

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)
《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)	

绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征

章孙逊¹, 张守红^{1,2,3*}, 闫婧¹, 王恺¹, 杨航¹, 王任重远¹, 张文龙¹, 李华林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, 临汾 042200; 3. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 屋顶占据大量城市不透水面, 实施生态屋顶建设, 有利于缓解城市化造成的生态和环境问题。在北京市区搭建不同类型生态屋顶(绿色屋顶、蓝色屋顶和蓝-绿屋顶), 基于对 2019 年雨季降雨特征、各类生态屋顶径流量以及径流中营养盐和重金属浓度的监测, 计算不同生态屋顶径流污染负荷和径流水质指数(RQI), 定量对比分析不同类型生态屋顶径流的综合水质差异。结果表明, 在 2019 年雨季, 各生态屋顶均表现出良好的雨水滞留能力, 平均径流削减率在 75.7%~78.9% 之间, 且不同生态屋顶的径流削减率无显著差异($P > 0.05$); 相较雨水, 各生态屋顶均为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 DZn 和 DCd 的汇, 累积负荷削减率分别在 63.8%~96.4%、68.6%~90.7% 和 39.8%~54.5% 之间, 但均为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 DCr 、 DFe 和 DNi 的释放源; 蓝色屋顶是 DCu 的汇(累积负荷削减率为 21.9%), 但对雨水径流中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的累积负荷无明显影响, 而绿色和蓝-绿屋顶均为 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 DCu 的释放源; 蓝色屋顶的 RQI 最高, 蓝-绿屋顶次之, 绿色屋顶的 RQI 显著低于蓝色和蓝-绿屋顶($P < 0.05$)。这表明蓝色屋顶水质最佳, 为绿色屋顶增加蓄水层可显著改善径流水质。研究结果可为生态屋顶设施选择和设计提供科学依据。

关键词: 绿色屋顶; 蓝色屋顶; 蓝-绿屋顶; 径流水质; 营养盐; 重金属

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0303-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202203191

Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality

ZHANG Sun-xun¹, ZHANG Shou-hong^{1,2,3*}, YAN Jing¹, WANG Kai¹, YANG Hang¹, WANG Ren-zhongyuan¹, ZHANG Wen-long¹, LI Hua-lin¹

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

Abstract: Roofs occupy a great proportion of urban impervious surfaces, and the implementation of eco-roof construction in urban areas is beneficial to alleviate the ecological and environmental problems caused by rapid urbanization. In this study, different eco-roofs (i.e., green roofs, blue roofs, and blue-green roofs) were set up in downtown Beijing. During the rainy season of 2019, the rainfall characteristics, runoff volumes, and concentrations of nutrients and heavy metals in runoff from different eco-roofs were monitored. Further, the pollutant loads and runoff quality indices (RQI) of the eco-roofs were calculated to evaluate the comprehensive influences of configurations on the runoff quality of these eco-roofs. During the rainy season of 2019, all eco-roofs had favorable rainwater retention capacity (with average runoff reduction rates between 75.7% and 78.9%), and there were no significant differences in runoff reduction rates among different eco-roofs ($P > 0.05$). Compared to rainwater, all the eco-roofs were sinks of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, DZn , and DCd , and the load reduction rates of these pollutants were 63.8%-96.4%, 68.6%-90.7%, and 39.8%-54.5%, respectively. However, all the eco-roofs were sources of $\text{NO}_3^- - \text{N}$, DCr , DFe , and DNi . The blue roof was a sink of DCu (with a pollutant load reduction rate of 21.9%) and did not affect the cumulative load of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ in runoff. However, the green roof and blue-green roof were the sources of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and DCu . The RQI value of the blue roof was the highest, followed by that of the blue-green roof and green roof. The RQI value of the green roof was significantly lower than that of the blue and blue-green roofs ($P < 0.05$). These results indicated that the runoff quality of the blue roof was the best, whereas that of the green roof was the worst. Adding a storage layer to the green roofs could significantly improve the runoff quality. The results of this study provide scientific references for the selection and design of eco-roof facilities.

Key words: green roof; blue roof; blue-green roof; runoff quality; nutrients; heavy metals

近年来,快速城市化造成城镇地区面积迅速扩张^[1,2],道路、建筑物和停车场等不透水面替代了城市原有绿地^[3,4]。伴随不透水面增加,城市的自然水循环和能量循环过程遭受破坏^[5],诱发城市内涝、面源污染和热岛效应等系列问题^[6,7]。屋顶作为城市的“第五立面”^[8],约占城市不透水面 40%~50%^[9]。相较传统的黑色屋顶(black roof),在城镇地区合理利用屋顶空间、开展生态屋顶(eco-roof)建设,可有效缓解因城市化引发的生态和环境问题^[10]。

依据结构和功能,生态屋顶通常可分为蓝色屋顶(bule roof)、绿色屋顶(green roof)和蓝-绿屋顶(blue-green roof)等类型^[10]。其中,蓝色屋顶通常指

在屋顶上采用限流措施(如提高排水口高度、设置限流孔和溢流堰等),临时贮存并缓慢排放径流的设施^[11]。Campisano 等^[12]的长期观测研究表明,蓝色屋顶具有较好的径流调控效益,平均径流削减率为 54%。蓝色屋顶结构简单、建设成本低且易维护^[10],近年来开始逐渐被各国采用,但目前鲜见对其径流水质的研究。

相较蓝色屋顶,绿色屋顶的结构更复杂,从上到下通常包括植被层、基质层、过滤层、排水层和防

收稿日期: 2022-03-22; 修订日期: 2022-04-24

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

水层等^[13]. 已有研究表明,绿色屋顶具有调控径流^[14]、减少噪声^[15]和减缓城市热岛效应^[16]等功能. 然而,绿色屋顶的建设和维护成本较高^[10],且植被生长情况^[17]、径流调控功能^[18]和径流水质^[19]等易受外部环境(如气候、降雨和周边环境等)和配置因素(如植被类型和基质等)的影响和制约^[20,21]. 例如,Zhang等^[17]在北京地区的研究表明,绿色屋顶植被生长受基质含水量制约,在无灌溉条件下,基质厚度显著影响绿色屋顶的植被生长情况. 章孙逊等^[22]的长期监测研究发现,在降雨较少的年份,绿色屋顶植被生长会受到抑制,且绿色屋顶的径流水质存在年际差异. 鉴于此,近年来有研究尝试在绿色屋顶的底部添加蓄水层,构建蓝-绿屋顶^[23,24]. 添加蓄水层既可增加绿色屋顶的蓄水空间,也能通过水分补给影响绿色屋顶的蒸散发,从而维护植被健康生长并改善绿色屋顶的径流调控能力^[25]. 除影响径流调控能力外,添加蓄水层还会改变绿色屋顶的径流过程和基质水分状况,这可能会对绿色屋顶的径流水质造成影响^[26,27],但目前尚缺少相关实测研究.

综上,蓝色、绿色和蓝-绿屋顶均能吸纳雨水和调控径流,具有推广应用的潜力. 因结构、建筑材料、成本和维护方式不同,这些生态屋顶的功能和适用场景存在差异^[10]. 对比研究各类型生态屋顶的功能差异,有利于合理比选生态屋顶. 然而,当前有关蓝色、绿色和蓝-绿屋顶的研究大部分仅对其中单种屋顶进行功能评价,且主要集中于成本、结构和径流调控效益的研究^[25,28],缺少对不同生态屋顶间径流调控功能与径流水质的综合评价与对比研究.

本研究基于对北京市3种不同类型生态屋顶在

2019年雨季产流量和径流中营养盐和重金属浓度的监测,对比分析不同类型生态屋顶径流调控功能与径流水质差异,并解析造成差异的原因. 在此基础上通过计算雨水和各生态屋顶径流中污染物负荷,判断各屋顶对污染物的源-汇功能,并构建径流水质指标,综合评价不同生态屋顶径流水质优劣. 本研究结果旨在为生态屋顶类型选择和设计提供科学基础,并为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2019年5月在北京市海淀区北京林业大学林业楼楼顶搭建了3种类型生态屋顶实验装置,并设置1个对照屋顶实验装置(图1). 北京市1951~2015年年均降水量为587.2 mm,大约80%的降水集中在6~9月的雨季^[29].

各实验装置均由屋顶实验槽(1 m长×1 m宽×0.4 m高)、导流槽、雨量计和集水桶4部分组成,各屋顶的结构如图1所示. 其中,绿色屋顶(GR)从上到下包括植被层、基质层、过滤层和排水层,在排水层底部开设排水口;对照屋顶(NV)除无植被层,其余结构均与绿色屋顶一致;蓝色屋顶(BR)主要为砾石材料的蓄水层,在蓄水层顶部开设排水口;蓝-绿屋顶(BGR)由上到下包括植被层、基质层、过滤层和蓄水层,在蓄水层顶部开设排水口. 各屋顶的详细配置参见表1.

为减少排水层和蓄水层材料对径流水质的影响,本研究所使用的陶粒和砾石在搭建初期均使用自来水浸泡并冲洗. 除种植初期的少量灌溉,雨季实验期内所有生态屋顶均无灌溉和施肥.

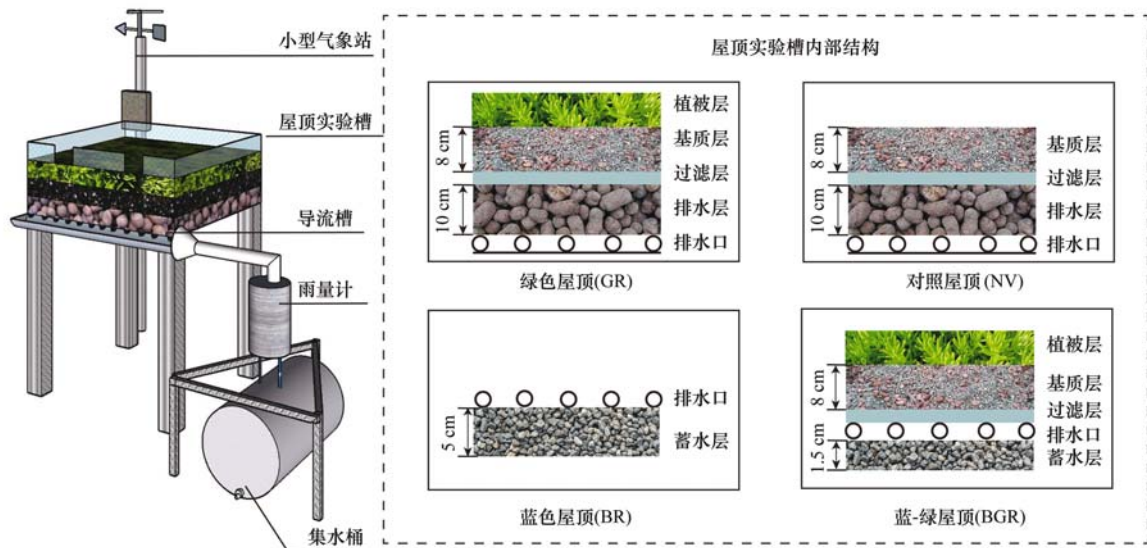


图1 不同屋顶结构示意图

Fig. 1 Structures of the roof construction

表 1 不同屋顶结构层配置参数¹⁾
Table 1 Configuration parameters of the roofs

屋顶类型	植被层	基质层	过滤层	蓄水层	排水层
蓝色屋顶	/	/	/	砾石(厚度 5 cm)	/
蓝-绿屋顶	佛甲草 (<i>Sedum lineara</i>)	轻质生长基 (浮石:草炭土:沸石:碎木屑 = 4:3:2:1,厚度 8 cm)	聚酯无纺布 (300 g·m ⁻²)	砾石(厚度 1.5 cm)	/
绿色屋顶	佛甲草	轻质生长基(厚度 8 cm)	聚酯无纺布	/	陶粒(厚度 10 cm)
对照屋顶	/	轻质生长基(厚度 8 cm)	聚酯无纺布	/	陶粒(厚度 10 cm)

1)“/”表示屋顶不含对应结构层

1.2 径流收集和水质检测

如图 1 所示,本研究在实验装置附近搭建小型气象站(HOBO U30)记录气象特征.并在实验区放置一个不锈钢盆,用以收集雨水.各屋顶的径流经排水槽全部汇集进入雨量计记录,最后由雨量计下方的集水桶收集.产流结束后,量取集水桶中径流总量以校核雨量计数据,并从充分摇匀的不锈钢盆和集水桶中收集径流水样,装入 HDPE 水样瓶中.取样结束后,先后使用自来水和去离子水清洗不锈钢盆和集水桶,所有水样在 1 h 内放入冰箱冷冻储存,分批检测水质.

选择 2019 年雨季 6 场各屋顶均产流的降雨进行水质检测,所选降雨的特征如表 2 所示.水质检测前,使用 0.45 μm 的滤头过滤雨水和径流样品.本研究采用全自动化学分析仪(Smartchem 200)检测水样中营养盐(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和PO₄³⁻-P)的浓度;使用 ICP-MS 检测水样中溶解态重金属(DCr、DCu、DFe、DNi、DZn 和 DCd)的浓度.

表 2 所选降雨特征

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	07-22	22.0	0.48
2	07-28	92.6	1.68
3	08-02	27.2	1.84
4	08-04	24.0	0.76
5	09-09	73.0	1.04
6	09-12	20.0	0.16

1.3 指标计算及数据分析

基于场降雨量、屋顶产流量以及雨水和屋顶径流中污染物浓度,分别计算场降雨*i*各屋顶的径流削减率(*D_i*)和径流中污染物*j*负荷(*L_{ij}*),计算方法如下:

$$D_i = (P_i \times S - V_i) / (P_i \times S) \times 100\% \quad (1)$$

$$L_{ij} = C_{ij} \times V_i \quad (2)$$

式中,*P_i*为场降雨*i*的降雨量(mm);*S*为屋顶面积(m²);*V_i*为场降雨*i*屋顶的径流量(L);*C_{ij}*为场降雨*i*屋顶径流中污染物*j*的浓度(mg·L⁻¹或μg·L⁻¹).

基于雨水和各屋顶径流中累积污染负荷,判断各屋顶对污染物的源-汇功能,污染物*j*的累积负荷削减率(*D_{ej}*)可由下式计算:

$$D_{ej} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{pij} \times P_i \times S - \sum_{i=1}^n L_{ij}}{\sum_{i=1}^n C_{pij} \times P_i \times S} \times 100\% \quad (3)$$

式中,*C_{pij}*为第*i*场降雨雨水中污染物*j*的浓度(mg·L⁻¹或μg·L⁻¹),其余变量含义同式(1).

本研究采用径流水质指数(RQI)^[30],综合评价不同屋顶的径流水质情况,计算步骤如下.

(1)屋顶径流中污染物的负荷越低表明其径流水质越好,采用式(4)计算各屋顶场降雨*i*时径流中污染物*j*的得分*S_{ij}*(分值在 0~1 间,分值越高代表水质越好):

$$S_{ij} = [1 + (L_{ij}/L_{mij})^{2.5}]^{-1} \quad (4)$$

式中,*L_{mij}*为场降雨*i*各屋顶径流中污染物*j*负荷的平均值.

(2)基于*S_{ij}*,采用下式计算各屋顶场降雨*i*的径流水质指数(RQI):

$$RQI_i = \sum_{j=1}^n W_j S_{ij} \quad (5)$$

式中,*n*为污染物指标总数;*W_j*为污染物*j*的权重,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.

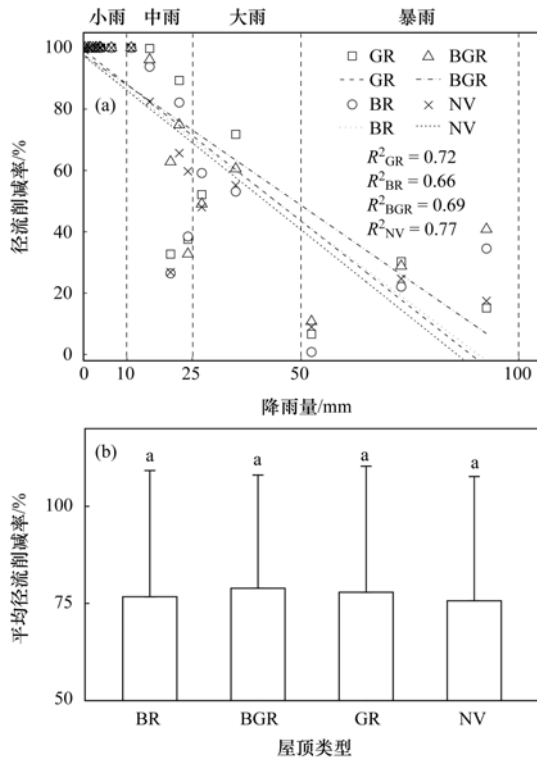
本文数据分析和制图均采用 R 语言.使用 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Levene 检验分别检测数据的正态性和齐次性.当数据满足正态时,使用单因素方差分析不同屋顶径流削减率、径流中营养盐和重金属浓度以及 RQI 差异的显著性.否则,采用 Kruskal-Wallis 法进行显著性差异分析.

2 结果与分析

2.1 不同屋顶径流削减能力对比

不同降雨条件下蓝色屋顶、蓝-绿屋顶、绿色屋

顶和对照屋顶的径流削减率如图 2(a). 小雨条件下 (降雨量 < 10 mm), 各屋顶均无产流. 随降雨量增加, 各屋顶的径流削减率均显著下降 ($P < 0.05$). 如图 2(b), 蓝-绿屋顶的径流削减率平均值最高, 为 78.9%, 依次高于绿色屋顶 (77.9%)、蓝色屋顶 (76.7%) 和对照屋顶 (75.7%), 不同屋顶的径流削减率无显著差异 ($P > 0.05$).



相同小写字母表示不同屋顶径流削减率无显著差异 ($P > 0.05$)

图 2 不同屋顶径流削减率

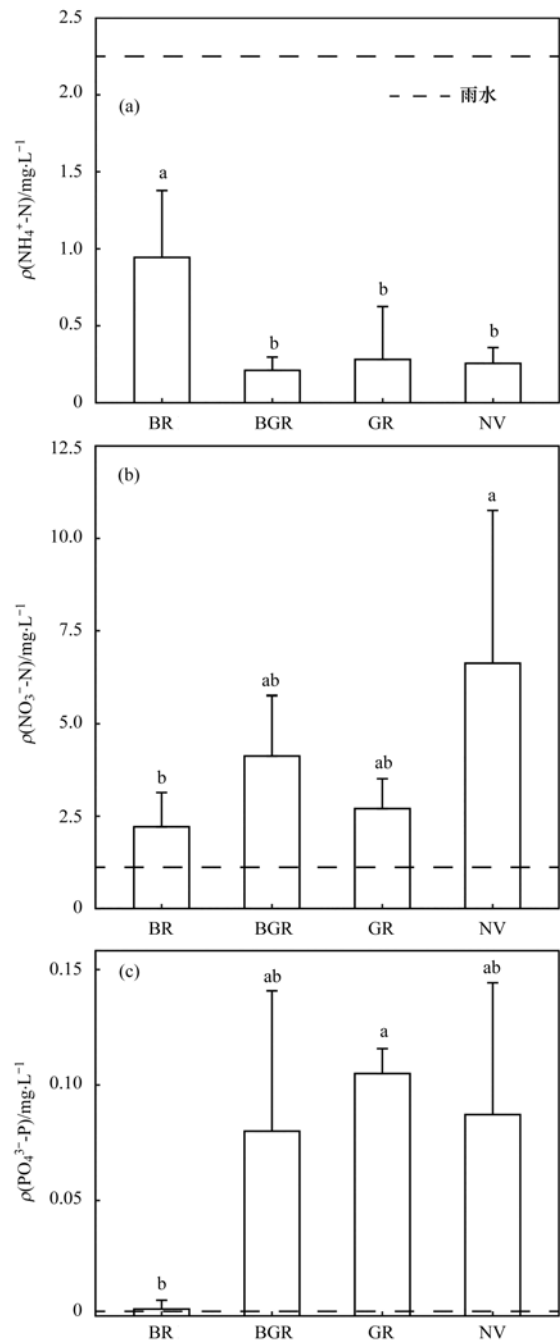
Fig. 2 Runoff reduction rates of different roofs

2.2 不同屋顶径流营养盐特征

如图 3(a), 蓝色屋顶径流中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 的平均值为 $(0.94 \pm 0.43) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著高于蓝-绿、绿色和对照屋顶 ($P < 0.05$), 所有屋顶径流中 NH_4^+-N 的平均浓度均明显低于雨水. 雨水和各屋顶径流中营养盐的累积负荷和削减率如表 3 所示, 雨水中 NH_4^+-N 的累积负荷为 $552.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 各屋顶径流中 NH_4^+-N 的累积负荷均低于雨水. 不同屋顶均是雨水中 NH_4^+-N 的汇, 蓝色屋顶的污染负荷削减率相对较低 (63.8%), 蓝-绿、绿色和对照屋顶对雨水中 NH_4^+-N 负荷的削减率均高于 90%.

雨水中 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 的平均值为 $(1.12 \pm 0.57) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 3(b)], 各屋顶径流中 NO_3^--N 的平均浓度和污染负荷均高于雨水, 是 NO_3^--N 的释放源. 其中, 对照屋顶径流中 NO_3^--N 平均浓度和累积负荷最高, 依次高于蓝-绿、绿色和蓝色屋顶.

NH_4^+-N 和 NO_3^--N 为可溶性无机 N 的主要存在



相同小写字母表示不同屋顶径流营养盐浓度

无显著差异 ($P > 0.05$)

图 3 不同屋顶径流中营养盐浓度

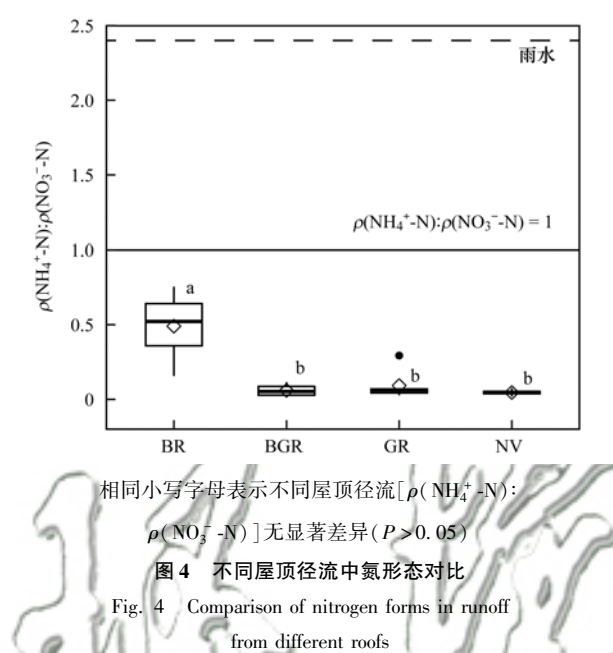
Fig. 3 Concentrations of nutrients in runoff from different roofs

形式^[31,32]. 如图 4 所示, 雨水中 $[\rho(\text{NH}_4^+-\text{N}) : \rho(\text{NO}_3^--\text{N})]$ 的平均值为 2.39, 而各屋顶径流中 $[\rho(\text{NH}_4^+-\text{N}) : \rho(\text{NO}_3^--\text{N})]$ 的平均值均小于 1. 该结果表明雨水中可溶性无机 N 主要以 NH_4^+-N 存在, 而流经各屋顶后无机 N 的主要形式为 NO_3^--N , 这与 Mason 等^[33] 和 Todorov 等^[34] 的研究结果一致. 蓝色、蓝-绿和绿色屋顶径流中无机 N ($\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N}$) 的总污染负荷均小于雨水 (表 3), 对无机 N 的削减率分别为 36.5%、26.6% 和 43.7%. 然而, 对

表 3 不同屋顶营养盐累积负荷和削减率¹⁾

指标	雨水累积负荷 /mg·m ⁻²	BR		BGR		GR		NV	
		累积负荷 /mg·m ⁻²	削减率 /%	累积负荷 /mg·m ⁻²	削减率 /%	累积负荷 /mg·m ⁻²	削减率 /%	累积负荷 /mg·m ⁻²	削减率 /%
NH ₄ ⁺ -N	552.9	200.1	63.8	32.6	94.1	19.7	96.4	47.2	91.5
NO ₃ ⁻ -N	277.0	326.7	/	576.4	/	447.3	/	1 700.9	/
无机 N	830.0	526.8	36.5	609.0	26.6	467.0	43.7	1 748.1	/
PO ₄ ³⁻ -P	0.6	0.6	—	14.4	/	18.6	/	16.0	/

1) “/”表示屋顶为该营养盐的释放源,“—”表示蓝色屋顶对PO₄³⁻-P的累积负荷无明显影响

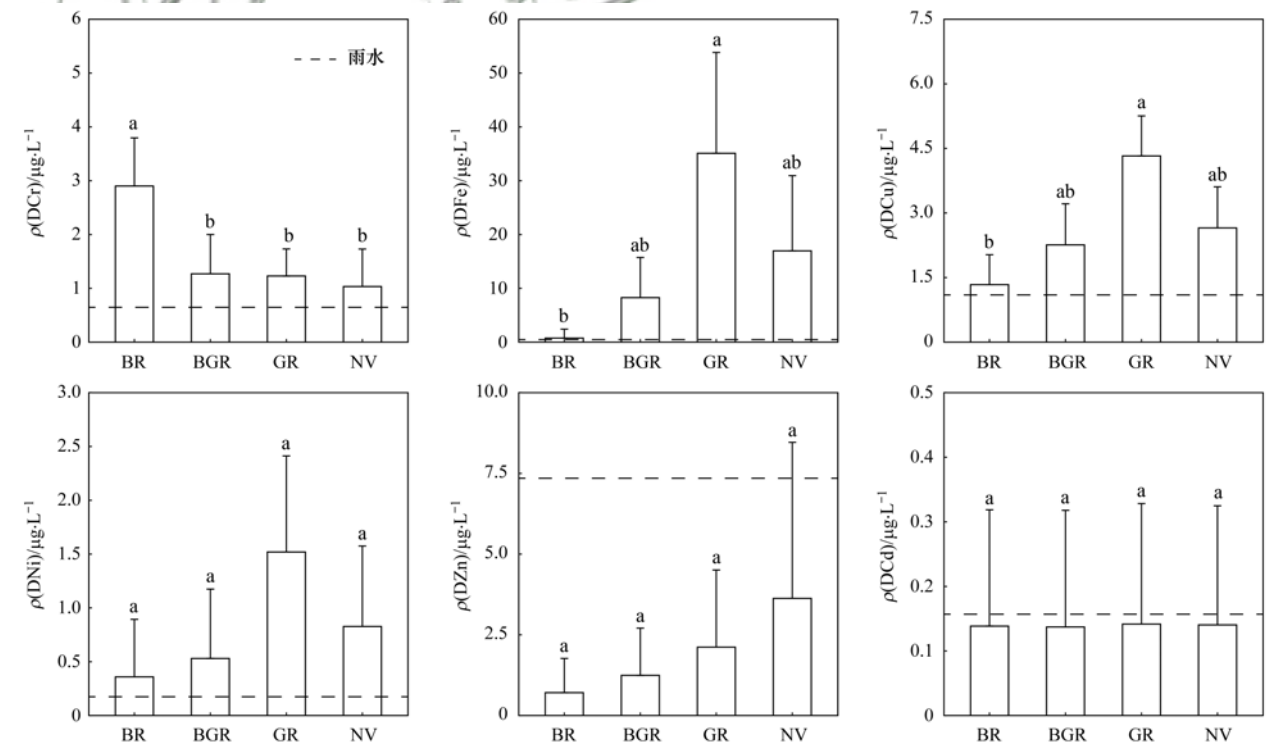


照屋顶径流中的无机 N 高于雨水,是无机 N 的释放源.

雨水和蓝色屋顶径流中 $\rho(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$ 的平均值极低($<0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),蓝-绿、绿色和对照屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的平均值均明显高于雨水和蓝色屋顶[图 3(c)].蓝色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的累积负荷与雨水相近(表 3),表明其对雨水径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的累积负荷无明显影响.然而,蓝-绿、绿色和对照屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的累积负荷均明显高于雨水,是 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的释放源.

2.3 不同屋顶径流重金属特征

如图 5 所示,所有屋顶径流中 DZn 和 DCd 的平均浓度均低于雨水,但 DCr、DFe、DCu 和 DNi 的平均浓度均高于雨水.蓝色屋顶径流中 DCr 浓度的平均值最高,显著高于其他 3 种屋顶($P<0.05$).绿色屋顶径流中 DFe、DCu 和 DNi 浓度平均值最高,依



次高于对照、蓝-绿和蓝色屋顶. 其中,绿色屋顶径流中 DFe 和 DCu 的浓度显著高于蓝色屋顶 ($P < 0.05$). 对照屋顶径流中 DZn 浓度的平均值最高,依次高于绿色、蓝-绿和蓝色屋顶,但各屋顶间无显著差异 ($P > 0.05$). 各屋顶径流中 DCd 的浓度相近,同样无显著差异 ($P > 0.05$).

各屋顶径流中 DCr、DFe 和 DN_i 的累积污染负荷均高于雨水(表 4),表明这些屋顶均为这 3 种重

金属的释放源. 雨水中 DCu 的累积负荷为 $268.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,蓝色屋顶径流中 DCu 的累积负荷为 $209.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,是 DCu 的汇(累积负荷削减率为 21.9%),但蓝-绿、绿色和对照屋顶均为 DCu 的释放源. 雨水中 DZn 和 DCd 的累积负荷分别为 $1\,912.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $31.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,各屋顶均为雨水中 DZn 和 DCd 的汇,污染负荷削减率分别在 68.6% ~ 90.7% 和 39.8% ~ 54.5% 之间.

表 4 不同屋顶重金属累积负荷和削减率¹⁾

Table 4 Cumulative loads and reduction rates of heavy metals from different roofs

指标	雨水累积负荷 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	BR		BGR		GR		NV	
		累积负荷 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	削减率 /%	累积负荷 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	削减率 /%	累积负荷 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	削减率 /%	累积负荷 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	削减率 /%
DCr	106.3	370.4	/	133.0	/	159.7	/	150.1	/
DFe	57.5	65.9	/	1\,044.7	/	5\,117.0	/	2\,586.9	/
DN _i	45.9	89.1	/	104.5	/	237.3	/	181.7	/
DCu	268.4	209.5	21.9	298.0	/	669.0	/	484.4	/
DZn	1\,912.1	177.1	90.7	224.1	88.3	389.5	79.6	600.4	68.6
DCd	31.6	19.0	39.8	14.4	54.5	17.5	44.5	17.8	43.6

1) “/”表示屋顶为该重金属的释放源

2.4 不同屋顶径流水质综合评价

基于不同屋顶径流中营养盐和重金属的负荷,计算不同屋顶径流的 RQI 如图 6,可用以综合评价不同屋顶的径流水质,各污染物指标权重如表 5 所示. 蓝色屋顶径流 RQI 的平均值最高(0.70),表明

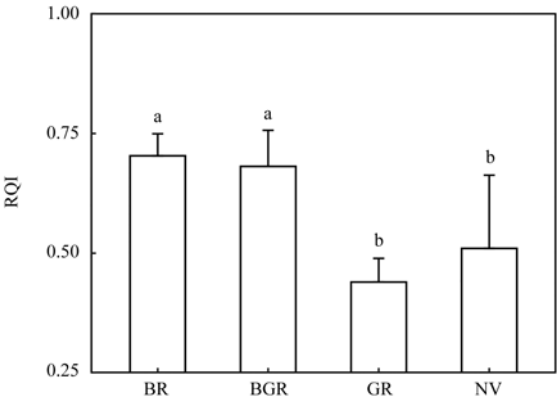
其径流的水质最优. 蓝-绿屋顶的 RQI 为 0.68,略低于蓝色屋顶,但二者的 RQI 无显著差异 ($P > 0.05$). 绿色和对照屋顶径流 RQI 的平均值分别为 0.44 和 0.51,显著低于蓝色和蓝-绿屋顶 ($P < 0.05$).

3 讨论

本研究中,不同屋顶在小雨条件下均未产流,且径流削减率均与降雨量呈显著负相关[图 2(a)],这与前期研究结果一致^[14]. 不同屋顶的径流削减率由降雨量和屋顶的雨水滞留能力决定^[35],雨水滞留能力通过蒸散发恢复^[36],蒸散发量与雨前干期呈正相关^[37]. 北京的降雨主要集中于雨季(6 ~ 9 月),降雨间干期较短. 因此,各屋顶在雨前干期的蒸散发量差异不大,径流削减率无显著差异.

3.1 不同屋顶对径流营养盐影响

本研究中,各屋顶径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度均低于雨水,但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的平均浓度却高于雨水. 从累积污染负荷的角度来看,各屋顶均为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的汇,但均为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的释放源(表 3),相似的结果在已有研究中也广泛报道^[34,38]. 本研究中,雨水中无机 N 主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形式存在,而各屋顶径流中主要以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的形式存在(图 4). 已有研究表明^[39,40],雨水在流经屋顶过程中发生的硝化反应,是造成屋顶径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度低于雨水的主要原因. 相较于含砾石的蓝色屋顶,蓝-绿、绿色和对照屋顶基质层中富含营养物质,基质的相对表面积更大且更易保持长期湿润环境,可能更有利于硝化细菌生长和



相同小写字母表示不同屋顶径流 RQI 无显著差异 ($P > 0.05$)

图 6 不同屋顶径流水质综合评价

Fig. 6 Runoff quality indices of runoff from different roofs

表 5 污染物指标权重

Table 5 Communnality and weight of pollutants

污染物指标	公因子方差	权重
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.664	0.092
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.955	0.132
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.873	0.121
DCr	0.927	0.128
DFe	0.895	0.124
DN _i	0.838	0.116
DCu	0.752	0.104
DZn	0.527	0.073
DCd	0.794	0.110

硝化反应^[26]. 因此, 蓝-绿、绿色和对照屋顶径流中 NH_4^+-N 的平均浓度均显著低于蓝色屋顶. 蓝色、蓝-绿和绿色屋顶径流中无机 $\text{N}(\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N})$ 的累积负荷均低于雨水, 这表明雨水中的无机 N 在经过这些屋顶后除通过硝化反应进行形态转换, 也可能通过生物吸收、离子交换和反硝化反应等途径被固定或消耗^[27,32], 从而降低径流中的无机 N 污染. 然而, 与蓝-绿和绿色屋顶不同, 对照屋顶无植被覆盖, 基质中的 NO_3^--N 缺少植物和根际微生物同化吸收^[41]. 这可能是造成对照屋顶径流中 NO_3^--N 和无机 N 累积负荷明显高于雨水以及其他 3 种屋顶的主要原因.

有研究表明^[34,38], 雨水中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的浓度通常极低. 蓝色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的平均浓度和累积负荷与雨水几乎相同, 表明砾石材料无明显 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 淋出. 已有研究表明, 基质层中的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 会随径流淋出^[20,27], 因此蓝-绿、绿色和对照屋顶均是 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的释放源. 由于砾石材料无明显 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 淋出, 且植被吸收对基质 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 淋出的影响有限^[22,32], 蓝-绿、绿色和对照屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的浓度无显著差异.

3.2. 不同屋顶对径流重金属影响

蓝色屋顶径流中 DCr 的浓度高于雨水, 且显著高于蓝-绿、绿色和对照屋顶. 然而, 蓝-绿屋顶与不含砾石蓄水层的绿色和对照屋顶径流中 DCr 的浓度无显著差异(图 5). 这表明雨水和砾石材料并不是蓝色屋顶径流中 DCr 的主要来源. 谭吉华等^[42]的综述指出, 煤和石油燃烧产生的废气是大气中 Cr 的重要来源, 我国空气中 Cr 的平均浓度远高于 WHO 限值. 雨前干期的大气沉降可能是造成蓝色屋顶径流中 DCr 浓度高于雨水的重要原因. 蓝色屋顶径流中 DCu 累积负荷低于雨水, 表明砾石蓄水层在滞留了雨水的同时, 也滞留了雨水中的 DCu . 基质层中可交换态重金属随径流淋出^[43]可能是造成蓝-绿、绿色和对照屋顶径流中 DFe 、 DCu 和 DNi 的平均浓度和累积负荷均明显高于雨水和蓝色屋顶的主要原因, 相似的结果在前人的研究也有报道^[38,44,45]. 雨水中 DZn 的浓度明显高于其他重金属(图 5), 雨水中的 DZn 进入各屋顶后, 可能通过沉淀、络合吸附、植物和微生物吸收等方式固定^[46,47], 促使各屋顶径流中 DZn 的平均浓度和累积负荷均低于雨水, 该研究结果与 Gregoire 等^[45] 和 Akther 等^[48] 的一致. 雨水和各屋顶径流中 DCd 的平均浓度接近, 表明屋顶材料中无 DCd 淋出. 得益于出色的雨水滞留能力, 各屋顶均为雨水中 DCd 的汇.

绿色屋顶径流中 DFe 、 DNi 和 DCu 的平均浓度

和累积污染负荷均明显高于对照屋顶(图 5 和表 4), 这表明植被会促进基质中这 3 种重金属的释放, 这与前期的研究结果一致^[41]. 该现象可能主要受以下因素影响: 一方面, 植被根系分泌物活化了基质层中固定的重金属, 造成可交换态的重金属随径流淋出^[49]. 另一方面, 植被叶片表面可能较空白基质吸附更多大气沉降重金属, 随降雨冲刷进入径流^[50]. 蓝-绿屋顶的蓄水层可为径流提供更长的停留时间, 基质层淋出的重金属可在蓄水层被沉淀、络合和吸附^[51]. 此外, 由于蓝-绿屋顶的砾石蓄水层长期处于潮湿的环境, 有利于微生物的生长, 微生物吸附可能可以进一步减少其径流中重金属淋出^[52,53]. 总体上看, 蓝-绿屋顶径流中 DCr 、 DCu 、 DFe 、 DNi 、 DZn 和 DCd 的累积负荷均明显低于绿色屋顶. 在绿色屋顶下增加蓄水层, 有利于降低径流中重金属的淋出.

4 建议与展望

本研究对 2019 年雨季不同新建的生态屋顶的径流中营养盐和重金属进行监测, 构建 RQI 综合评价 4 种不同类型屋顶的径流水质. 观测期内, 蓝色屋顶的 RQI 最高, 其径流水质最佳. 相较绿色屋顶, 蓝色屋顶无需种植植物, 并可通过清洗和更换填料的方式保证其径流水质, 在低维护、植物生长条件较差的地区具有应用空间. 已有研究表明, 除生态功能外, 绿色屋顶还具备提供审美价值和提供休憩场所等功能^[54]. 然而, 观测期内绿色屋顶 RQI 最低, 其径流水质最差. 盲目建设绿色屋顶, 建筑材料中的污染物可能会随雨水径流淋出, 引发面源污染. 为绿色屋顶添加蓄水层, 建造蓝-绿屋顶可有效降低绿色屋顶的污染物淋出. 已有研究表明^[10,22], 生态屋顶的建筑材料会随使用时长增加而动态变化, 进而影响径流水质. 未来可通过多年长期监测, 进一步揭示不同生态屋顶在长期使用下的径流水质的动态变化.

5 结论

(1) 2019 年雨季, 绿色、蓝色、蓝-绿和对照屋顶的雨水滞留能力无明显差异, 各屋顶的平均径流削减率在 75.7% ~ 78.9% 之间, 无显著差异 ($P > 0.05$).

(2) 相较雨水, 各屋顶均为 NH_4^+-N 的汇, 累积负荷削减率在 63.8% ~ 96.4% 之间, 但均为 NO_3^--N 的释放源; 砾石材料的蓝色屋顶对雨水径流中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的累积负荷无明显影响, 但蓝-绿、绿色和对照屋顶基质层中的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 会随径流淋出.

(3) 各屋顶均可有效减少雨水径流中 DZn 和

DCd 的负荷,累积负荷削减率分别在 68.6%~90.7% 和 39.8%~54.5% 之间,但均为 DCr、DFe 和 DNi 的源;蓝色屋顶为 DCu 的汇,累积负荷削减率为 21.9%,但蓝-绿、绿色和对照屋顶的基质为 DCu 的释放源。砾石蓄水层可有效减少重金属淋出,蓝-绿屋顶径流中 DCr、DFe、DNi、DCu、DZn 和 DCd 的累积负荷均低于绿色屋顶。

(4)本研究综合评价了不同新建生态屋顶的径流水质。蓝色屋顶的径流水质指数(RQI)最高,径流水质最佳,依次优于蓝-绿、对照和绿色屋顶。为绿色屋顶增加蓄水层建设蓝-绿屋顶可显著改善绿色屋顶径流水质。

参考文献:

- [1] Priya U K, Senthil R. A review of the impact of the green landscape interventions on the urban microclimate of tropical areas[J]. *Building and Environment*, 2021, **205**, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108190.
- [2] Oudin L, Salavati B, Furusho-Percot C, *et al.* Hydrological impacts of urbanization at the catchment scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **559**: 774-786.
- [3] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, *et al.* Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, **319**(5864): 756-760.
- [4] Chen J Q, Liu Y Z, Gitau M W, *et al.* Evaluation of the effectiveness of green infrastructure on hydrology and water quality in a combined sewer overflow community[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **665**: 69-79.
- [5] Salvadore E, Bronders J, Batelaan O. Hydrological modelling of urbanized catchments: a review and future directions[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **529**: 62-81.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 许萍, 车伍, 李俊奇. 屋顶绿化改善城市环境效果分析[J]. *环境保护*, 2004, (7): 41-44.
- Xu P, Che W, Li J Q. Analysis on improvement of urban environment made by green roof[J]. *Environmental Protection*, 2004, (7): 41-44.
- [9] Stovin V, Vesuviano G, Kasmin H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **414-415**: 148-161.
- [10] Foster J, Lowe A, Winkelmann S. The value of green infrastructure for urban climate adaptation[R]. Washington: The Center for Clean Air Policy.
- [11] 杨春霞, 肖以恒, 朱晓明, 等. 蓝屋顶技术及其在旧城改造中应用的可行性分析[J]. *中国园艺文摘*, 2017, **33**(2): 111-115, 194.
- Yang C X, Xiao Y H, Zhu X Y, *et al.* Analysis of blue roof application feasibility in traditional district reconstruction[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2017, **33**(2): 111-115, 194.
- [12] Campisano A, Modica C, Gullotta A. Long-term experiments for the evaluation of the potential for storm water control of modular blue roofs in Mediterranean climate[J]. *Urban Water Journal*, 2021, **18**(1): 33-42.
- [13] Shafique M, Kim R, Rafiq M. Green roof benefits, opportunities and challenges-a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **90**: 757-773.
- [14] 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.
- [15] Connelly M, Hodgson M. Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs[J]. *Building and Environment*, 2015, **92**: 335-346.
- [16] 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.
- [17] Zhang H, Lu S S, Fan X F, *et al.* Is sustainable extensive green roof realizable without irrigation in a temperate monsoonal climate? A case study in Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **753**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142067.
- [18] Liu W, Feng Q, Chen W P, *et al.* The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **569**: 230-238.
- [19] 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.
- [20] Rowe D B. Green roofs as a means of pollution abatement[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(8-9): 2100-2110.
- [21] 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.
- [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] Shafique M, Lee D, Kim R. A Field study to evaluate runoff quantity from blue roof and green blue roof in an Urban Area[J]. *International Journal of Control and Automation*, 2016, **9**(8): 59-68.
- [24] Skjeldrum P M, Kvande T. Moisture-resilient upgrading to blue-green roofs[J]. *Energy Procedia*, 2017, **132**: 417-422.
- [25] Busker T, De Moel H, Haer T, *et al.* Blue-green roofs with forecast-based operation to reduce the impact of weather extremes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113750.
- [26] 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.
- [27] Buffam I, Mitchell M E. Nutrient cycling in green roof ecosystems[A]. In: Sutton R K (Ed.). *Green Roof Ecosystems*

- [M]. Cham: Springer, 2015. 107-137.
- [28] Andenæs E, Time B, Muthanna T, *et al.* Risk reduction framework for blue-green roofs[J]. *Buildings*, 2021, **11**(5), doi: 10.3390/buildings11050185.
- [29] 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.
- [30] 章孙逊, 张守红, 闫婧, 等. 不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4587-4596.
- Zhang S X, Zhang S H, Yan J, *et al.* Integrated assessment of runoff quality from green roofs with different configurations[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4587-4596.
- [31] Lambers H, Raven J, Shaver G, *et al.* Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, **23**(2): 95-103.
- [32] Johnson C, Schweinhart S, Buffam I. Plant species richness enhances nitrogen retention in green roof plots[J]. *Ecological Applications*, 2016, **26**(7): 2130-2144.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Liu W, Engel B A, Feng Q. Modelling the hydrological responses of green roofs under different substrate designs and rainfall characteristics using a simple water balance model[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **602**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126786.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Burger M, Jackson L E. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(1): 29-36.
- [40] Huang L Q, Luo J Y, Li L X, *et al.* Unconventional microbial mechanisms for the key factors influencing inorganic nitrogen removal in stormwater bioretention columns[J]. *Water Research*, 2022, **209**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117895.
- [41] 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.
- [42] 谭吉华, 段菁春. 中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2013, **30**(2): 145-155.
- Tan J H, Duan J C. Heavy metals in aerosol in China: pollution, sources, and control strategies[J]. *Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, 2013, **30**(2): 145-155.
- [43] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(12): 1499-1502.
- Han C M, Wang L S, Gong Z Q, *et al.* Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(12): 1499-1502.
- [44] Berndtsson J, 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.
- [45] 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.
- [46] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. *生态学杂志*, 2004, **23**(1): 65-72.
- Wei S H, Zhou Q X. Discussion on basic principles and strengthening measures for phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(1): 65-72.
- [47] 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.
- [48] Akther M, He J X, Chu A, *et al.* Chemical leaching behaviour of a full-scale green roof in a cold and semi-arid climate[J]. *Ecological Engineering*, 2020, **147**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105768.
- [49] Tao Q, Zhao J W, Li J X, *et al.* Unique root exudate tartaric acid enhanced cadmium mobilization and uptake in Cd-hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **383**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121177.
- [50] Shao F, Wang L H, Sun F B, *et al.* Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **652**: 939-951.
- [51] 李鸿博, 钟怡, 张昊楠, 等. 生物炭修复重金属污染农田土壤的机制及应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(13): 173-185.
- Li H B, Zhong Y, Zhang H N, *et al.* Mechanism for the application of biochar in remediation of heavy metal contaminated farmland and its research advances[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(13): 173-185.
- [52] 王建龙, 陈灿. 生物吸附法去除重金属离子的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(4): 673-701.
- Wang J L, Chen C. Research advances in heavy metal removal by biosorption[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(4): 673-701.
- [53] 刘金燕, 刘立华, 薛建荣, 等. 重金属废水吸附处理的研究进展[J]. *环境化学*, 2018, **37**(9): 2016-2024.
- Liu J Y, Liu L H, Xue J R, *et al.* Research progress on treatment of heavy metal wastewater by adsorption[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(9): 2016-2024.
- [54] Jungels J, Rakow D A, Allred S B, *et al.* Attitudes and aesthetic reactions toward green roofs in the Northeastern United States[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, **117**: 13-21.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)