

# 基于 MIKE 耦合模型的绿化率对城市内涝影响研究

张旭<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 张洋<sup>3</sup>, 袁水龙<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100; 3. 西安国际港务区农业农村和水务局, 陕西 西安 710026)

**摘要:** 为了进一步了解强降雨条件下城市内涝的形成过程及地表淹没情况,以西安市新城区为研究对象,设定不同比例的绿地面积,建立了城市洪水的 MIKE FLOOD 耦合模型,对比了不同情景下城市绿化对地面积水和内涝风险的削减效果。结果表明:随着城市绿化面积比例的增加,3、5、10、20 年一遇降雨下的积水淹没范围得到了有效控制,其中绿化面积比例为 35% 时削减效果最为明显。研究区 0.05 m 以上水深的淹没面积比现状分别减少了 20.64%、20.83%、18.42%、18.40%;积水历时 20 min 以上的淹没面积比现状分别减少了 31.18%、24.40%、24.55%、23.33%;内涝风险总淹没面积比现状分别减少了 30.26%、23.98%、23.25%、23.07%。随着降雨重现期的增加,城市绿化对内涝的削减效应会减弱。

**关键词:** 城市内涝; 绿化率; MIKE FLOOD 耦合模型; 西安市

中图分类号: TU998.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0137-08

## Influence of greening rate on urban waterlogging based on MIKE coupling model

ZHANG Xu<sup>1</sup>, LI Zhanbin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yang<sup>3</sup>, YUAN Shuilong<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Agricultural, Rural and Water-Control Bureau of Xi'an International Trade & Logistics Park, Xi'an 710026, China)

**Abstract:** In order to further understand the formation process of urban waterlogging and surface submergence under heavy rainfall, taking Xi'an New District as the research background, we established a Mike FLOOD coupling model of urban floods with the setting of different proportional green areas. With this model, the mitigation effect of green area on the accumulation of surface water and waterlogging risk under different scenarios were compared. The results show that with the increase of the proportion of urban green area, the submerged areas under the rainfall of 3 a, 5 a, 10 a and 20 a have been effectively controlled, especially when the proportion of green area is 35%. The submerged area with the water depth of more than 5 cm reduced by 20.64%, 20.83%, 18.42% and 18.40% respectively, and the decrease rate of the submerged area with the water accumulation time of more than 20 min was 31.18%, 24.40%, 24.55% and 23.33% respectively. Furthermore, the percentage of submerged area at the risk of waterlogging decreased by 30.26%, 23.98%, 23.25% and 23.07% respectively. However, the mitigation effect will be weakened with the increase of rainfall recurrence interval.

**Key words:** urban waterlogging; greening rate; MIKE FLOOD coupling model; Xi'an City

## 1 研究背景

近年来,城市化建设规模逐渐增大且进程不断

加快,下垫面不透水面积迅速增加,加上暴雨等极端天气频发,使得我国许多城市在遭遇强降雨之后极易形成内涝灾害<sup>[1]</sup>,造成严重的经济财产损失。城

收稿日期:2020-05-21; 修回日期:2020-10-10

基金项目:陕西省创新人才推进计划项目科技(水土资源环境演变与调控)创新团队(2018TD-037);西安市城市水土保持关键技术研究(104-441118085)

作者简介:张旭(1992-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要研究方向为城市雨洪模拟与内涝防治。

通讯作者:李占斌(1962-),男,河南南阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。

市内涝已经成为许多国家和地区面临的共同问题<sup>[2]</sup>。不透水率增加、排水系统老化以及管网设计标准较低导致地面雨水不能及时排出,也是城市内涝形成的直接原因<sup>[3]</sup>。

针对日益突出的城市内涝问题,国内外学者在城市洪水过程的模拟分析、内涝风险分析与评估等方面进行了大量研究。Yin 等<sup>[4]</sup>采用基于网格的地理信息系统(GIS)方法,对城市淹没面积和淹没深度进行了模拟,并采用小规模综合评价方法对暴雨洪涝灾害风险进行了评价;Schmitt 等<sup>[5]</sup>将城市洪水发生频率定义为一个水力性能指标,分析了城市排水系统中因附加的污水管道而引起的城市洪水现象,提出了建立城市双排水系统模型的必要性;Li 等<sup>[6]</sup>以海绵城市试验区为研究背景,通过建立 MIKE FLOOD 模型阐明了低影响开发措施对城市降雨径流及污染物的影响规律。目前,我国在城市雨洪模型和内涝风险分析方面的研究也取得了较好的成果,麻蓉等<sup>[7]</sup>利用 MIKE 21 模型模拟了某小区地面积水过程,为城市内涝灾害的防治提供了技术支撑;黄纪萍<sup>[8]</sup>利用 SWMM 构建城市排水管网模型,在城市内涝模拟技术方面取得了较为理想的效果;沈黎达等<sup>[9]</sup>基于复杂的城市下垫面,提出了一种新的城市内涝汇水区的划分方法。此外,对城市内涝与降雨时空分布的关系、内涝风险的动态评估和防涝规划等方面的研究也取得了良好的进展<sup>[10-14]</sup>。

目前,城市雨洪模拟技术逐渐成熟,已开发了多种模型,如 SWMM、STORM、Info - Works、MIKE 系列模型等<sup>[15]</sup>。从不同的条件下对城市内涝模拟的可行性来看,MIKE 系列模型非常适合于模拟不同情景下的城市雨洪过程。本文在现有研究的基础上,以西安市新城区为研究区域,利用 MIKE FLOOD 平台模拟不同情景下城市地表淹没水深、淹没范围、淹没历时等情况,并对内涝风险做出系统评估。

## 2 研究区概况

西安市新城区位于陕西省西安市城区东北部,跨越城墙内外,历史悠久,交通便利,地理位置优越,旅游资源丰富,具有深厚的文化积淀。该区域占地面积约 30.22 km<sup>2</sup>,年降水量在 560 ~ 630 mm 之间,随着城市规模的不断扩大,地下排水管网分布密集,布设了雨水、污水和雨污合流 3 种排水系统,雨水大多通过雨水管道排入护城河。新城区土地利用化程度高,城市化建设规模较大,用地特征明显。现状土地利用类型大致分为 7 类,据统计,西安市城区总绿

化率为 33.90%,其中新城区绿化率仅为 17.23%,远低于平均水平。当遇到暴雨等极端天气时,城区内极易遭遇内涝灾害。故本研究在现有土地利用的基础上,将研究区部分硬化地表和低矮城中村转化为人工草地<sup>[16]</sup>,使研究区绿地面积比例分别增加至 20%、25%、30%、35%,分析不同情景对地面淹没情况的影响。研究区土地利用类型分布现状及实测积水点位置见图 1。

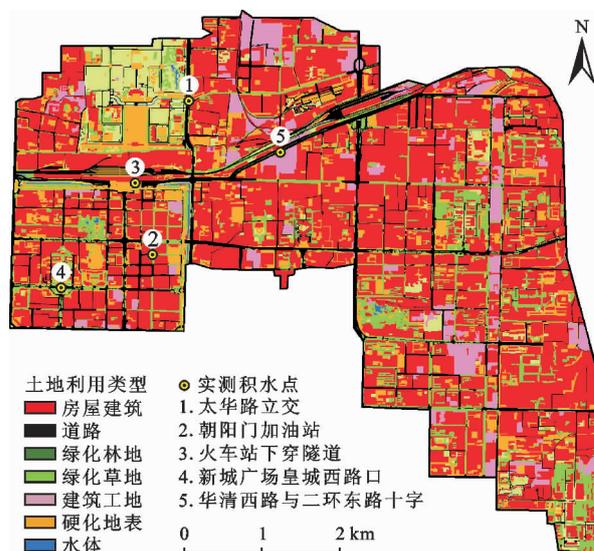


图1 研究区土地利用类型分布现状及实测积水点位置

## 3 研究方法

本文基于 MIKE FLOOD 洪水模型将城市地下管网模型(MIKE URBAN)与二维地表漫流模型(MIKE 21)耦合,弥补了单一模型计算的不足。一维排水管网模型包含降雨径流和管流两个模块,其中降雨径流模块以不同频率的设计暴雨作为输入条件,一维水流的计算通过隐式有限差分法进行求解。利用圣维南方程组<sup>[17]</sup>来计算管流模块管网中的水流状态,圣维南方程组由连续方程和动量方程组成:

连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2)$$

式中: $Q$ 为管道过水断面流量,m<sup>3</sup>/s; $A$ 为管道过水断面面积,m<sup>2</sup>; $x$ 为水流方向的距离,m; $t$ 为时间,s; $S_0$ 为管道坡度; $S_f$ 为水力坡度; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $h$ 为管道水深,m。

MIKE 21 模型用来模拟地表流场、流速和水位

的变化<sup>[18]</sup>,应用二维浅水流动质量和动量守恒方程组求解。其连续性方程可由公式(3)表示,公式(4)、(5)分别表示 X 和 Y 方向的动量方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial(\zeta - h)}{\partial t} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \\ \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x + \\ \frac{h}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(p_a) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \\ \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xy}) \right] + \Omega_p - fVV_y + \\ \frac{h}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(p_a) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $h$  为水深,m; $\zeta$  为地表高程,m; $x,y$  为空间坐标,m; $p,q$  分别为  $x,y$  方向上的流通流量,即单宽流量, $m^3/(s \cdot m)$ ; $C$  为谢才系数, $m^{1/2}/s$ ; $g$  为重力加速度, $m/s^2$ ; $t$  为时间,s; $\tau_{xx},\tau_{xy},\tau_{yy}$  为有效剪切应力分量, $kg/m^2$ ; $\rho$  为水的密度, $g/m^3$ ; $V_x,V_y$  为风速及在  $x,y$  方向上的分量, $m/s$ ; $\Omega$  为科里奥利参数; $f$  为风阻力系数; $p_a$  为大气压强,Pa。

## 4 模型构建与验证

### 4.1 研究区管网模型建立

根据研究区现有数据,通过 MIKE URBAN 建立一维排水管网模型。管道直径 200 ~ 2 600 mm,检查井直径设置为 1 m,根据检查井的分布情况,采用泰森多边形法划分多个子集水区。模型包含 435 个管线、448 个检查井、6 个排水口,概化后的管网模型如图 2 所示。

构建二维地表漫流模型的关键是数字高程模型 (DEM),DEM 栅格精度直接影响到模型计算的准确度和稳定性<sup>[19]</sup>。采用分辨率为 5 m 的高精度 DEM,将不同土地利用类型加载于 DEM 之上,形成完整的地形图。最后,利用 MIKE FLOOD 耦合模拟平台对管道内的水流和地表水的性能进行重新评估,模拟管道水流与地表水的相互作用。

### 4.2 模型参数率定与验证

模型参数的率定和验证通过输入实测降雨数据来完成,由于内涝点的实测数据有限,故只收集到两场有效降雨数据,其中参数率定过程利用 2016 年 7 月 24 日实测降雨,总降雨量约为 19.8 mm,持续时

间 304 min,降雨重现期接近 1 年一遇,选取太华路立交、朝阳门加油站、火车站下穿隧道等 3 个实测积水点(积水点位置见图 1)水深对结果进行率定。模型基本数据输入完成后需要多次调试参数,直至模拟结果与实测内涝点水深相吻合。由率定结果可知,下垫面不透水率与水文衰减系数对管网模型影响较大,而二维地表漫流模型的结果准确性主要取决于网格的大小与模拟的时间步长。其他参数率定结果见表 1。

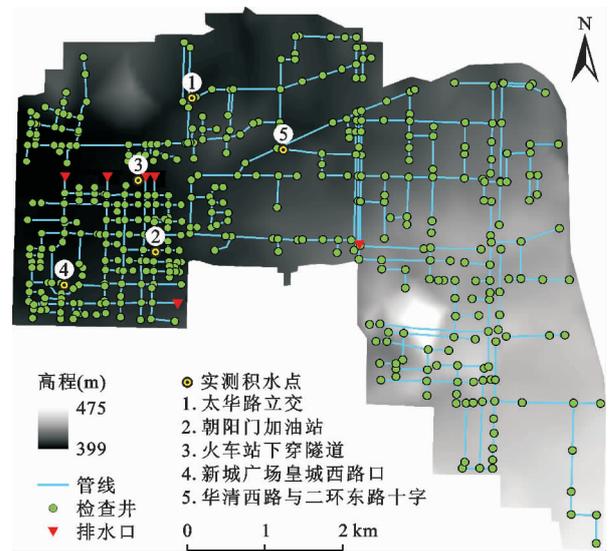


图 2 研究区概化管网模型图

表 1 模型各参数率定结果

MIKE URBAN		MIKE 21	
参数	取值	参数	取值
房屋建筑	0.95	网格大小/m	10 × 10
道路	0.85	时间步长/s	0.5
绿化林地	0.07	初始水位/m	0
绿化草地	0.15	干水深/m	0.002
建筑工地	0.57	淹没水深/m	0.003
硬化地表	0.7	涡黏系数	16
水域	0	糙率	32
水文衰减系数	0.9		
初损	0.0006		

注:表中各土地利用类型参数为不透水率。

选取 2016 年 6 月 23 日实测降雨对应的华清西路与二环东路十字与新城广场皇城西路口两处的实测积水点(积水点位置见图 1)水深对率定结果进行验证,该次降水的总降雨量为 25.6 mm,历时 504 min,降雨重现期接近 2 年一遇,模型率定及验证结果见表 2。由表 2 可以看出,模拟结果均在积水点

水深的实测范围内,表明模型各参数设定合理,模拟精度较高,具有良好的可靠性和稳定性,可用于城市内涝的模拟研究。

表2 积水点水深模型率定及验证结果

项目	积水点位置	积水点水深/m	
		模拟值	实测值
率定	太华路立交	0.12	>0.10
	朝阳门加油站	0.21	>0.15
	火车站下穿隧道	0.14	>0.10
验证	华清西路与二环东路十字	0.22	>0.20
	新城广场皇城西路口	0.30	>0.25

### 4.3 雨型设计

为了研究不同频率暴雨过程对研究区内涝情况的影响,根据西安市降雨特点并结合西安市暴雨公式<sup>[20]</sup>合成短历时降雨过程线,暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{6.041(1 + 1.4751 \lg P)}{(t + 14.72)^{0.704}} \quad (6)$$

式中: $q$ 为暴雨强度,mm/min; $P$ 为降雨重现期,a; $t$ 为降雨历时,min。

城市地区降雨多为短历时降雨,诸多学者对短历时雨型进行了不同程度的研究,其中芝加哥雨型在短历时的设计降雨分布中得到了广泛应用。因此,结合研究区实际情况,利用芝加哥雨型计算设计降雨过程,根据毕旭等<sup>[21]</sup>的研究结果,雨峰系数取值为0.35。根据西安市暴雨强度公式和降雨分布过程,计算出3、5、10、20 a的高重现期短历时(2 h)降雨量。设计雨量分别为39、46、56、67 mm。

## 5 结果与分析

### 5.1 不同水深下的淹没范围

根据研究区在 MIKE FLOOD 耦合平台的模拟结果,比较了现状及4种情景在不同降雨重现期下的淹没深度及淹没范围大小。图3显示了在现状土地利用下,研究区在不同重现期降雨时地面最大水深的分布情况。

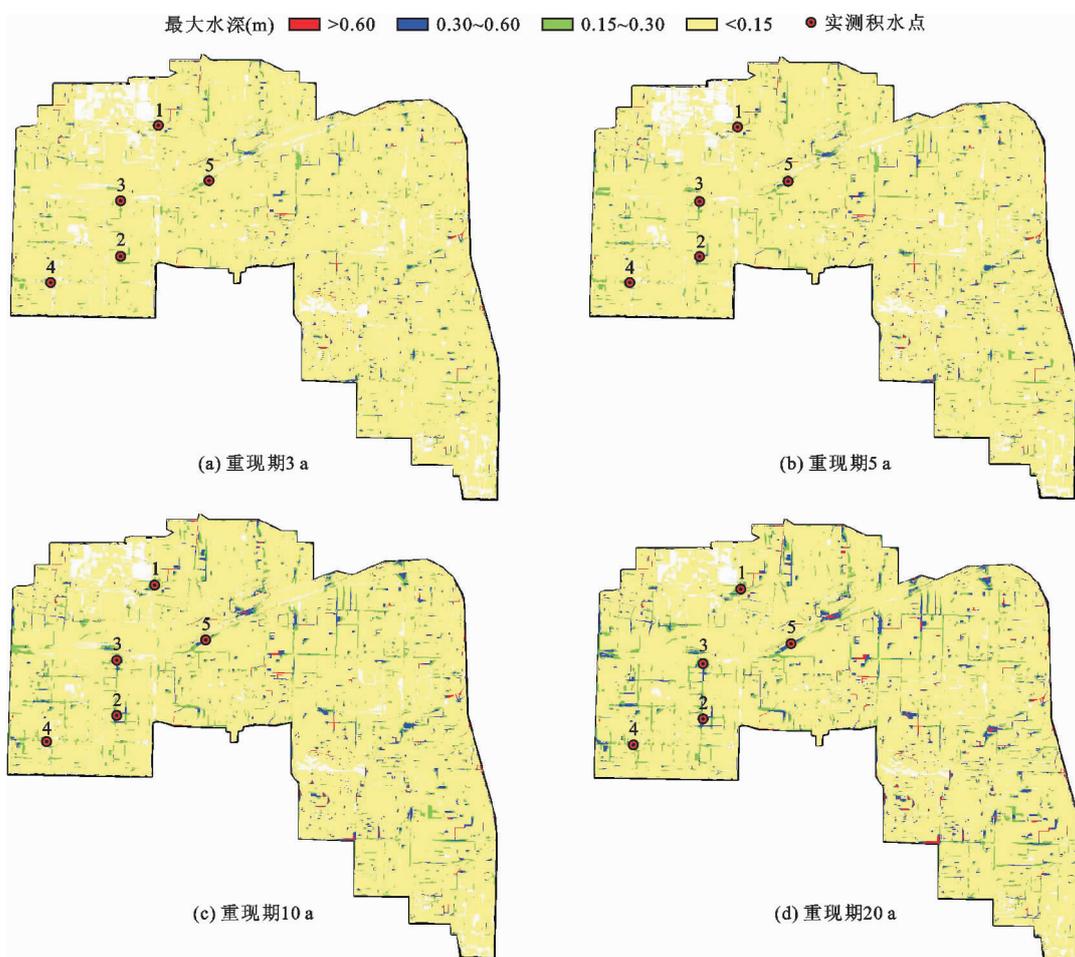


图3 研究区土地利用现状下不同降雨重现期最大水深分布

图3中的模拟结果显示,研究区在现状土地利用下,不同重现期降雨的地面积水水深以0~0.05 m为主,其次为0.05~0.15 m;0.05 m以上深度的积水大多集中在道路及排水管道尺寸较小的区域,主要因为积水点的位置一般低于周边地势,而且管网分布较为密集的区域通常存在管径小、设计标准低、排水系统老化等问题,导致雨水不能及时排放,形成内涝灾害;淹没面积随着重现期的增加呈现增

大趋势,局部水深达到0.6 m以上的地区一般处于高密度住宅区附近,地势较低,人口密集,地面多为不透水路面。从整体上来看,不同重现期下研究区水深的空间分布大体呈一致状态。

根据模拟计算结果,统计了研究区不同降雨重现期各情景各淹没水深分级的淹没面积,如表3所示,其中情景1~4分别代表研究区绿地面积比例为20%、25%、30%和35%的工况。

表3 研究区不同降雨重现期各情景各淹没水深分级的淹没面积统计

降雨 重现期/a	情景	淹没水深/m					总计	淹没水深大于0.15m 的面积比例/%
		0.05~0.15	0.15~0.3	0.3~0.4	0.4~0.6	>0.6		
3	现状	211.65	72.66	14.81	10.09	7.42	316.63	33.16
	情景1	205.75	69.64	14.04	9.65	7.15	306.23	32.81
	情景2	193.95	63.99	12.52	8.62	6.94	286.02	32.19
	情景3	183.40	60.12	10.55	7.37	6.73	268.17	31.61
	情景4	173.97	54.85	9.67	6.26	6.54	251.29	30.77
5	现状	240.91	97.33	19.75	14.49	9.14	381.62	36.87
	情景1	235.78	93.22	18.93	13.67	8.81	370.41	36.35
	情景2	224.50	85.96	17.27	12.38	8.38	348.49	35.58
	情景3	210.05	80.42	15.56	11.26	7.97	325.26	35.42
	情景4	194.46	75.86	13.61	10.58	7.61	302.12	35.63
10	现状	272.12	126.32	29.75	23.04	12.78	464.01	41.35
	情景1	266.11	122.09	27.70	21.79	12.26	449.95	40.86
	情景2	255.49	114.71	24.63	19.73	11.49	426.05	40.03
	情景3	242.80	110.30	21.90	17.38	10.73	403.11	39.77
	情景4	227.43	105.12	20.01	15.78	10.21	378.55	39.92
20	现状	298.06	149.09	43.56	32.15	18.43	541.29	44.94
	情景1	293.46	144.35	41.41	30.41	17.58	527.21	44.34
	情景2	282.27	136.26	37.00	27.72	16.30	499.55	43.50
	情景3	269.72	129.06	33.23	24.50	15.12	471.63	42.81
	情景4	253.86	122.22	29.00	22.24	14.38	441.70	42.53

由表3可看出,淹没范围、淹没深度与设计降雨重现期之间存在正相关关系;随着淹没深度级别的增大,其相应的淹没面积逐渐减小;增加绿化率会在一定程度上减小淹没范围,对城市洪水具有一定的调节作用,不同情景下绿地面积比例越高,则对地面积水的削减效果越好,绿地比例在35%时(情景4)的效果最为明显,各重现期下分别比现状总淹没面积减少20.64%、20.83%、18.42%、18.40%。但也发现降雨重现期达到10年一遇时,这种削减效应会开始有所减弱,原因可能是在高重现期降雨条件下,不同下垫面的入渗能力达到饱和,地表逐渐汇集超

渗雨水,同时大部分排水管网也达到满流状态,部分地区的多余积水不能及时排出,短时间难以缓解内涝压力。

## 5.2 不同淹没历时的淹没范围

除淹没深度外,淹没历时也是评价内涝灾害的重要指标。一般情况下,积水时间较长的区域往往积水深度较深,因为积水较深的区域一般地势较低,很难在短时间内排出聚集的雨水。通过统计不同情景和不同降雨重现期的计算结果,统计出淹没水深在0.15 m以上以及淹没历时超过20 min的不同历时的淹没范围,结果如表4所示。

表4 研究区不同降雨重现期各情景不同淹没历时的淹没面积统计

hm<sup>2</sup>

降雨 重现期/a	情景	淹没历时/min					总计
		20~40	40~60	60~80	80~100	>100	
3	现状	28.33	28.43	19.42	1.21	0	77.39
	情景1	27.28	27.00	18.00	1.13	0	73.41
	情景2	24.70	24.80	15.73	0.98	0	66.21
	情景3	22.69	23.03	13.65	0.73	0	60.10
	情景4	20.29	20.10	12.19	0.68	0	53.26
5	现状	34.44	38.62	31.84	2.15	0	107.05
	情景1	33.55	36.99	29.69	2.01	0	102.24
	情景2	31.72	34.07	26.45	1.71	0	93.95
	情景3	30.54	32.24	23.23	1.32	0	87.33
	情景4	29.50	29.85	20.36	1.22	0	80.93
10	现状	43.55	54.57	53.22	4.08	0	155.42
	情景1	42.20	52.38	50.10	3.76	0	148.44
	情景2	39.59	48.43	45.03	3.27	0	136.32
	情景3	36.82	46.37	40.28	2.86	0	126.33
	情景4	34.54	43.79	36.31	2.62	0	117.26
20	现状	47.72	69.26	78.82	7.40	0	203.20
	情景1	46.30	67.22	74.38	6.82	0	194.72
	情景2	44.21	63.03	66.96	5.92	0	180.12
	情景3	42.42	59.25	60.79	5.12	0	167.58
	情景4	40.20	55.47	55.50	4.61	0	155.78

由表4可以看出,各情景淹没历时随着降雨重现期的增大而延长;同一历时时段的淹没面积随着研究区绿化率的增大而减小,但重现期在10年一遇以上时,淹没面积的削减效果同样呈现减弱的趋势,这是因为高重现期降雨情况下进入排水管道的流量也随之增大,但管道的排水能力受管道尺寸大小的限制,存在排水时间随重现期的增大而延长的现象。上述结果表明,在高重现期的降雨情况下,单靠增加下垫面透水率对缓解城市内涝的效果并不明显,除了重视绿色基础设施的建设以外,还应从源头防治,多措并举,加强排水控制系统的管理,在保证城市水安全的前提下,解决超标雨水的问题。

### 5.3 研究区内涝风险评估

城市地表积水风险应综合考虑淹没水深和淹没历时两个方面来进行分析,以准确评价强降雨对城市地区的影响。结合西安地区的内涝研究<sup>[10]</sup>,对模型模拟结果的风险等级进行划分,将内涝风险分为3个等级:(1)轻度积涝,即最大水深0.15~0.6 m且淹没历时15~30 min;(2)中度积涝,即最大水

深0.15~0.6 m且淹没历时30~60 min;(3)重度积涝,即最大水深0.6 m以上且淹没历时60 min以上。按3个内涝风险等级计算出相应的淹没区域面积,降雨重现期为3和20 a时,研究区现状与情景4(绿化率为35%)的内涝风险等级分布如图4所示,各风险等级相应的淹没面积统计结果见表5。

由图4和表5可以看出,整个研究区的内涝风险主要来自道路,各内涝风险等级相应的道路淹没面积占总淹没面积的50%左右;随着重现期的增加,各内涝风险等级的淹没面积也相应增大,5个实测积水点的内涝风险从轻度积涝转变为中度积涝;当降雨重现期为3 a时,研究区现状内涝风险等级主要以中度积涝为主,当降雨重现期为20 a时,研究区中度积涝风险的淹没面积增大,少数地势低洼地区会出现重度积涝现象;当绿化面积增大到35%时(情景4),各重现期内涝风险总淹没面积比现状分别减少了30.26%、23.98%、23.25%、23.07%,结合研究区布设较为密集的排水系统,能够排出多余的水量,内涝风险与现状相比有所下降。

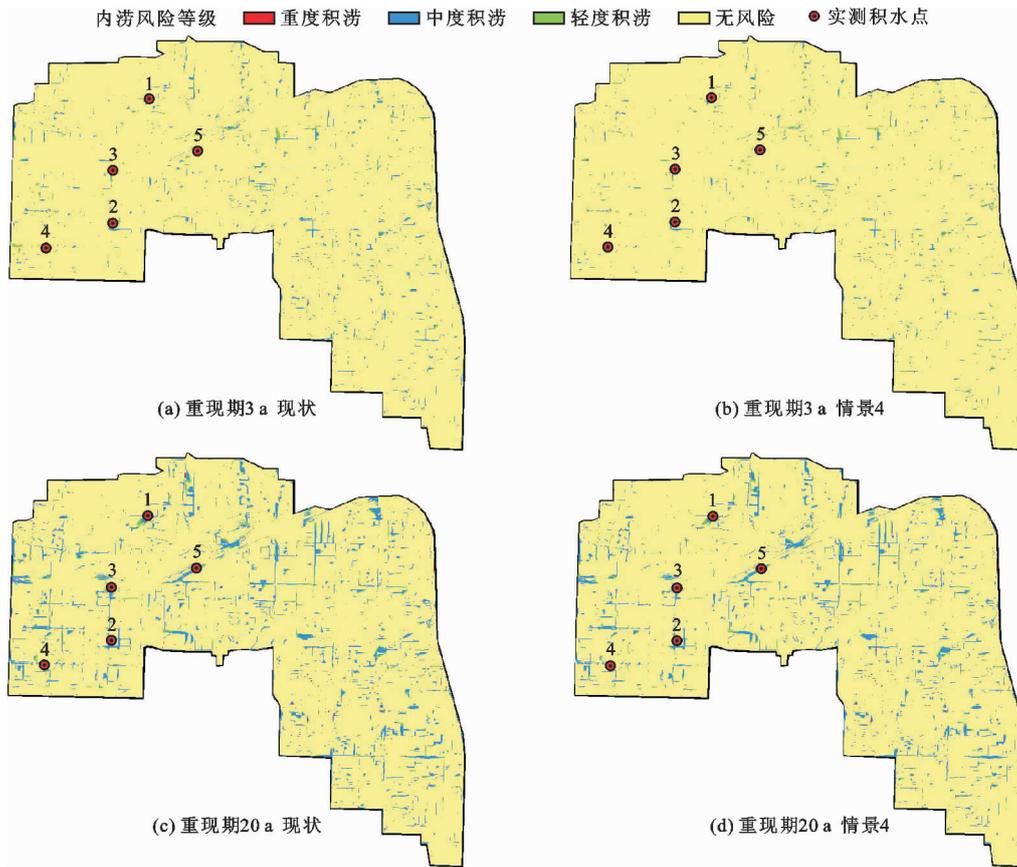


图 4 研究区现状与情景 4 的内涝风险等级分布(降雨重现期为 3、20 a)

表 5 研究区各内涝风险等级相应的淹没面积统计

hm<sup>2</sup>

降雨 重现期/a	情景	轻度积涝		中度积涝		重度积涝	
		淹没面积	道路淹没面积	淹没面积	道路淹没面积	淹没面积	道路淹没面积
3	现状	20.63	9.64	62.61	34.36	0.44	0.25
	情景 1	20.07	9.51	59.20	32.85	0.41	0.23
	情景 2	18.16	8.75	53.63	30.77	0.38	0.23
	情景 3	16.55	7.99	48.72	28.50	0.36	0.22
	情景 4	14.31	6.50	43.70	26.26	0.35	0.22
5	现状	25.11	10.59	89.51	48.91	0.69	0.39
	情景 1	24.42	10.58	85.12	47.17	0.65	0.37
	情景 2	23.14	10.46	77.56	44.43	0.57	0.35
	情景 3	22.06	10.14	71.74	42.51	0.50	0.30
	情景 4	20.96	10.02	66.27	40.31	0.43	0.28
10	现状	29.68	12.72	133.77	69.47	1.17	0.68
	情景 1	28.91	12.73	127.34	67.06	1.12	0.66
	情景 2	27.74	12.54	116.33	63.04	1.04	0.65
	情景 3	27.32	12.49	107.53	60.04	0.61	0.63
	情景 4	26.19	12.40	99.62	57.31	0.53	0.62
20	现状	33.15	14.17	178.67	88.20	2.40	1.55
	情景 1	32.35	13.88	170.63	85.56	2.28	1.48
	情景 2	30.27	13.37	157.59	81.06	2.11	1.44
	情景 3	27.71	12.77	147.23	78.26	1.84	1.40
	情景 4	25.46	12.57	137.56	75.28	1.77	1.38

## 6 结 论

建立了研究区水动力学的 MIKE FLOOD 耦合模型,通过设定 4 种情景来分析不同降雨重现期下,改变绿地面积比例对城市洪水及内涝风险的影响,得到的主要结论如下:

(1) MIKE 模型能够较好地模拟城市管网中的水动力过程和地表积水情况,模型率定和验证的结果表明,模拟的积水点水深均在实测值的范围内,在实际的工程领域内具有一定的可靠性和广泛的应用前景。

(2) 绿化面积比例为 35% 时,淹没面积削减效果最为明显,在降雨重现期为 3、5、10、20 a 时,0.05 m 以上水深的淹没面积比现状分别减少了 20.64%、20.83%、18.42%、18.40%;积水历时 20 min 以上的淹没面积比现状分别减少了 31.18%、24.40%、24.55%、23.33%;各重现期内涝风险总淹没面积比现状分别减少了 30.26%、23.98%、23.25%、23.07%,总体来看,增加绿地面积对城市地表水深、淹没范围和内涝风险具有一定的控制作用,其中重现期在 5 年一遇及其以下的降雨控制效果较为显著,随着重现期的增大,控制效果会减弱,说明传统的海绵城市措施已不能满足高重现期降雨等极端天气下的城市防洪排涝需求,应制定一套切实可行的方案来应对强降雨等突发事件。

(3) 建议城市应继续加强绿色基础设施的建设,同时加强雨水综合利用,建立完善的城市雨洪管理体系;排水管网应做好雨污分流,提高应急排水能力;在源头设置雨水处理系统,实现径流总量源头控制并保持排水管道的畅通。这种多措并举、上下联动的协调机制有利于缓解洪水压力,减少城市内涝带来的风险和损失。

### 参考文献:

- [1] 刘俊萍, 韩君良. 小城市排水防涝规划模拟[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(11): 163-165.
- [2] KONG Fanhua, BAN Yulong, YIN Haiwei, et al. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development [J]. Environmental Modelling and Software, 2017, 95: 132-142.
- [3] 王伟武, 汪琴, 林晖, 等. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题, 2015(10): 24-28.
- [4] YIN Zhan'e, YIN Jie, XU Shiyuan, et al. Community-based scenario modelling and disaster risk assessment of urban rainstorm waterlogging [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(2): 274-284.
- [5] SCHMITT T, THOMAS M, ETTRICH N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems[J]. Journal of Hydrology, 2004, 299(3-4): 300-311.
- [6] LI Jiake, ZHANG Bei, MU Cong, et al. Simulation of the hydrological and environmental effects of a sponge city based on MIKE FLOOD [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(2): 32.
- [7] 麻蓉, 白涛, 黄强, 等. MIKE 21 模型及其在城市内涝模拟中的应用[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 172-179.
- [8] 黄纪萍. 城市排水管网水力模拟及内涝预警系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [9] 沈黎达, 李瑶, 李东臣, 等. 复杂下垫面城市暴雨内涝汇水区划分方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 50-58+67.
- [10] 高维英, 李明, 李菁. 西安城市内涝分布特征及其与降雨量的关系[J]. 陕西气象, 2014(2): 17-20.
- [11] 石涛, 谢五三, 张丽, 等. 暴雨洪涝风险评估的 GIS 和空间化应用——以芜湖市为例[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 169-176.
- [12] 苏伯尼, 黄弘, 张楠. 基于情景模拟的城市内涝动态风险评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(6): 684-690.
- [13] 张旭, 李占斌, 何文虹, 等. 基于 MIKE URBAN 的西安市中心城区雨洪过程模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 157-163.
- [14] 高小平, 曾曜. 城市排水(雨水)防涝规划编制技术路线探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(4): 19-23.
- [15] ANA E V, BAUWENS W. Modeling of the structural recreation of urban drainage pipes: The state of the art in statistical methods[J]. Urban Water Journal, 2010, 7(1): 47-59.
- [16] 刘文平. 基于景观服务的绿色基础设施规划与设计研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [17] LIN S S, HSIEH S H, KUO J T, et al. Integrating legacy components into a software system for storm sewer simulation [J]. Environmental Modelling and Software, 2006, 21(8): 1129-1140.
- [18] Danish Hydraulic Institute. MIKE 21 flow model hydrodynamic module user: Guide manual [R]. Copenhagen: DHI, 2014.
- [19] 周玉文, 赵树旗, 王乾勋, 等. 快速评估模型在排水防涝规划中的改进应用[J]. 给水排水, 2016, 42(2): 45-48.
- [20] 王丹. 基于 MIKE 模型的西安市曲江新区城市内涝模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [21] 毕旭, 程龙, 姚东升, 等. 西安城区暴雨雨型分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(35): 295-297+325.