# 城市绿色空间的雨洪调蓄效益研究进展

阿娜尔 黄甘霖

北京师范大学地理科学学部 北京 100875

**摘要**：为全面系统地了解城市绿色空间雨洪调蓄效益的研究进展与发展趋势，文章通过梳理国内外城市绿色空间雨洪调蓄效益和能力的研究，归纳其在雨水再分配过程中对雨洪调蓄效益的影响，并揭示在径流形成的不同环节中雨洪调蓄效益的影响因素。结果表明：在林冠截留过程中，雨洪调蓄效益受植物种类、叶片特征、修剪形状等多种因素影响，且不同植被的冠层蓄水能力差异很大；在绿地雨水入渗过程中，绿地构型和土壤特性是影响雨洪调蓄效益的主要因素；在地表径流形成过程中，绿色空间的景观格局与径流量显著相关，对城市绿色空间景观格局的合理构建可以实现对城市水文过程的主观调控；城市绿色空间的雨洪调蓄效益研究缺乏小微尺度分析，并且鲜有涉及各因素之间如何相互作用。最后提出研究展望，即探索和完善适合中国本土的雨洪管理模式、建立系统的科学理论和评价指标体系，是城市绿色空间雨洪调蓄效益研究的重要方向。

**关键词**：城市绿色空间；雨洪调蓄；城市生态；效益

DOI：10.12169/zgcsly.2023.02.13.0003

## Research Progress in Stormwater Storage Benefit of Urban Green Spaces

A Naer Huang Ganlin

(Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract**: In order to systematically understand the research progress and development trend in stormwater storage benefit of urban green spaces, this paper reviews the relevant research on storm water storage benefit and capacity of urban green space at home and abroad, summarizes the influence of stormwater redistribution process on stormwater storage benefit, and reveals the influencing factors to stormwater storage benefit in different phases of runoff formation. The results indicate that in the process of canopy interception, stormwater storage benefit is affected by many factors such as plant species, leaf characteristics and pruning shape, and the canopy water storage capacity of various vegetation is much different; In the process of stormwater infiltration, green space configuration and soil characteristics are the main factors affecting the benefit of stormwater storage; In the process of surface runoff formation, there is a significant correlation between the landscape pattern of green space and the runoff, and the rational construction of urban green space landscape pattern can realize the subjective regulation of urban hydrological process. There is a lack of small-scale analysis on the benefit of stormwater storage for urban green spaces, and few studies have been conducted for the interactions between various factors. At the end, the research directions are discussed, and exploring and improving the stormwater management mode suitable for China and establishing a systematic and scientific theory and evaluation index system are recognized as the important directions.

**Keywords**: urban green space; stormwater management; urban ecology; benefits

收稿日期：2023-02-13

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（31670702）

第一作者：阿娜尔（1998-），女，硕士，研究方向为土地资源与区域发展。E-mail：ane0430@163.com

通信作者：黄甘霖（1980-）女，博士，副教授，研究方向为土地资源与区域发展。E-mail：ghuang@bnu.edu.cn

在全球气候变化的背景下，暴雨导致的城市内涝已经成为严重威胁城市安全和居民生活的灾害之一[1]。随着城市化速度的不断加快和规模的快速扩大，城市建设区域内透水性较好的原生自然景观，如林地、耕地、湿地等被人工建筑表面大面积替代，这种不透水下垫面面积的急剧增加，直接或间接地引起水文格局和水文过程的改变，使得城市区域在面对暴雨事件时雨水径流量加大，地表径流速度加快，洪涝灾害风险加剧[2]。为解决城市化发展带来的一系列水文问题，改善城市水环境，城市绿色空间在雨洪调蓄、减轻城市雨洪负担方面的作用逐渐受到关注。

城市绿色空间是由乔木、灌木、草本植物合理布局构成的绿色网络系统[3]，作为城市生态系统的重要组成部分，为我们提供一系列生态系统服务[4]，其中雨洪调节服务是人类从中获取的重要惠益之一。作为修复自然水循环的重要载体，城市绿色空间发挥着冠层截留雨水、减少城市地表暴雨径流、净化雨水质量等重要作用，从而影响城市水文过程，缓解市政排水管网压力，这个过程被称为城市绿色空间的雨洪调蓄。近年来，城市内涝灾害频发，传统雨洪管理模式的不足日益突显，常导致降水时雨水排出多、入渗少，洪水峰现时间早，洪峰流量大，城市排水管网负荷重，面源污染严重等问题。因此，多个以绿色空间为技术核心的雨洪管理理念相继被提出，包括美国的低影响开发、澳大利亚的水敏感城市、英国的可持续排水系统以及我国的海绵城市等，同时越来越多的绿地建设指标中引入了雨洪管理作为控制目标。随着雨洪管理新模式的发展，城市排水实现了从传统的雨水集中管网末端处理，转为分散的绿地源头控制，由此实现排出少、入渗多、洪水峰现时间延后、洪峰流量小、控制面源污染的径流特点，间接达到减小城市内涝风险、补充地下水、修复自然水循环、缓解城市热岛等生态效益，城市绿色空间的雨洪调蓄功能逐渐成为城市生态学中的热点研究方向之一。

目前，已有很多研究围绕绿色空间雨洪调蓄的影响因素、形成机制等进行了深入探讨。然而，这些研究往往聚焦于雨洪调蓄过程中的某个环节，城市绿色空间具体在缓解城市内涝中扮演了什么角色，雨洪调蓄的系统性过程是怎样的等相关研究较少。因此，本文基于中国知网数据库和 Web of Science 数据库，分别以“城市绿色空间、绿地、绿色基础设施、公园、雨洪、径流、效益、能力”“urban，city，greenspace，green infrastructure，parks，stormwater management，rainfall management，ability，capability，efficiency，effectiveness”为检索词进行检索，以城市绿色空间雨水再分配的关键过程为梳理依据，从植被林冠截留、绿地土壤入渗、绿地景观格局下的径流产生 3 个方面（图 1）对现有的城市绿色空间及其雨洪调蓄效益研究进行综述，为更好地实现城市雨洪管理的科学预测和精准调控、优化城市绿色空间格局提供科学参照和理论支持，并对未来绿色空间雨洪调蓄效益研究发展提出展望。

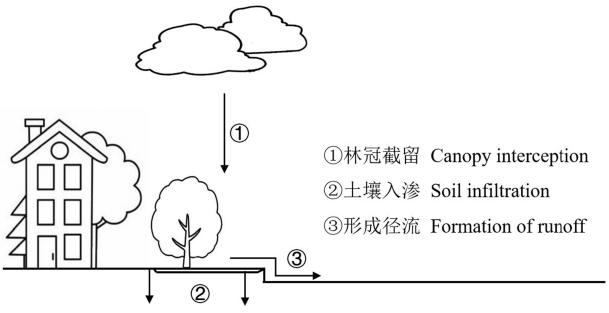



图 1　雨水再分配主要过程示意图

## 1　植被林冠截留研究

绿地的植被冠层是大气降水与城市生态系统接触作用的第一面层，林冠截留也是降水再分配的第一步[5]。植被冠层通过改变降水的空间分布格局，对径流的形成与发展产生重要影响[6]。与森林植被相比，城市绿地的突出特点是占地比例小、覆盖不连续[7]，加之城市小气候条件的特殊性[8]，二者在截留雨水时的表现具有一定的差异。在森林植被林冠截留研究的基础上，城市绿地林冠截留研究得到了迅速发展，主要从不同种植物的冠层截留效果及其影响因素两个方面展开研究，研究方法主要有实测法、浸水法、模型法（表 1）。

### 1.1　林冠截留效果

不同种类植被的冠层蓄水能力之间差异很大[9]，植被冠层对雨水的截留总量在年降水总量

表 1 绿地林冠截留常用研究方法

| 方法 | 原理 | 特点 |
|---|---|---|
| 实测法 | 基于雨量计等实测数据,通过数理统计拟合分析,建立截留量和降水量之间的经验回归 | 精度较高,但测量周期长、成本高,受实验室和地域环境等多方面的限制,难以推广应用 |
| 浸水法 | 根据测得的单位叶面积蓄水量推断植被的冠层截留能力 | 操作简单,数据精度较低,仅考虑叶片吸水能力,所得结果往往偏低,且忽略了外部环境因素的影响 |
| 模型法 | 从结合截留过程和经验参数的概念模型出发,构建影响林冠截留的各种因子与截留量间的关系,建立基于计算机技术的智能化分析软件模型(CITY-green 模型、i-Tree 模型) | 根据降水过程和截留原理严谨推理得出的物理关系得到,高效、动态模拟、操作性强、外延性好,目前得到广泛应用 |

中的占比可达 10%~35%。在植被冠层投影面积相同的情况下,常绿针叶乔木的林冠截留率一般高于落叶阔叶乔木[10],这主要受绿地植被冠层密度的影响。由于在城市建设过程中选择的园林绿化针叶树种通常枝叶结构复杂,在单位投影面积内具有更大的叶片总面积,相较于落叶阔叶树种,在降水过程中更利于承接雨水,降水不易穿透冠层到达地表[11],使得林冠截留量随着冠层密度的增加而提高[12]。通过对不同降水条件下林冠截留量、截留率、截留体积、覆盖率及场地径流控制率之间的关系进行研究和分析发现,常见的园林绿化树种中雪松(*Cedrus deodara*)、圆柏(*Sabina chinensis*)、梧桐(*Firmiana simplex*)、国槐(*Styphnolobium japonicum*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、榉树(*Zelkova serrata* (Thunb.) *Makino*)、黄葛树(*Ficus virens*)、细叶榕(*Ficus microcarpa*)的截留效益较高[13-17],一般冠层雨水截留率在 25%~55%。同时,考虑到城市绿地建设时使用单种单层植物种类的情况较少,有学者针对不同的种类搭配情况对复层园林植物树冠截留效果展开研究发现,同种植物在不同层次和与不同种类植物搭配组合时达到的雨水截流效果也有所不同[14]。

### 1.2 林冠截留影响因素

林冠截留效果受多种因素影响。气象因素中树冠外降水量、降水时长、降水强度[13, 18-20]对树冠截留效果有显著影响,其中降水量和植被冠层截留量的关系成反比,即截留量占降水量的比重会随着降水量的增加而急剧下降,直到降水强度达到一定值时趋于水平[21]。一般情况下截留效果随枝叶疏密度和郁闭度的增加而增加[22]。植被的垂直空间结构配置也是影响截留效果的一个重要因素[23],植物冠层的层次性特征可以提升绿地的截留能力[24],要达到更好的截留能力,植被的垂直结构配置需要随绿地的尺度和形状做出相应变化,进行垂直配置、错层配置、错落配置或密度递减配置以获得较高的截留率[25]。绿地植被自身特点对截留效果产生的影响中,叶片特征是学者们关注的重点,林冠截留量随叶片疏水性的增大而减小[26],叶片粗糙度、叶长宽比、叶干重、是否被毛等均会对叶片疏水性产生影响,但各因素对截留能力的具体影响效果在不同研究结果中存在分歧。一些研究认为影响叶片持水特征的主要因素为叶片大小、叶片长宽比和叶片粗糙程度[27-28];而另一些研究认为叶长宽比、叶周长、叶鲜重与叶片截留能力的相关性均不显著[29]。此外,树干表面特征[7,30]、植被的树冠修剪形状[9,14]也会对截留效果产生显著影响。研究发现,相较于修剪成矩形的树冠,球状的树冠截留效果更好,二者的雨水截留效率可相差 10%[14]。

## 2 绿地雨水入渗研究

当降水经过林冠截留到达地表,绿地作为天然的渗透设施,在雨洪调蓄过程中发挥着削减雨水动能、控制城市水文面源污染的重要作用。绿地的构型和土壤特性是影响绿地雨水入渗情况的主要因素,研究方法主要有注水法、水文分析法、人工降雨模拟实验(表 2)。

### 2.1 影响绿地雨水入渗的绿地构型

绿地构型主要指城市绿地在建设过程中,在下凹程度、凹凸比例、坡度、形状等方面有别于传统平铺式绿地的特殊设计,其中最典型的是目前研究较多的集雨型绿地。集雨型绿地是在探索绿地功能与雨水利用的关系过程中提出的[31],我们所熟知的多数雨洪调蓄措施,如渗透井、植草沟、高位花坛、雨水花园和下沉式绿地都属于集雨型绿地的主要技术手段。研究发现,绿地的阶

表 2　绿地雨水入渗常用研究方法

| 方法 | 原理 | 特点 |
| --- | --- | --- |
| 注水法 | 双环入渗仪，通过观测某时段内入渗量计算不同样地的入渗能力 | 可以测量入渗能力变化的全过程，但野外测定难度较大，对样地条件要求较高，且忽视了降雨对地表的打击作用对入渗的影响 |
| 水文分析法 | 利用径流试验场或小流域实测降水和径流过程资料推求入渗过程 | 对流域整体进行综合分析，但流域内部异质性会使该方法缺乏代表性 |
| 人工降雨模拟实验 | 野外或实验室模拟人工降雨，观测不同绿地构型、地表特征下的雨水入渗能力 | 与自然降雨实测相比缩短试验周期，控制降雨强度，数据结果更精确，与经验公式相比更为真切的反映了绿地在降雨时的真实入渗情况 |

梯构型可以使绿地在满足景观功能的同时，延长土壤滞留雨水的时间，有效降低径流流速，控制径流总量和削减污染，当阶梯构型的绿地梯坡比为 1 时，渗蓄率可达 60%～70%，且绿地主要在深度为 50～70 cm 的土层中对地表径流进行污染削减[32]；下沉绿地利用高程差汇集周围不透水表面产生的雨水径流，通过植被、土壤对雨水径流进行自然消减，同时补充地下水，达到排出少入渗多的近自然水循环雨水滞蓄效果[33-37]。下沉绿地的雨水滞蓄效果和下沉深度、下沉面积成正比，但下凹深度过大会导致降水时洼蓄积水，破坏植物根系，构成安全隐患，研究发现下沉深度在 10～20 cm 时为最佳[38]。植草沟在具备滞蓄雨水优点的同时，还可代替部分传统雨水管网承担收集、输送、排放雨水的作用，是推广前景较好的一种具备景观性能的绿地入渗措施[39]。当绿地凹凸比为 1∶1 时，改良式绿地的稳定径流强度随降水强度的变化始终最小，径流控制效果最好[40]。多研究发现，在集雨型绿地技术措施的基础上，结合传统城市绿道建设，可以有效调蓄场地道路及周边用地的降水径流[41]。

### 2.2　影响绿地雨水入渗的土壤特性

除绿地构型因素外，充分发挥城市绿地雨水蓄渗能力的关键是土壤的渗透性能。在城市绿地建设过程中，土壤来源混杂，存在掺杂生土、无规律混合的情况，且伴随着机械压实、人为扰动等因素干扰，城市区域的土壤物理性质会发生变化，如容重增大、孔隙度降低、渗透性减弱等。城市绿化区域土壤孔隙度一般在 10%以下，且容重在 0.92 g · $cm^{-3}$ 以上[36,41-42]，土壤中理化性能较差的片状、板状结构代替了渗透性能良好的团粒结构，不利于蓄水排水和植物根系的生长，城市绿地的渗透速率一般情况下随土壤容重的增加而减缓，随土壤孔隙度的减小而降低[43]。当砖瓦块、煤渣等建筑残渣和化工废弃物侵入土壤，反而会增大土壤孔隙度，这样形成的砂质壤土虽然具有低容重和高孔隙度，但在保水性、抗蚀性上较差。同一城市内不同城市功能区的土壤入渗情况也有所差异[44]，一般情况下居住区最高，商业区最低[45]。

## 3　绿色空间的景观格局对雨洪调蓄的影响研究

当降水满足了植物截留和表层土壤储存，后续降水强度又超过下渗强度后，超出雨量开始沿地表流动、汇集，这个过程中不同大小和形状的绿地在空间上的排列方式，也就是绿色空间的景观格局会对径流的产生起到重要的影响作用。绿色空间景观格局如何影响雨洪调蓄，以及如何通过构建合理的城市绿色空间景观格局实现对城市水文过程的主观调控，是学者们关注的主要问题，研究中常见模型主要包括 SWMM、SCS、SUSTAIN、IFMS/Urban（表 3）。

### 3.1　理论机制研究

在理论机制研究方面，绿色空间的景观格局与径流量之间存在显著相关性。景观格局指数能够反映城市绿色空间组成结构和空间配置特征，其中斑块面积指数、密度指数、内聚力指数、破碎度指数、聚集性指数等常被选为定量研究指标[46]，结合空间统计学方法，对绿色空间的雨洪调蓄能力进行分析评价。研究发现，城市绿色空间的组成、类型、空间分布和总体特征对地表径流产生的规模、数量和连接路径有显著影响，绿色空间斑块面积大、景观破碎度高、斑块连接度高、斑块结合度低、斑块密度高的绿色空间格局具有更佳的雨洪调蓄能力，不宜引发内涝灾害。绿色空间占比一定时，小面积分散但彼此连接的绿色空间布局相比于大面积集中的绿色空间能够

产生更长距离的水文过程路径[47-49]，更能有效地降低洪峰流量，推迟峰现时间[50]。在不同尺度上影响径流削减的绿色空间景观格局指数也不同[49]，其中在城市、区域等较大尺度上，斑块面积指数、最大斑块指数等表征绿色空间规模特征的指数影响较大；在小区、场地等较小尺度上，景观破碎度指数、斑块内聚力指数等表征绿色空间分布特征的指数影响较大；形状指数和分维度等表征绿色空间形态特征的指数对绿色空间滞蓄能力的影响不突出。

### 3.2 实践规划研究

在实践规划研究方面，有学者在景观生态学“源-汇”理论的基础上提出利用河流绿地、道路绿地等线性绿色空间作为廊道增加绿色空间景观格局的连接性，减少汇入道路的径流量以有效提升绿色空间的雨洪调蓄能力[51]。也有研究通过对研究区城市绿色空间、汇水区与积水点的关系分析，模拟极端降水的雨洪淹没区和雨水廊道，建立针对不同研究区的雨洪安全绿色空间格局[52-53]。

模型模拟是目前研究绿色空间景观格局对雨洪调蓄效益影响的主要手段。城市绿色空间雨洪调蓄效益与绿色空间景观格局之间的耦合关系研究议题出现较晚，但也随着地理信息系统和遥感数据的成熟与推广得到了一定的发展。应用最广泛的模型中，SWMM 模型、SCS 模型因其有较好的径流模拟效果而被多数学者采用。其中，SWMM 模型在中微观尺度上可以实现对城市区域径流水量和水质的单一事件或者长期（连续）模拟，模型考虑了城市区域产生径流的各种水文过程，通过灵活的水力模拟能力，广泛应用于城市地区雨水径流、合流管道、污水管道和其他排水系统的规划、分析和设计。SCS 模型有着参数少、应用要求相对较低等特点，在大中尺度且数据获取困难等情况下，为丘陵区和无水文资料流域的产汇流计算提供依据。SUSTAIN 模型和 IFMS/Urban 模型应用相对较少，但也在一些特定条件下的研究案例中得以采用。未来，如何借助景观生态学方法，合理设置绿色空间，提升城市绿色空间在城市水文循环过程的调蓄作用仍是研究趋势。

**表 3 绿地景观格局的雨洪调蓄能力常用模型**

| 模型名称 | 开发 | 输入 | 输出 | 特点 |
|---|---|---|---|---|
| SWMM(Storm water management model) | 美国环境保护署(USEPA),1971 | 大气模块:降水、蒸发(恒定蒸发速率、月均蒸发量,用户自定义时间序列)<br>地表模块:汇流区/子流域面积、域宽、坡度、不透水率、汇流演算模式、透水面和不透水面曼宁系数 n 等(综合反映管渠壁面粗糙情况对水流影响的一个系数。其值一般由实验数据测得,使用时可查表选用) | 不同汇流情景下地表径流过程曲线 | 动态降水-径流模拟模型,是目前应用最广泛的城市暴雨径流模型,常用于中微尺度,可分别用于场次径流及长期模拟 |
| SCS (Soil Conservation Service) | 美国农业部水土保持局,1954 | 降水量、不同土壤组及地表覆盖下的 CN 值(Curve Number) | 地表产流估算 | 估算无测站小流域地表径流量,结构简单,对数据获取的要求相对较低,常用于在大尺度上研究绿地削减雨水径流量 |
| SUSTAIN(System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration Model) | 在美国环境保护署(USEPA)支持下开发(Tetra Tech),2003 | 将研究区基本资料转化为地理信息数据输入;研究区汇水区、土地利用图、土壤结构、数字高程模型、降水量、蒸发率、日均温等 | 暴雨时间分级分析、BMP 性能报表、效率-成本曲线 | 以 ArcGIS 为基础平台,进行城市暴雨处理及分析的集成模型系统,可用于进行不同尺度流域中暴雨管理方案经济性和有效性的评估和分析 |
| IFMS/Urban(Integrated Flood Modeling System) | 中国水科院水利减灾中心,2015 | 雨量站信息、区域内排水管段、子汇水区数字高程模型、土地利用数据等 | 特征点淹没曲线、汇水区降水流量过程、管道流量/节点水位 | 专门针对城市洪水研发,对城市暴雨内涝进行风险分析、实时预测预警,可用于绘制城市洪水风险图、对城市排水管网系统、雨洪调蓄设施进行评估和优化设计 |

## 4 展望

城市绿色空间对于缓解城市内涝的作用受到广泛关注，国内外学者对城市绿色空间的雨洪调蓄效益进行了大量的研究与实践，结果发现：不同植被的冠层蓄水能力存在较大差异；绿地构型和土壤特性是影响绿色空间雨水入渗情况的主要因素；绿色空间的景观格局与径流量之间存在显

著相关性，对城市绿色空间景观格局的合理构建可以实现对城市水文过程的主观调控。但现有研究在微观尺度上对绿色空间变化引起地表径流的影响研究较少，且缺少在雨洪调蓄过程中各影响因素之间协同作用的研究。因此，为推动我国城市绿地雨洪效益研究的进一步发展，提出以下 3 点展望。

### 4.1　从微观尺度分析绿色空间变化对地表径流的影响

以往研究中针对雨洪调蓄效益的研究多以城市森林、区域绿地为主体，较少关注城市中的小微绿色空间，而小微绿色空间多以在特殊设计的绿地构型实验研究中出现，缺少在微观尺度上对地表径流削减的评估。基于如今的城市建设土地利用现状，对城市现有公园、城市森林等大面积绿色空间进行改造，或者改变难度较大，而通过对口袋公园、街心公园等小微绿色空间的调整来达到更好的雨洪调蓄效益是一种切实可行的手段，所以在未来的研究中，利用景观生态学理论，借助地理信息系统工具和统计分析方法，将定性定量结合，在微观尺度上分析绿色空间变化对地表径流的影响，可为优化城市绿色空间雨洪管控空间格局提供科学依据。

### 4.2　亟待建立本土化的应用模型、系统理论和城市绿色空间滞蓄容量评估方法

目前研究中常选用的 SWMM 模型及 SCS 模型分别由美国环境保护署和农业部开发，我国自主研发的模型应用研究较少。自“海绵城市”理念提出以来，城市绿色空间的雨洪调蓄效益成为研究热点，相关管理模式也日趋成熟，但目前针对中国本土的地域化雨洪管理模式还有细化和完善的空间，且缺少普适的、具有公信力的、系统的科学理论和评价指标体系。结合我国土壤条件、气候类型、常见植被、城市历史、建设规划等情况，对现有的案例研究进行有效总结，构建本土化的系统理论和评价指标体系，为实现城市雨洪管理的科学预测和精准调控、优化城市绿色空间分布格局、提高截蓄雨水效应提供科学参照和理论支持。

### 4.3　积极探索理论成果在管理实践中的落实，推动城市可持续发展建设

在城市雨水资源管理实践中，应充分考虑植被冠层的截留效益，选择具有高截留效益的树种将有助于削减强降水事件带来的洪水灾害；同时，在绿色空间景观格局对雨洪调蓄影响的理论研究的基础上，应结合城市更新、口袋绿地等新兴城市绿色基础空间建设，使城市绿地从“被动地对雨洪调蓄起积极作用”，转变为“水量调节服务的主体”，更好地推进城市可持续发展。

**参考文献**


[1]吴健生,张朴华.城市景观格局对城市内涝的影响研究:以深圳市为例[J].地理学报,2017,72(3):444-456.

[2]李超超,程晓陶,申若竹,等.城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J].灾害学,2019,34(2):57-62.

[3]汪方心怡,王敏.多重生态系统服务需求下滨水绿道供给优化与精明发展[J].中国城市林业,2022,20(2):51-56,124.

[4]李兰,李锋.“海绵城市”建设的关键科学问题与思考[J].生态学报,2018,38(7):2599-2606.

[5]BERLAND A,SHIFLETT S A,SHUSTER W D,et al.The role of trees in urban stormwater management[J].Landscape and Urban Planning,2017,162:167-177.

[6]COBLE A A,HART S C.The significance of atmospheric nutrient inputs and canopy interception of precipitation during ecosystem development in piñon-juniper woodlands of the southwestern USA[J].Journal of Arid Environments,2013,98:79-87.

[7]LIVESLEY S J,BAUDINETTE B,GLOVER D.Rainfall interception and stem flow by eucalypt street trees-the impacts of canopy density and bark type[J].Urban Forestry & Urban Greening,2014,13(1):192-197.

[8]BAPTISTA M D,LIVESLEY S J,PARMEHR E G,et al.Variation in leaf area density drives the rainfall storage capacity of individual urban tree species[J].Hydrological Processes,2018,32(25):3729-3740.

[9]程晓波.园林植物的树冠截留雨水效果研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2019,50(4):542-545.

[10]LI X,NIU J Z,ZHANG L,et al.A study on crown interception with four dominant tree species:a direct measurement[J].Hydrology Research,2016,47(4):857-868.

[11]FATHIZADEH O,HOSSEINI S M,ZIMMERMANN A,et al.Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands[J].The Science of the Total Environment,2017,601/602:1824-1837.

[12]游宇.城市树木对雨水径流的控制效果及应用策略研究[D].北京:北京建筑大学,2018.

[13]游宇,车伍,张伟,等.8 种园林乔木林冠对雨水截留作用的研究[J].中国给水排水,2018,34(9):121-127.

[14]郭胜男,林萍,吴荣,等.昆明市园林植物树冠截留降雨及其影响因素研究[J].广东农业科学,2014,41(23):47-51.
[15]李苗,史红文,刘淑超.武汉市公园绿地植物的冠层雨水截留能力研究[J].湖北林业科技,2021,50(6):1-6.
[16]陈然,侯凯翔,徐众,等.徐州市园林植物的冠层雨水截留能力分析[J].绿色科技,2018(3):1-4.
[17]郭树煌,李晓鹏,梁龙锋,等.基于 i-Tree 模型的湛江市行道树冠层截留雨水效益分析[J].西北林学院学报,2020,35(2):244-251.
[18]龙佳.北京老城区建筑与小区绿地植被对雨水的截留效应研究[D].北京:北京建筑大学,2020.
[19]计燕,郭欢欢,宋良红,等.关于 9 种绿化树种林冠雨水截留量的研究[J].河南科学,2017,35(7):1075-1078.
[20]罗佳,田育新,周小玲,等.女儿寨小流域 3 种植被类型林冠层对降水再分配研究[J].生态科学,2019,38(5):145-150.
[21]NYTCH C J,MELÉNDEZ-ACKERMAN E J,PÉREZ M E,et al. Rainfall interception by six urban trees in San Juan,Puerto Rico[J]. Urban Ecosystems,2019,22(1):103-115.
[22]周彬,韩海荣,康峰峰,等.太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征[J].生态学报,2013,33(5):1645-1653.
[23]李苗,邓永成,史红文.武汉市公园绿地植物群落冠层雨水截留能力研究[J].黑龙江农业科学,2018(7):112-116.
[24]李晨阳.海绵城市导向下西安中小尺度绿地植物景观设计研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
[25]张毅川.海绵城市导向下绿地典型下垫面的雨水特征及优化:以新乡市为例[D].武汉:武汉大学,2017.
[26]HOLDER C D.Effects of leaf hydrophobicity and water droplet retention on canopy storage capacity[J].Ecohydrology,2013,6(3):483-490.
[27]肖卫平,喻理飞.贵州茅台水源功能区植物叶片形态与持水特征及其功能群划分[J].植物研究,2012,32(5):596-602.
[28]喻阳华,李光容,皮发剑,等.赤水河上游主要树种叶片与枝条持水性能[J].水土保持研究,2016,23(2):171-176.
[29]刘艳丽,王全九,杨婷,等.不同植物截留特征的比较研究[J].水土保持学报,2015,29(3):172-177.
[30]XIAO Q F,MCPHERSON E G,USTIN S L,et al.Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis,California[J]. Hydrological Processes,2000,14(4):763-784.
[31]强健,CHEN Jun-qi.北京推进集雨型城市绿地建设的研究与实践[J].中国园林,2015,31(6):5-10.
[32]赵松婷,李新宇,戴子云,等.集雨型绿地雨水净化功能效果评估:以北京望和公园为例[J].北京农学院学报,2019,34(1):82-86.
[33]赵庆俊,丛海兵,汪智霞,等.高渗透下凹绿地对城市降雨径流的削减作用研究[J].水利水电技术,2018,49(9):41-48.
[34]邱舒鸿.新型下凹式绿地的雨水渗滞蓄及回用效果研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
[35]郭瀛莉,张守红,陈明秀,等.北京西山砂壤土绿地雨水断接径流调控效应试验研究[J].北京林业大学学报,2019,41(6):111-119.
[36]刘柯伶,鲍安红,牛泽南,等.重庆市城市绿地雨水滞蓄能力研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2021,46(12):89-94.
[37]张建锋,董旭辉,刘茵,等.西安城区绿地雨水下渗特征与影响分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(1):116-121.
[38]聂发辉,李田,宁静.概率分析法计算下凹式绿地对雨水径流的截留效率[J].中国给水排水,2008,24(12):53-56.
[39]郭凤,陈建刚,杨军,等.SWMM 模拟植草沟功能的参数敏感性分析[J].中国给水排水,2016,32(9):131-134,139.
[40]周倩倩,张茜,任毅,等.基于室外 LID 渗透试验的绿地仿真建模及改造评估[J].中国给水排水,2020,36(19):109-113.
[41]董光,周维,何兰.成都市绿地土壤特性及对雨洪削减效应的研究[J].安徽农业科学,2018,46(1):137-140.
[42]戴子云,隋静轩,许蕊,等.北京城市绿地土壤水分入渗性能研究[J].中国园林,2019,35(6):105-108.
[43]HELALIA A M.The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils[J].Agricultural Water Management,1993,24(1):39-47.
[44]杨霄.关中地区城市下垫面雨水入渗性能的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
[45]王思思,王榕,苏毅,等.北京城区绿地土壤渗透性能及其对降雨产流的影响分析[J].环境工程,2020,38(4):83-88.
[46]MILLER J D,BREWER T.Refining flood estimation in urbanized catchments using landscape metrics[J].Landscape and Urban Planning,2018,175:34-49.
[47]WU Y,TAO Y,YANG G S,et al.Impact of land use change on multiple ecosystem services in the rapidly urbanizing Kunshan City of China:past trajectories and future projections[J].Land Use Policy,2019,85:419-427.
[48]李孝永,匡文慧.北京城市土地利用/覆盖变化及其对雨洪调节服务的影响[J].生态学报,2020,40(16):5525-5533.
[49]石铁矛,卜英杰.多尺度绿地景观格局对滞蓄能力的影响研究[J].风景园林,2021,28(3):88-94.
[50]AUFFRET A G,PLUE J,COUSINS S A O.The spatial and temporal components of functional connectivity in fragmented landscapes[J].Ambio,2015,44:S51-S59.
[51]KIM H W,PARK Y.Urban green infrastructure and local flooding: the impact of landscape patterns on peak runoff in four Texas MSAs[J].Applied Geography,2016,77:72-81.
[52]陈珂珂,何瑞珍,梁涛,等.基于“海绵城市”理念的城市绿地优化途径[J].水土保持通报,2016,36(3):258-264.
[53]张泉,薛珊珊,邹成东.基于低影响开发的安徽泾县查济古村落雨洪管理[J].中国城市林业,2022,20(2):111-117.