of extensive green roofs with different substrates [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, **43**(11): 1722-1727.
- [20] Berndtsson J C, Emilsson T, Bengtsson L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 48-63.
- [21] Rowe D B. Green roofs as a means of pollution abatement [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(8-9): 2100-2110.
- [22] 张千千, 王效科, 高勇, 等. 绿色屋面降雨径流水质及消减污染负荷研究 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(10): 3454-3463.
- [23] Zhang Q Q, Wang X K, Gao Y, *et al.* Research on green roof in water quality of rainfall runoff and reduction of pollution load [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(10): 3454-3463.
- [24] Beecham S, Razzaghmanesh M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate [J]. *Water Research*, 2015, **70**: 370-384.
- [25] Bliss D J, Neufeld R D, Ries R J. Storm water runoff mitigation using a green roof [J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, **26**(2): 407-418.
- [26] Carpenter C M G, Todorov D, Driscoll C T, *et al.* Water quantity and quality response of a green roof to storm events: experimental and monitoring observations [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 664-672.
- [27] Nagase A, Dunnett N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: effects of plant species, diversity and plant structure [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, **104**(3-4): 356-363.
- [28] Vijayaraghavan K, Joshi U M, Balasubramanian R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs [J]. *Water Research*, 2012, **46**(4): 1337-1345.
- [29] 王书敏, 何强, 张峻华, 等. 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(12): 3691-3700.
- [30] Wang S M, He Q, Zhang J H, *et al.* The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff from green roofs [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(12): 3691-3700.
- [31] Berndtsson J C, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(3): 369-380.
- [32] Azeñas V, Janner I, Medrano H, *et al.* Performance evaluation of five Mediterranean species to optimize ecosystem services of green roofs under water-limited conditions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **212**: 236-247.

- [28] 刘爽, 牛建森, 王宗平, 等. 消化污泥及给水厂剩余污泥在绿色屋顶中的应用[J]. 中国给水排水, 2017, **33**(23): 104-108, 114.  
Liu S, Niu J S, Wang Z P, *et al.* Application of digested sludge and waterworks alum sludge in green roof construction[J]. China Water & Wastewater, 2017, **33**(23): 104-108, 114.
- [29] 罗珊, 周永潮, 张仪萍. 绿色屋面对雨水径流控制效果及影响因素[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, **52**(5): 845-852, 895.  
Luo S, Zhou Y C, Zhang Y P. Experimental study on performance and its influence factors of green roof on stormwater management[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, **52**(5): 845-852, 895.
- [30] 钟兴, 张伟, 邢成, 等. 填料对绿色屋顶设施出流中营养物质淋失的影响[J]. 中国给水排水, 2018, **34**(7): 128-132.  
Zhong X, Zhang W, Xing C, *et al.* Influence of substrate on nutrients leaching of green roof[J]. China Water & Wastewater, 2018, **34**(7): 128-132.
- [31] 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 等. 绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1803-1810.  
Li J S, Yin H W, Kong F H, *et al.* Effects of green roof on stormwater regulation and cost-benefit analysis [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1803-1810.
- [32] 余开亮, 陈宁, 余四胜, 等. 物种组成对高寒草甸植被冠层降雨截留容量的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(19): 5771-5779.  
Yu K L, Chen N, Yu S S, *et al.* Effects of species composition on canopy rainfall storage capacity in an alpine meadow, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(19): 5771-5779.
- [33] 张建军, 张守红. 水土保持与荒漠化防治实验研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 2017. 65-71.
- [34] Voyde E, Fassman E, Simcock R. Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand[J]. Journal of Hydrology, 2010, **394**(3-4): 384-395.
- [35] Lundholm J, MacIvor J S, MacDougall Z, *et al.* Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions[J]. PLoS One, 2010, **5**(3): e9677.
- [36] Razzaghmanesh M, Beecham S, Kazemi F. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment [J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 651-659.
- [37] Gregoire B G, Clausen J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality [J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(6): 963-969.
- [38] 张菊, 邓焕广, 吴爱琴, 等. 东平湖菹草腐烂分解及其对水环境的影响[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2590-2596.  
Zhang J, Deng H G, Wu A Q, *et al.* Decomposition of *Potamogeton crispus* and its effect on the aquatic environment of Dongping Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(9): 2590-2596.
- [39] 庄树宏, 王克明. 城市大气重金属(Pb, Cd, Cu, Zn)污染及其在植物中的富积[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2000, **13**(1): 31-37.  
Zhuang S H, Wang K M. Study on the relationship between atmospheric heavy metal pollution (Pb, Cd, Cu, Zn) and its accumulations in leaves of urban trees [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2000, **13**(1): 31-37.
- [40] 罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(12): 3496-3504.  
Luo Y Q, Zhao X Y, Li M X. Ecological effect of plant root exudates and related affecting factors: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(12): 3496-3504.
- [41] 徐卫红, 黄河, 王爱华, 等. 根系分泌物对土壤重金属活化及其机理研究进展[J]. 生态环境, 2006, **15**(1): 184-189.  
Xu W H, Huang H, Wang A H, *et al.* Advance in studies on activation of heavy metal by root exudates and mechanism [J]. Ecology and Environment, 2006, **15**(1): 184-189.
- [42] Huang H G, Li T Q, Gupta D K, *et al.* Heavy metal phytoextraction by *Sedum alfredii* is affected by continual clipping and phosphorus fertilization amendment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(3): 376-386.
- [43] Ma Y, Rajkumar M, Luo Y M, *et al.* Phytoextraction of heavy metal polluted soils using *Sedum plumbizincicola* inoculated with metal mobilizing *Phyllobacterium myrsinacearum* RC6b [J]. Chemosphere, 2013, **93**(7): 1386-1392.
- [44] Van Mechelen C, Dutoit T, Kattge J, *et al.* Plant trait analysis delivers an extensive list of potential green roof species for Mediterranean France [J]. Ecological Engineering, 2014, **67**: 48-59.
- [45] Zhang Z, Szota C, Fletcher T D, *et al.* Influence of plant composition and water use strategies on green roof stormwater retention[J]. Science of The Total Environment, 2018, **625**: 775-781.

## 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)