

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

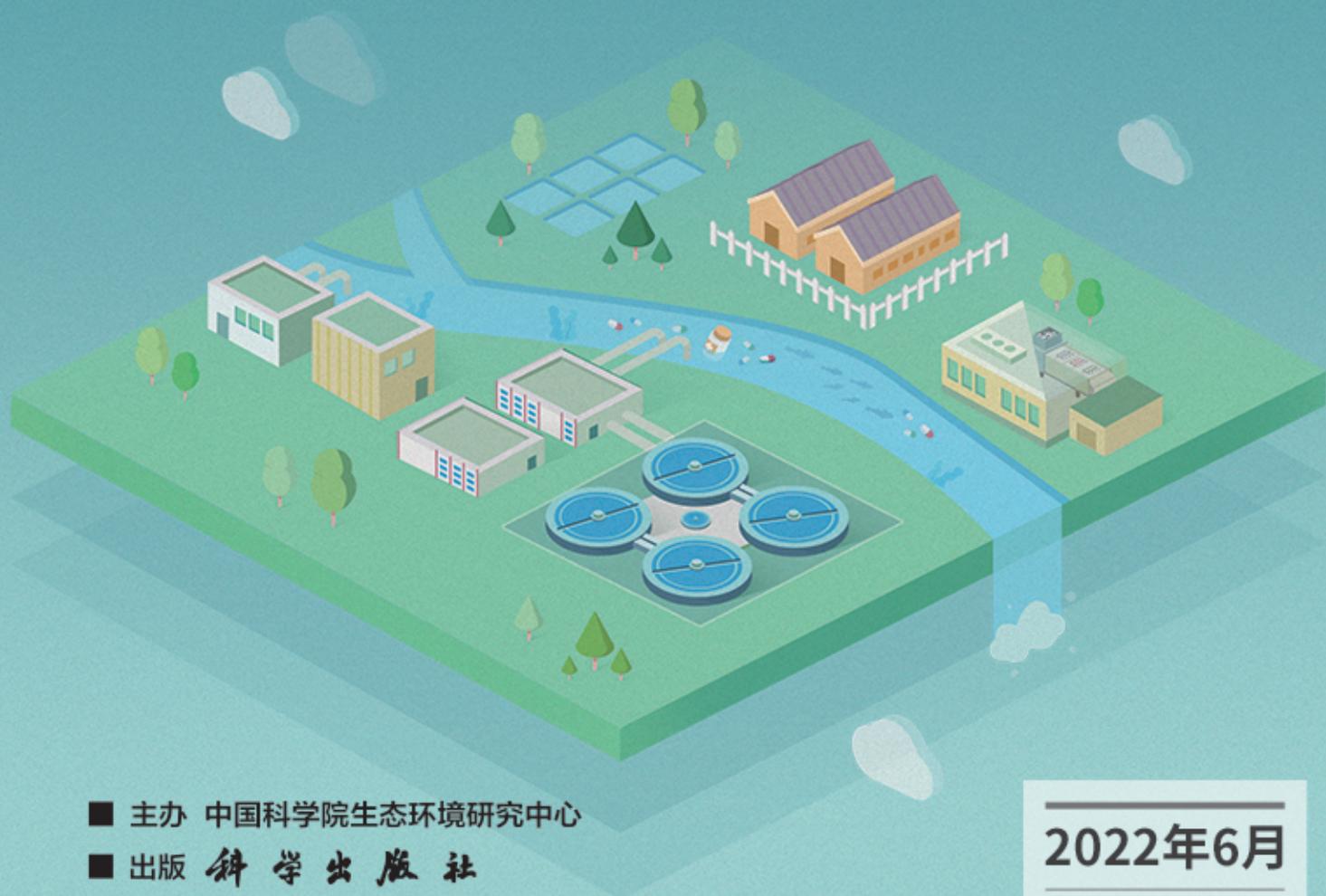
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期

Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响 ..... 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)

新冠疫情管控措施对郑州市 PM<sub>2.5</sub> 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 ..... 黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)

COVID-19 管控期间苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度变化及来源解析 ..... 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)

2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 ..... 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜祺, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)

基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM<sub>2.5</sub> 来源 ..... 彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)

保定市冬季 PM<sub>2.5</sub> 的氧化潜势特征及其影响来源分析 ..... 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)

南京江北新区 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 ..... 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)

广西十万大山背景点 PM<sub>2.5</sub> 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 ..... 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)

大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例 ..... 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)

基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 ..... 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)

天津市 PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 复合污染特征及气象影响分析 ..... 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)

2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 ..... 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)

河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 ..... 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)

热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 ..... 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)

武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 ..... 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)

运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)

我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 ..... 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 ..... 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)

内蒙古东北部地区地下水-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 ..... 张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思璐, 孙兴滨, 王山军 (3005)

不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 ..... 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)

高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素 ..... 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔景阳, 陈安强, 张丹 (3027)

青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 ..... 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)

东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 ..... 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)

湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 ..... 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)

长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 ..... 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)

香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 ..... 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)

城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 ..... 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)

2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 ..... 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)

嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系 ..... 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)

近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 ..... 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)

长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 ..... 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)

高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 ..... 顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋钟钟, 曹引, 赵红莉 (3140)

不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 ..... 陈旭东, 高良敏 (3149)

生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 ..... 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)

不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 ..... 吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)

北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 ..... 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐苏士, 荆红卫, 刘保献 (3177)

不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 ..... 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)

可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 ..... 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)

4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 ..... 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)

农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 ..... 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)

腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 ..... 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)

2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 ..... 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)

黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 ..... 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)

青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 ..... 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)

西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 ..... 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴鑫, 刘双燕 (3262)

贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 ..... 张倩, 韩贵琳 (3269)

南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析 ..... 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)

神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 ..... 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)

石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 ..... 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)

水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 ..... 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)

改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 ..... 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)

土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 ..... 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)

小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 ..... 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)

重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 ..... 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)

长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 ..... 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)

基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 ..... 梁建设, 白永平, 杨雪菡, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)

《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)

# 不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征

章孙逊<sup>1</sup>, 张守红<sup>1,2\*</sup>, 葛德<sup>1</sup>, 闫婧<sup>1</sup>, 杨航<sup>1</sup>, 王任重远<sup>1</sup>, 魏良怡<sup>1</sup>, 张成玉<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 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, 近年来逐渐得到广泛关注. 为探究植被和使用时长对绿色屋顶径流水质的影响, 于北京市区搭建了3种不同植被类型[佛甲草(*Sedum lineare*)、大花马齿苋(*Portulaca grandiflora*)和无植被(对照)]的绿色屋顶. 根据2017~2019年植物生长情况、雨季雨水和绿色屋顶径流水质的长期监测, 定量分析不同植被绿色屋顶径流水质的年际变化特征. 结果表明, 相较雨水, 3种绿色屋顶在监测期内均是 $\text{NH}_4^+$ -N的汇, 浓度平均削减率在50.1%~79.2%之间, 但均是 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、DCr、DCu和DNi的源; 佛甲草和大花马齿苋绿色屋顶在2017年是 $\text{NO}_3^-$ -N的汇, 浓度平均削减率分别为71.4%和99.5%, 在2018和2019年是 $\text{NO}_3^-$ -N的源, 而对照绿色屋顶在监测期均为 $\text{NO}_3^-$ -N的源; 绿色屋顶的植被类型和使用时长显著影响其径流中 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、DNi和DCu的浓度( $P < 0.05$ ), 但对 $\text{NH}_4^+$ -N和DCr的浓度影响均不显著( $P > 0.05$ ); 2017~2019年, 佛甲草和对照绿色屋顶径流中 $\text{NO}_3^-$ -N以及大花马齿苋绿色屋顶径流中 $\text{PO}_4^{3-}$ -P浓度的平均值均逐年增加, 各绿色屋顶径流中DNi和DCu的浓度均在2018年增加并在2019年回落; 3种绿色屋顶中, 大花马齿苋绿色屋顶对 $\text{NO}_3^-$ -N的控制效果最好, 但可能会增加径流中 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、DNi和DCu的浓度.

**关键词:** 绿色屋顶; 径流水质; 年际变化; 植被; 营养盐; 重金属

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3187-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108344

## Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation

ZHANG Sun-xun<sup>1</sup>, ZHANG Shou-hong<sup>1,2\*</sup>, GE De<sup>1</sup>, YAN Jing<sup>1</sup>, YANG Hang<sup>1</sup>, WANG Ren-zhong-yuan<sup>1</sup>, WEI Liang-yi<sup>1</sup>, ZHANG Cheng-yu<sup>1</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

**Abstract:** As an important measure of the sponge city, green roofs have received extensive attention in recent years. To investigate the inter-annual changes in runoff quality of green roofs with different vegetation types, three green roofs with different vegetation cover (*Sedum lineare*, *Portulaca grandiflora*, and a non-vegetated control) were set up in Beijing. The influences of vegetation and monitoring period on runoff quality from the green roofs were evaluated using the plant growth characteristics and the quality of rainwater and runoff from the green roofs during the rainy season of 2017-2019. The results showed that all three green roofs were the sinks of  $\text{NH}_4^+$ -N, and the average mass concentration reduction rates were between 50.1% and 79.2%. However, all three green roofs were sources of  $\text{PO}_4^{3-}$ -P, DCr, DCu, and DNi. The green roofs covered with *S. lineare* and *P. grandiflora* were sinks of  $\text{NO}_3^-$ -N in 2017, and the average mass concentration reduction rates were 71.4% and 99.5%, respectively, but they became sources of  $\text{NO}_3^-$ -N in both 2018 and 2019. However, the non-vegetated control was the source of  $\text{NO}_3^-$ -N in all three rainy seasons. Both vegetation type and length of monitoring period had significant effects on the mass concentrations of  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P, DNi, and DCu in runoff from the green roofs ( $P < 0.05$ ) but had no significant effects on the mass concentrations of  $\text{NH}_4^+$ -N and DCr in runoff from the green roofs ( $P > 0.05$ ). In 2017-2019, the mass concentrations of  $\text{NO}_3^-$ -N in runoff from the non-vegetated control and the green roofs covered by *S. lineare* and the mass concentration of  $\text{PO}_4^{3-}$ -P in runoff from the green roof covered by *P. grandiflora* increased yearly. The mass concentrations of DNi and DCu in runoff from all three green roofs increased in 2018 but dropped in 2019. Among the green roofs with different vegetation types, the green roof covered by *P. grandiflora* showed better  $\text{NO}_3^-$ -N retention capacity than that of the other green roofs but may have increased the concentrations of  $\text{PO}_4^{3-}$ -P, DNi, and DCu in the runoff.

**Key words:** green roofs; runoff quality; inter-annual changes; vegetation; nutrients; heavy metals

不透水面(如道路、停车场和屋面)的快速增加和透水面积(如湿地、草地和森林)锐减破坏了城市流域的自然水循环, 引发城市内涝和面源污染等生态环境问题<sup>[1,2]</sup>. 屋面约占城镇不透水面积的40%~50%<sup>[3]</sup>, 在城镇地区建设绿色屋顶是增加城市绿地、减缓城市生态环境问题的有效手段之一. 绿色屋顶自上而下通常包括植被层、基质层、过滤层、排水层和防水层等<sup>[4,5]</sup>. 有研究表明, 绿色屋顶具有美化环境和减缓城市热岛效应等功能<sup>[6]</sup>, 并可以通过滞留雨水、减少径流和延缓洪峰等方式调控径流<sup>[7,8]</sup>. 然而, 有研究指出, 绿色屋顶植被和基质等材料中的可溶性物质(如营养盐和重金属等)会随

雨水径流淋出, 盲目建设绿色屋顶可能会影响城市饮用水安全和水环境健康<sup>[9~11]</sup>.

植被可为绿色屋顶带来生机、提供审美价值并影响径流调控功能, 是绿色屋顶的重要组成部分<sup>[6,12]</sup>. 有研究表明, 植被对绿色屋顶的径流水质起了至关重要的作用<sup>[13,14]</sup>. 例如, Vijayaraghavan等<sup>[15]</sup>的研究通过人工降雨实验发现, 种植植物的绿色屋顶径流中重金属浓度明显低于无植被的对照组.

收稿日期: 2021-08-31; 修订日期: 2021-10-22

基金项目: 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: zhangs@bjfu.edu.cn

Beecham 等<sup>[16]</sup>的研究发现种植植物的绿色屋顶径流中营养元素的浓度明显低于无植被的对照组. 植被吸收和固定、滞尘和根系分泌等活动影响绿色屋顶的径流水质, 种植不同植被的绿色屋顶径流水质也存在差异<sup>[17]</sup>. 尽管前人开展了一些关于植被类型对绿色屋顶径流水质影响研究, 但尚缺少基于植物生长情况和动态变化对绿色屋顶径流年际变化影响研究<sup>[11]</sup>.

除植物的动态变化外, 绿色屋顶的基质材料等也会随时间动态变化<sup>[14]</sup>, 这种动态变化也可能会对绿色屋顶的径流水质造成影响. 有学者认为, 相较于长时间使用的绿色屋顶, 新建绿色屋顶会释放更多的污染物进入径流<sup>[4, 18, 19]</sup>. 也有学者指出, 绿色屋顶的基质中常含有缓释的材料(如有机质和缓释肥等), 这些材料产生的物质可能会随使用时间的增加而缓慢释放<sup>[20, 21]</sup>. 在植被、基质材料和外界环境条件等动态变化影响下, 绿色屋顶径流水质也极有可能是动态变化的. 因此, 对绿色屋顶径流水质的长时间监测十分必要. 然而, 目前国内外有关绿色屋顶水质的研究大多为室内模拟实验或短期室外监测<sup>[15, 17, 22~25]</sup>, 对绿色屋顶进行长期监测鲜见报道, 缺少有关绿色屋顶径流水质年际变化的研究.

本研究于 2017 年在北京市搭建了 3 个不同植被类型的绿色屋顶, 在 2017~2019 年雨季对研究区气象条件、绿色屋顶的植物生长情况、绿色屋顶径流中营养盐和重金属的浓度进行长期监测, 定量分析植被和使用时长等因素对绿色屋顶径流水质的影响, 并结合气象条件、植物生长情况和基质动态变化等因素分析水质差异的原因. 本研究通过了解不同植被覆盖的绿色屋顶径流水质的年际变化, 以期绿色屋顶的长期使用和科学管理提供科学参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

本研究于 2017 年在北京林业大学林业楼楼顶搭建绿色屋顶实验装置(图 1). 该实验区地处北京市海淀区, 属北温带半湿润大陆性季风气候, 1960~2015 年平均年降水量为 587.2 mm, 约 80% 的降雨发生在 6~9 月的雨季<sup>[26]</sup>.

绿色屋顶实验装置均由亚克力板和不锈钢材料搭建(1 m × 1 m). 从上到下, 绿色屋顶包括植被层、基质层、过滤层、排水层和防水层. 植被层分别种植屋顶绿化常用植物佛甲草(*Sedum lineare*)和大花马齿苋(*Portulaca grandiflora*, 马齿苋), 并设置 1 个无植被裸露基质作为对照(对照绿色屋顶). 佛甲草绿色屋顶、马齿苋绿色屋顶和对照绿色屋顶的编号

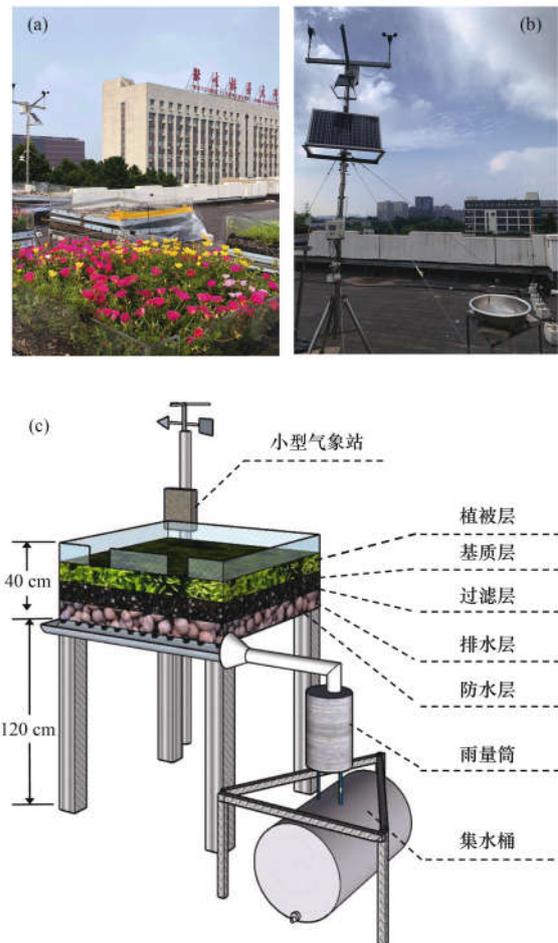


图 1 研究区和绿色屋顶实验装置示意

Fig. 1 Study site and structure of the green roof modules

分别为 GR1、GR2 和 GR3. 参考“种植屋面工程技术规程”(JGJ 155-2013), 配置厚度为 10 cm 的轻质生长基(浮石: 草炭土: 沸石: 碎木屑 = 4: 3: 2: 1)作为各绿色屋顶基质. 此外, 采用 300~400 g·m<sup>-2</sup> 的聚酯无纺布作为过滤层, 使用厚度 10 cm 的陶粒(直径平均值为 3 cm)作为排水层, 并铺设 TPO 卷材作为防水层.

### 1.2 植物维护和监测

佛甲草和马齿苋首次种植于 2017 年 5 月. 佛甲草为多年生植物, 每年春天会重新萌芽; 马齿苋为一年生植物, 在 2018 年和 2019 年春天进行重新栽植. 除种植初期的少量灌溉, 雨季实验期内所有绿色屋顶均无灌溉和施肥. 此外, 每年冬季(12 月至次年 2 月)在所有绿色屋顶装置外包裹一层土工布, 以避免低温和强风破坏绿色屋顶植物和基质.

实验期内, 在各绿色屋顶随机取 10 个点定期测量植物高度, 计算平均株高. 当雨季结束, 收割各绿色屋顶 0.2 m × 0.2 m 样方的地上部分植被, 将收割的植物置于 65℃ 的烘箱内烘干至恒重, 称重并计算该绿色屋顶的地上生物量.

### 1.3 样品采集与分析方法

2017年5月至2019年10月,使用架设在绿色屋顶装置上方2 m处的HOBO U30小型气象站监测实验区的降雨和气象特征(图1),并在气象站旁摆放不锈钢盆用于收集雨水.基于Voyde等<sup>[27]</sup>的研究,本研究将6 h雨前干期作为划分场降雨的依据.各绿色屋顶产流后,径流会随着导流槽流经雨量计并全部导入下方的集水桶.每场降雨结束后,充分搅拌不锈钢盆和集水桶中的径流并采样装入HDPE取样瓶.采样结束后,排放剩余雨水和径流,先后使用自来水和去离子水清洗不锈钢盆和集水桶.取样1 h内,将所采水样放入冰箱冷冻贮存,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(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)和溶解态重金属(DCr、DNi、DCu).营养盐浓度检测采用意大利AMS公司生产的全自动化学分析仪(Smartchem 200);使用ICP-MS对水样中重金属的浓度进行检测.利用SPSS 25.0软件进行单因素方差分析对比不同实验期雨水污染物浓度的差异性,用多因素方差分析对不同植被类型和不同使用时长的绿色屋顶径流水质数据进行差异分析,采用LSD法进行多重比较.

## 2 结果与分析

### 2.1 气象特征和雨水水质

实验区2017~2019年雨季(6~9月)的气象特征如图2所示.在3个观测年,7月的总降雨量均最高(132.0~237.7 mm).除2018年8月温度最高,其余年份7月的平均温度最高.

如表1所示,本研究在2017、2018和2019年共选取20场所有绿色屋顶均产流的降雨(降雨量15.2~131.6 mm)进行水质检测.其中包括12场中雨(降雨量10~24.9 mm)、3场大雨(25~49.9

mm)和5场暴雨(>50 mm).这20场降雨的降雨量和最大雨强存在明显差异,且包括了2017、2018和2019年降雨量最大的3场暴雨,水质检测结果具有代表性.

表1 2017~2019年雨季取样降雨特征

Table 1 Characteristics of the selected rainfall event in rainy seasons from 2017 to 2019

序号	降雨日期 (年-月-日)	降雨量 /mm	最大雨强 /mm·min <sup>-1</sup>
1	2017-07-06	44.8	1.16
2	2017-07-07	17.6	0.60
3	2017-07-14	81.4	2.76
4	2017-08-22	44.2	0.44
5	2018-07-07	24.9	1.24
6	2018-07-16	131.6	1.12
7	2018-07-21	17.4	0.88
8	2018-07-24	19.7	0.12
9	2018-07-25	20.0	0.72
10	2018-08-08	18.2	0.68
11	2018-08-11	16.4	0.92
12	2018-08-18	18.1	0.44
13	2019-07-10	15.2	0.72
14	2019-07-22	22.0	0.47
15	2019-07-28	92.6	1.68
16	2019-08-02	27.2	1.84
17	2019-08-04	24.2	0.76
18	2019-08-06	52.4	1.64
19	2019-09-09	72.0	1.04
20	2019-09-13	20.0	0.16

mm)和5场暴雨(>50 mm).这20场降雨的降雨量和最大雨强存在明显差异,且包括了2017、2018和2019年降雨量最大的3场暴雨,水质检测结果具有代表性.

### 2.2 植物生长特征

各生长季马齿苋的平均株高均明显高于佛甲草(图3).然而,由于2018年8月的总降雨相对较少且气温偏高(图2),相对干旱造成马齿苋的抗逆性下降,8月末大量地上部分被蚱壳虫啃食.2018年雨季自8月18日取样之后不再有各绿色屋顶均产流的降雨(表1).8月末的蚱壳虫灾虽未影响2018年雨季所选的8场降雨马齿苋绿色屋顶的径流水质,但无法在雨季结束后准确计算马齿苋的地上生物量.因此,2018年实测马齿苋的地上生物量低于佛甲草.除2018年外,2017年和2019年马齿苋的地上生物量均明显高于佛甲草.此外,由于实验期内无灌溉,2019年6月降雨较少(仅26.4 mm)可能是造成佛甲草和马齿苋的株高和生物量较低的主要原因.

### 2.3 不同植被绿色屋顶径流营养盐浓度年际变化

#### 2.3.1 铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)

不同植被的绿色屋顶径流中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的年际变化如图4(a)所示.观测期内雨水中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度的平

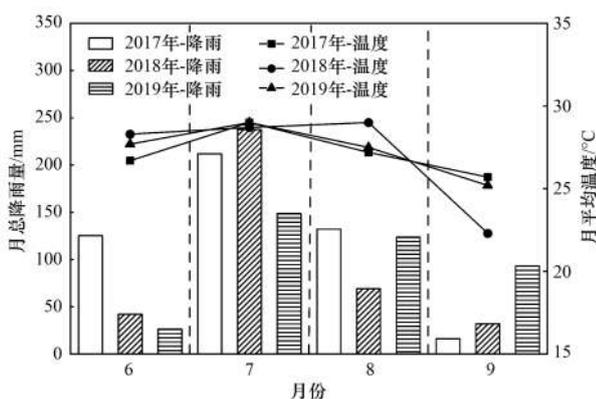


图2 2017~2019年雨季气象特征

Fig. 2 Weather conditions in rainy seasons from 2017 to 2019

表 2 雨水中污染物浓度年际差异<sup>1)</sup>

Table 2 Inter-annual changes in pollutant concentration in rainwater

指标	2017 年	2018 年	2019 年
$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.63 ± 0.19b	1.66 ± 0.95ab	2.16 ± 0.72a
$\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.15 ± 1.80a	0.80 ± 0.39a	1.18 ± 0.52a
$\rho(\text{PO}_4^{3-} - \text{P})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.046 ± 0.027a	0.071 ± 0.086a	0.002 ± 0.003a
$\rho(\text{DCr})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.86 ± 0.09a	1.43 ± 1.43a	0.62 ± 0.58a
$\rho(\text{DNi})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.20 ± 1.04a	0.57 ± 0.05a	0.19 ± 0.25a
$\rho(\text{DCu})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0(未检出)a	2.82 ± 5.94a	1.05 ± 0.77a

1) 相同小写字母表示雨水中污染物无显著年际差异( $P > 0.05$ )

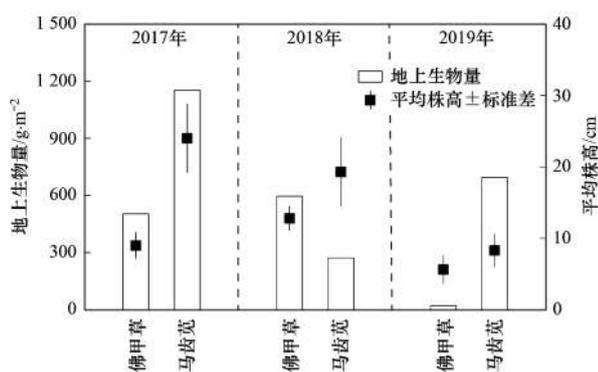


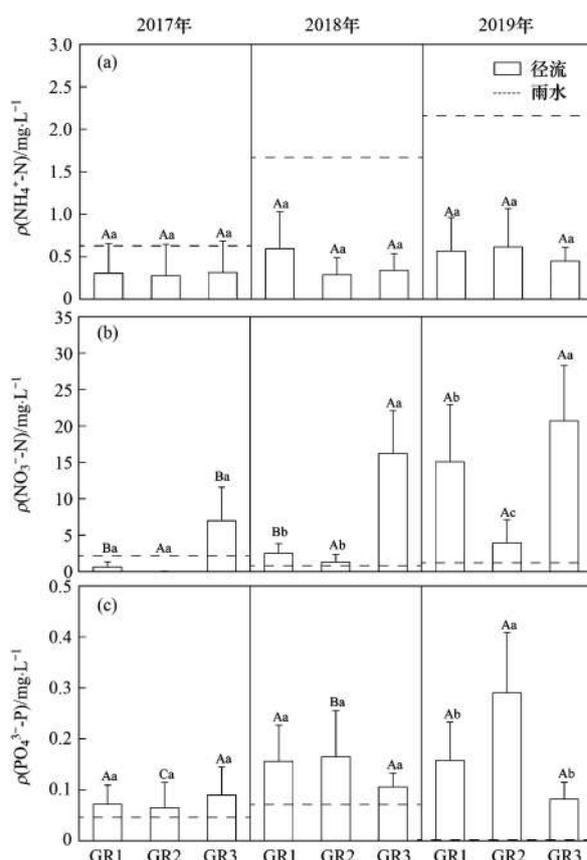
图 3 2017 ~ 2019 年不同绿色屋顶植物生长特征

Fig. 3 Plant growth characteristics of the green roofs from 2017 to 2019

均值存在显著年际差异( $P < 0.05$ ), 2019 年雨水  $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$  的平均值最高[(2.16 ± 0.72)  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ], 显著高于 2017 年[(0.63 ± 0.19)  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ]. 2017 ~ 2019 年雨季, 雨水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的平均值均高于 GR1、GR2 和 GR3 的径流, 说明绿色屋顶是雨水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的汇. 2017、2018 和 2019 年雨季, 绿色屋顶对雨水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的浓度平均削减率分别在 50.1% ~ 56.1%、64.5% ~ 79.7% 和 71.5% ~ 79.2% 之间. 多因素方差分析结果表明, 植被覆盖类型和使用时长对绿色屋顶径流中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度的平均值均无显著影响( $P > 0.05$ , 表 3).

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

2017 ~ 2019 年雨季, 雨水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的浓度平均值无显著性差异(表 2). 绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的平均值同时受植被覆盖类型和使用时长的影响, 且不同观测年植被对绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度平均值的影响存在显著差异(表 3). 如图 4(b) 所示, GR3 径流中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的平均值始终高于 GR1、GR2 和雨水, 绿色屋顶基质是  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的源. 2017 年 GR1 和 GR2 径流中  $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$  的平均值低于雨水[(2.15 ± 1.80)  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ], 但在 2018 年和 2019 年高于雨水. 因此, GR1 和 GR2 在 2017 年是  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的汇(浓度平均削减率分别为 71.4% 和 99.5%), 但在 2018 和 2019 年是  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的源. 本实



相同大写字母表示同一绿色屋顶径流中污染物浓度无显著年际差异( $P > 0.05$ ); 相同小写字母表示同一观测年不同植被覆盖绿色屋顶径流中污染物浓度无显著差异( $P > 0.05$ ), 下同

图 4 不同植被覆盖绿色屋顶径流营养盐年际变化

Fig. 4 Variations in the nutrient concentrations of runoff from the green roofs

验期内, 各绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的平均值均逐年增加. 其中, 2019 年 GR1 径流中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的平均值显著高于 2017 和 2018 年( $P < 0.05$ ); 2018 年和 2019 年 GR3 径流中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的平均值也显著高于 2017 年( $P < 0.05$ ).

### 2.3.3 磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ )

如表 2 所示, 2017 ~ 2019 年雨季雨水中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度的平均值无显著年际差异. GR1、GR2 和 GR3 径流中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度的平均值均高于雨水, 绿色屋顶均为  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的源[图 4(c)]. GR1、GR2 和 GR3 径流

表3 植被类型和使用时长对绿色屋顶径流水质的影响<sup>1)</sup>

Table 3 Significance of the effects of vegetation type and experimental year

影响因素	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	DCr	DNi	DCu
植被类型	n. s	s	s	n. s	s	s
使用时长	n. s	s	s	n. s	s	s
植被类型 × 使用时长	n. s	s	s	n. s	n. s	n. s

1) s 表示在  $P < 0.05$  水平下差异显著, n. s 表示差异不显著

中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度的平均值同时受植被类型和使用时长的影响,且不同观测年植被对绿色屋顶径流中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度平均值的影响存在显著差异(表3). GR1 和 GR3 径流中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度的平均值无显著年际变化 ( $P > 0.05$ ). 然而, 2017 年 GR2 径流中  $\rho(\text{PO}_4^{3-}$ -P) 的平均值 [ $(0.065 \pm 0.049) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ] 显著低于 2018 年 [ $(0.165 \pm 0.090) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ] 和 2019 年 [ $(0.290 \pm 0.119) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]. 2017 年 GR1 和 GR2 径流  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度平均值略低于 GR3, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ ). 然而, 2018 年和 2019 年 GR1 和 GR2 径流  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度平均值均明显高于 GR3, 2019 年 GR2 径流中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度平均值显著高于 GR1 和 GR3 ( $P < 0.05$ ).

#### 2.4 不同植被绿色屋顶径流重金属浓度年际变化

2017~2019 年实验期雨水中的 DCr、DNi 和 DCu 浓度的平均值均无显著的年际变化(表2). 各绿色屋顶径流中 DCr、DNi 和 DCu 浓度的平均值在 2017~2019 年均高于雨水(图5), 绿色屋顶是这些重金属的源. 2017~2019 年, GR1、GR2 和 GR3 径

流中 DCr 浓度的平均值均没有显著的年际差异, 植被类型对各绿色屋顶径流中 DCr 浓度的平均值也无显著影响 ( $P > 0.05$ , 表3). 然而, 使用时长对各绿色屋顶径流中 DNi 和 DCu 浓度的平均值均有显著影响. 2018 年各绿色屋顶径流中 DCu 和 DNi 浓度的平均值均高于 2017 年和 2019 年 ( $P < 0.05$ ). 种植马齿苋可能会增加绿色屋顶径流中重金属的浓度, 2017~2019 年, GR2 径流中 DCr、DNi 和 DCu 浓度的平均值均高于 GR1 和 GR3.

### 3 讨论

#### 3.1 植被和使用时长对绿色屋顶径流营养盐浓度影响

本实验 3 个绿色屋顶均为雨水中  $\text{NH}_4^+$ -N 的汇, 且浓度平均削减率在 50% 以上. 不同植被绿色屋顶径流  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度的平均值在 2017~2019 年雨季均接近且无显著性差异, 表明绿色屋顶植被和使用时长对  $\text{NH}_4^+$ -N 吸附的影响有限<sup>[28]</sup>. 基质中的硝化反应、离子交换和基质吸附可能是造成绿色屋顶径流中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度低于雨水的主要因素<sup>[29,30]</sup>, 本研究结果与前人的一致<sup>[19,31]</sup>.

2017 年雨季, 佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度的平均值均明显低于对照绿色屋顶, 植物吸收和固定可能是造成有植物绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度较低的主要原因<sup>[13,14,16,24]</sup>. Johnson 等<sup>[32]</sup> 的研究表明, 绿色屋顶对营养盐的滞留能力受植物对营养盐需求的影响, 绿色屋顶生物量与  $\text{NO}_3^-$ -N 的滞留能力呈正相关, 而对磷的滞留能力无显著影响. 这可能是造成 2017 年生物量更大的马齿苋绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度平均值明显低于佛甲草绿色屋顶, 而二者径流中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度平均值相近的主要原因.

有研究认为<sup>[18,21]</sup>, 绿色屋顶基质中营养盐会随径流淋出, 且径流中营养盐浓度会随使用时长增加而降低. 然而, 本研究的监测结果显示, 各实验绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度的平均值在 2018 年和 2019 年均明显高于 2017 年. Wang 等<sup>[13]</sup> 的研究指出, 绿色屋顶基质中有机质会通过矿化逐渐成为可溶性物质, 从而增加径流中污染物的含量. 这可

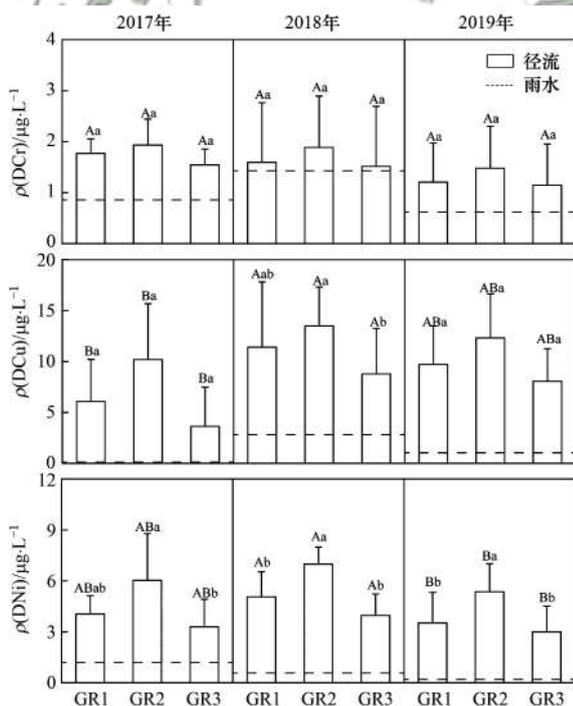


图5 不同植被覆盖绿色屋顶径流重金属年际变化

Fig. 5 Variations in the heavy metal concentrations of runoff from the green roofs

能是造成 2018 年和 2019 年对照绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度显著高于 2017 年的主要原因<sup>[13,14,33]</sup>. 2018 年和 2019 年佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度均显著低于对照绿色屋顶,表明植物可有效吸收和固定基质因矿化产生的  $\text{NO}_3^-$ -N. 此外,植物的生长情况对绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度有重要影响. 2017 ~ 2019 年雨季,马齿苋绿色屋顶植物生长状况良好,其径流中的  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度相近且无显著的年际差异. 然而,2019 年佛甲草绿色屋顶植物生长情况极差(地上生物量不足 2017 年的十分之一),其径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度平均值显著高于 2017 年和 2018 年.

2017 ~ 2019 年雨季,雨水中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的浓度均明显低于各绿色屋顶径流. 有研究表明,基质风化和有机质的矿化可能是绿色屋顶径流中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的主要来源<sup>[14,34,35]</sup>. 与 2017 年相反,2018 年和 2019 年佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度平均值均高于对照绿色屋顶,这表明植被对绿色屋顶径流  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度的影响受使用时长影响. 佛甲草和马齿苋绿色屋顶未收割,2017 年和 2018 年的植物残体、产生枯落物和分泌物会增加绿色屋顶基质中的有机质含量. 有机质矿化可以产生  $\text{PO}_4^{3-}$ -P<sup>[32]</sup>,植物残体腐化产生的腐植酸也可能通过同晶替代作用等方式降低基质对  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的固定<sup>[36,37]</sup>,这可能是造成 2018 年和 2019 年佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度平均值高于对照绿色屋顶的原因. 相较多年生的佛甲草,每年的重新栽植和 2018 年蚱壳虫侵害给马齿苋绿色屋顶引入了更多的有机质,磷的归还和释放大于其他两种绿色屋顶. 这可能是造成马齿苋绿色屋顶径流  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度平均值逐年显著增加和 2019 年显著高于佛甲草和对照绿色屋顶的主要原因.

### 3.2 植被和使用时长对绿色屋顶径流重金属浓度影响

本研究各绿色屋顶径流中 DCr、DNi 和 DCu 浓度的平均值均高于雨水,说明绿色屋顶均是这些重金属的源,其他研究者在不同地区的研究也得到了相近的结果<sup>[15,38,39]</sup>. 然而,与前人的研究不同<sup>[15,16,40]</sup>,本研究中佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中 DCr、DNi 和 DCu 浓度的平均值并未低于对照绿色屋顶,马齿苋绿色屋顶径流中的 DNi 和 DCu 浓度的平均值甚至显著高于对照绿色屋顶.

相较 Vijayaraghavan 等<sup>[15]</sup>的连续人工降雨实验,自然降雨条件下植物的动态变化可能是造成本研究佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流重金属浓度高于对照绿色屋顶的主要原因. 佛甲草和马齿苋绿色屋

顶径流中较高的重金属浓度可能由以下 3 个原因造成:①为促进植物吸收,植物根系分泌物会将基质中重金属和有机物的复合物转化为溶解态<sup>[41,42]</sup>. 植物活动增加了绿色屋顶基质里溶解态重金属的含量,但由于绿色屋顶植物根系较弱,不能完全吸收和固定这些溶解态重金属,超出植物吸收和固定能力的溶解态重金属会随径流淋出;②由于本研究未收割植物,被植物吸收和固定的重金属可能随枯落物分解释放进入径流<sup>[43]</sup>;③降雨期间植物表面会吸附部分大气中的颗粒物和重金属,这些污染物可能随雨水冲刷进入径流<sup>[44,45]</sup>. 生物量更大且每年重复种植的马齿苋绿色屋顶可能会比佛甲草和对照绿色屋顶吸附更多空气中的污染物且引入更多的外源物质,这可能是造成马齿苋绿色屋顶径流中重金属浓度最高的主要原因.

### 3.3 建议与展望

在本研究 3 a 的监测期内,实验绿色屋顶径流水质并未随使用时长有明显改善,植物生长状况和动态变化均对绿色屋顶的径流水质有重要影响. 选用多年生植物、维护植物健康生长和在雨季结束后进行收割可能可以减少植物对绿色屋顶径流水质的消极影响. 除植被和使用时长的影响外,绿色屋顶的径流水质还受基质类型及厚度、施肥灌溉、气象条件和实验区周边环境等因素影响<sup>[9,46,47]</sup>. 因此,应根据当地气候条件、维护方式、经济可行性和建筑承载能力等合理配置绿色屋顶,并对绿色屋顶径流水质进行长期监测.

## 4 结论

(1) 绿色屋顶植被类型和使用时长对径流中  $\text{NH}_4^+$ -N 和 DCr 的浓度影响不显著 ( $P > 0.05$ ),但对径流中  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、DNi 和 DCu 的浓度均有显著影响 ( $P < 0.05$ ).

(2) 观测期内,实验绿色屋顶均为  $\text{NH}_4^+$ -N 的汇,但均为  $\text{PO}_4^{3-}$ -P、DCr、DCu 和 DNi 的源. 对照绿色屋顶始终为  $\text{NO}_3^-$ -N 的源,马齿苋和佛甲草绿色屋顶在 2017 年为  $\text{NO}_3^-$ -N 的汇,但在 2018 年和 2019 年为  $\text{NO}_3^-$ -N 的源.

(3) 观测期内,对照绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度平均值逐年增加,佛甲草和马齿苋绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度的平均值始终低于对照绿色屋顶. 生物量较大的马齿苋绿色屋顶径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度平均值低于佛甲草. 马齿苋和佛甲草绿色屋顶径流中  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度平均值在 2017 年低于对照绿色屋顶,但在 2018 年和 2019 年高于对照绿色屋顶.

(4)各绿色屋顶径流中 DCu 和 DNi 浓度平均值在 2018 年增加并在 2019 年降低。马齿苋绿色屋顶径流中 DCr、DCu 和 DNi 浓度的平均值在观测期内均明显高于佛甲草和对照绿色屋顶。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报, 2005, **25**(12): 3225-3230.  
Ren Y F, Wang X K, Han B, *et al.* Chemical analysis on stormwater-runoff pollution of different underlying urban surfaces [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(12): 3225-3230.
- [ 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 ] 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.
- [ 4 ] Rowe D B. Green roofs as a means of pollution abatement[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(8-9): 2100-2110.
- [ 5 ] Cook L M, Larsen T A. Towards a performance-based approach for multifunctional green roofs: an interdisciplinary review [J]. *Building and Environment*, 2021, **188**, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107489.
- [ 6 ] Shafique M, Kim R, Rafiq M. Green roof benefits, opportunities and challenges - A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, **90**: 757-773.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 缪丽萍, 张千千. 绿色屋面降雨径流水质源汇特征及污染源解析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(5): 1940-1949.  
Miao L P, Zhang Q Q. Characteristics of source and sink of runoff in green roof and the pollutant source analysis [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(5): 1940-1949.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] Buffam I, Mitchell M E. Nutrient cycling in green roof ecosystems [A]. In: Sutton R K (Ed.). *Green Roof Ecosystems* [M]. Cham: Springer, 2015.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Beecham S, Razzaghmanesh M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate [J]. *Water Research*, 2015, **70**: 370-384.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] Berndtsson J C, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(3): 369-380.
- [ 20 ] 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.
- [ 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 ] Gong Y W, Yin D K, Li J Q, *et al.* Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **687**: 505-515.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] Zhang S H, Zhang J J, Yue T J, *et al.* Impacts of climate change on urban rainwater harvesting systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **665**: 262-274.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] 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.

- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [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] 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.
- [34] Jennett T S, Zheng Y B. Component characterization and predictive modeling for green roof substrates optimized to adsorb P and improve runoff quality: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 988-999.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Yang X Y, Chen X W, Yang X T. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, **187**: 85-91.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Kim S, Lim H, Lee I. Enhanced heavy metal phytoextraction by *Echinochloa crus-galli* using root exudates [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, **109**(1): 47-50.
- [42] Ghori Z, Ifikhar H, Bhatti M F, *et al.* Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soil [A]. In: Ahmad P (Ed.). *Plant Metal Interaction* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2016. 385-409.
- [43] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. *生态学报*, 2014, **34**(14): 3807-3819.  
Li Q, Zhou D W, Chen X Y. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(14): 3807-3819.
- [44] Cai M F, Xin Z B, Yu X X. Particulate matter transported from urban greening plants during precipitation events in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 1648-1658.
- [45] 卢绘, 张银龙, 吴永波. 植物叶面吸收污染物机制研究进展[J]. *环境化学*, 2020, **39**(12): 3371-3383.  
Lu H, Zhang Y L, Wu Y B. Research progress on foliar absorption mechanism of pollutants [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(12): 3371-3383.
- [46] 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.
- [47] 章孙逊, 张守红. 基质类型及厚度对绿色屋顶径流量和水质影响[J]. *中国水土保持科学*, 2021, **19**(2): 117-126.  
Zhang S X, Zhang S H. Impacts of types and depth of substrates on quantity and quality of runoff from green roofs[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, **19**(2): 117-126.

## CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM <sub>2.5</sub> Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region .....	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM <sub>2.5</sub> Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China .....	HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> During COVID-19 Control in Suzhou .....	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 .....	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing .....	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM <sub>2.5</sub> in Baoding City in Winter .....	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> in Jiangbei New Area, Nanjing .....	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi .....	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transport and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example .....	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis .....	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020 .....	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province .....	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn .....	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan .....	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City .....	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China .....	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River .....	WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia .....	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism .....	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors .....	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai .....	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake .....	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks .....	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area .....	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-ji, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin .....	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water .....	CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 .....	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City .....	WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years .....	GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China .....	TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data .....	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution .....	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution .....	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water .....	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing .....	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Autochthonic Photoelectron .....	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System .....	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions .....	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis .....	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020 .....	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland .....	SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau .....	WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China .....	LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province .....	ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin .....	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey ( <i>Rhinopithecus roxellana</i> ) Habitat in Shennongjia Mountains .....	YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation .....	XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice .....	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments .....	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai .....	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops .....	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing .....	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018 .....	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data .....	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)