

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚 (1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣 (1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰 (1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚 (1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余 (1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉 (1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰 (1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊 (1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀 (1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰 (1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲 (1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣 (1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰 (1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超 (1645)
南昌市扬尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任 (1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰 (1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌 (1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新 (1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬 (1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫 (1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高 (1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠 (1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民 (1726)
湛江湾沉积物中六六六 (HCHs)、滴滴涕 (DDTs) 有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中 (1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳 (1742)
溶解性有机物 (DOM) 与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析 (EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪 (1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安 (1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生 (1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏 (1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳 (1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华 (1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲 (1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓 (1811)
金属有机框架 MIL-53 (Fe) 可见光催化还原水中 U (VI)	闫增元, 刁海玲, 袁立永 (1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞 (1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政 (1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖 (1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕 (1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂 (1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟 (1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚 (1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启 (1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹 (1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良 (1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳 (1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand (1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔 (1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪 (1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮 (N ₂ O) 浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波 (1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋 (1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹 (1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣 (1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥 (1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青 (1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏 (1990)
《环境科学》征订启事 (1612)	《环境科学》征稿简则 (1787)
信息 (1663, 1796, 1833)	

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价

李俊生¹, 尹海伟^{2*}, 孔繁花¹, 陈佳宇¹, 邓金玲¹

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023; 2. 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093)

摘要: 日益频发的城市内涝灾害引起了社会各界的广泛关注, 其主要原因是快速城市化导致的不透水面增加. 绿色屋顶能够有效增加城市透水面积, 进而从源头上控制雨水径流, 具有重要的生态环境效益. 本文以南京市金陵小学行政楼的绿色屋顶为研究区, 收集了17个月(2016-06~2017-10)中的76起降雨与径流数据, 探讨了场地尺度上绿色屋顶的综合径流调控能力, 辨识了影响其径流调控能力的主要因素, 并基于生命周期评价理论与方法对其30年生命周期下的雨洪调控效益进行了定量评价. 结果表明: ①该绿色屋顶的平均截流率为62.7%, 可有效削减雨水径流量和洪峰流量、延缓径流发生时间和峰现时间. ②绿色屋顶对于中小型降雨具有较强的截流能力, 但当其滞留能力达到饱和状态或未完全恢复时, 即使是小型降雨, 其截流能力也会大幅降低. ③绿色屋顶径流调控能力的主要影响因素为降雨量、降雨强度和生长基质含水量. ④绿色屋顶建设的成本效率为12.51元·m⁻³, 费效比为5/12(0.41), 经济效益较高. 本研究结果可为绿色屋顶的规划建设、推广普及政策制定提供重要的科学依据和决策参考.

关键词: 绿色屋顶; 雨洪调控; 决策树; 截流率; 成本效益

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1803-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809050

Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis

LI Jun-sheng¹, YIN Hai-wei^{2*}, KONG Fan-hua¹, CHEN Jia-yu¹, DENG Jin-ling¹

(1. International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Increasingly frequent urban waterlogging disasters, which are mainly caused by the increase in impervious surfaces due to rapid urbanization, have attracted public attention. Green roofs are conducive to increasing the urban pervious surface area to control sources of runoff, which has great significance for the ecological environment. This study uses the green roof of the administrative building of Jinling Primary School in Nanjing as the study area. 76 rainfall-runoff events collected over 17 months (2016-06-2017-10) were used to calculate the comprehensive runoff control ability and factors influencing the green roof in the context of the site scale. Based on life cycle assessment theory, the benefits of stormwater regulation over its 30-year life cycle were quantitatively evaluated. The results show that: ① The average retention of the green roof was 62.7%, which could have a significant impact on runoff and peak flow, reducing the runoff time and delaying the flood peak. ② The green roof has a strong ability to retain runoff during small and medium rainfall; however, this ability becomes low when the retention capacity is saturated or not fully recovered, even in small rainfall-runoff events. ③ The main factors affecting the retention ability of the green roof are the total rainfall, rainfall intensity, and water content of the growth substrate soil. ④ The green roof has great economic benefits, with a construction cost of about 12.51 yuan·m⁻³ and a return on investment of 0.41. The results of this study can provide an important scientific basis and decision-making reference for the planning and construction of green roofs and the promotion of related policies.

Key words: green roof; stormwater regulation; regression tree; retention; cost-benefit

随着我国城镇化的快速推进, 城市不透水面迅速增加, 致使原有的自然排水体系与水循环系统遭到破坏, 严重削弱了城市的雨洪调控能力, 极易造成城市洪涝灾害^[1~3]. 在建筑密度大、土地供应紧张的城市主城区增加透水面将非常困难^[4]. 然而, 占城市不透水面40%~50%的城市建筑屋顶在我国多数城市均“素面朝天地”, 屋顶空间未能很好地开发利用. 因此, 因地制宜地进行屋顶绿化, 可以显著增加城市绿地面积, 增强绿地等透水面的雨洪调控能力, 进而有效提升城市应对城市内涝灾害的弹性^[5,6].

绿色屋顶(green roof), 又称为生态屋顶或种植屋面, 是指基于普通屋顶表面, 在生长基质上种植植物的一种绿化方式^[7,8]. 作为海绵城市建设中一

种重要的源头控制技术和具有潜在成本效益的雨洪管理措施^[9,10], 绿色屋顶能够通过屋顶水平上储存和控制雨水来降低城市洪水发生的风险^[11], 目前已成为缓解城市雨洪的有效方式^[12,13]. 根据生长基质的厚度不同, 绿色屋顶通常分为两类, 即生长基质厚度小于等于15 cm的粗放型绿色屋顶(extensive green roof, EGR)和生长基质厚度大于15 cm的精细型绿色屋顶(intensive green roof, IGR)^[7,8]. 由于EGR具有重量轻、成本低、维护成本低等优势, 因此绝大多数新建绿色屋顶属于粗放

收稿日期: 2018-09-06; 修订日期: 2018-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670470, 51878328)

作者简介: 李俊生(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为绿色屋顶功能与生态系统服务, E-mail: jsli_nju@163.com

* 通信作者, E-mail: qzyinhaiwei@163.com

型绿色屋顶,同时 EGR 也是现阶段相关研究的重点^[2,14]。

尽管绿色屋顶滞留和截流雨水的能力得到了学者的广泛认同,但是在不同地区、不同环境下其截流能力变化幅度较大^[7,15]。例如,Stovin 等^[16]利用英国谢菲尔德市 29 个月的降雨数据,分析了实验型绿色屋顶的雨洪调控能力,其平均截流率为 50.2%;Razzaghamanesh 等^[17]的研究发现,在干旱气候条件下,粗放型绿色屋顶的平均截流率为 74.02%;Nawaz 等^[18]分析了温带气候下 30 起降雨事件,发现绿色屋顶截流率范围在 3.6%~100%,平均截流率为 66%。与此同时,国内外学者普遍认为绿色屋顶的截流率与生长基质厚度、屋顶坡度、降雨特征和雨前干旱时间等因素有关^[19]。Teemusk 等^[20]的研究发现,当降雨强度属于中小雨时,绿色屋顶的平均截流率为 87%,但在大暴雨时,绿色屋顶的截流能力会大大减弱;Stovin 等^[21]发现雨前干旱时间的增长可以提高绿色屋顶的雨水滞留能力。Lee 等^[22]的研究发现,生长基质为 200 mm 深时,绿色屋顶截流率变化范围为 42.8%~60.8%,生长基质为 150 mm 深时,截流率为 13.8%~34.4%。然而,目前多数研究均是基于小面积实验性绿色屋顶,针对真实绿色屋顶的研究尚不多见;其次多数研究采用的降雨数据均来自于人工模拟数据或区域通用气象站,忽略了降雨的时空不连续性,且选取的降雨事件偏少,未能进行长期观测,致使所得结论缺乏足够的说服力,尚难以有效指导目前国内的海绵城市建设。

此外,得益于其自身的多种生态环境效益,绿色屋顶建设目前已成为世界许多国家可持续发展策略中的重要一环^[23]。但是,绿色屋顶的推广普及与其建设成本和收益紧密相关。Carter 等^[23]的研究发现绿色屋顶的净现值比传统屋顶高 10%~14%,绿色屋顶在未来极具经济吸引力。Bianchini 等^[24]的研究发现绿色屋顶的建设是一项低风险投资,其所带来的经济效益远高于潜在的经济损失。然而,在探究绿色屋顶的成本效益方面,大多数学者只定性分析了其经济效益,并未通过真实建设成本去估算其成本效益。

本文以在南京市金陵小学行政楼楼顶建设的模块化绿色屋顶作为研究区,利用 Hobo U30 微气象观测站和 CR1000 降雨径流观测系统采集的气象和屋顶径流数据,分析了场地尺度上绿色屋顶的综合径流调控能力,探讨了其在典型降雨事件下的径流响应过程;通过决策树分类算法辨识了影响绿色屋顶雨洪调控能力的主要因素;基于生命周期评价

(life cycle assessment, LCA)方法分析了绿色屋顶 30 年生命周期下的成本效率与费效比(return on investment, ROI),评估场地尺度上绿色屋顶建设的成本效益,以期绿色屋顶的规划建设、推广普及政策制定提供重要的科学依据和决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文以实建于南京市栖霞区金陵小学(32°7'N, 118°59'E)的绿色屋顶为研究区[图 1(a)]。南京市属于北亚热带湿润气候带和季风环流的海洋性气候区,季风显著,冬冷夏热,四季分明,日照充足,水资源充沛。年平均气温为 15.4℃,相对湿度 76%。年降水量 1 100 mm 左右,降水日数年平均在 110 d 左右。

实建的绿色屋顶位于南京市金陵小学行政楼屋顶,总面积约为 1 016 m²,其中绿色屋顶面积约为 509 m²,裸屋顶面积约为 507 m²,屋顶坡度为 2% [图 1(b)和 1(d)]。绿色屋顶为模块化安装,每个模块(长×宽×高:50×33×11 cm)都包含 10 cm 的植被层(佛甲草,由于景天属植物独特的景天酸代谢过程和叶肉储水功能和极强的环境适应能力,因而成为世界上广泛使用的绿色屋顶植物^[25]),8 cm 厚的基质层(由 30%的蛭石,30%的长有泥炭藓的土壤,30%的陶粒以及 10%的有机质组成),一层 0.1 cm 厚的无纺布过滤层以及 2.9 cm 厚的多功能储水与排水层[图 1(c)]。

1.2 实验仪器与数据采集

本文分别在绿色屋顶和裸屋顶中间位置设置了两个观测站,每一个观测站均安装了 Hobo U30 微气象观测系统和 CR1000 降雨径流观测系统(屋顶径流数据主要来自于在南侧裸屋顶和绿色屋顶落水管上安装的 2 台电磁流量计),分别对降雨量(mm)、空气温度(℃)、土壤含水量(%)、径流(L·min⁻¹)等因子进行了连续观测[图 1(d)和表 1]。数据采集间隔为 6 s,数据存储间隔为 1 min。本文选取 17 个月(2016 年 6 月 1 日至 2017 年 10 月 31 日)的连续数据进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 场地尺度上绿色屋顶径流调控能力分析

首先,以降雨事件间隔超过 6 h 作为阈值对所观测到的降雨事件进行划分^[26,27],本文共得到 76 起独立降雨事件,其降雨量范围在 0.3~146.9 mm (由于单次累积降雨量小于 0.3 mm 的降雨事件通常不会产生地表径流,故本文未做统计)。然后,测算了单次降雨事件的降雨量(total rainfall depth,

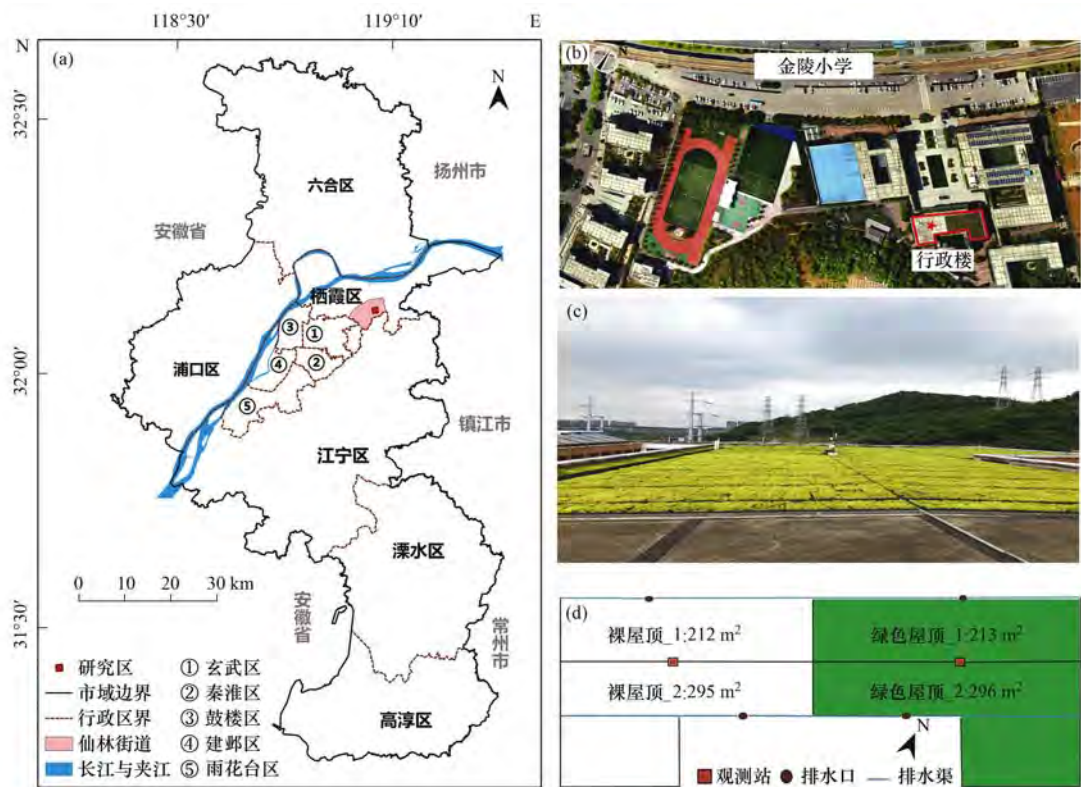


图1 研究区示意
Fig. 1 Map of the study area

表1 观测仪器参数

Table 1 Main sensor parameters of the observing station

仪器	传感器	型号	参数	精度	分辨率
CR1000	降雨传感器	TE525MM	降雨	$\pm 1\%$ ($\leq 10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.1 mm
CR1000	土壤湿度传感器	CS616	土壤湿度	$\pm 2.5\%$ VWC	0.1% VWC
电磁流量计	流量传感器	米科 DN25	降雨径流	0.5%	$0\sim 26\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
Hobo U30	空气温度传感器	S-THB-M002	空气温度	$\pm 0.2^\circ\text{C}$ (25°C)	0.02°C (25°C)

TR)(mm)、降雨历时(rain duration, t , min)、平均降雨强度(i , $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、最大降雨强度(R_p , $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)、降雨重现期(T , a)、土壤含水量(volumetric soil water content, VWC, %)和雨前干旱时间(antecedent dry weather period, ADWP, d)等7个降雨特征参数,并基于观测的径流数据计算了单次降雨事件的截流率(PR, %)、截流量(R , mm)、延缓径流发生时间Lag-time1(min)、延缓峰现时间Lag-time2(min)和径流峰值削减率(peak-attenuation, PA, %).其中:平均降雨强度等于降雨量和降雨历时的比值,降雨重现期根据2014年南京市城管局修订的南京市暴雨强度公式[式(1)]计算所得.同时,根据我国气象部门降雨强度相关标准,将76起降雨事件按照降雨量的大小分为5类[小雨($<10\text{ mm}$),中雨($10\sim 25\text{ mm}$),大雨($25\sim 50\text{ mm}$),暴雨($50\sim 100\text{ mm}$),大暴雨($\geq 100\text{ mm}$)],并进行了分类统计分析.

南京市暴雨强度计算公式如下^[28]:

$$i = \frac{64.300 + 53.800 \lg T}{(t + 32.900)^{1.011}} \quad (1)$$

式中, t 为降雨历时,min; T 为降雨重现期,a.
单次降雨事件的截流率(precipitation retention, PR, %)计算公式如下^[18]:

$$\text{PR} = (1 - \text{Flow2}/\text{Flow1}) \times 100\% \quad (2)$$

式中,Flow1和Flow2分别为裸屋顶一侧和绿色屋顶一侧的径流量, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$.

由式(2)可得绿色屋顶单次降雨事件的截流量(R , mm),即:

$$R = (\text{TR} \times \text{PR})/100 \quad (3)$$

单次降雨事件的径流峰值削减率(peak-attenuation, PA, %)计算公式如下:

$$\text{PA} = \left(1 - \frac{\text{Peak-flow2}}{\text{Peak-flow1}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中,Peak-flow1和Peak-flow2分别为裸屋顶一侧

和绿色屋顶一侧的洪峰流量, $L \cdot \min^{-1}$ 。

1.3.2 基于决策树分类算法的绿色屋顶雨洪调控效应影响因子辨识

决策树分类的基本思想是通过比较各训练样本数据中属性信息增益比的大小, 取其中信息增益比最大但不低于所有属性平均值的属性作为决策树的一个分支节点, 以此类推, 最终形成决策分类树^[29], 该方法不仅分类准确性高并且可以处理连续的数值数据, 非常适合辨识出多因素共同影响下占据主导作用的因素^[30]。因而, 本文基于新西兰怀卡托大学开发的数据挖掘工具 Weka, 采用决策树分类算法中的 C4.5 算法^[31], 对所选的 76 起降雨事件进行分类统计分析, 以辨识影响绿色屋顶雨洪调控效应的主要影响因子。在 Weka 软件中, 输入的属性数据有雨前干旱时间 (ADWP)、生长基质含水量 (VWC)、降雨历时 (t)、降雨量 (TR)、降雨重现期 (T)、平均降雨强度 (i)、最大降雨强度 (R_p), 分类目标变量为截流率 (PR)。

1.3.3 基于生命周期评价的绿色屋顶成本效益计算

生命周期评价 (LCA) 作为一种评价产品环境表现的工具被广泛应用于一些国家的绿色建筑评价体系。本文基于生命周期评价理论, 采用投入产出比 (费效比), 对场地尺度上绿色屋顶的成本效益进行了定量评价 (根据文献^[32, 33]选取 30 a 作为本文绿色屋顶的生命周期)。首先, 核算绿色屋顶的建设总成本, 主要包括绿化模块运输与安装费, 绿化模块费用, 维护费用, 其中只在前两年对绿色屋顶进行针对性维护 (浇水、拔草等), 后期采取零维护策略 (表 2)。然后, 计算绿色屋顶生命周期内的雨洪调控效应。依据观测数据和公式 (2)、(3), 可得 76 起降雨事件的总降雨量和总径流削减量, 从而得到该绿色屋顶年总径流削减率 (即年总径流削减量和年总降雨量之间的比值)。此外, 由中国气象局发布的南京地理气候特征文件可知, 南京市年平均降雨量约为 1 106 mm。因此, 该绿色屋顶的年总径流削减量可以通过总径流削减率与南京市年平均降雨量的乘积估算。最后, 通过公式 (5)、(6) 计算绿色屋顶 30a 生命周期的成本-效率和投入产出比即费效比 (ROI)。

表 2 30 a 生命周期的绿色屋顶建设成本

建设成本	单价/元	单位	总计/元
运输与安装费	5 000	次	5 000
绿化模块费	120	$\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$	61 080
维护费	50	h	3 250
总费用	—	—	69 330

成本-效率的计算公式如下:

$$E = C/Y \tag{5}$$

式中, E 表示 30 a 生命周期绿色屋顶的成本效率, $\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$; C 表示该绿色屋顶 30 a 生命周期成本, 元; Y 表示 30 a 生命周期的总径流削减量, m^3 。

费效比的基本计算公式如下^[34]:

$$\text{ROI} = C/B \tag{6}$$

式中, B 代表项目产出效益, 元; C 代表 30 a 生命周期的绿色屋顶建设成本, 元。绿色屋顶的产出效益采用年总径流削减量来衡量^[35]。本文通过传统灰色基础设施的工程做法, 以建造一个等容积蓄水池的价格与建设绿色屋顶成本之间的差值当作产出效益。建设蓄水池的费用参考依据为江苏省水利厅关于发布江苏省水利工程人工预算工时标准的通知 (苏水基[2015]32 号) 及 2017 年省水利工程施工机械台费概算基价预算表等资料 (表 3)。

表 3 蓄水池建设成本费用明细

Table 3 Details of reservoir construction costs			
建设成本	类别	单价/元·h ⁻¹	总计/元
人工费	工人数 15 人		
	每日工时 8 h		
	工期 30 d	10.67	38 412
机械费	钢筋调直机 1 台	22.06	
	钢筋切断机 1 台	18.43	
	钢筋弯钩机 1 台	23.03	107 834.4
	振捣机 2 台	184.04	
	电焊机 1 台	17.71	
材料费	钢筋混凝土 (184.67 m ³)	500 元·m ⁻³	92 335
总费用			238 581.4

2 结果与讨论

2.1 基于定点观测的屋顶绿化径流调控能力分析

本文选取的 76 起降雨事件, 降雨量范围在 0.3 ~ 146.9 mm, 平均降雨量为 20.4 mm; 降雨历时范围在 0.3 ~ 57.6 h, 平均降雨历时为 11.1 h; 平均降雨强度范围在 0.052 ~ 39 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 降雨重现期大于 1 a 的有 9 起, 其中最大降雨重现期为 70 a。所选 76 起降雨事件的截流率范围在 0.6% ~ 100%, 平均截流率为 62.7%; 截流量范围在 0.1 ~ 76.7 mm, 平均截流量为 6.7 mm。延缓产流时间 Lag-time1 范围在 0 ~ 697 min, 平均延缓产流时间为 107.3 min; 延缓峰现时间 Lag-time2 范围在 0 ~ 57 min, 平均延缓峰现时间为 9.5 min; 裸屋顶一侧洪峰流量 Peak-flow1 的平均值为 47.17 $L \cdot \min^{-1}$, 绿色屋顶一侧洪峰流量 Peak-flow2 的平均值为 22.04 $L \cdot \min^{-1}$, 平均峰值削减率为 65.61%。经统计可得, 76 起降雨的总降雨量为 1 551.1 mm, 总径流削减量为 508.3 mm, 因此可以得出该绿色屋顶的总

径流削减率为 32.8%，年总径流削减量为 362.8 mm，该绿色屋顶在 30 a 生命周期下的总径流削减量为10 884 mm，即5 539.96 m³。

绿色屋顶在不同降雨量类别下的径流调控能力差异显著。由表 4 可以看出，降雨量小于 10 mm 的事件数目最多，但其占全部降雨量的比例仅为 11.8%，绿色屋顶在面对小雨事件时，截流率和峰值削减率最大，平均为 79.4%。随着降雨量的增加，绿色屋顶截流率和径流峰值削减率整体呈变小趋势；Lag-time1 随着降雨量的增大而增大，但是在

面对大暴雨时，其延缓产流的时间会大大减小，而 Lag-time2 的变化波动较大，总体上看绿色屋顶在面对高降雨强度的事件时，延缓峰现时间的能力并不显著。尽管每一类别降雨事件的降雨特征不同，绿色屋顶的径流调控能力变化范围较大，但是绿色屋顶在大暴雨事件中依旧展现了一定的滞留雨水能力，这说明绿色屋顶在缓解城市洪涝灾害方面可以扮演重要的角色^[36]。而且由于仪器设备故障，本研究缺少了冬季和初春时的观测数据，这可能会导致本文所得平均截流率偏小，低估了绿色屋顶的截流能力。

表 4 不同降雨量类别下绿色屋顶径流调控能力

Table 4 Runoff control ability of the green roof under different rainfall conditions							
降雨量 /mm	降雨次数 /次	总降雨量 /mm	占全部降雨比例 /%	Lag-time1 /min	Lag-time2 /min	PA /%	PR /%
<10(小雨)	48	183.1	11.8	56.7	9.3	79.4	79.4
10~25(中雨)	14	231.8	14.9	126.5	14.8	51.7	44.3
25~50(大雨)	5	172.3	11.1	225.6	11.5	28.1	27.4
50~100(暴雨)	3	201.5	13	268	2	17.7	19.6
≥100(大暴雨)	6	762.4	49.2	187.2	0.8	28.3	23.3
累计	76	1 551.1	—	—	—	—	—

最后，为了探讨绿色屋顶在降雨过程中径流调控能力的变化情况，本节遴选了 4 起典型降雨事件进行对比分析，分别是降雨事件 5、9、35、51。图 2、3 分别展现了在不同降雨情况下绿色屋顶和裸屋顶的径流响应情况。图 2(a) 为发生在 2016-06-21 的短时间小降雨量事件，6 h 内降雨量为 6.5 mm，雨前干旱时间约为 9 d，绿色屋顶生长基质含水量低于 0.1%。由图 2(a) 可见，在降雨前期，裸屋顶一侧产生了明显的径流，而绿色屋顶一侧几乎无径流产生；在降雨进行到大约 260 min 时，降雨强度达到最大，绿色屋顶才产生了径流。从此次降雨事件看来，当绿色屋顶正常运行，滞留能力未达饱和时，其对小降雨事件的截流率可接近 100%，并且绿色屋顶延缓产流时间和削减径流峰值的能力也得到了充分体现。图 2(b) 所示为发生在 2016-06-28 的降雨量仅为 1.4 mm 的事件，从中可以看到，绿色屋顶对于此次降雨的滞留并没有图 2(a) 中的明显。这是由于在事件 9 之前有三场时间间隔较短的降雨(事件 6、7、8)，绿色屋顶的雨水滞留能力并未完全恢复，所以此次降雨的截流率仅为 54%。一般来说，一次降雨结束后绿色屋顶会通过蒸散发来恢复其存储雨水的能力，但是如果两次降雨间隔较短，绿色屋顶存储能力未能完全恢复，就会大大影响其对下一次降雨的截流能力^[37]。

图 3(a) 所选事件为所有 76 起降雨中降雨量最大和降雨重现期最大的一次降雨，发生时间为 2017-06-09，总降雨量 146.9 mm，最大降雨强度为

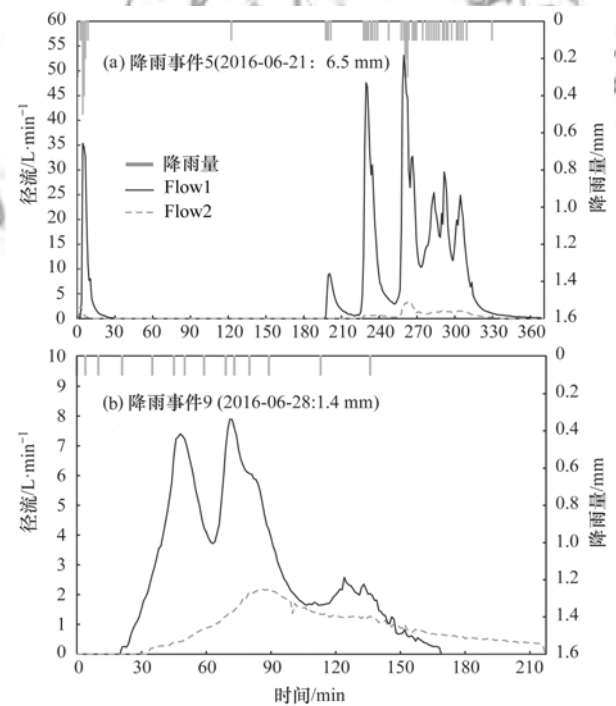


图 2 事件 5 和 9 中的降雨径流响应

Fig. 2 Rainfall-runoff response in events 5 and 9

54 mm·h⁻¹，降雨重现期约 70 a。从中可以看出，在降雨的前 420 min 以内，降雨强度较小，绿色屋顶展现了良好的雨水滞留和峰值削弱能力；但是随着降雨的持续进行，降雨强度逐渐增大，绿色屋顶的调控能力也接近或达到饱和状态，其对雨水的滞留虽然还有一定效果，但是和裸屋顶相比差异已不那么明显。由此可见，绿色屋顶对于降雨量和降雨强度偏大的降雨只具有有限的调控能力，这也说明了

绿色屋顶的径流调控能力不仅和降雨特征有关系, 和其本身的截流能力也有很大关系.

图 3(b) 所选降雨为所有 76 起事件中绿色屋顶截流率最小的一起. 该起降雨的最大降雨强度为 $71.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 截流率仅为 0.6%. 从图 3(b) 可以看出, 在此次降雨过程中, 绿色屋顶和裸屋顶的径流响应曲线基本一致. 相比于图 3(a) 所选降雨, 事件 51 的降雨更为集中, 短时间内降雨强度更大, 这

就导致了绿色屋顶没有充分地响应时间, 并且短时间内的降雨强度远远超过了绿色屋顶的最大截流能力, 所以从图 3(b) 中并未看出绿色屋顶的截流能力. 但是从降雨开始的 180 min 起, 当降雨强度慢慢减弱时, 可以看到绿色屋顶具有明显的延迟产流作用. 由此可见, 绿色屋顶在面对短时间强降雨时, 截流雨水的能力较弱, 但当降雨强度变小后, 绿色屋顶会恢复其一部分径流调控的能力.

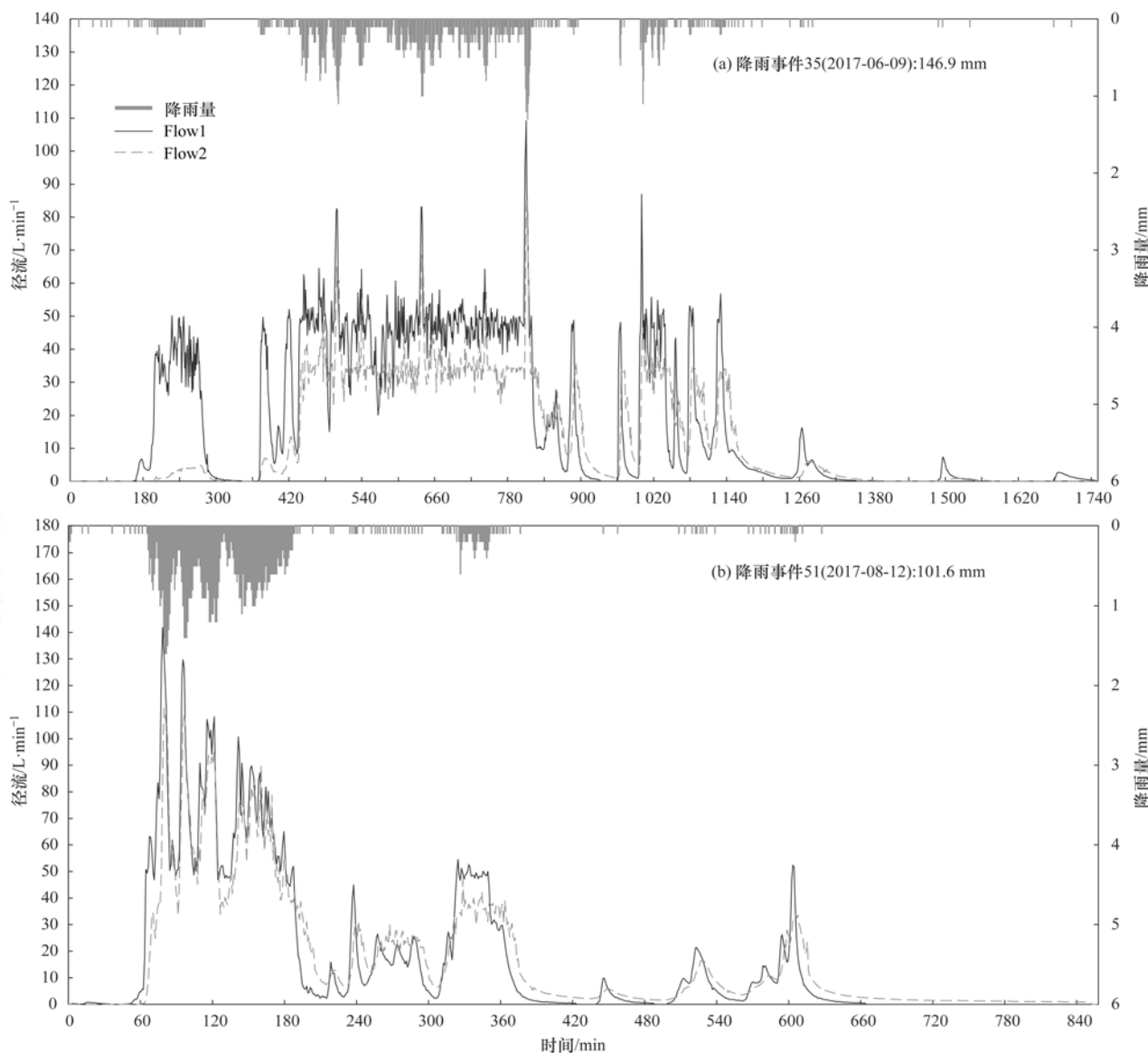


图 3 事件 35 和 51 的降雨径流响应

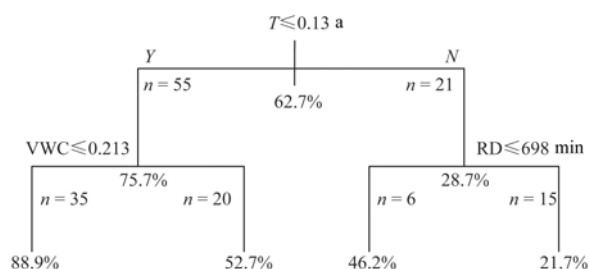
Fig. 3 Rainfall-runoff response in events 35 and 51

2.2 基于决策树方法的绿色屋顶径流调控能力影响因素识别

由图 4 可见, 对绿色屋顶截流率影响最大的因子是降雨重现期 (T), 而降雨重现期本质上是由降雨量和降雨历时共同决定的 [式 (1)], 平均降雨强度又与降雨历时和降雨量直接相关. 因此, 绿色屋顶径流调控能力的主要影响因素为降雨量 (TR)、降雨强度 (i 和 R_p) 和生长基质含水量 (VWC). 当 T

小于等于 0.13 时, 55 起降雨事件的平均截流率为 75.7%; 而其大于 0.13 的 21 起降雨事件的平均截流率仅为 28.7%; 雨前干旱时间 (ADWP) 没有出现在决策树的分类因子中. 这与 Stovin 等^[16] 和 Nawaz 等^[18] 在英国进行的绿色屋顶实验结果基本一致. 而 Nawaz 等^[18] 在对英国利兹的一个场地尺度下屋顶绿化的研究分析表明, 降雨重现期和截流率之间没有明显关系, 这可能是因为 Nawaz 只分析了 30

起降雨事件, 且与所选降雨事件的重现期均较小有关。



Y 和 N 分别表示是与否, n 代表样本数

图 4 针对截流率的决策树分类

Fig. 4 Regression tree for runoff retention

此外, 利用决策树分类算法的一个好处是它不仅是一个分类方法也是一个预测模型, 通过决策树的分类结果, 可以推测出不同降雨情形下绿色屋顶的可能截流率。例如, 图 4 结果表明, 当 VWC 小于等于 0.213 且 T 小于等于 0.13 时, 绿色屋顶可能有最大的截流率 88.9%。当已知一起降雨的重现期时, 可以进而通过分析其降雨历时和绿色屋顶生长基质含水量来估算绿色屋顶的截流能力。这为市政工程师们在设计不同地区绿色屋顶布局时提供了重要的理论与方法支撑。

2.3 基于生命周期理论的绿色屋顶成本效益分析

由 1.3.3 节可知, 本文实建绿色屋顶 30 a 生命周期内的产出效益约为 16.93 万元, 年平均收益约为 5641.71 元。其次, 基于总径流削减效果的绿色屋顶 30 年生命周期成本效率 E 为 $12.51 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$, 而传统灰色基础设施滞留雨水的成本效率约为 $43.07 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$, 明显大于绿色屋顶的成本效率。最后, 该绿色屋顶的费效比约为 5/12, 即 0.41。费效比低, 代表着投入少, 产出多。由此可见, 以绿色屋顶年总径流削减量来衡量其产出效益时, 绿色屋顶已经具有较低的费效比, 从而带来较高的社会效益。实际上绿色屋顶还具有节能减排、去除污染物、降低噪声等其他多种价值, 其所带来的社会效益事实上远大于本文所计算的产出效益。例如 Banting 等^[38]对加拿大多伦多市 50 km^2 屋顶绿化的研究表明, 在考虑绿色屋顶的降温、雨洪管理、建筑节能和净化空气等方面的效益时, 其一次性可降低成本 19.5 亿元, 每年可降低成本约 2.3 亿元。

3 结论

(1) 场地尺度上绿色屋顶的雨水平均截流率为 62.7%, 平均延缓产流时间为 107.3 min, 平均径流峰值削减率为 65.61%; 这表明相比于裸屋顶, 绿

色屋顶具有显著的雨洪调控能力。通过对 4 起典型降雨的径流响应过程分析可知, 绿色屋顶本身滞留能力的限制会大大影响其对降雨的截流作用。

(2) 决策树分类结果表明, 影响绿色屋顶截流率的主要因素是降雨量、降雨强度和生长基质含水量。

(3) 基于 30 年生命周期的绿色屋顶成本效率和费效比分别为 $12.51 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 5/12 (0.41)。由此证明了绿色屋顶的建设潜力与价值, 这也为城市推广普及绿色屋顶提供了经济效益层面的理论依据。

参考文献:

- [1] Bengtsson L. Peak flows from thin sedum-moss roof [J]. *Hydrology Research*, 2005, **36**(3): 269-280.
- [2] Hakimdavar R, Culligan P J, Finazzi M, et al. Scale dynamics of extensive green roofs: quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance[J]. *Ecological Engineering*, 2014, **73**: 494-508.
- [3] Yang W Y, Li D, Sun T, et al. Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **74**: 327-336.
- [4] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, et al. Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **461-462**: 28-38.
- [5] Boulanger B, Nikolaidis N P. Mobility and aquatic toxicity of copper in an urban watershed[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, **39**(2): 325-336.
- [6] Dunnett N, Nolan A. The effect of substrate depth and supplementary watering on the growth of nine herbaceous perennials in a semi-extensive green roof [J]. *International Conference on Urban Horticulture*, 2004, **643**(40): 305-309.
- [7] Berardi U, Ghaffarianhoseini A, Ghaffarianhoseini A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs[J]. *Applied Energy*, 2014, **115**: 411-428.
- [8] 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.
- [9] Getter K L, Rowe D B. The role of extensive green roofs in sustainable development[J]. *Hortscience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 2006, **41**(5): 1276-1285.
- [10] Stovin V, Poë S, Berretta C. A modelling study of long term green roof retention performance[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **131**: 206-215.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [12] 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.
- [13] Stovin V, Vesuviano G, De-Ville S. Defining green roof detention performance[J]. *Urban Water Journal*, 2017, **14**(6): 574-588.
- [14] Carter T, Jackson C R. Vegetated roofs for stormwater

- management at multiple spatial scales[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, **80**(1-2): 84-94.
- [15] Li W C, Yeung K K A. A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective [J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2014, **3**(1): 127-134.
- [16] 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.
- [17] Razzaghamanesh M, Beecham S. The hydrological behaviour of extensive and intensive green roofs in a dry climate[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **499**: 284-296.
- [18] Nawaz R, McDonald A, Postoyko S. Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **82**: 66-80.
- [19] Stovin V. The potential of green roofs to manage urban stormwater [J]. *Water and Environment Journal*, 2010, **24**(3): 192-199.
- [20] 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.
- [21] Stovin V, Dunnett N, Hallam A. Green roofs-getting sustainable drainage off the ground [A]. In: *Proceedings of the 6th International Conference of Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*[C]. Lyon, France, 2007: 1-8.
- [22] Lee J Y, Lee M J, Han M. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **152**: 171-176.
- [23] Carter T, Keeler A. Life-cycle cost – benefit analysis of extensive vegetated roof systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **87**(3): 350-363.
- [24] Bianchini F, Hewage K. Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: a lifecycle approach [J]. *Building and Environment*, 2012, **58**(58): 152-162.
- [25] 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.
- [26] Wong G K L, Jim C Y. Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **70**: 366-378.
- [27] Cipolla S S, Maglionico M, Stojkov I. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 876-887.
- [28] 王诗雅, 巫晓燕, 黄祎静, 等. 南京市暴雨强度公式研究 [J]. *人民长江*, 2016, **47**(S2): 41-44.
- [29] Wu X D, Kumar V, Quinlan J R, *et al.* Top 10 algorithms in data mining[J]. *Knowledge and Information Systems*, 2008, **14**(1): 1-37.
- [30] Tan P N, Steinbach M, Kumar V. 数据挖掘导论: 完整版 [M]. (第二版). 范明, 范宏建, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 83-130.
- Tan P N, Steinbach M, Kumar V. *Introduction to data mining: the full version (2nd ed.)* [M]. Fan M, Fan H J, trans. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011: 83-130.
- [31] Salzberg S L. C4.5: programs for machine learning by J. Ross Quinlan. Morgan Kaufmann publishers, Inc., 1993 [J]. *Machine Learning*, 1994, **16**(3): 235-240.
- [32] Kosareo L, Ries R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs[J]. *Building and Environment*, 2007, **42**(7): 2606-2613.
- [33] Peri G, Traverso M, Finkbeiner M, *et al.* The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: covering the gap [J]. *Energy*, 2012, **48**(1): 406-414.
- [34] Erdogmus H, Favaro J, Strigel W. Return on investment [J]. *IEEE Software*, 2004, **21**(3): 18-22.
- [35] Wu T, Smith R E. Economic benefits for green roofs: a case study of the Skaggs pharmacy building, university of Utah [J]. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2011, **6**(2): 122-138.
- [36] 王书敏, 李兴扬, 张峻华, 等. 城市区域绿色屋顶普及对水量水质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(7): 2026-2032.
- Wang S M, Li X Y, Zhang J H, *et al.* Influence of green roof application on water quantity and quality in urban region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(7): 2026-2032.
- [37] 刘明欣, 代色平, 周天阳, 等. 湿热地区简单式屋顶绿化的截流雨水效应 [J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(2): 620-626.
- Liu M X, Dai S P, Zhou T Y, *et al.* Capacity of extensive green roof to retain rainwater runoff in hot and humid region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(2): 620-626.
- [38] Banting D, Doshi H, Li J, *et al.* Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of Toronto [EB/OL]. <https://mpr.ub.uni-muenchen.de/id/eprint/70526>, 2016-04-09.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)