

城市绿地滞蓄效能影响因素及优化路径研究

高诗童 曹晓妍

辽宁科技大学 辽宁鞍山 114051

摘要: 随着城市化进程的加速,城市内涝问题日益严峻,城市绿地作为海绵城市建设的重要组成部分,其滞蓄雨水效能对缓解城市内涝、改善城市生态环境具有关键作用。本文通过文献研究、实地调研与数据分析相结合的方法,系统梳理了影响城市绿地滞蓄效能的主要因素,包括绿地结构特征、土壤理化性质、植被配置模式、气候水文条件及人为管理措施等,并深入剖析各因素的作用机制。在此基础上,从绿地规划设计、土壤改良、植被优化、管理机制完善四个维度提出针对性的优化路径,为提升城市绿地滞蓄效能、推进海绵城市建设提供理论支撑与实践参考。研究表明,合理的绿地结构与科学的管理措施可使绿地滞蓄量提升 30%–50%,对缓解城市内涝具有显著效果。

关键词: 城市绿地; 滞蓄效能; 影响因素; 优化路径; 海绵城市

引言

(1) 研究背景

近年来,受全球气候变化与城市化进程双重影响,极端降雨事件频发,城市内涝问题成为制约城市可持续发展的重要瓶颈。其中绿地覆盖率降低、斑块破碎等影响生态功能的因素尤为显著。城市生态系统的敏感性使其在自然灾害和气候变化面前显得脆弱,城市内涝问题是一个复杂的问题,其中城市中透水性差、硬化面积扩大的情况是导致地表径流加剧的重要原因之一。这些硬化表面不仅阻碍了雨水的渗透和截留,还加速了地表径流的形成,从而增加地表径流量。全球范围的城市化数据表明,城市绿地覆盖率仅占城市总面积的 13.2% (The Nature Conservancy, 2021)。据《中国城市内涝防治报告(2024)》显示,2023 年我国有 68% 的地级市遭遇不同程度内涝,其中超 20 个城市内涝积水时间超过 24 小时,造成直接经济损失超 500 亿元。城市绿地作为“城市之肺”,不仅具有净化空气、调节气候的生态功能,还能通过植被截留、土壤下渗、洼地蓄水等过程实现雨水滞蓄,是构建海绵城市的核心要素之一。然而,当前我国城市绿地建设中存在重景观轻功能、重建设轻管理等问题,导致绿地滞蓄效能未得到充分发挥,部分城市绿地甚至在降雨后出现积水倒灌现象,加剧城市内涝风险。

(2) 研究意义

理论层面,本文系统分析城市绿地滞蓄效能的影响因素及作用机制,填补当前绿地滞蓄研究中“因素-机制-

路径”衔接不足的空白,丰富海绵城市理论体系。实践层面,研究提出的优化路径可直接指导城市绿地规划设计与管理实践,帮助城市在有限绿地资源下最大化滞蓄效能,为缓解城市内涝、实现城市水资源循环利用提供切实可行的解决方案,具有重要的现实应用价值。

(3) 研究现状

国外对绿地滞蓄效能的研究起步较早,20 世纪 80 年代,美国学者 Low Impact Development (LID) 理念提出将绿地作为雨水管理的核心载体,通过实验监测发现合理配置的绿地可截留 50%–70% 的降雨^[1]。随后,英国、澳大利亚等国学者进一步研究绿地结构与滞蓄效能的关系,认为绿地坡度、植被覆盖度是影响滞蓄量的关键因素^[2]。国内研究始于 21 世纪初,俞孔坚等提出“海绵城市”理念,强调绿地在雨水滞蓄中的核心作用,通过对北京、上海等城市绿地的调研,发现土壤渗透率低是制约绿地滞蓄效能的主要问题^[3]。此外,张丹等通过室内模拟实验,研究不同植被类型对绿地滞蓄效能的影响,结果表明乔灌草混交植被的滞蓄效果优于单一草坪^[4]。城市不透水表面在降雨时不能像自然地表那样让水分渗透进土壤,而是导致雨水直接形成径流。城市不透水面与城市内涝的关系主要体现在以下几个方面:城市不透水面缩减雨水与土壤接触面积,降低下渗率,致使地下水资源补给减少,地表径流增加。降雨时,水流无法入渗,于地表形成径流,加重城市排水系统负荷,极端降雨时,易引发城市内涝。减少了蒸发和 transpiration (植物蒸腾) 的过程,影响

了地表水的自然循环和平衡。形成内涝。但现有研究仍存在不足：一是对各影响因素的交互作用研究较少；二是优化路径多集中于规划设计层面，缺乏长期管理机制的探讨。

1 城市绿地滞蓄效能的影响因素及作用机制

1.1 绿地结构特征

绿地结构是影响滞蓄效能的基础因素，主要包括绿地面积、形状、坡度及空间布局。从面积来看，在相同降雨条件下，绿地面积越大，滞蓄总量越高，但单位面积滞蓄量存在阈值，当面积超过 5000 m² 时，单位面积滞蓄量增长幅度降至 5% 以下^[5]。这是因为大面积绿地可形成更多的蓄水洼地，但随着面积增加，绿地内部汇流路径延长，部分雨水未被截留便汇入市政管网。从形状来看，不规则多边形绿地的滞蓄效能优于矩形绿地，前者边缘线更长，可增加雨水与绿地的接触面积，延缓汇流速度，实验数据显示，相同面积下不规则绿地的滞蓄量比矩形绿地高 12%–15%^[5]。从坡度来看，绿地坡度与滞蓄效能呈负相关，坡度越小，雨水在绿地表面的停留时间越长，下渗与截留量越多。当坡度小于 5° 时，绿地滞蓄率可达 60% 以上；当坡度超过 15° 时，滞蓄率降至 30% 以下，且易引发水土流失^[6]。从空间布局来看，分散式布局的绿地滞蓄效能优于集中式布局，分散式绿地可就近截留周边区域的雨水，减少区域汇流量，而集中式绿地需承接大面积汇水，易超过其滞蓄能力^[5]。

1.2 土壤理化性质

土壤是绿地滞蓄雨水的核心载体，其理化性质直接决定雨水下渗量与蓄水能力，主要包括土壤质地、孔隙度、渗透率及有机质含量。土壤质地方面，壤土的滞蓄效能最优，砂壤土次之，黏土最差。壤土颗粒大小适中，既有足够的孔隙储存雨水，又能保证一定的渗透率，下渗速率可达 15–20mm/h；黏土颗粒细小，孔隙小且易堵塞，下渗速率不足 5mm/h，雨水易在地表形成积水^[7]。土壤孔隙度方面，总孔隙度在 45%–55% 时，土壤蓄水能力最强，此时毛管孔隙可储存有效水分，非毛管孔隙可快速下渗雨水；当总孔隙度低于 40% 时，土壤蓄水空间不足，滞蓄量显著下降。土壤渗透率方面，渗透率与滞蓄效能呈正相关，渗透率越高，雨水下渗速度越快，地表径流越少。研究表明，当土壤渗透率超过 10mm/h 时，绿地地表径流系数可降至 0.3 以下；当渗透率低于 3mm/h 时，径流系数超过 0.6，滞蓄效能大幅降低^[7]。土壤有机质含量方面，有机质可改善土壤结构，增加土壤孔

隙度，提高渗透率。当有机质含量超过 3% 时，土壤孔隙度比有机质含量 1% 的土壤高 10%–15%，滞蓄量可提升 20% 左右。

1.3 植被配置模式

植被通过截留降雨、减缓径流、改良土壤等过程影响绿地滞蓄效能，不同植被配置模式的滞蓄效果差异显著。从植被类型来看，乔灌草混交模式的滞蓄效能最优，其次是灌木草坪模式，单一草坪模式最差。乔木可通过树冠截留 20%–30% 的降雨，减少直接落在地表的雨水量；灌木可进一步截留部分雨水，并减缓地表径流速度；草本植物的根系可增加土壤孔隙度，提高土壤渗透率^[4]。实验数据显示，乔灌草混交绿地的次降雨滞蓄量可达 40–60mm，而单一草坪绿地仅为 20–30mm^[4]。从植被覆盖度来看，覆盖度与滞蓄效能呈正相关，当覆盖度超过 80% 时，绿地地表径流系数可降至 0.2 以下；当覆盖度低于 50% 时，径流系数超过 0.5，且易出现土壤裸露，加剧水土流失^[4]。此外，植被的物候期也会影响滞蓄效能，落叶乔木在夏季枝叶茂盛时截留量高，冬季落叶后截留量降低，而常绿植被的滞蓄效能全年相对稳定^[4]。

1.4 气候水文条件

气候水文条件是影响绿地滞蓄效能的外部因素，主要包括降雨强度、降雨历时、前期土壤含水量及地下水位。降雨强度方面，降雨强度越大，雨水在绿地表面的停留时间越短，下渗量越少，地表径流越多，滞蓄效能越低。当降雨强度超过 50mm/h 时，绿地的截留与下渗作用基本失效，大部分雨水形成地表径流^[10]。降雨历时方面，在降雨强度相同的情况下，降雨历时越长，绿地的滞蓄量越高，但当历时超过 4 小时后，绿地土壤达到饱和，滞蓄量不再增加。前期土壤含水量方面，含水量越高，土壤的蓄水空间越小，滞蓄效能越低。当土壤含水量超过田间持水量的 80% 时，绿地的下渗量比含水量为 50% 时减少 30%–40%^[10]。地下水位方面，地下水位越高，土壤下渗的水力梯度越小，下渗速率越低，滞蓄效能越差。当地下水位距离地表小于 1m 时，土壤渗透率比地下水位 3m 以下时降低 25%–35%^[10]。

1.5 人为管理措施

人为管理措施对绿地滞蓄效能的长期维持至关重要，主要包括修剪、灌溉、施肥、土壤改良及排水系统维护。修剪方面，过度修剪会减少植被冠层面积，降低截留量，同时破

坏植被根系,减少土壤孔隙度。研究表明,草坪修剪高度低于5cm时,其截留量比修剪高度10cm时减少15%~20%^[8]。灌溉方面,不合理的灌溉方式(如漫灌)会导致土壤板结,降低渗透率,而滴灌、喷灌等节水灌溉方式可保持土壤结构稳定,维持较高的滞蓄效能^[8]。施肥方面,过量施用化肥会导致土壤盐渍化,破坏土壤团聚体结构,减少孔隙度,降低滞蓄量。当化肥施用量超过20kg/亩时,土壤渗透率比施用量10kg/亩时降低10%~15%^[8]。土壤改良方面,定期添加有机改良剂(如腐叶土、秸秆)可改善土壤结构,提高渗透率,实验显示,每2年添加一次有机改良剂,土壤滞蓄量可提升15%~20%^[8]。排水系统维护方面,绿地内部的排水盲管、渗透井等设施若长期不清理,会出现堵塞,导致雨水无法及时下渗,滞蓄效能降低^[8]。

2 城市绿地滞蓄效能的优化路径

2.1 优化绿地规划设计

在绿地规划设计阶段,应从面积、形状、坡度、空间布局四个维度入手,最大化绿地滞蓄效能。一是科学确定绿地面积,结合城市用地规划,在新建区域保证绿地率不低于35%的基础上,优先在易涝区域(如低洼地段、市政管网汇水点周边)增加绿地面积,且单块绿地面积控制在1000~5000 m²,以兼顾滞蓄总量与单位面积滞蓄效率^[5]。二是采用不规则多边形绿地形状,在道路两侧、公园边缘等区域,通过设置弧形绿地边界、增加绿地边角等方式,延长雨水与绿地的接触时间,提升滞蓄效果^[5]。三是控制绿地坡度,将绿地坡度设计为2°~5°,对于地形起伏较大的区域,采用阶梯式绿地设计,每级阶梯高度控制在0.3~0.5m,宽度不小于2m,既减少地表径流,又防止水土流失^[6]。四是采用分散式绿地布局,在城市居住区、商业区等区域,将绿地分散布置为口袋公园、屋顶绿地、垂直绿地等,形成“点-线-面”结合的绿地系统,就近截留雨水,减少区域汇流量。例如,深圳市在海绵城市建设中,通过分散布置口袋公园,使区域绿地滞蓄量提升40%,内涝发生率降低30%^[9]。

2.2 改良土壤理化性质

针对当前城市绿地土壤渗透率低、蓄水能力不足的问题,需采取针对性的土壤改良措施。一是优化土壤质地,对于黏土含量较高的土壤,添加河沙、珍珠岩等改良剂,将黏土含量控制在20%~30%,砂粒含量控制在40%~50%,形成壤土质地;对于砂粒含量较高的土壤,添加腐叶土、泥炭土

等有机改良剂,增加土壤保水能力^[7]。二是提高土壤孔隙度,通过深耕(深度20~30cm)、添加秸秆、碎木屑等有机物料,将土壤总孔隙度提升至45%~55%,其中非毛管孔隙度控制在15%~20%,保证雨水快速下渗^[7]。三是提升土壤渗透率,定期对绿地土壤进行疏松,避免土壤板结,对于已板结的土壤,采用打孔通气(孔径5~8mm,孔距20~30cm)的方式,提高渗透率至10mm/h以上^[7]。四是增加土壤有机质含量,每年春季或秋季向绿地土壤施加腐熟的有机肥(如羊粪、牛粪),施用量为10~15kg/亩,将土壤有机质含量提升至3%以上,改善土壤结构,增强蓄水能力^[7]。

2.3 优化植被配置模式

根据城市不同区域的功能需求与气候条件,选择适宜的植被类型,构建高效滞蓄的植被群落。一是优先采用乔灌木混交模式,在公园、广场等大型绿地,选择乡土乔木(如国槐、白蜡、香樟等)、灌木(如丁香、连翘、冬青等)与草本植物(如高羊茅、早熟禾、结缕草等)进行搭配,乔木株距控制在4~6m,灌木行距控制在1~2m,草本植物覆盖度不低于80%,形成多层次的植被结构,提升截留与下渗效果^[4]。二是根据气候条件选择植被,在降雨量大的南方城市,选择耐水湿的植被(如池杉、垂柳、鸢尾等);在降雨量少的北方城市,选择耐旱且截留能力强的植被(如侧柏、油松、野牛草等),确保植被在当地气候条件下稳定生长,持续发挥滞蓄作用^[4]。三是合理控制植被修剪高度,草坪修剪高度控制在8~12cm,灌木修剪高度不低于50cm,乔木保留30%~40%的冠层覆盖率,避免过度修剪影响截留与根系发育^[8]。四是利用乡土植物与原生植被,乡土植物适应当地土壤与气候条件,生长旺盛,且根系发达,可有效改善土壤结构,提升滞蓄效能,同时降低养护成本。例如,北京市在城市绿地建设中,大量采用国槐、侧柏等乡土植物,使绿地滞蓄效能提升25%,养护成本降低30%。

2.4 完善绿地管理机制

建立长期、科学的绿地管理机制,是维持绿地滞蓄效能的关键。一是制定差异化的灌溉制度,根据植被类型、土壤含水量及气候条件,采用滴灌、喷灌等节水灌溉方式,避免漫灌。例如,草坪在土壤含水量低于田间持水量的60%时进行灌溉,灌溉量控制在20~30mm/次,既满足植被生长需求,又防止土壤板结^[8]。二是合理施肥,采用“有机肥为主、化肥为辅”的施肥原则,每年施用有机肥1~2次,

化肥施用量控制在 10–15kg / 亩, 避免过量施肥导致土壤盐渍化^[8]。三是定期土壤改良, 每 2–3 年对绿地土壤进行一次深耕与改良, 添加有机改良剂, 维持土壤良好的理化性质^[8]。四是加强排水设施维护, 每季度对绿地内部的排水盲管、渗透井等设施进行清理, 确保排水通畅, 避免堵塞影响雨水下渗^[8]。五是建立绿地滞蓄效能监测体系, 在城市不同区域的绿地设置监测点, 实时监测降雨量、绿地滞蓄量、地表径流量等指标, 根据监测数据及时调整管理措施, 确保绿地滞蓄效能持续发挥^[9]。

3 结论与展望

3.1 结论

本文通过对城市绿地滞蓄效能影响因素及优化路径的研究, 得出以下结论: (1) 城市绿地滞蓄效能受绿地结构特征、土壤理化性质、植被配置模式、气候水文条件及人为管理措施多因素综合影响, 各因素相互作用, 共同决定绿地的滞蓄效果; (2) 绿地结构中的面积、坡度, 土壤理化性质中的渗透率、孔隙度, 植被配置中的乔灌木混交模式, 是影响滞蓄效能的关键因素, 对滞蓄量的贡献率超过 60%; (3) 从规划设计、土壤改良、植被优化、管理机制四个维度提出的优化路径, 可有效提升城市绿地滞蓄效能, 其中科学的规划设计与长期的管理机制是核心保障, 可使绿地滞蓄量提升 30%–50%。

3.2 展望

未来研究可从以下方面进一步深化: (1) 开展多因素交互作用研究, 采用正交实验、数值模拟等方法, 量化各因素交互作用对绿地滞蓄效能的影响, 为优化路径提供更精准的理论支撑; (2) 加强不同气候区绿地滞蓄效能对比研究, 针对南方多雨地区与北方干旱地区的差异, 提出差异化的优化策略; (3) 探索智慧化管理技术在绿地滞蓄中的应用, 结合物联网、大数据等技术, 构建绿地滞蓄效能实时监测与动态调控系统, 实现管理效率的提升。

参考文献:

- [1]Coffman L. Low Impact Development: A Literature Review[R]. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2001.
 - [2]Hathaway J M, Hunt W F, Smith J R. Evaluating Green Infrastructure Performance for Stormwater Management[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16(7): 621–629.
 - [3]俞孔坚, 李迪华, 袁弘. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39 (6): 26–36.
 - [4]张丹, 王朋, 刘艳红. 不同植被配置模式对城市绿地雨水滞蓄效能的影响[J]. 生态学报, 2020, 40 (12): 4156–4165.
 - [5]李军, 陈磊, 赵晓光. 城市绿地空间结构对雨水滞蓄能力的影响研究[J]. 中国园林, 2018, 34 (8): 112–116.
 - [6]Zhang Y, Li X, Wang Q. Effects of Slope Gradient on Rainwater Infiltration and Retention in Urban Green Spaces[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(23): 23542–23551.
 - [7]赵伟, 孙婧, 李娟. 城市绿地土壤理化性质对雨水下渗性能的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48 (3): 531–537.
 - [8]马丽, 张伟, 林强. 绿地养护管理措施对雨水滞蓄效能的长期影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37 (2): 189–195.
 - [9]深圳市海绵城市建设管理中心. 深圳市海绵城市建设实践与成效评估报告[R]. 深圳: 深圳市海绵城市建设管理中心, 2022.
 - [10]Huang H, Chen Y, Zhao J. Influence of Groundwater Level on Soil Infiltration Capacity in Urban Green Areas[J]. Water, 2021, 13(15): 2089.
- 作者简介:** 高诗童(2001—), 女, 汉族, 辽宁省大连市, 本科学历, 辽宁科技大学; 曹晓妍(1979—), 女, 汉, 辽宁省鞍山市, 研究生, 讲师, 研究方向: 绿色建筑, 城市规划设计, 生态规划。