

陈鹏, 梁馨月, 孙滢悦. 土壤渗透性变化对城市暴雨内涝积水过程影响研究: 以长春市南关区为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 87-97. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.007

CHEN Peng, LIANG Xinyue, SUN Yingyue. Study on the effect of soil permeability changes on the process of urban storm waterlogging during heavy rainfalls: A case study of Nanguan District, Changchun City [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 87-97. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.007

土壤渗透性变化对城市暴雨内涝积水过程影响研究: 以长春市南关区为例

陈鹏, 梁馨月, 孙滢悦

(吉林师范大学地理科学与旅游学院, 吉林四平 136000)

摘要:【目的】为减缓或抑制城市暴雨内涝的严重程度, 明确土壤渗透性变化对城市暴雨内涝的抑制作用, 达到减缓或抑制城市暴雨内涝的目的, 【方法】采用水文和水动力学方法、下渗系数计算、情景设定等方法, 综合构建城市暴雨内涝数值模型、下渗量模型, 明确了不同植被覆盖度对城市下垫面积水深度、面积、积水量和积水时间等要素的影响。【结果】结果显示: 从积水深度来看, 情景1中最大与最小积水深度分别为1.30 m、0.10 m, 情景2中最大与最小积水深度为0.95 m、0.05 m, 情景3中最大与最小积水深度为0.35 m、0.01 m; 从积水面积来看, 情景1、情景2、情景3中积水面积分别为28.96 km²、14.40 km²、4.16 km²; 从积水量来看, 3种情景中研究区的积水量减少率会随着时间雨量增加而降低, 其差也随着时间雨量的增加而变小; 从研究区积水水位来看, 最大积水水位因植被覆盖度的增加而减少, 且减少率在5%~20%左右波动, 但整体变化不大; 从研究区积水延迟时间来看, 情景1和情景3中最大平均积水水位出现的时间差为60 min。【结论】增加城市植被覆盖率可以有效地减缓城市暴雨内涝严重程度。研究结果不仅可为城市绿地合理规划提供参考, 还可为政府应急部门开展救援工作提供决策依据。

关键词: 内涝灾害; 抑制作用; 植被覆盖; 土壤渗透性; 数值模拟; 降雨

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.007

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0087-11



Study on the effect of soil permeability changes on the process of urban storm waterlogging during heavy rainfalls: A case study of Nanguan District, Changchun City

CHEN Peng, LIANG Xinyue, SUN Yingyue

(College of Geographic Science and Tourism, Jilin Normal University, Siping 136000, Jilin, China)

Abstract: [Objective] With the goal of mitigating or inhibiting the severity of urban storm waterlogging, the inhibitory effect of soil permeability changes on urban storm waterlogging is studied. [Methods] Hydrological and hydrodynamic methods, infiltration

收稿日期: 2024-02-26; 修回日期: 2024-04-18; 录用日期: 2024-04-25; 网络出版日期: 2024-06-18

基金项目: 吉林省教育厅项目(JJKH20220434KJ, JJKH20230503KJ); 国家自然科学基金项目(41501557)

作者简介: 陈鹏(1980—), 男, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 从事自然灾害风险评估与应急管理研究。E-mail: pp11290@163.com

通信作者: 孙滢悦(1980—), 女, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 从事区域灾害风险评价与应急管理研究。E-mail: syy800201@126.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

coefficient calculation, and scenario setting were used to comprehensively construct the urban rainstorm waterlogging numerical model and infiltration volume model. The effects of different levels of vegetation coverage on factors such as depth, area, volume, and duration of waterlogging on the urban subsurface were investigated. [Results] The results showed that: in terms of waterlogging water depth, in Scenario 1, the maximum and minimum water depths were 1.30 m and 0.10 m, respectively. In Scenario 2, the maximum and minimum water depths were 0.95 m and 0.05 m, respectively. In Scenario 3, the maximum and minimum water depths were 0.35 m and 0.01 m, respectively. As for waterlogged area, the areas in Scenario 1, Scenario 2, and Scenario 3 were 28.96 km², 14.40 km², and 4.16 km², respectively. In terms of water volume, the reduction rate of water volume in the study area decreased as the rainfall intensity increased, and the difference decreased with the increase in rainfall intensity. In terms of water level in the study area, the maximum water level decreased due to the increase of vegetation coverage, with the reduction rate fluctuating between 5% and 20%, but the overall change was minor. In terms of waterlogging delay time in the study area, the time difference for the maximum average water level in Scenario 1 and Scenario 3 were 60 minutes. [Conclusion] Increasing urban vegetation coverage can effectively mitigate the severity of urban storm waterlogging. The results of this study not only serve as a reference for the rational planning of urban green spaces, but also provide a decision-making basis for the government emergency departments in their disaster response efforts.

Keywords: waterlogging disaster; inhibitory effect; vegetation coverage; soil permeability; numerical simulation; rainfall

0 引言

近年来,城市暴雨内涝灾害频发,对城市交通、基础设施及居民生命安全造成严重损失。例如2012年7月21日北京市遭遇城市暴雨内涝灾害,受灾人口190万人,经济损失近百亿元;广东省2014年5月城市暴雨内涝灾害造成江门、深圳、珠海等8市23县118个乡镇33.92万人受灾,直接经济损失5.45亿元;2020年8月长春市发生严重内涝,造成交通瘫痪,多辆车驾驶员被困水中,近6000人紧急转移;2022年郑州市“7·20”特大城市暴雨内涝灾害,1478.6万人受灾,直接经济损失1200.6亿元;2023年7月涿州市受洪涝灾害影响,全市受灾人数133913人,受灾村146个。如果能够寻求抑制或阻断城市下垫面积水的汇集时间,就会大大减少城市暴雨内涝灾害发生的时间,给居民避难及应急救援预留更多的时间,从而保障居民的生命、财产安全。缓解或抑制暴雨内涝灾害已经成为中国城市可持续发展过程中亟待解决的难题。随着全球变暖,城市不透水面积不断增加,改变了城市水文过程,加之城市排水管网老化,排水能力下降,导致暴雨的频度和强度不断加大,造成的损失越来越严重^[1-2]。随着城市工程性措施建设成本的提高及防洪防涝思想的转变,新型的洪涝减缓措施在城市中的应用成为当前的研究热点^[3-5]。

目前,学者们认为通过城市绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)的建设来改善城市生态环境,是减缓或抑制城市暴雨内涝灾害的重要途径^[6]。而在建设城市绿色基础设施过程中,增加植被覆盖是该措施

的重要方法之一。究其原因是植被覆盖度的增加可以减少径流、增加土壤的渗透性和保护土壤表面。其中,植被覆盖度增加能够更好地拦截降雨并吸收部分水分,减少了径流的形成,相比于无植被的地表,植被覆盖的土地能够更好地保持水分,减缓水流速度,从而减缓下垫面积水形成过程^[7]。而植被根系可渗透到土壤深处,能够改善土壤结构,增加土壤的孔隙度和渗透性,这样可以促进水分在土壤中的下渗,加快下垫面雨水的下渗速率,减少地表径流的产生。此外,植被覆盖能够为地表形成一个保护层,遮蔽土壤表面,减少雨水对土壤的冲击,有助于防止土壤表面的侵蚀,保持土壤的疏松性和透水性,促进下渗^[8]。当前国内外学者针对此方面研究已经取得了一定成果,如ZHANG等^[9]通过分析历史土地利用时空变化,发现土地利用的合理性对景观聚集指数存在一定影响,并影响城市地表径流,而城市地表径流发生变化又会对城市暴雨内涝灾害起到很好地抑制作用;KIM等^[10]通过对景观格局模式研究发现,景观格局的聚集程度是减缓平均径流峰值的重要因素;FENG等^[11]提出通过构建自然水文情景、GI情景及基准情景,分析了不同情景下的城市绿色基础设施在修复水量平衡中的作用,以此减缓城市暴雨内涝灾害;YAO等^[12]采用SCS模型计算下垫面径流深度,设定绿地覆盖率为40%情景,探究了现状情景与设定情景间的差异性,并提出优化的绿地覆盖情景。随着城市暴雨内涝灾害频度和强度逐渐加大,城市管理者提出了海绵城市(Low Impact Development, 简称LID)的理念^[13],研究学者已经取得了一些成果,如AHIA-

BLAME 等^[14]提出了建设海绵城市可以增强城市绿色基础设施,并可以减缓城市暴雨内涝灾害严重程度;BLISS 等^[15]通过绿色屋顶对减缓径流进行研究,得出绿色屋顶与传统屋顶相比可以减缓 70%的径流量;MENTENS 等^[16]对降雨、绿色屋顶和径流的关系进行拟合分析,发现绿色屋顶的覆盖率增加可以有效地减缓城市径流。上述学者探讨了城市绿色基础设施与海绵城市建设对城市地表径流的影响,研究结果对城市暴雨内涝减缓或抑制策略制定具有一定参考价值。另外,提高土壤下渗率亦是减缓或抑制城市暴雨内涝灾害的有效措施之一。如程江等^[17-18]通过对下凹绿地对减缓地表径流作用进行研究,得出下凹绿地的下渗率 $K=5\times 10^{-5}$ m/s 时,下凹深度 0.1~0.3 m 的下凹绿地,可缓解 3 a 一遇以下的暴雨重现期 1 h 的降雨所产生的地表径流;LIU 等^[19]通过研究小区域海绵城市建设与城市暴雨内涝灾害间的关系时,发现虽然海绵城市建设对城市暴雨内涝灾害具有一定的减缓效应,但由于研究区域过小会出现不确定性,从而限制了成果应用的普适性。随着协同治理理念的不断发展,探究综合协同治理以此减缓或抑制城市暴雨内涝灾害已经成为研究热点。已有研究从协同治理标准、城市工程群调度及联排联调技术在防洪排涝中的作用分析等方面^[20-21]展开。近些年,学者们除了上述研究外,还从城市暴雨内涝灾害对交通影响角度出发^[22-23],结合其时空分布与演变特征^[24-25],探讨了城市暴雨内涝灾害如何影响交通,并提出了缓解城市暴雨内涝灾害的方法。此外,亦有学者从城市暴雨内涝灾害损失评估^[26-27]角度出发,提出了减缓或抑制城市暴雨内涝灾害的方法。虽然已有的城市暴雨内涝灾害相关研究取得了大量成果,但部分研究成果对城市暴雨内涝灾害的抑制或缓解效果欠佳,需要进一步完善。

鉴于此,本文拟通过厘清不同土地利用类型的土壤渗透率,设定不同城市植被覆盖情景,构建城市暴雨内涝数值模拟模型,模拟不同土地利用类型情景下的下垫面积水变化过程,探讨不同植被覆盖度情景下植被对城市暴雨内涝的抑制或缓解作用。本研究的创新点在于明确了城市植被覆盖区域具有较好的雨水渗透功能和减缓径流作用,研究成果可为未来城市绿地综合规划和城市防灾减灾提供决策依据。

1 研究区概况

南关区位于吉林省长春市的中南部(见图 1),属于温带大陆性半湿润季风气候,年均降水量

570.3 mm,主要集中在夏季的 6—8 月份,此时段为南关区暴雨内涝灾害高发期。南关区总面积为 80 km²,全区植被覆盖率为 40.94%,人口近 70 万人。研究区目前有 19 处严重易涝点,主要集中于南关区的明沟水系附近、自然地势低点及管网老旧、负荷不足区域。另外,《长春市城市排水(雨水)防涝综合规划(2016—2030)》(以下简称《综合规划》)显示^[28],长春市中心城区的内涝高风险区面积为 64 km²、内涝中风险区面积为 144 km²、内涝低风险区面积为 277 km²。根据《综合规划》制定的城市规划范围,内涝防治标准为 50 a 一遇,24 h 累积降雨量为 162.1 mm。当发生 50 a 一遇及以下暴雨时,城市主干道以上道路可以正常通车,即车行道积水不超过 0.20 m。其他道路积水不超过 0.20 m,积水时间不大于 2 h,一旦超过该标准,区内道路积水将对居民生命、财产安全造成威胁。

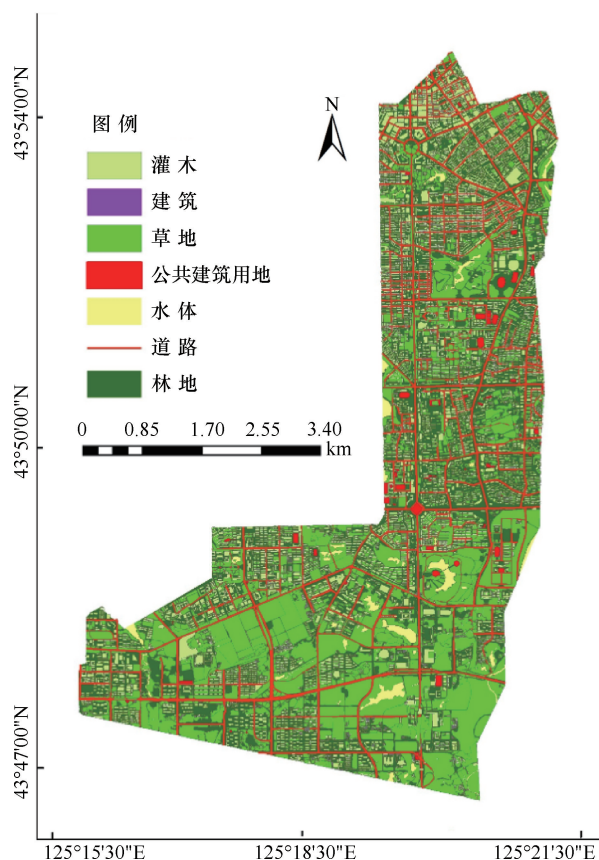


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 研究方法与数据来源

2.1 数据来源与处理方法

本研究使用数据包括矢量数据、栅格数据及属性

数据 3 个部分, 其中, 栅格数据为研究区遥感影像数据(资源 2 号卫星获取, 分辨率 2 m)、DEM 数据来源于资源与环境科学中心 <http://www.resdc.cn>; 矢量数据包括土地利用数据和网格数据, 其中, 土地利用数据主要是利用遥感影像目视解译获得, 网格数据利用 ArcGIS 网格绘制工具绘制研究区不规则网格(网格大小约 400 m×400 m), 并利用 DEM 数据提取研究区下垫面高程点; 属性数据主要包括各地类的属性、降雨数据、高程数据、排水管网数据及下垫面渗透率数据, 将属性数据与矢量网格关联, 使每个网格具有下垫面相关属性值, 为后续研究提供数据基础。

2.2 城市暴雨内涝模型

本文构建的城市暴雨内涝模型与已有模型不同之处在于, 除了模拟下垫面积水范围和积水深度之外, 还将模拟出积水量、积水水位和最大积水水位延迟时间 3 个要素, 其中积水量和积水水位的定量化计算(见图 2)可为应急部门在排涝时准确掌握积水量提供决策依据。而最大积水水位延迟时间量化, 可为居民应急避难和应急救援提供时间参考。

具体模型整体构成为^[29]

$$L = L_1 + (I_1 - I_2) \quad (1)$$

式中, L 为 t 时刻积水量; L_1 为 $(t-1)$ 时刻积水量;

I_1 为流入量总和; I_2 为流出量总和。

$$I_1 = rain + N_1 \quad (2)$$

式中, I_1 为流入量总和; $rain$ 为降雨量; N_1 为从周围网格流入量。

$$I_2 = m + N_2 + K \quad (3)$$

式中, I_2 为流出量总和; m 为渗透量; N_2 为周围网格流出量; K 为排水量。

(1) 流出时间计算。为了明确各网格积水水位时间滞后性, 采用网格内水流流出时间模型, 分析各网格内水位变化过程, 厘清研究区内涝积水水位的延迟时间。具体模型为

$$time = \left\{ \frac{2}{3} \times 3.16 \times l \times \frac{N}{\sqrt{s}} \right\}^{0.446} \quad (4)$$

式中, $time$ 为网格水流流出时间; l 为从最远点流入距离; N 为迟滞系数; s 为地表坡度。

(2) 流出量模型。在计算流出量时, 首先, 在当前的降雨量上乘以流出系数, 再加上当前时刻的积水量, 将其作为“临时流出量”; 其次, 从某一网格中流出的雨水可能有多个方向, 将“临时流出量”按照(海拔+水位)比例分配后的量分别流向各网格, 并作为预定量; 最后, 当网格某方向的流出时间比前一时刻的时间短时, “临时流出量”全部作为“流出预

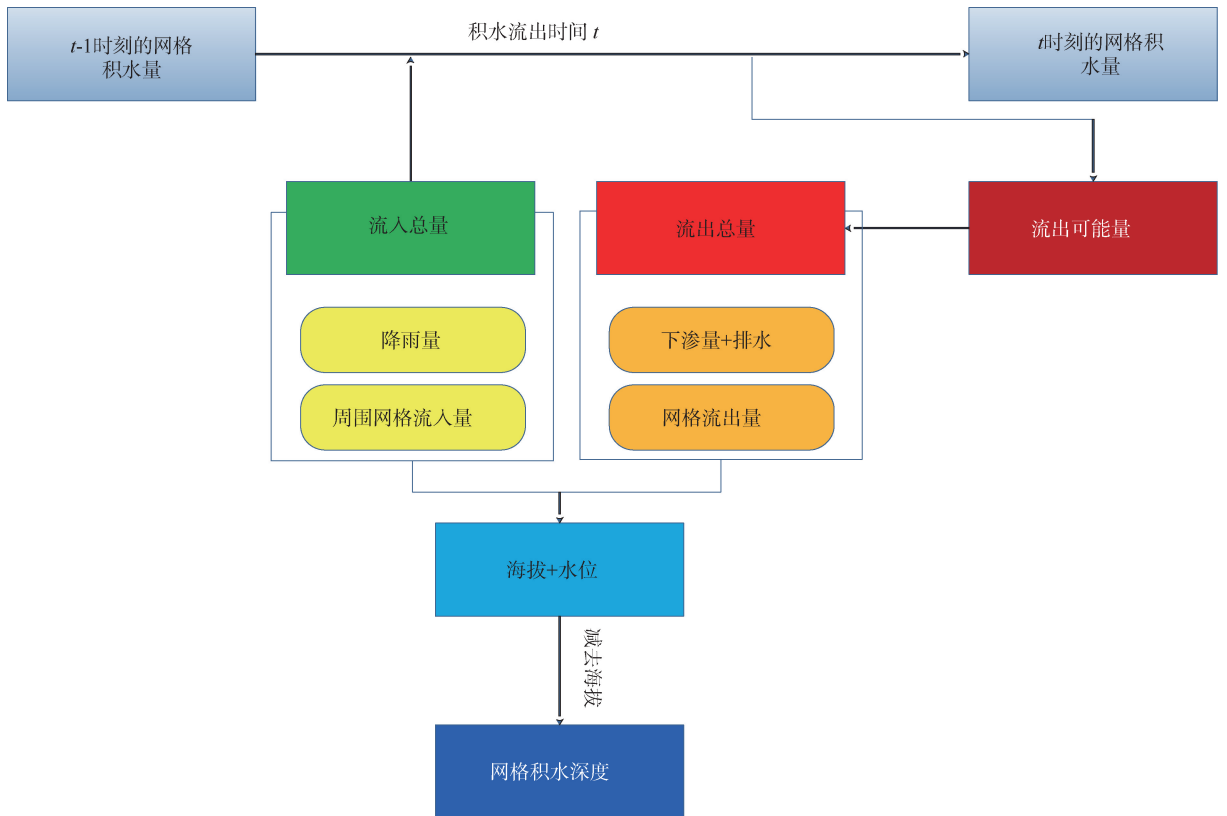


图 2 模型思路

Fig. 2 Model framework

定量”。如果流出时间比前一时刻的时间长时,将 $\{(\text{单位时间})/(\text{流出时间})\} \times \{\text{临时流出量}\}$ 作为“流出预定量”。此时,将某一网格中 $t-1$ 时刻某方向流出量设为 $F(t-1)$, 则该网格 $t-1$ 时刻的积水量 $v(t-1)$ 、 t 时刻某个方向流出预定量 $f(t)$ 计算公式为

积水量

$$v(t-1) = \sum \{f(t-1) - F(-1)\} \quad (5)$$

流出预定量

$$f(t) = \{rain \cdot (1 - \alpha) \cdot R\} + \{v(t-1) + \sum F_n(t-1)R^d\} \cdot \beta \cdot H \quad (6)$$

式中, α 为不透水面积; R 为流出系数; d 为变量(植被 = 1, 其他 = 0); $\beta = 1$ 时, $t \geq time$, $\beta = T/time$ 时, $t < time$; T 为单位时间; $F_n(t)$ 为 t 时刻从相邻网格的流入量; H 为与海拔 + 水位的差成比例的分配率。

另外,当多个网格内积水流入当前网格时,如果来自各网格的“流出预定量”全部流出,积水水位会比流出源的网格高。为了防止此种情况,预先确定流出源和流出目的地网格间的(海拔+水位)差得到的容量(可流出量)。当预定流出量超过可流出量时,将可流出量作为该网格的“流出期待量”。当流出预定量不超过可能流出量时,直接将流出预定量作为流出期待量。具体关系为

流出可能量

$$g(t) = \{hn(t-1) - h(t-1)\} \times \left(\frac{1}{2}\right) \times \text{网格面积} \quad (7)$$

式中, $hn(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻的海拔+水位。

流出期待量

$$F_0(t) = \min\{f(t), g(t)\} \quad (8)$$

(3)流出可能量计算。如果周围网格的预定流出量全部流入当前网格,则需预先计算流入水量总和,并与网格的可能流入量进行比较。关于溢出的水量计算,有必要对周围网格进行“返回”处理,然后将这个“返回的水量”从“流出期待量”中减去,并暂定为“流出量”,计算公式为

$$F(t) = F_0(t) - bn(t) \quad (9)$$

式中, $bn(t)$ 为 t 时刻的返回水量; $F(t)$ 为流出量。

为了验证模型的有效性,利用历史积水深度数据与模拟积水结果数据进行对比,结果显示,情景1中的181个积水网格积水精度误差在5~9 cm之间,模拟精度达到88%左右,模拟精度较好,可以在后续

研究使用。

2.3 各土地利用类型渗透率计算

2.3.1 渗透系数计算

渗透系数又称水力传导系数(hydraulic conductivity),其定义为:单位水力梯度下的单位流量,表示流体通过孔隙骨架的难易程度^[30]。较常用的计算方法为1931年RICHARDS提出的土壤渗透系数 K 的计算方法^[30],具体计算方法为

$$K = C \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot \frac{d_H^2}{\tau} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad (10)$$

式中, k_j 、 k_s 、 k_w 分别为土壤级配、饱和度、土壤基质吸力的影响系数, $C = c \cdot k_j \cdot k_s \cdot k_w$; d_H 为土壤颗粒的平均有效粒径, $d_H = 1 \cdot \sin\theta$; τ 为迂曲度; γ 为地下水重度; μ 为流体动力黏度。

通过以上计算得出渗透系数 K ,按 Darcy'slaw 方法计算渗透流量 Q

$$Q = KA \frac{H_1 - H_2}{L} = KAI \quad (11)$$

式中, H_1 为上游水头; H_2 为下游水头; A 为垂直于水流方向的截面积; L 为渗透长度; I 为水力梯度。

通过渗透流量,可以计算出土壤渗透速率 v

$$v = Q/(6A \cdot T) \quad (12)$$

式中, v 为绿地土壤渗透速率; Q 为入渗水量; A 为垂直于水流方向的截面积; T 为时间。

经本文测定,有草皮的土壤渗透率比相同条件下裸露土壤高20%左右,而草地中种植某些灌木比单纯种植草地的渗透系数高15%左右,渗透速率可达到5~10 m/s,具体测定结果如表1所列。

表1 渗透率测算值

Table 1 Permeability calculation values

土地类型	渗透率/mm · h ⁻¹
落叶林	222
落叶混交林	230
灌木	144
草地	22
建筑用地	0
公共建筑用地	0
道路	0

2.3.2 情景设定

植被覆盖与土壤渗透率有着密切联系,植被覆盖度增加导致土壤渗透率变大是否能够有效地减缓或抑制城市暴雨内涝灾害,是本研究所要解决的关键问题。为了验证城市植被的雨水渗透功能对暴雨内涝灾害的抑制效果,本研究分别设定了城市现状植被覆

盖情景和两个不同类型的增加植被覆盖情景, 具体情景设定如下。

情景1: 现状情景, 指研究区现状情况下的城市土地利用状态, 该情景主要是厘清研究区现状土地利用情景下城市暴雨内涝的真实情景。

情景2: 增加植被覆盖度, 将研究区的公共建筑用地改为草地, 以此明确草地对城市暴雨内涝的抑制作用。

情景3: 增加植被覆盖度, 将研究区公共建筑用地改为草地中种植灌木(二者混合种植), 以此探究混合植被覆盖对城市暴雨内涝的抑制作用。

从各类植被的渗透率来看, 林地的渗透率较高, 原则上对城市暴雨内涝的抑制效果最好, 但城市公共建筑用地一般为广场、人行道等, 因此, 无法在公共建筑用地种植高大树木, 但可以种植草坪或是草坪中混合种植低矮灌木, 此种地类基本不会影响原地类的用途。

3 结果分析

3.1 研究区积水深度分析

近年来, 随着城市化进程加快, 城市下垫面的不透水面积不断增加, 致使城市水文过程发生改变, 从而加大了城市暴雨内涝灾害风险^[31]。若想有效地抑制内涝灾害风险, 增加植被覆盖、提高排水能力、改善下垫面的水文环境等是其解决问题的根本^[32-33]。为此, 本文从3种情景角度出发, 分别厘清城市不同

植被覆盖度下的内涝情景。

以2022年7月7日降雨过程为例, 该降雨过程为5h, 降雨量范围在10~100mm, 以此作为内涝模型的初始最小和最大输入。从模拟结果可以看出, 在情景1时研究区最大与最小积水深度分别为1.30m、0.10m, 积水网格数量为181个, 其中网格积水深度超过1.00m的有6个, 0.50~1.00m的有135个, 0.50m以下的有40个[见图3(a)]; 情景2时研究区最大与最小积水深度为0.95m、0.05m, 积水网格数量为90个, 其中网格积水深度超过1.00m的有4个, 0.50~1.00m的有34个, 0.50m以下的有52个[见图3(b)]; 情景3时研究区最大与最小积水深度为0.35m、0.01m, 积水网格数量为26个, 0.50m以下的有26个[见图3(c)]。从研究区积水深度变化来看, 情景2积水网格数量比情景1减少了50.28%, 情景3积水网格数量比情景1减少了85.64%, 说明植被覆盖度的变化确实对城市内涝有一定的缓解作用, 尤其是情景3中草地和灌木混合状态下, 缓解内涝的效果最佳。

3.2 研究区积水量变化

因一次降雨过程存在波动性, 一般表现为开始时降雨量较小, 中间降雨量较高, 结束时降雨量变小的过程。本文选定的降雨过程大致符合该过程, 因此本文设定以10mm/h为间隔, 模拟研究区的积水量变化过程。经模拟, 得到各网格最大积水量的总和及其减少率, 如图4所示。结果表明, 3种情景中积水

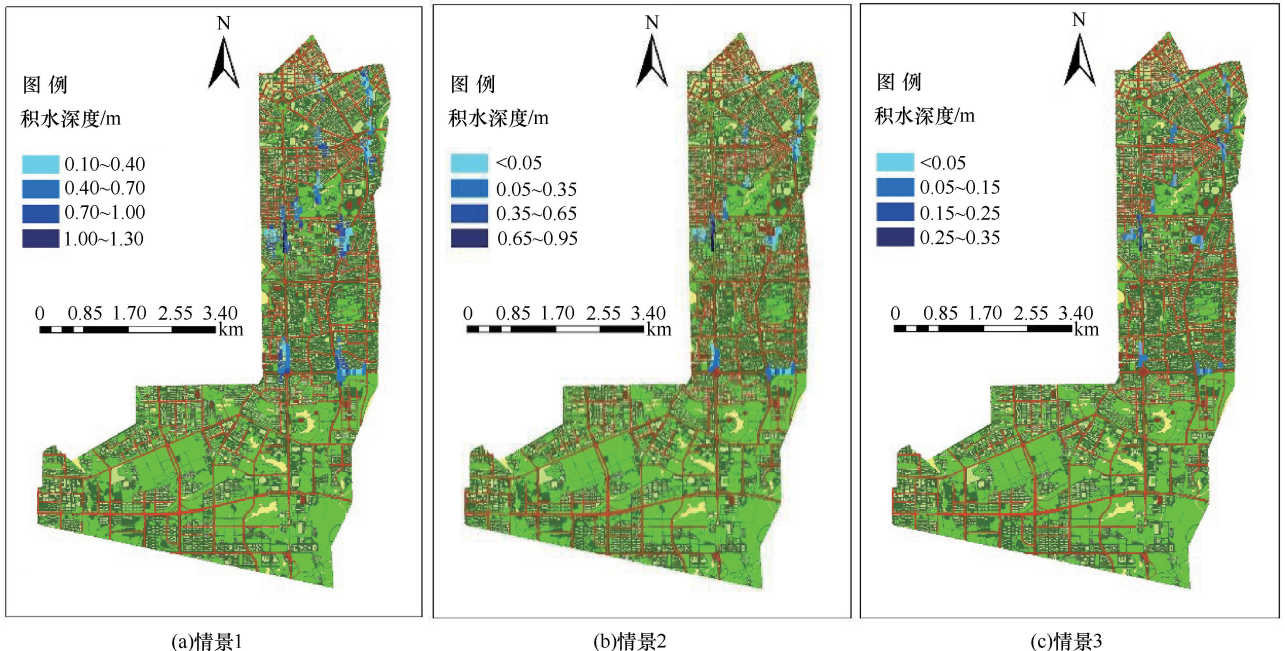


图3 3种情景研究区道路积水位置及深度

Fig. 3 Location and depth of road water logging in the study area under three scenarios

量均存在减少趋势,且情景1>情景2>情景3,这一结果与降雨过程的波动直接相关。此外,研究区的积水量变化最大的为情景1,其最小时间雨量为10 mm的情况下,大约减少70%,最大时间雨量为100 mm的情况下,大约减少8%,说明减少率会随着时间雨量降低,其差也随着时间雨量的增加而变小。情景2和情景3中因植被覆盖度增加,导致研究区下垫面的积水量减幅远小于情景1中的下垫面积水量变化,说明植被覆盖度增加对抑制城市暴雨内涝效果较好。

3.3 研究区积水水位变化

从研究区积水水位变化过程和减少率模拟结果可以看出,最大积水水位因植被覆盖度的增加,每个时间雨量情况下都有所减少,且减少率几乎都在5%~20%左右波动(见图5)。虽然随着时间雨量的增加,研究区积水水位减少率的变化也有所增减,整体上呈现出下降趋势,但不能说明植被覆盖度的增加会导致最大积水水位的大幅度减少,究其原因因为最大积水水位的地区可能存在四周高、中间低的洼地地形,在地形上容易集中水,因此单从积水水位变化难以说明增加植被覆盖度可以抑制城市暴雨内涝。

3.4 积水面积变化

从模拟结果发现,情景1中研究区共有181个网格存在积水,总面积约为28.96 km²,情景2中研究区共有90个网格存在积水,总面积约为14.40 km²,情景3中研究区共有26个网格存在积水,总面积约

为4.16 km²。其中,0.50~1.00 m的积水网格面积变化最大,0.20 m以下的积水网格面积变化最小。另外,对每个小时雨量达到规定积水水位以上的积水面积进行计算,求出在增加植被覆盖度前后,积水面积的减少率,如图6所示。从该图可看出,当小时雨量为100 mm时,大约减少13%,当小时雨量为50 mm时,大约减少38%,当小时雨量为10 mm时,大约减少约85%,积水面积减少率随着时间雨量的增加而减少,且其减少率的差也随着时间雨量的增加而呈现出减少的趋势。但从整体积水面积来看,每个时间雨量的情况下,积水面积都在减少,但其减少率有时会随着时间雨量的增加而增加,这是因为,正如对最大积水水位计算中所述,在研究区内存在的洼地,水特别容易集中,受时间雨量的影响较小,所以会出现随着雨量增加而增加的趋势,但整体上积水面积仍呈减少趋势。

3.5 积水延迟时间分析

平均积水水位变化趋势如图7所示,标准水位的时间滞后情况如图8所示。由图7可以看出,由于情景2和情景3中增加了植被覆盖度,会出现超过一定积水水位的时间延迟。图8右上图显示的是情景1时,以最大积水水位的一半为标准积水水位时,情景1、情景2和情景3超过标准积水水位的差值。结果表明,当时间雨量为10 mm时,由于没有达到标准积水水位,其差值变为无穷大,当时间雨量为20 mm时,差值约为1.5 h,而当时间雨量为50 mm时,差

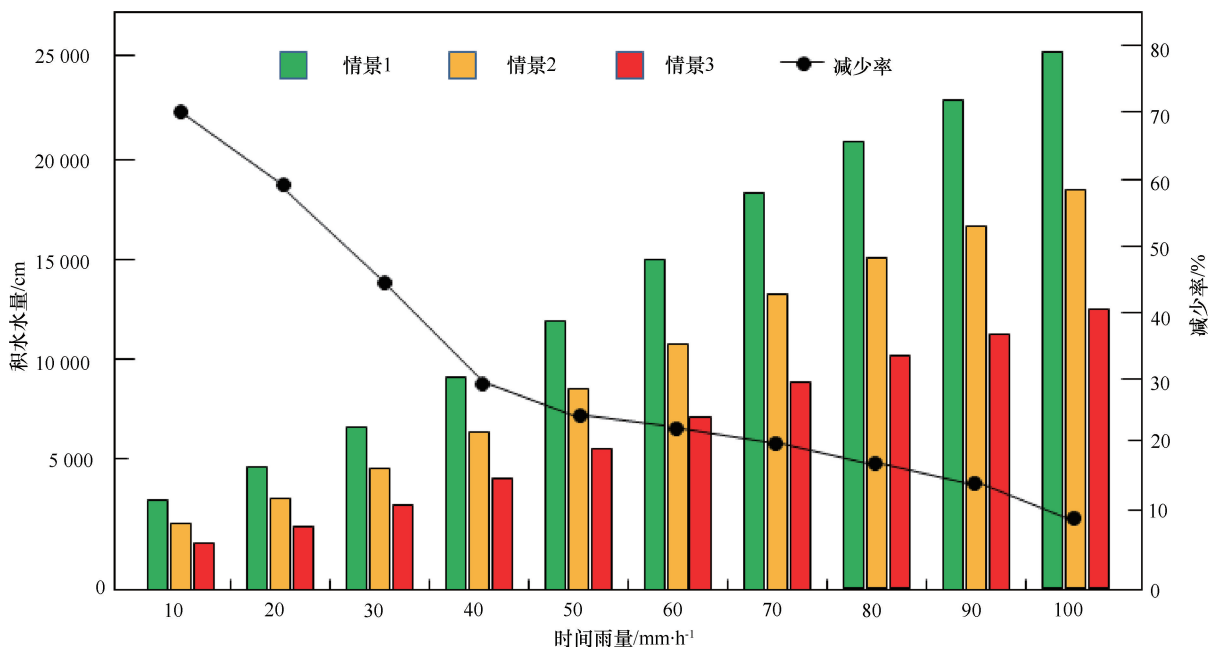


图4 研究区积水量变化

Fig. 4 Changes of waterlogging volume in the study area

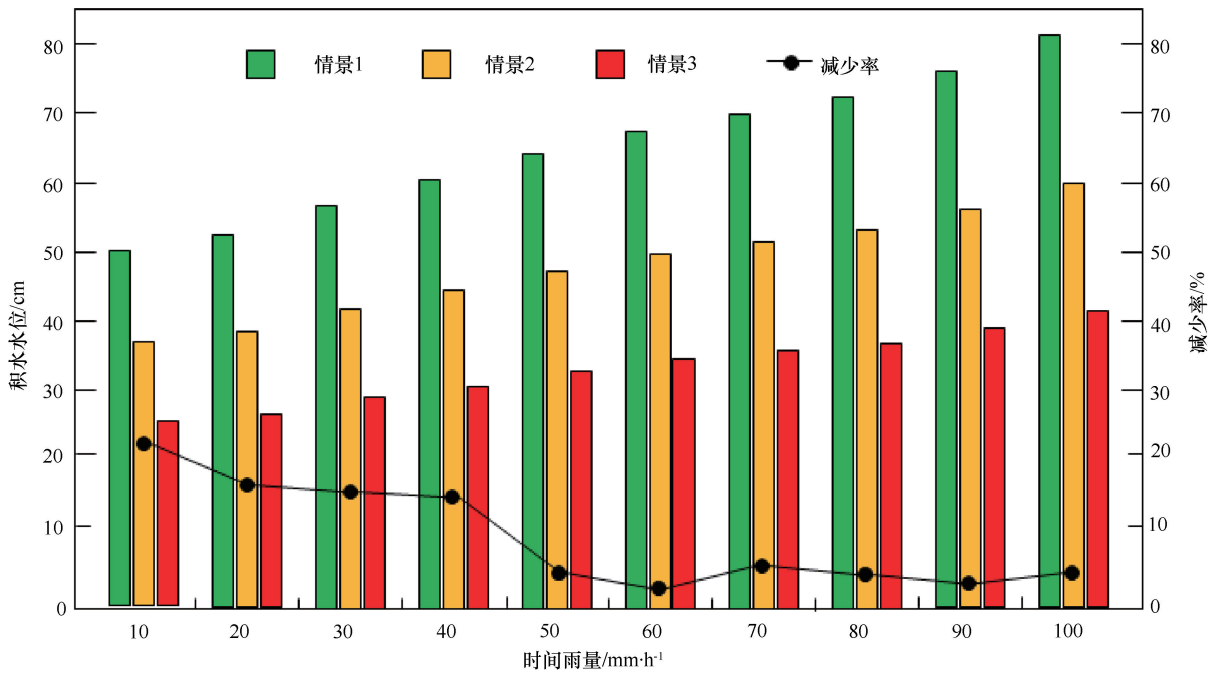


图 5 研究区积水水位变化

Fig. 5 Changes in water level of water logging in the study area

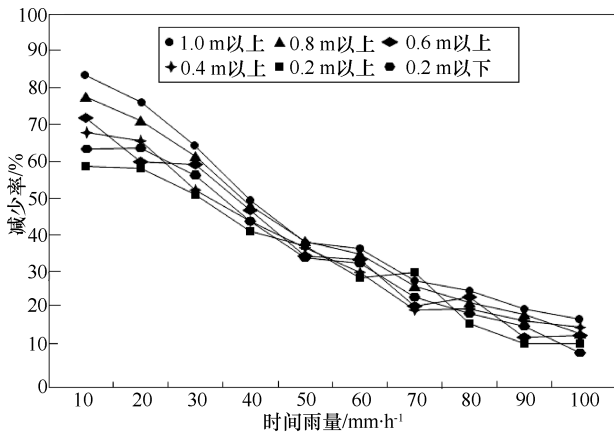


图 6 积水面积减少率

Fig. 6 Reduction rate of waterlogging area

值约为 10 min。从其他小时雨量的情况来看,可以说时间延迟也随着小时雨量的增加而减少。此外,为进一步辨析情景 1 和情景 2、情景 3 的差别,每隔 30 min 计算出所有网格的积水水位的平均值,并通过比较其时序变化,发现增加植被覆盖度无论在何种时间雨量的情况下,所有时间内平均积水水位都有所减少,但比较最小和最大平均积水水位时可知,时间雨量为 10 mm 时[见图 7(a)],平均积水水位达到最大值时为 180 min,情景 2 和情景 3 的最大值分别为 210 min、240 min;雨量为 100 mm 时[见图 7(b)],情景 1 的平均最大积水水位达到最大值时为 150 min,

情景 2 和情景 3 的最大平均积水水位出现时间均不同程度的后移,分别为 180 min、210 min。据此,可看出当雨量为最大 100 mm 时,情景 1 和情景 3 中最大平均积水水位出现的时间差值为 60 min(见图 8),说明研究区通过增加植被覆盖度不仅可以很好地抑制城市暴雨内涝的严重程度,延缓其平均最大积水水位出现的时间,亦可为政府部门有效地发布降雨和内涝灾害信息,以及减轻城市暴雨内涝灾害损失争取大量时间。

4 结果讨论

为减缓或抑制城市暴雨内涝灾害,探究新型减缓措施在城市中的应用成为研究热点。当前研究内容多集中在绿色基础设施(GI)或海绵城市(LID)措施对减缓城市径流或者洪峰的影响,而 LID 措施被认为是在绿地面积一定情况下增强 GI 减缓暴雨内涝灾害的有效措施;在研究方法方面,GI 研究多采用构建情景模型计算径流深度,分析绿地设施减缓城市径流量及对应的径流系数的差异。但由于城市用地难以逆转,一些替代措施如 LID 成为解决该问题的有效措施。目前,针对 LID 研究方法主要为通过拟合降雨、LID 和径流的关系,分析 LID 措施与年平均径流总量的关系,明确了 LID 的建设可以减缓地表径流,从而减缓城市暴雨内涝灾害。此外,亦有学者通过探究下垫面土壤入渗速率,厘清了不

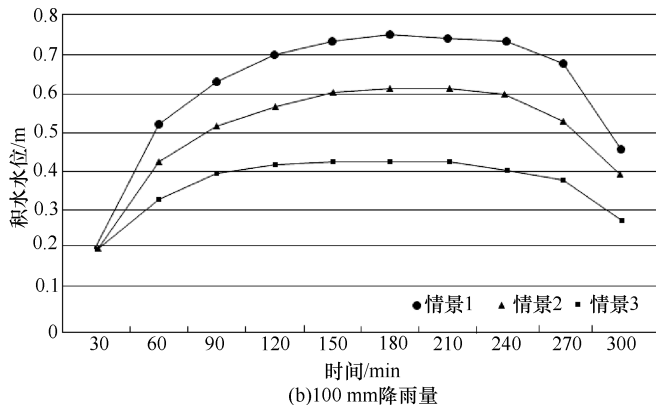
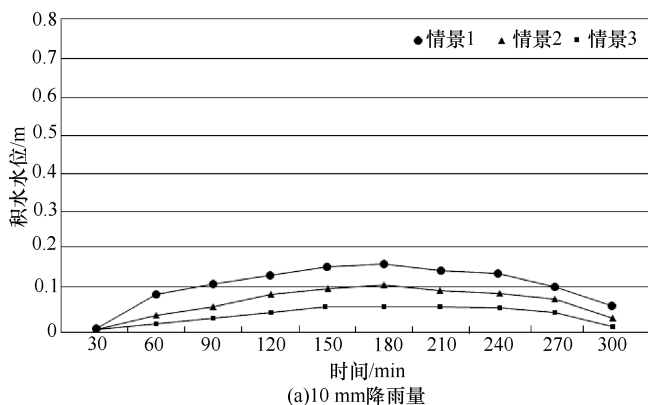


图7 研究区平均积水水位变化趋势

Fig. 7 Trend of average water level changes in the study area

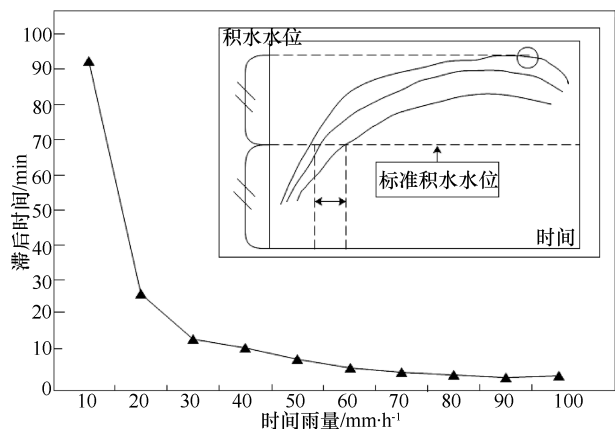


图8 标准水位的时间滞后性

Fig. 8 Time lag of the standard water level

同类型的绿地措施,可以缓解不同暴雨重现期的城市暴雨内涝灾害,以及通过试验模拟探究LID对小范围区域城市雨量的减缓效应,但是上述研究因范围过小,往往伴有不确定性。从已有研究可看出,研究多集中在GI或LID措施对减缓城市径流或者洪峰的影响,研究结果并未明确反映出相关措施在减缓城市暴雨内涝积水范围和深度中的作用。鉴于此,本文与已有研究不同之处有两点:一是构建的城市暴雨内涝模型可以模拟不同植被覆盖情景下减缓城市暴雨内涝场景,包括模拟积水范围和深度;二是可以模拟不同植被覆盖情景下城市暴雨内涝积水水位出现的时间。研究表明,植被覆盖的增加可以改变土壤渗透性,对城市暴雨内涝具有一定的抑制作用,具体表现在减少了研究区的积水范围和积水深度,以及延缓了最大积水水位的形成时间,这一结果可为城市居民应急避难和应急救援争取时间。

5 结论

本文主要探讨了土壤渗透率变化对城市暴雨内涝的抑制作用,得到结论如下。

(1)从研究区积水深度来看,增加下垫面植被覆盖度可以有效地抑制积水深度。具体表现为:在情景1时研究区最大与最小积水深度分别为1.30 m、0.10 m,情景2时最大与最小积水深度为0.95 m、0.05 m,情景3时最大与最小积水深度为0.35 m、0.01 m,情景2积水网格数量比情景1减少了50.28%,情景3积水网格数量比情景1减少了85.64%。

(2)从研究区积水面积来看,增加下垫面植被覆盖度可以有效地减少内涝面积。具体结果为:情景1中道路用地网格共有181个网格存在积水,总面积约为28.96 km²,情景2中道路用地网格共有90个网格存在积水,总面积约为14.40 km²,情景3中道路用地网格共有26个网格存在积水,总面积约为4.16 km²。

(3)从研究区积水延迟时间来看,所有时间内平均积水水位都有所减少,但比较最小和最大平均积水水位时发现,情景1和情景3中最大平均积水水位出现的时间差值为60 min,该时间差可为居民避难和应急救援提供充足时间。

本文中情景2和情景3的设定仅是将研究区土地里利用类型中的公共建筑用地(如广场、人行道等)替换成草地和草地灌木混合两种类型,并未从规划角度考虑如何合理布局才能达到抑制城市暴雨内涝最佳效果,在后续研究中将进一步探讨如何合理规划城市下垫面植被布局才能更好地抑制城市暴雨内涝。另外,从整个研究区来看,虽然增加植被覆盖度可以改

变土壤的渗透性,能有效减轻城市暴雨内涝的严重程度,但因局部地形的影响,也存在效果很小的区域(如洼地)。总体来说增加城市下垫植被覆盖度虽然能起到抑制城市暴雨内涝的效果,但如果与其他对策进行补充与并用(如加快海绵城市建设),可以最大化抑制城市暴雨内涝灾害,从而减轻其造成的损失。

参考文献(References):

- [1] 尹占娥,许世远,殷杰,等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562.
YIN Zhan'e, XU Shiyan, YIN Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 553-562.
- [2] 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.
WU Jiansheng, ZHANG Puhua. The effect of urban landscape pattern on urban waterlogging[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(3): 444-456.
- [3] 杨同歆,沈迪,李有明,等. 基于实时监测数据的城市内涝成因分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 85-89.
YANG Tongxin, SHEN Di, LI Youming, et al. Analysis of causes of waterlogging based on real-time monitoring data [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(12): 85-89.
- [4] CHEN Peng, ZHANG Shuo, BAO Jianhua, et al. Evaluation of evacuation difficulty of urban resident during storm water-logging based on walking experiment [J]. Journal of Flood Risk Management, 2022, 15(4): 1-12.
- [5] 权瑞松. 多情景视角的上海中心城区地铁暴雨内涝暴露性分析[J]. 地理科学, 2015, 35(4): 471-475.
QUAN Ruisong. Exposure analysis of rainstorm waterlogging on subway in central urban area of shanghai based on multiple scenario perspective[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(4): 471-475.
- [6] DU S, GU H, WEN J, et al. Detecting flood variations in shanghai over 1949—2009 with mann-kendall tests and a newspaper-based database[J]. Water, 2015, 7(5): 1808-1824.
- [7] DU S Q, VAN ROMPAEY A, SHI P J, et al. A dual effect of urban expansion on flood risk in the pearl river delta (China) revealed by land-use scenarios and direct runoff simulation[J]. Natural Hazards, 2015b, 77(1): 111-128.
- [8] BENEDICT M A, MCMAHON E T. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century [J]. Renewable Resources Journal, 2002, 20(3): 12-17.
- [9] ZHANG B, XIE G D, LI N, et al. Effect of urban green space changes on the role of rainwater runoff reduction in Beijing, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 140: 8-16.
- [10] 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.
- [11] FENG Y, BURIAN S, POMEROY C. Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 744-755.
- [12] YAO L, CHEN L, WEI W, et al. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(2): 300-308.
- [13] FISHER H, BURKHART B, BREBNER A. LID on the SC coastal plain: Benefits, costs, and constraints [C]. National Low Impact Development Conference, 2008, 11-24.
- [14] AHIABLAME L M, ENGEL B A, CHAUBEY I. Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research[J]. Water Air and Soil Pollution, 2012, 223(7): 4253-4273.
- [15] BLISS D J, NEUFELD R D, RIES R J. Storm water runoff mitigation using a green roof [J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26(2): 407-417.
- [16] MENTENS J, RAES D, HERMY M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? [J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 77(3): 217-226.
- [17] 程江,徐启新,杨凯,等. 下凹式绿地雨水渗蓄效应及其影响因素[J]. 给水排水, 2007(5): 45-49.
CHENG Jiang, XU Qixin, YANG Kai, et al. The rainwater infiltration and storage effect of sunken green spaces and its influencing factors[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007(5): 45-49.
- [18] 程江,杨凯,赵军,等. 上海中心城区河流水系百年变化及影响因素分析[J]. 地理科学, 2007(1): 85-91.
CHENG Jiang, YANG Kai, ZHAO Jun, et al. Variation of river system in center district of shanghai and Its impact factors during the last one hundred years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007(1): 85-91.
- [19] LIU W, CHEN W, PENG C. Influences of setting sizes and combination of green infrastructures on community's stormwater runoff reduction[J]. Ecological Modelling, 2015, 318: 236-244.
- [20] 徐宗学,叶陈雷,廖如婷. 城市洪涝灾害协同治理: 研究进展与应用案例[J]. 地球科学进展, 2023, 38(11): 1107-1120.
XU Zongxue, YE Chenlei, LIAO Ruting. Integrated management technology for urban flooding/waterlogging disaster: Research progress and case study [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(11): 1107-1120.
- [21] 张建云,王银堂,刘翠善,等. 中国城市洪涝及防治标准讨论[J]. 水力发电学报, 2017, 36(1): 1-6.
ZHANG Jianyun, WANG Yintang, LIU Cuishan, et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging pre-vention in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(1): 1-6.
- [22] 李鹏程,李昊洋. 基于城市雨洪模型的内涝交通影响研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(5): 62-65.
LI Pengcheng, LI Haoyang. Rainstorm model-based approach for traffic loss evaluation under condition of urban inundation[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(5): 62-65.
- [23] 易嘉伟,王楠,千家乐,等. 基于大数据的极端暴雨事件下城市道路交通及人群活动时空响应[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 497-508.
YI Jiawei, WANG Nan, QIAN Jiale, et al. Spatio-temporal responses

- of urban road traffic and human activities in an extreme rainfall event using big data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 497-508.
- [24] 那仁满都拉, 宫凌旭, 张虎贵, 等. 城市内涝的时空分布特征及其成因分析: 以呼和浩特市为例[J]. *灾害学*, 2022, 37(1): 107-111.
NA Renmandula, GONG Lingxu, ZHANG Hugui, et al. Spatial and temporal distribution of urban water logging and its causes: a case study of Hohhot[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(1): 107-111.
- [25] 钟晋阳, 王秀珍, 黄敬峰, 等. 浙江省雨涝时空分布特征研究[J]. *科技通报*, 2009, 25(1): 35-39.
ZHONG Jinyang, WANG Xiuzhen, HUANG Jingfeng, et al. Study on the spatial and temporal distribution of waterlogging indices in Zhejiang province[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2009, 25(1): 35-39.
- [26] 乔贤玲, 侯精明, 张文晴, 等. 社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(5): 73-81.
QIAO Xianling, HOU Jingming, ZHANG Wenqing, et al. Research on community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(5): 73-81.
- [27] NASCIMENTO N, MACHADO M L, BAPTISTA M, et al. The assessment of damage caused by foods in the Brazilian context[J]. *Urban Water Journal*, 2007, 4: 195-210.
- [28] 长春市人民政府. 长春市城市排水(雨水)防涝综合规划(2016—2030)[R]. 长春: 长春市人民政府, 2017.
Changchun Municipal People's Government. Comprehensive Plan for Urban Drainage (Rainwater) and Flood Control in Changchun city (2016—2030) [R]. Changchun: Changchun Municipal People's Government, 2017.
- [29] AKIKO I, HIROAKI Y, SEIJI H, et al. A simulation study of rain-water infiltration and flood prevention effects by urban green spaces in Kanda River [J]. *Journal of the City Planning Institute of Japan*, 2015, 50(3): 501-508.
- [30] 周韩, 罗璟, 杨沛璋, 等. 基于土壤质地分类的土壤渗透性影响因素研究[J]. *人民长江*, 2023, 54(8): 153-159.
ZHOU Han, LUO Jing, YANG Peizhang, et al. Influence factors of soil permeability based on soil texture classification[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(8): 153-159.
- [31] 何珮婷, 刘丹媛, 卢思言, 等. 基于最大熵模型的深圳市内涝影响因素分析及内涝风险评估[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(10): 1868-1881.
HE Peiting, LIU Danyuan, LU Siyan, et al. Influencing factors of waterlogging and waterlogging risks in Shenzhen city based on maxent[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(10): 1868-1881.
- [32] 康永德, 李伟, 许尔文, 等. 海绵措施下降雨径流模拟及污染物削减率评价[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(2): 78-89.
KANG Yongde, LI Wei, XU Erwen, et al. Rainfall runoff simulation and pollutant reduction rate evaluation under sponge measures[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(2): 78-89.
- [33] 石虹远, 梅超, 刘家宏, 等. 降雨径流过程对不透水面空间分布的响应解析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(7): 45-54.
SHI Hongyuan, MEI Chao, LIU Jiahong, et al. Response analysis of rainfall runoff processes to spatial distribution of impervious area[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(7): 45-54.

(责任编辑 王璐)