

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征	陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)
面向二/三维城市形态指标的PM _{2.5} 浓度调控模拟	李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)
减排背景下成都大气PM _{2.5} 碳质组分特征	陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)
青岛秋冬季PM ₁ 中金属元素污染特征及健康风险评估	刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)
港口地区大气PM _{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析	王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析	张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)
北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素	梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)
北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析	孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源	周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠筠, 张智胜, 陶俊(4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果	何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比	武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析	宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险	许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子	剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性	陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源	陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)
紫外光化过硫酸盐降解磷酸氯喹	李阳, 许玻琨, 邓琳, 罗伟(4597)
微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能	刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响	陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响	郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响	夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响	宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响	袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化	孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响	翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性	赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制	龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响	刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响	王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析	李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基(4727)
IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析	赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响	郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价	王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)
兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析	张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)
典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价	沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析	汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应	唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)
稻田干湿过程甲基化效率变化与关键影响因素分析	张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应	李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响	宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响	张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测	李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)
小型养殖塘水体中CH ₄ 、CO ₂ 和N ₂ O浓度的时空变化特征及影响因素	石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响	胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征	商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析	张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用	马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)
《环境科学》征订启事(4512)	《环境科学》征稿简则(4735)
信息(4696, 4790, 4887)	

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价

章孙逊¹, 张守红^{1,2,3*}, 闫婧¹, 王任重远¹, 杨航¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 吉县 042200; 3. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 绿色屋顶是海绵城市建设的重要措施之一, 但植被和基质等配置因素对其径流水质的综合影响尚不清楚, 这限制了绿色屋顶的推广。通过在北京市区搭建3种植被类型[佛甲草(*Sedum lineare*)、大花马齿苋(*Portulaca grandiflora*, 马齿苋)和无植被(对照)]、3种基质类型[田园土、改良土和轻质生长基质(轻质基)]和2种基质厚度(15 cm和10 cm)的12个绿色屋顶, 基于2019年雨季降雨特征、各绿色屋顶径流量以及径流中营养盐和重金属浓度的监测, 构建绿色屋顶径流水质指数(RQI)定量分析不同绿色屋顶配置对径流水质的综合影响。结果表明, 植被可提高绿色屋顶径流削减率和有效降低径流中 NO_3^- -N的浓度, 佛甲草和马齿苋绿色屋顶的RQI接近, 径流水质均优于对照绿色屋顶; 基质材料显著影响绿色屋顶径流削减率和径流中污染物浓度, 轻质基绿色屋顶的径流削减率最低且径流中 NH_4^+ -N、DFe、DMn和DZn的浓度均值最高, 其径流水质劣于改良土和田园土绿色屋顶; 基质厚度为15 cm的绿色屋顶径流削减率更高, 其径流水质优于10 cm的绿色屋顶。研究结果可为绿色屋顶设计及径流水质综合评价提供科学依据。

关键词: 绿色屋顶; 径流水质指数(RQI); 植被; 基质; 污染负荷; 综合评价

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4587-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112232

Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations

ZHANG Sun-xun¹, ZHANG Shou-hong^{1,2,3*}, YAN Jing¹, WANG Ren-zhong-yuan¹, YANG Hang¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. National Station for Forest Ecosystem Research in Jixian County, Jixian 042200, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

Abstract: Green roofs are regarded as one of the important measures for the sponge city construction. However, the comprehensive impacts of configuration factors (e.g., vegetation and substrates) on runoff quality from green roofs are not clear, which limits the promotion of green roofs. In this study, 12 green roofs with three vegetation types (i.e., *Sedum lineare*, *Portulaca grandiflora*, and non-vegetated substrates), three substrate types (i.e., local planting soil, engineered soil, and light growing medium), and two substrate depths (i.e., 10 cm and 15 cm) were set up in Beijing. During the rainy season of 2019, the rainfall characteristics, runoff volumes, and concentrations of nutrients and heavy metals of runoff from the green roofs were monitored. Based on the measured data, a runoff quality index (RQI) was developed to evaluate the comprehensive influences of configurations on runoff quality of the green roofs. The results showed that vegetation could improve runoff reduction rate and decrease the concentrations of NO_3^- -N in runoff of green roofs. The RQIs of green roofs planted with *S. lineare* and *P. grandiflora* were similar, and the evaluation results of runoff quality were better than those with non-vegetated substrates. The materials of substrates had significant influences on the runoff reduction rate and pollutant concentrations in runoff from green roofs. The green roofs with light growing medium, which had the lowest runoff reduction rates and the highest concentrations of NH_4^+ -N, DFe, DMn, and DZn in the runoff, showed poorer runoff quality than the green roofs with local planting soil and engineered soil. The green roofs with a substrate depth of 15 cm had higher runoff reduction rates than those with 10 cm deep substrate, and the runoff quality was better than those with a substrate depth of 10 cm. The results of this study provide scientific reference for the design and integrated assessment of green roofs.

Key words: green roofs; runoff quality index (RQI); vegetation; substrate; pollutant load; integrated assessment

随着城市化快速推进和城市人口的快速增长, 城市区域不透水面迅速增加^[1], 改变了城市水循环过程, 引发城市水质恶化、水生态系统退化和暴雨洪涝等生态和环境问题^[2]。为解决这些问题, 国内外近年来提出了低影响开发、水敏感城市、可持续排水系统和海绵城市等城市雨洪管理理念^[3]。作为海绵城市建设的重要措施之一, 绿色屋顶具有调蓄径流^[4]、减少噪声^[5]和减少城市热岛效应^[6]等生态和环境功能。此外, 由于实施屋顶绿化无需额外用地, 绿色屋顶在土地资源紧张、生态环境问题严重的城镇地区具有广泛的应用前景^[7], 近年来在许多国家和地区受到大量关注^[8]。然而, 受植被类型、

基质类型和厚度、气候条件和使用时长等因素的影响, 目前不同地区和不同配置的绿色屋顶径流水质研究结果存在差异, 绿色屋顶对径流水质的影响尚无统一结论^[9]。

基质和植被是绿色屋顶的主要组成部分, 也是影响绿色屋顶径流水质的重要因素^[10,11]。基质层是绿色屋顶的关键层, 为满足减轻屋顶负荷和支持植物生长等需求, 通常由轻质骨料和有机质等材料

收稿日期: 2021-12-23; 修订日期: 2022-01-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2021BLRD04); 国家自然科学基金项目(51609004)

作者简介: 章孙逊(1996~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为绿色屋顶径流水质, E-mail: zhangsx2018@bjfu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhangshouhong@bjfu.edu.cn

组成^[12]. 在降雨过程中,部分雨水被基质吸持^[13],雨水中的部分污染物也会通过过滤、化学沉淀和离子交换等途径被基质吸附^[14,15]. 然而,基质材料因风化和矿化等途径^[16,17]产生的污染物会随径流淋出. 基质类型和厚度的差异是影响绿色屋顶植物生长、雨水滞留量和时间、基质物质释放和交换程度等的重要因素^[18],不同基质材料和厚度的绿色屋顶径流中污染物浓度存在显著的差异^[11,19]. 通过截留和影响蒸散发,植被对绿色屋顶的径流调控能力同样有重要影响^[4]. 除此之外,植物也会通过吸收、富集、枯落物腐化、根系分泌和影响基质微生物活性^[20,21]等途径影响绿色屋顶径流水质. 有研究表明,是否种植植物、种植何种植物和植物的生长情况,均会影响绿色屋顶径流中污染物的浓度^[22].

基质和植被配置对绿色屋顶的径流水质影响非常复杂,已有的研究通常采用对比径流中营养盐和重金属的浓度和负荷的方法评估不同配置对绿色屋顶径流水质的影响^[10,23]. 例如, Qiu 等^[16]的研究发现,基质中添加泥炭土的绿色屋顶径流中 NH_4^+-N 的浓度高于添加缓释肥的绿色屋顶,但前者径流中 TP 的浓度低于后者; Liu 等^[24]的研究发现,基质厚度为 5 cm 的绿色屋顶,径流中 TSS 的负荷低于基质厚度为 10 cm 绿色屋顶,但 TN 和 TP 的负荷更高; 王书敏等^[25]的研究发现,相较种植接骨草的绿色屋顶,种植麦冬的绿色屋顶径流中 TN 的浓度更高,但 TP 的浓度更低. 以上研究表明,不同

基质和植被配置对绿色屋顶径流中不同污染物的影响存在差异^[12]. 基于单一污染物指标对比的研究方法缺少对绿色屋顶径流中各污染物输出的综合考虑,对绿色屋顶径流水质的评价结果存在片面性. 为优化绿色屋顶配置和满足径流水质调控目标,对绿色屋顶径流水质的综合评价十分必要^[19]. 然而,目前尚缺少可以综合评价绿色屋顶径流水质的方法.

本研究基于对北京市 3 种植被类型、3 种基质类型和 2 种基质厚度的 12 个绿色屋顶在 2019 年雨季植被生长特征、产流量和径流中营养盐和重金属浓度的监测,分析不同基质和植被配置对绿色屋顶径流污染物浓度的影响,并揭示造成差异的原因. 在此基础上通过计算绿色屋顶径流中各污染物的负荷,构建绿色屋顶径流水质指标,综合评价不同基质和植被配置对绿色屋顶径流水质的影响. 本研究结果以期为绿色屋顶的配置和绿色屋顶径流水质综合评价提供科学基础,并为我国的海绵城市建设提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 实验设计

本研究于 2017 年 4~5 月在北京市海淀区北京林业大学林业楼屋顶建设了 12 个绿色屋顶实验装置(图 1),该区域 1951~2015 年年平均降水量为 587.2 mm,大约 80% 的降水集中在 6~9 月的雨季^[26].

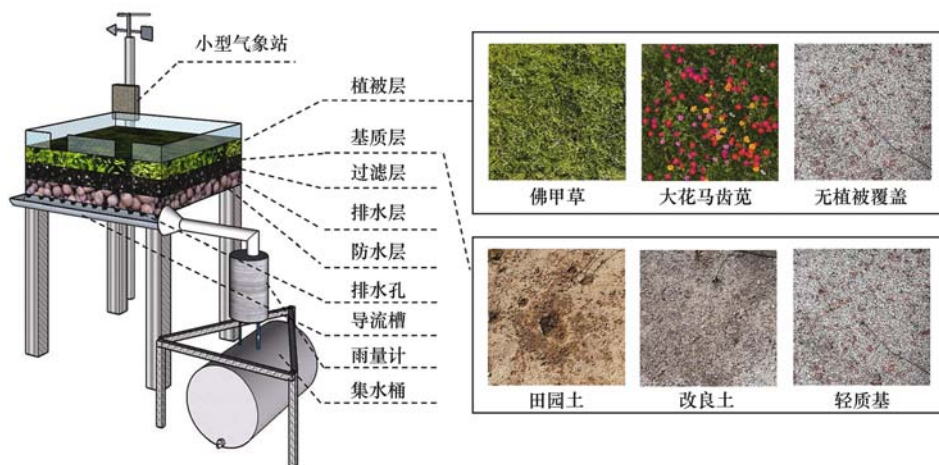


图 1 绿色屋顶结构

Fig. 1 Structure of green roof module

本实验装置从上到下分别包括植被层、基质层、过滤层、排水层和防水层. 如表 1 所示,参照“种植屋面工程技术规程”(JGJ 155-2013),本研究分别设置 3 种基质类型[田园土、改良土和轻质生

长基质(轻质基)]、3 种植被类型[佛甲草(*Sedum lineare*)、大花马齿苋(*Portulaca grandiflora*, 马齿苋)和无植被覆盖(对照)]和 2 种基质厚度(15 cm 和 10 cm)的绿色屋顶.

表 1 绿色屋顶设计参数
Table 1 Properties of the green roofs

编号	植被类型	基质性质			
		基质厚度 /cm	基质类型	密度 /g·cm ⁻³	田间持水量 /%
1	佛甲草	15	田园土,从北京林业大学苗圃获取	1.13	36.1
2	佛甲草	10			
3	大花马齿苋	10			
4	无植被	10			
5	佛甲草	15	改良土,腐殖土:轻砂壤土:珍珠岩:蛭石=10:5:4:1	0.63	41.4
6	佛甲草	10			
7	大花马齿苋	10			
8	无植被	10			
9	佛甲草	15	轻质生长基质,浮石:草炭土:沸石:碎木屑=4:3:2:1	0.55	33.7
10	佛甲草	10			
11	大花马齿苋	10			
12	无植被	10			

佛甲草和马齿苋均在 2017 年 5 月首次栽植.其中,佛甲草为多年生植物,冬季枯萎,来年春季萌发;马齿苋为一年生植物,冬季枯死,每年春季重新栽植,2019 年栽植密度为 25 株·m⁻².除种植初期的少量灌溉(所有绿色屋顶不产流),雨季实验期内所有绿色屋顶均无灌溉和施肥.此外,所有绿色屋顶过滤层均选用 300~400 g·m⁻² 聚酯无纺布,排水层均为厚度为 10 cm 的陶粒(平均直径为 3 cm),并铺设 TPO 材料作为防水层.

1.2 雨水和径流监测

本研究采用架设于绿色屋顶实验装置上方 2 m 的小型气象站(HOBO U30)记录实验区气象特征,在绿色屋顶旁放置一个不锈钢盆,用以收集雨水.在 2019 年雨季,共监测降雨 28 场,其中 8 场降雨所有绿色屋顶均产流,产流降雨的特征如表 2 所示.各绿色屋顶的径流量均采用分辨率为 1 mm 的雨量表监测,使用 HDPE 集水桶收集绿色屋顶全部径流,用以校核雨量表检测的径流量和径流取样(图 1).

表 2 产流场降雨特征

Table 2 Characteristics of the selected rainfall events			
序号	降雨日期 (月-日)	降雨量 /mm	最大雨强 /mm·min ⁻¹
1	07-10	15.2	0.72
2	07-22	22.0	0.48
3	07-28	92.6	1.68
4	08-02	27.2	1.84
5	08-04	24.0	0.76
6	08-06	52.4	1.64
7	09-09	73.0	1.04
8	09-12	20.0	0.16

1.3 数据采集与检测

降雨结束后,从充分搅匀的不锈钢盆和集水桶中收集雨水和径流样品装入 HDPE 取样瓶.采样结

束后,分别排放不锈钢盆和集水桶中剩余的雨水和径流,先后采用自来水和去离子水冲刷清洗不锈钢盆和集水桶.取样后 1 h 内,所有水样放入冰箱冷冻储存,分批进行水质检测.

水质检测前,对水样进行化冻并使用 0.45 μm 的滤头进行过滤.本研究监测水质指标包括营养盐(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P)和溶解态重金属(DCr、DCu、DFe、DMn、DNi、DZn).其中,营养盐浓度采用全自动化学分析仪(Smartchem 200)检测,重金属浓度使用 ICP-MS 检测.

实验期内,定期测量各绿色屋顶植物高度,计算平均株高.雨季结束后,在每个屋顶选择 3 个 0.2 m×0.2 m 的样方,收割地上部分植被,烘干并计算该绿色屋顶的地上生物量.

1.4 数据分析

参考已有的研究方法^[27,28],本研究构建绿色屋顶径流水质指标(runoff quality index, RQI),用以综合评价不同配置绿色屋顶的径流水质. RQI 的计算方法分为以下 3 步:①计算绿色屋顶径流中各污染物负荷;②标准化绿色屋顶径流中各污染物的负荷;③确定各污染物指标的权重,计算 RQI.

绿色屋顶*i* 径流中污染物*j* 的负荷(*L_{ij}*)可由下式计算:

$$L_{ij} = c_{ij} \times R_i \tag{1}$$

式中,*c_{ij}*为场降雨绿色屋顶*i* 径流中污染物*j* 的浓度(mg·L⁻¹或μg·L⁻¹);*R_i*为场降雨绿色屋顶*i* 的径流量(L).

污染物的负荷越低说明绿色屋顶径流水质越好,采用下式对各绿色屋顶径流中污染物的负荷进行标准化^[29]:

$$S_{ij} = \frac{1}{1 + (L_{ij}/L_{mj})^{2.5}} \quad (2)$$

式中, S_{ij} 为标准化后绿色屋顶 i 径流中污染物 j 的得分, 分值在 0 ~ 1 间, 分值越高代表水质越好; L_{mj} 为 12 个实验绿色屋顶径流中污染物 j 负荷的平均值。

基于 S_{ij} , 采用式(3)计算绿色屋顶 i 的 RQI:

$$RQI_i = \sum_{j=1}^n W_j S_{ij} \quad (3)$$

式中, n 为污染物指标总数; W_j 为污染物 j 的权重。本研究采用主成分分析法提取各污染物指标的公因子方差, W_j 为各指标公因子方差与公因子方差和的比值^[29,30]。

使用 SPSS 25 进行数据分析。数据分析前, 通过 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Levene 检验分别探

索数据的正态性和齐次性。使用单因素方差分析和独立样本 T 检验分析植被类型、基质类型和基质厚度对绿色屋顶径流水质、径流削减率和 RQI 的影响, 以及植被生长和雨水水质特征。此外, 采用 Kruskal-Wallis 和 Mann-Whitney U 检验分析非正态的数据。

2 结果与分析

2.1 绿色屋顶径流水质分析

雨水和不同配置绿色屋顶径流中各污染物指标的浓度均值如表 3 所示。所有绿色屋顶径流中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度平均值显著低于雨水 ($P < 0.05$), 浓度平均削减率在 71.5% ~ 87.9% 之间, 说明绿色屋顶是雨水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的汇, 这与 Todorov 等^[15] 和 Wang 等^[31] 的实验结果一致。有研究表明, 绿色屋顶基质

表 3 雨水和绿色屋顶径流污染物浓度对比¹⁾
Table 3 Comparison of pollutant concentrations between rainwater and runoff of the green roofs

指标	雨水	绿色屋顶		
		平均值	最小值	最大值
$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$2.16 \pm 0.72\text{a}$	$0.41 \pm 0.28\text{b}$	0.26 ± 0.25	0.62 ± 0.45
$\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.18 \pm 0.52\text{a}$	$21.93 \pm 7.17\text{b}$	3.93 ± 3.22	49.61 ± 24.86
$\rho(\text{PO}_4^{3-} - \text{P})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.002 \pm 0.003\text{a}$	$0.25 \pm 0.05\text{b}$	0.082 ± 0.033	0.342 ± 0.120
$\rho(\text{DCr})/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.62 \pm 0.58\text{a}$	$1.31 \pm 0.84\text{a}$	1.08 ± 0.82	1.60 ± 0.67
$\rho(\text{DCu})/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.05 \pm 0.77\text{a}$	$10.52 \pm 2.96\text{b}$	6.18 ± 2.42	14.68 ± 3.53
$\rho(\text{DFe})/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.36 \pm 0.82\text{a}$	$31.26 \pm 12.16\text{b}$	3.47 ± 5.01	85.14 ± 41.62
$\rho(\text{DMn})/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$2.25 \pm 1.57\text{a}$	$2.51 \pm 2.02\text{a}$	0.56 ± 0.66	6.72 ± 8.96
$\rho(\text{DNi})/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.19 \pm 0.25\text{a}$	$3.80 \pm 1.21\text{b}$	2.17 ± 1.91	6.03 ± 1.00
$\rho(\text{DZn})/\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$7.33 \pm 8.43\text{a}$	$5.51 \pm 2.80\text{a}$	1.16 ± 1.81	14.91 ± 14.90

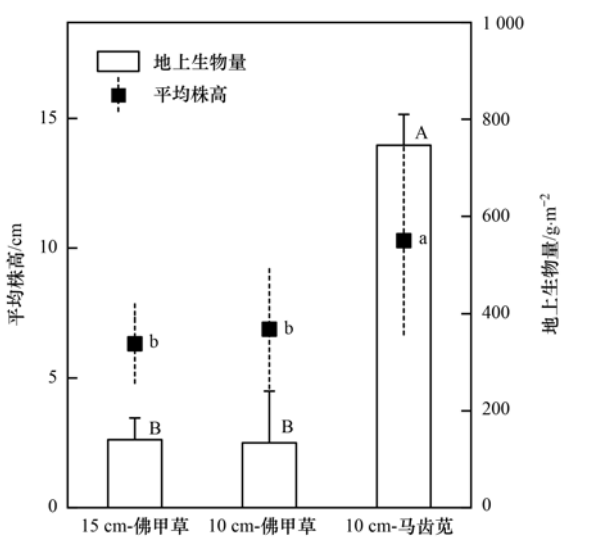
1) 相同小写字母表示雨水和绿色屋顶径流中污染物浓度平均值无显著差异 ($P > 0.05$)

中营养盐和重金属随径流淋出的现象普遍^[32~34]。本研究 12 个绿色屋顶径流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 DCr 、 DCu 、 DFe 和 DNi 浓度平均值均高于雨水, 这说明尽管本研究的绿色屋顶已运行 3 a, 但仍是以上污染物的源。

相较其他重金属, 雨水中 $\rho(\text{DMn})$ 和 $\rho(\text{DZn})$ 的平均值相对较高 ($> 2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 绿色屋顶对 DMn 和 DZn 浓度平均削减率分别在 -198.2% ~ 75.0% 和 -103.5% ~ 84.1% 之间, 表明绿色屋顶对 DMn 和 DZn 的源汇作用受绿色屋顶配置的影响。当绿色屋顶基质中 DMn 和 DZn 的含量高于雨水时, 基质中 DMn 和 DZn 会随径流淋出^[19,35]。

2.2 绿色屋顶植物生长情况

绿色屋顶植物生长特征如图 2 所示, 基质厚度 10 cm 和 15 cm 的绿色屋顶, 佛甲草的生长情况相似, 株高和地上生物量均相近且无显著差异 ($P > 0.05$)。基质厚度为 10 cm 的绿色屋顶中, 马齿苋株高和地上生物量的平均值均显著高于佛甲草 ($P < 0.05$)。



相同大写字母表示植被地上生物量无显著差异 ($P > 0.05$), 相同小写字母表示植被株高无显著差异 ($P > 0.05$)

图 2 绿色屋顶植被生长情况

Fig. 2 Plant growth characteristics of the green roofs

2.3 不同植被绿色屋顶径流水质对比

如图 3 所示, 不同植被类型的绿色屋顶径流中

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度无显著差异 ($P > 0.05$). 对照绿色屋顶径流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度平均值最高, 显著高于马齿苋绿色屋顶 ($P < 0.05$). 然而, 佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度均显著高于对照绿色屋顶 ($P < 0.05$). 不同植被类型的绿色屋顶径流中 DCr 、 DFe 、 DMn 和 DZn 的浓度无显著差异 ($P > 0.05$). 然而, 马齿苋绿色屋顶径流中 DCu 和 DNi 的浓度显著高于佛甲草和对照绿色屋顶 ($P < 0.05$).

2.4 不同基质类型和厚度绿色屋顶径流水质对比

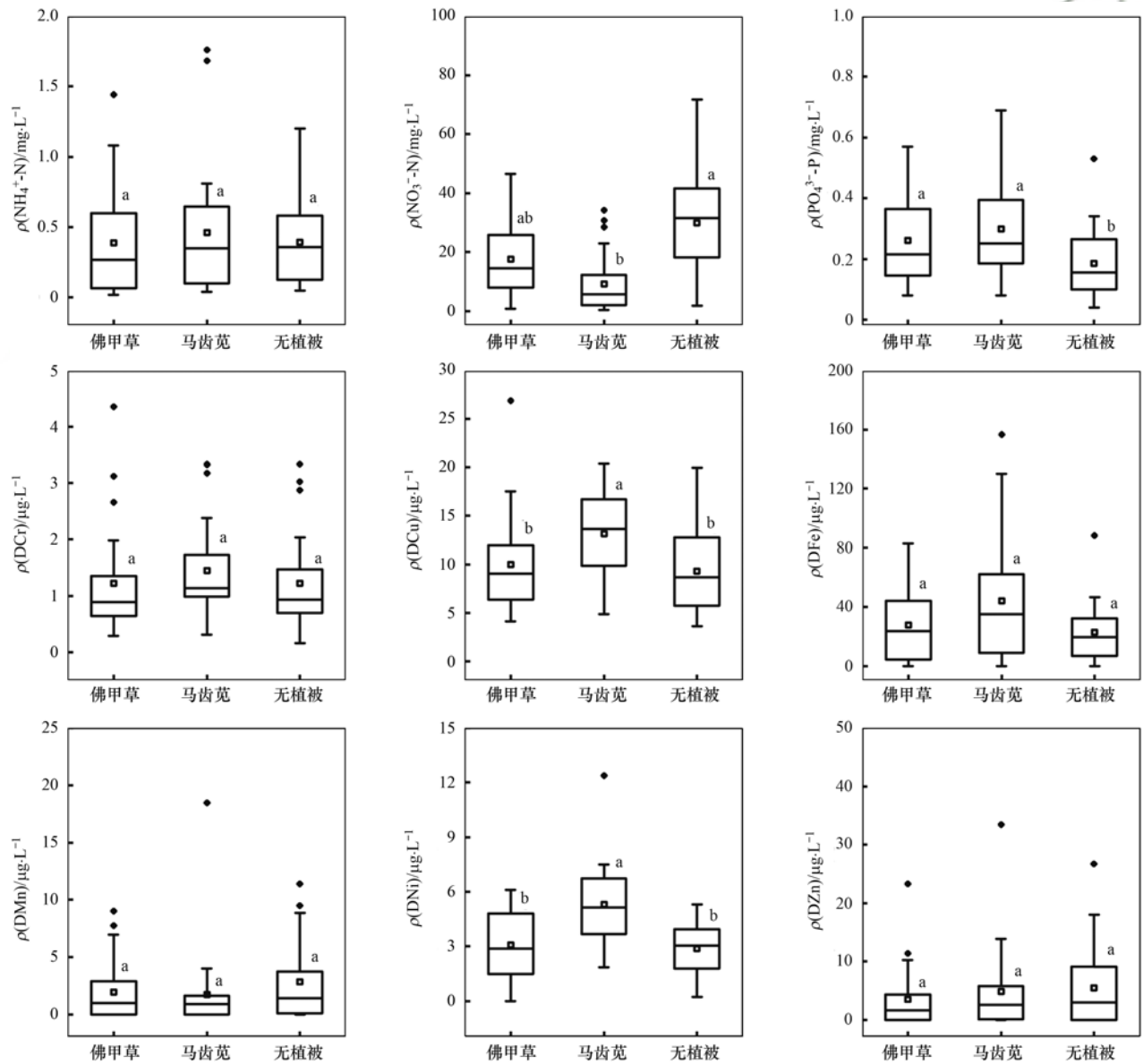
除 DCr 和 DMn 外, 不同基质类型绿色屋顶径流中营养盐和重金属的浓度均存在显著差异 (图 4). 轻质基绿色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度显著低于田园土和改良土绿色屋顶, 但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度显著高于田园土和改良土绿色屋顶 ($P < 0.05$). 改良土绿色屋顶

径流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的平均值最高, 显著高于田园土和轻质基绿色屋顶 ($P < 0.05$). 田园土和改良土绿色屋顶径流中 DCu 的浓度显著高于轻质基绿色屋顶 ($P < 0.05$). 改良土绿色屋顶径流中 DNi 的浓度显著高于田园土和轻质基绿色屋顶. 然而, 轻质基绿色屋顶径流中 DFe 和 DZn 的浓度平均值均高于田园土和改良土绿色屋顶.

基质厚度为 15 cm 和 10 cm 的佛甲草绿色屋顶径流中各污染物浓度平均值如表 4 所示, 15 cm 和 10 cm 绿色屋顶径流中各污染物的浓度均无显著差异 ($P > 0.05$).

2.5 绿色屋顶径流水质综合评价

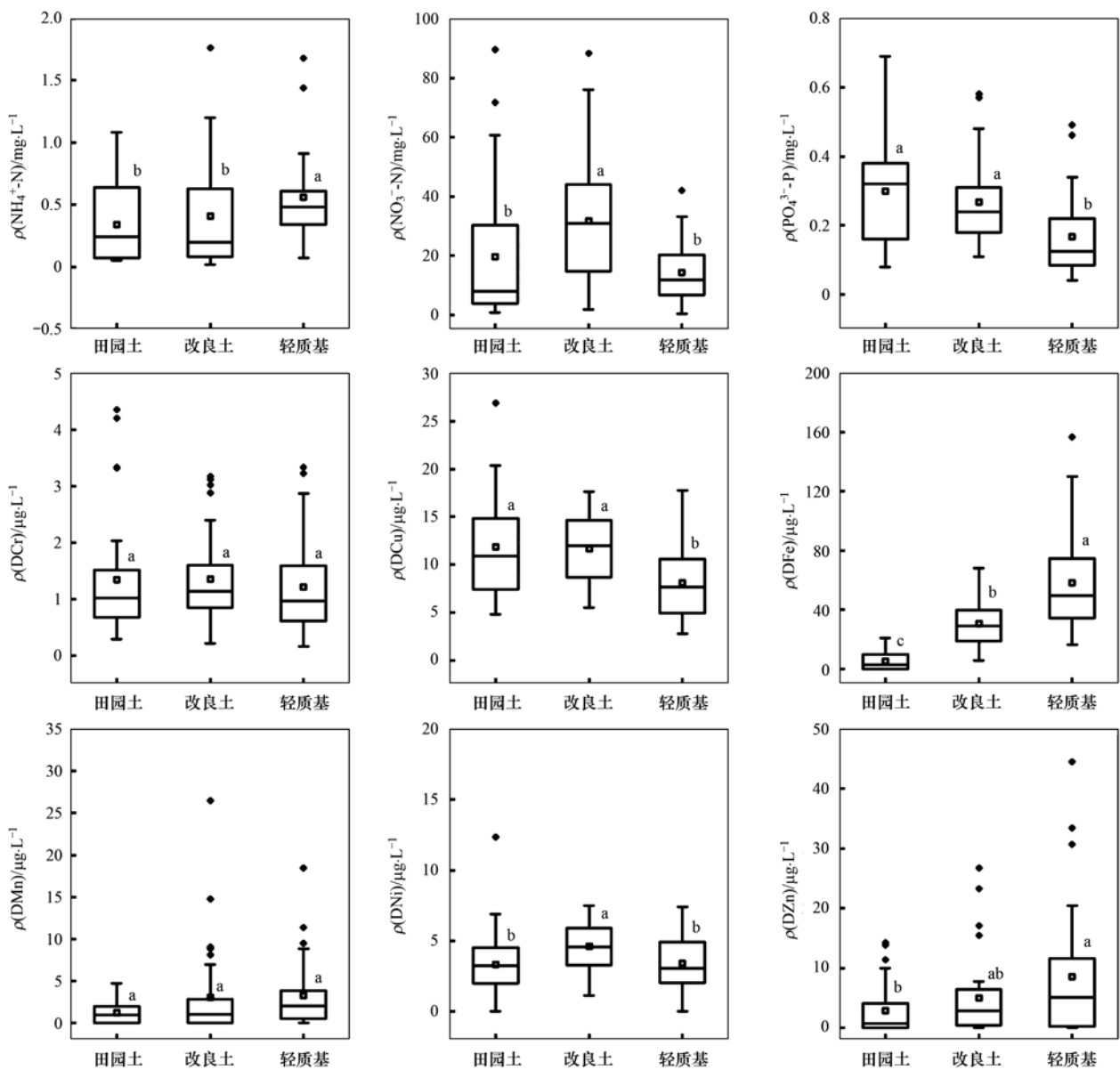
不同植被、基质类型和厚度绿色屋顶的径流削减率如图 5 所示. 马齿苋绿色屋顶径流削减率的平



相同小写字母表示不同植被绿色屋顶径流中污染物浓度无显著差异 ($P > 0.05$); $N = 72$

图3 不同植被类型绿色屋顶径流污染物浓度

Fig. 3 Pollutant concentrations of green roofs with different vegetation types



相同小写字母表示不同基质类型绿色屋顶径流中污染物浓度无显著差异 ($P > 0.05$) ; $N = 96$

图 4 不同基质类型绿色屋顶径流污染物浓度

Fig. 4 Pollutant concentrations of green roofs with different substrate types

表 4 不同基质厚度绿色屋顶径流污染物浓度¹⁾

Table 4 Pollutant concentrations between green roofs with different substrate depths

指标	15 cm 绿色屋顶	10 cm 绿色屋顶
$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.41 \pm 0.40\text{a}$	$0.39 \pm 0.37\text{a}$
$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$31.17 \pm 25.98\text{a}$	$17.53 \pm 12.64\text{a}$
$\rho(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.24 \pm 0.13\text{a}$	$0.26 \pm 0.13\text{a}$
$\rho(\text{DCr})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$1.31 \pm 0.97\text{a}$	$1.23 \pm 0.94\text{a}$
$\rho(\text{DCu})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$9.65 \pm 4.08\text{a}$	$10.00 \pm 5.11\text{a}$
$\rho(\text{DFe})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$30.14 \pm 26.43\text{a}$	$27.83 \pm 24.57\text{a}$
$\rho(\text{DMn})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$3.47 \pm 5.80\text{a}$	$1.98 \pm 2.60\text{a}$
$\rho(\text{DNi})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$3.91 \pm 1.76\text{a}$	$3.07 \pm 1.94\text{a}$
$\rho(\text{DZn})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$8.18 \pm 10.89\text{a}$	$3.51 \pm 5.16\text{a}$

1) 相同小写字母表示绿色屋顶径流中污染物浓度无显著差异 ($P > 0.05$) ; $N = 48$

均值最高,为 52.9%,依次高于佛甲草(48.8%)和

对照(45.0%)绿色屋顶.改良土绿色屋顶的径流削减率的平均值为 56.2%,略高于田园土绿色屋顶(54.5%),显著高于轻质基绿色屋顶(43.0%, $P < 0.05$).此外,基质厚度为 15 cm 的绿色屋顶,径流削减率的平均值明显高于基质厚度为 10 cm 的绿色屋顶.

基于绿色屋顶径流中各污染物负荷,计算不同配置绿色屋顶径流的 RQI(图 6),各污染物指标的权重如表 5 所示.佛甲草和马齿苋绿色屋顶 RQI 的平均值相近,分别为 0.59 和 0.60,均明显高于对照绿色屋顶(0.53).田园土绿色屋顶 RQI 的平均值最高,为 0.69,高于改良土绿色屋顶(0.62),田园土和改良土绿色屋顶 RQI 的平均值均显著高于轻质基绿色屋顶(0.47, $P < 0.05$).基质厚度为 15 cm 的佛

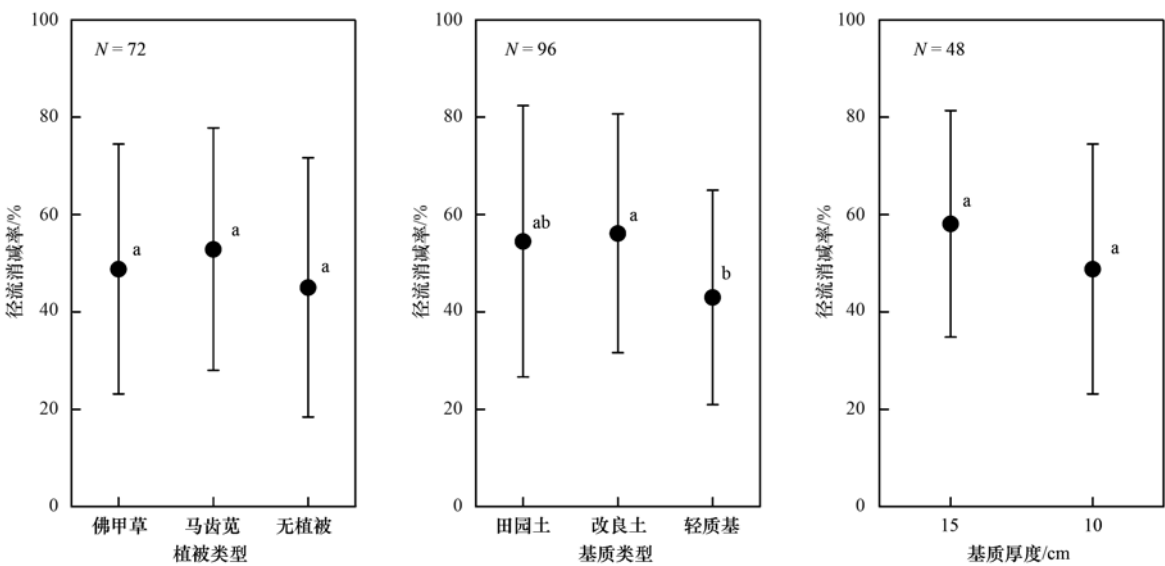


图 5 不同配置绿色屋顶径流削减率

Fig. 5 Stormwater retention rates of green roofs with different configurations

甲草绿色屋顶 RQI 的平均值高于基质厚度为 10 cm 的佛甲草绿色屋顶,但差异不显著 ($P > 0.05$).

表 5 污染物指标权重

Table 5 Commuality and weight of pollutants

污染物指标	公因子方差	权重
NH_4^+-N	0.621	0.096
NO_3^--N	0.865	0.133
$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	0.576	0.089
DCr	0.828	0.128
DCu	0.891	0.137
DFe	0.818	0.126
DMn	0.646	0.099
DNi	0.727	0.112
DZn	0.520	0.080

3 讨论

3.1 植被对绿色屋顶径流水质的影响

本研究中,佛甲草、马齿苋和对照绿色屋顶径流中 NH_4^+-N 浓度的平均值接近且无显著差异.土壤胶体颗粒带负电荷,雨水中带正电荷的 NH_4^+-N 可能主要由基质吸附、硝化反应和微生物利用等方式去除^[20,36],受植被种类的影响较小,相似的结果在前人的研究中也有报道^[14].然而,本研究表明,植被类型显著影响径流中 NO_3^--N 的浓度.相较雨水,绿色屋顶基质是 NO_3^--N 的释放源,植物吸收和固定可以有效降低径流中 NO_3^--N 的浓度^[37]. Johnson 等^[38]的研究指出,绿色屋顶对 NO_3^--N 的控制能力与植被的地上生物量呈正相关.本研究中,马齿苋的株高和地上生物量均显著高于佛甲草(图 2),对基质中 NO_3^--N 的吸收利用能力更强,因此马齿苋绿色屋顶径流中 NO_3^--N 的浓度最低.雨水中几乎不含 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$,绿色屋顶基质有机物矿化和植物腐烂是径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$

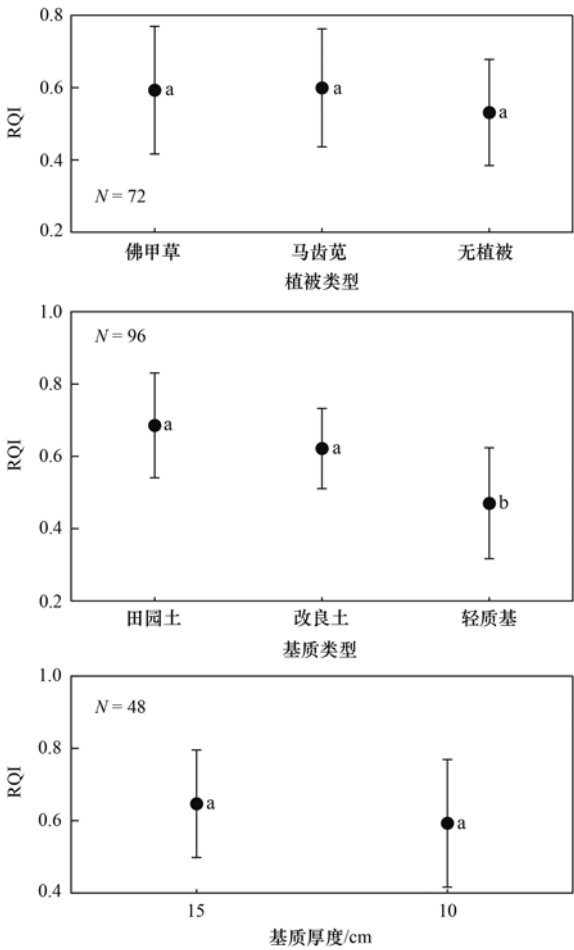


图 6 不同配置绿色屋顶径流水质综合评价

Fig. 6 Runoff quality indices of green roofs with different configurations

的主要来源^[18,39].有研究表明,植被对绿色屋顶径流释放 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的控制能力有限^[40,41,42],植物的生物量对绿色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的淋出影响不显著^[38].本研究绿色屋顶已运行 3 a,植物枯落物因腐

化产生的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 随降雨进入径流. 这可能是造成佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度显著高于对照绿色屋顶的主要原因^[9]. 马齿苋绿色屋顶径流中 DCu 和 DNi 浓度显著高于佛甲草和对照绿色屋顶可能由以下原因造成: 相较空白基质和多年生的佛甲草, 每年重新栽植的马齿苋可能会引入外源污染^[9]; 除此之外, 马齿苋的株高和地上生物量显著高于佛甲草, 叶片表面吸附的大气沉降物可能多于佛甲草和空白基质^[42,43].

绿色屋顶的径流量主要受降水量和基质层雨水滞留能力的影响^[4,44], 基质的雨水滞留能力通过基质蒸散和植物蒸腾耗水恢复^[13,45]. 生物量更大的 C4 植物马齿苋在夏季的蒸腾耗水强烈, 其蒸腾耗水量多于 CAM 代谢植物佛甲草和裸露基质^[10]. 因此, 马齿苋绿色屋顶的平均径流削减率最高, 依次高于佛甲草和对照绿色屋顶.

虽然种植植物会造成径流中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和重金属浓度上升, 但植物可有效降低径流中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度并提高绿色屋顶的径流削减率. 绿色屋顶径流中污染负荷由径流中污染物浓度和径流量决定. 本研究基于所测的营养盐和重金属的污染负荷, 建立 RQI 综合评价绿色屋顶水质. 结果表明佛甲草和大花马齿苋的径流水质综合评价结果相近, 且二者径流水质综合评价结果均优于对照绿色屋顶.

3.2 基质对绿色屋顶径流水质的影响

本研究中, 轻质基绿色屋顶径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的平均值高于其他两种基质的绿色屋顶. 相较田园土和改良土, 轻质基持水能力差且饱和导水率高 (表 1), 可能导致轻质基中微生物活性较低且雨水在基质中停留时间更短^[16,18], 这可能是造成其对雨水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附能力较差的主要原因. 改良土绿色屋顶基质中腐殖土比例高达 50%, 高有机质含量可能是造成其径流中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 显著高于轻质基绿色屋顶的主要原因^[46], 这与 Liu 等^[24] 的研究结果一致. 为提高绿色屋顶基质的透水能力和减少容重^[47], 轻质基中添加了高比例的轻质无机矿物材料, 沸石和浮石占比为 60%, 这可能是导致轻质基绿色屋顶径流中 DFe 、 DMn 和 DZn 浓度的平均值高于改良土和田园土绿色屋顶的主要原因. 本研究中, 基质厚度为 15 cm 的绿色屋顶和 10 cm 的绿色屋顶径流中各污染物的浓度无显著差异. 这可能主要由于本研究的绿色屋顶已使用 3a, 基质中大部分污染物的释放速度已放缓^[11,48]. 此外, 不同基质厚度的绿色屋顶佛甲草长势无显著差异 (图 2), 植被对径流中污染物的浓度影响有限. 这些原因导致不同基质厚度绿色屋顶径流中大部分污染物的浓度相近,

相似的结果在 Gong 等^[11] 的研究中也有报道.

绿色屋顶基质层的雨水滞留能力受基质厚度和基质的田间持水量影响^[49], 基质层较厚和田间持水量更大的绿色屋顶雨水滞留能力更好^[50]. 本研究中, 改良土的田间持水量最大 (41.4%), 依次高于田园土 (36.1%) 和轻质基 (33.7%). 因此, 改良土绿色屋顶的平均径流削减率高于田园土和轻质基绿色屋顶, 且基质厚度为 15 cm 的绿色屋顶的平均径流削减率高于基质厚度为 10 cm 的绿色屋顶.

本研究结果表明, 基质类型对绿色屋顶径流水质综合评价结果有显著的影响. 轻质基绿色屋顶径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 DFe 、 DMn 和 DZn 的浓度平均值最高且径流削减能力最差, 其水质综合评价结果显著劣于田园土和改良土绿色屋顶. 基质厚度为 15 cm 的绿色屋顶径流水质综合评价结果优于基质厚度为 10 cm 的绿色屋顶. 这可能是由于基质厚度对绿色屋顶径流中污染物的浓度影响不显著, 而 15 cm 基质绿色屋顶的平均径流削减率高于 10 cm 基质绿色屋顶.

3.3 建议与展望

本研究结果表明, 增加植物覆盖度、适当减少基质中有机质含量和提高基质持水能力等途径有利于改善绿色屋顶水质. 值得注意的是, 尽管田园土绿色屋顶的 RQI 高于改良土和轻质基绿色屋顶, 但田园土存在土壤成分不均匀且不确定、容重大、透水性差、土壤易板结和易引入杂草等缺陷^[51], 不推荐用于绿色屋顶建设.

本研究的 12 种不同配置的实验绿色屋顶未设置重复, 采用对具有相同配置因素 (即相同植被类型、基质类型和基质厚度) 的绿色屋顶分组, 以及对多场降雨水质特征求平均的方式, 评价不同绿色屋顶设计参数对绿色屋顶径流水质的影响. 这样的研究方法可获得多组数据并对单个影响因素进行分析, 在前人的研究中也广泛得到应用^[19,25,33,52], 但该方法缺乏对不同设计参数的交互作用和降雨特征对绿色屋顶径流水质影响的深入探讨^[53]. 未来可通过增加重复并结合人工降雨的实验方法, 进一步揭示不同设计参数对绿色屋顶水质的交互作用以及降雨特征对绿色屋顶径流水质的影响. 此外, 本研究提出和采用的径流水质指数用以综合评价各绿色屋顶的径流水质, 目前主要以营养盐和重金属作为评价指标开展研究. 未来可在本研究的基础上, 根据水质评价需求, 引入更多水质评价指标 (如 pH、COD 微生物和病原体等^[32]) 用于指导生产实践.

4 结论

(1) 相较雨水中污染物的浓度, 本研究 12 个不

同植被和基质配置的绿色屋顶均是 NH_4^+ -N的汇,但均是 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、DCr、DCu、DFe和DNi的源。

(2) 植被类型显著影响绿色屋顶径流中 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、DCu和DNi的浓度($P < 0.05$),生物量最大的马齿苋绿色屋顶径流中 NO_3^- -N浓度的平均值最低,但DCu和DNi浓度均显著高于佛甲草和对照绿色屋顶($P < 0.05$)。

(3) 基质类型显著影响绿色屋顶径流中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、DCu、DFe、DMn和DNi的浓度($P < 0.05$);基质厚度为15 cm和10 cm的绿色屋顶径流中各污染物浓度无显著差异($P > 0.05$)。

(4) 基于不同配置绿色屋顶的径流污染负荷建立的径流水质指标(RQI),可以综合评价不同配置绿色屋顶径流水质。综合水质评价结果表明,佛甲草和马齿苋绿色屋顶的RQI接近,径流水质均优于对照绿色屋顶;田园土绿色屋顶的RQI最高,径流水质优于改良土和轻质基绿色屋顶;基质厚度为15 cm的绿色屋顶的径流水质优于基质厚度为10 cm的绿色屋顶。

参考文献:

- [1] Wang G Q, Li J W, Sun W C, *et al.* Non-point source pollution risks in a drinking water protection zone based on remote sensing data embedded within a nutrient budget model [J]. *Water Research*, 2019, **157**: 238-246.
- [2] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. *水科学进展*, 2014, **25**(4): 594-605.
Zhang J Y, Song X M, Wang G Q, *et al.* Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: hydrological response to urbanization [J]. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(4): 594-605.
- [3] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化LID模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. *自然资源学报*, 2016, **31**(5): 719-731.
Liu C M, Zhang Y Y, Wang Z G, *et al.* The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: a preliminary study of planning and techniques for sponge city [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(5): 719-731.
- [4] 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.
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.
- [5] Connelly M, Hodgson M. Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs [J]. *Building and Environment*, 2015, **92**: 335-346.
- [6] Zhang G C, He B J, Dewancker B J. The maintenance of prefabricated green roofs for preserving cooling performance: a field measurement in the subtropical city of Hangzhou, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, **61**, doi: 10.1016/j.scs.2020.102314.
- [7] Salerno F, Gaetano V, Gianni T. Urbanization and climate change impacts on surface water quality: enhancing the resilience by reducing impervious surfaces [J]. *Water Research*, 2018, **144**: 491-502.
- [8] Manso M, Teotónio I, Silva C M, *et al.* Green roof and green wall benefits and costs: a review of the quantitative evidence [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, **135**, doi: 10.1016/j.rser.2020.110111.
- [9] Wang H B, Qin J, Hu Y H. Are green roofs a source or sink of runoff pollutants? [J]. *Ecological Engineering*, 2017, **107**: 65-70.
- [10] 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.
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.
- [11] Gong Y W, Zhang X W, Li J Q, *et al.* Factors affecting the ability of extensive green roofs to reduce nutrient pollutants in rainfall runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **732**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139248.
- [12] Shafique M, Kim R, Rafiq M. Green roof benefits, opportunities and challenges-A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **90**: 757-773.
- [13] Zhang S H, Lin Z X, Zhang S X, *et al.* Stormwater retention and detention performance of green roofs with different substrates: observational data and hydrological simulations [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **291**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112682.
- [14] Payne E G I, Pham T, Deletic A, *et al.* Which species? A decision-support tool to guide plant selection in stormwater biofilters [J]. *Advances in Water Resources*, 2018, **113**: 86-99.
- [15] 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.
- [16] Qiu D Y, Peng H Y, Li T, *et al.* Application of stabilized sludge to extensive green roofs in Shanghai: feasibility and nitrogen leaching control [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **732**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138898.
- [17] 刘文博, 李絮花. 腐植酸增效剂对不同类型土壤中磷素形态转化的调控 [J]. *山东农业科学*, 2021, **53**(8): 73-79.
Liu W B, Li X H. Regulation of humic acid synergistic agent on phosphorus transformation in different types of soil [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, **53**(8): 73-79.
- [18] Buffam I, Mitchell M E. Nutrient cycling in green roof ecosystems [A]. In: Sutton R K (Ed.). *Green Roof Ecosystems*. Cham: Springer, 2015.
- [19] Liu W, Engel B A, Chen W P, *et al.* Quantifying the contributions of structural factors on runoff water quality from green roofs and optimizing assembled combinations using Taguchi method [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **593**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125864.
- [20] Liu M, Adl S, Cui X Y, *et al.* *In situ* methods of plant-microbial interactions for nitrogen in rhizosphere [J]. *Rhizosphere*, 2020, **13**, doi: 10.1016/j.rhisph.2020.100186.
- [21] 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.
- [22] 章孙逊, 张守红, 葛德, 等. 不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3187-3194.
Zhang S X, Zhang S H, Ge D, *et al.* Inter-annual changes in runoff quality from green roofs with different vegetation [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3187-3194.
- [23] 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.
- [24] Liu W, Wei W, Chen W P, *et al.* The impacts of substrate and

- vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **576**: 575-582.
- [25] 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.
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.
- [26] Zhang S H, Zhang J J, Jing X E, *et al.* Water saving efficiency and reliability of rainwater harvesting systems in the context of climate change [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **196**: 1341-1355.
- [27] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management [J]. *Geoderma*, 2014, **230-231**: 131-142.
- [28] Varol M. Use of water quality index and multivariate statistical methods for the evaluation of water quality of a stream affected by multiple stressors: a case study [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115417.
- [29] Mamehpour N, Rezapour S, Ghaemian N. Quantitative assessment of soil quality indices for urban croplands in a calcareous semi-arid ecosystem [J]. *Geoderma*, 2021, **382**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114781.
- [30] Li P, Zhang T L, Wang X X, *et al.* Development of biological soil quality indicator system for subtropical China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, **126**: 112-118.
- [31] 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.
- [32] Zhang Q Q, Miao L P, Wang X K, *et al.* The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, **144**: 142-150.
- [33] Akther M, He J X, Chu A, *et al.* Nutrient leaching behavior of green roofs: laboratory and field investigations [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **754**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141841.
- [34] Vijayaraghavan K, Reddy D H K, Yun Y S. Improving the quality of runoff from green roofs through synergistic biosorption and phytoremediation techniques: a review [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, **46**, doi: 10.1016/j.scs.2018.12.009.
- [35] 李涛, 蒲韵婷, 王全华, 等. Mn、Cu 和 Zn 在植物生长发育中的生理作用 [J]. *河北农业科学*, 2008, **12**(6): 12-15.
Li T, Pu Y T, Wang Q H, *et al.* Physiology functions of Mn, Cu and Zn on plant growth [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, **12**(6): 12-15.
- [36] Mason Y, Ammann A A, Ulrich A, *et al.* Behavior of heavy metals, nutrients, and major components during roof runoff infiltration [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(10): 1588-1597.
- [37] 陈雅君, 闫庆伟, 张璐, 等. 氮素与植物生长相关研究进展 [J]. *东北农业大学学报*, 2013, **44**(4): 144-148.
Chen Y J, Yan Q W, Zhang L, *et al.* Research progress on nitrogen and plant growth [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, **44**(4): 144-148.
- [38] Johnson C, Schweinhart S, Buffam I. Plant species richness enhances nitrogen retention in green roof plots [J]. *Ecological Applications*, 2016, **26**(7): 2130-2144.
- [39] Teemusk A, Mander Ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: the effects of short-term events [J]. *Ecological Engineering*, 2007, **30**(3): 271-277.
- [40] Gong Y W, Zhang X W, Li H Y, *et al.* A comparison of the growth status, rainfall retention and purification effects of four green roof plant species [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111451.
- [41] Chen C F, Kang S F, Lin J H. Effects of recycled glass and different substrate materials on the leachate quality and plant growth of green roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2018, **112**: 10-20.
- [42] 章孙逊, 张守红, 张英, 等. 植被对绿色屋顶径流量和水质影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3618-3625.
Zhang S X, Zhang S H, Zhang Y, *et al.* Impacts of vegetation on quantity and quality of runoff from green roofs [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3618-3625.
- [43] 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.
- [44] Li X X, Cao J J, Xu P X, *et al.* Green roofs: effects of plant species used on runoff [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, **29**(10): 3628-3638.
- [45] Zhang Z, Szota C, Fletcher T D, *et al.* Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **232**: 404-412.
- [46] Mitchell M E, Emilsson T, Buffam I. Carbon, nitrogen, and phosphorus variation along a green roof chronosequence: implications for green roof ecosystem development [J]. *Ecological Engineering*, 2021, **164**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106211.
- [47] Eksi M, Sevgi O, Akburak S, *et al.* Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates [J]. *Ecological Engineering*, 2020, **156**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105966.
- [48] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, *et al.* Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 33-43.
- [49] 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.
- [50] 葛德, 张守红. 基质类型及厚度对绿色屋顶径流调控效益的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2019, **17**(3): 31-38.
Ge D, Zhang S H. Influence of types and depths of substrates on hydrological performances of green roofs [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, **17**(3): 31-38.
- [51] Xiao M, Lin Y L, Han J, *et al.* A review of green roof research and development in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **40**: 633-648.
- [52] 彭航宇, 李田, 齐悦, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3612-3617.
Peng H Y, Li T, Qi Y, *et al.* Control measure effects on the effluent quality from extensive green roofs based on stabilized sludge recycling [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3612-3617.
- [53] 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.
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.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risk in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)