

# 设计降雨特征对城市内涝模拟结果的影响分析

宋瑞宁<sup>1</sup>, 谢芳<sup>1</sup>, 李小宁<sup>2</sup>, 赵天明<sup>1</sup>, 秦祎<sup>3</sup>

(1. 北控水务(中国)投资有限公司, 北京 100102; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100045)

**摘要:** 降雨是城市内涝的主要诱因之一, 不同降雨特征对于城市内涝风险的影响也有所区别。为了进一步挖掘降雨特征对城市内涝风险的影响, 采用综合流域排水模型(InfoWorks ICM)构建了我国南方某城市的内涝模型, 系统分析了设计降雨的雨型和历时特征对城市内涝模拟结果的影响。在4个重现期的3种降雨雨型和3个降雨历时条件下, 共计36个不同降雨情景对研究区的内涝情况进行模拟。通过对比不同模拟情景下的积水深度、积水面积以及积水量等结果发现: 在相同降雨雨型和重现期条件下, 降雨历时对积水深度的影响有一定的差别; 在不同降雨雨型和降雨历时模拟情景中, 积水点的位置基本保持一致, 而积水面积受降雨雨型和降雨历时的双重影响; 峰值积水量受降雨雨型影响较大, 受降雨历时影响较小, 而积水总量受降雨历时影响较大, 受降雨雨型影响较小。研究中量化分析了不同设计降雨特征对城市内涝模拟结果的影响, 旨在为合理地开展城市内涝预警以及应急管理等工作提供依据。

**关键词:** 城市内涝; 设计降雨; 雨型; 降雨历时; InfoWorks ICM 模型

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)03-0136-08

## Design rainfall characteristics affects urban flood inundation simulation

SONG Ruining<sup>1</sup>, XIE Fang<sup>1</sup>, LI Xiaoning<sup>2</sup>, ZHAO Tianming<sup>1</sup>, QIN Yi<sup>3</sup>

(1. Beijing Enterprises Water Group (China) Investment Limited, Beijing 100102, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited, Beijing 100045, China)

**Abstract:** Rainfall is one of the leading causes of urban flood inundation, and different rainfall characteristics have different influences on the urban flood inundation risk. In order to investigate the influences, an urban flood inundation model of a southern city in China was established to systematically analyze the influence of design rainfall pattern and duration characteristics on urban flood simulation results with the application of the integrated catchment model (InfoWorks ICM). To evaluate flood inundation risk in the study area, 3 rainfall patterns and 3 rainfall duration under 4 return periods were chosen for the combinations of a total of 36 different design rainfall scenarios. By comparing the results of the scenarios in terms of inundation depth, inundation area and inundation volume, it was found that under the same rainfall pattern and return period, the influence of rainfall duration on inundation depth varies within a certain range; in all scenarios of different rainfall patterns and duration, the locations of the inundation sites basically remain the same; the inundation area is affected by both rainfall patterns and duration, peak inundation volume is influenced more by rainfall patterns than by rainfall duration, but total inundation volume is influenced more by rainfall duration and less by rainfall patterns. This study quantified the influence of different design rainfall characteristics on the urban flood inundation simulation results which aims to provide a technical basis for urban flood inundation early warning and emergency management.

**Key words:** urban flood inundation; design rainfall; rainfall pattern; rainfall duration; InfoWorks ICM

收稿日期: 2022-09-28; 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000105); 国家自然科学基金青年基金项目(42207057); 国家自然科学基金联合基金项目(U2040209)

作者简介: 宋瑞宁(1988—), 男, 河北邢台人, 硕士, 工程师, 主要从事排水系统模型模拟、城市雨洪控制利用研究。

## 1 研究背景

近年来,受全球气候变化和城镇化快速发展的双重影响,我国极端降雨事件频发<sup>[1-4]</sup>,由降雨引发的城市内涝逐渐成为制约我国经济和社会发展的重大问题。极端降雨事件是诱发城市内涝的关键因素,而极端降雨事件的特征,例如雨型、降雨强度以及降雨历时等因素对城市内涝的影响尚不清晰<sup>[5]</sup>。为了进一步加强城市排水防涝体系建设,推动城市内涝治理,需要全面地对城市内涝风险进行评估。而很多城市由于缺少内涝积水特征数据,例如积水深度、积水范围、退水时间等信息的记录,加之传统的城市排水计算方法也难以估算城市内涝积水深度和积水范围。因此,需要通过模型模拟不同设计降雨情景下的城市内涝积水情况<sup>[6-9]</sup>,来为城市排水系统规划设计和应急管理提供依据。

迄今为止,诸多学者已经从单一雨型的不同雨峰系数、单峰或双峰等情景对城市内涝积水深度、积水面积以及积水量等指标产生的影响进行了研究。Mei等<sup>[10]</sup>应用 TELEMAC-2D 模型构建了厦门市的内涝灾害评估模型,并结合12种降雨情景模拟分析了降雨特征对内涝灾害的影响。Mu等<sup>[11]</sup>基于 FLO-2D 模型建立了越南顺化市(Hue City, Vietnam)的城市内涝模型,结合4种雨型分析了不同降雨峰值时间对城市内涝积水深度和面积的影响。雷向东等<sup>[12]</sup>基于 AGSWM 耦合模型研究了不同雨峰位置(前、中、后峰)的芝加哥设计暴雨对城市内涝的响应规律;胡彩虹等<sup>[13]</sup>采用芝加哥雨型生成的不同单峰、双峰型设计降雨对郑州市金水区南部进行了内涝过程场景推演;侯精明等<sup>[14]</sup>模拟分析了不同重现期及峰值比例设计暴雨条件下的西咸新区内涝过程。上述研究采用的设计降雨均为根据当地暴雨强度公式计算得到的指定重现期条件下的降雨量,以芝加哥雨型法进行时程分配<sup>[15]</sup>。但是芝加哥雨型为单峰降雨,暴雨峰值过于尖瘦,与实际降雨差异较大,仅采用单一的芝加哥雨型可能会导致模拟结果不够准确<sup>[16]</sup>。因此,需要开展不同降雨特征对城市内涝模拟结果的影响研究。

尽管近年来关于降雨雨型<sup>[17-19]</sup>的研究逐渐增多,但是仍然缺少针对不同降雨雨型和降雨历时对城市内涝模拟结果的影响进行综合评估的系统研究<sup>[20]</sup>。因此,为了确定设计降雨雨型和降雨历时的选择对城市内涝模拟结果产生的影响,本研究采用综合流域排水模型(InfoWorks integrated catchment

management, InfoWorks ICM)建立了我国南方某城市的内涝模型,系统分析了设计降雨雨型和降雨历时对城市内涝积水深度、积水面积以及积水量的影响,从而能够更科学、更全面地评估城市内涝风险,期为城市排水防涝、内涝预警等工作提供参考和借鉴。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

研究所需数据包括降雨数据、卫星影像数据、地形数据、雨水管网数据以及相关规划文本等资料。其中,降雨数据根据暴雨强度公式和设计雨型计算得出,地形数据来源于当地1:500地形图测绘数据,雨水管网数据来源于当地2020年排水管网普查数据,内涝积水点信息来源于相关规划文本、新闻报道以及现场调研等。

### 2.2 研究区概况

研究区域位于我国南方某城市开发区,占地面积为5.32 km<sup>2</sup>,其中大部分为产业园区(51.21%),其余为小区(10.01%)、道路(18.54%)和绿地(20.24%),研究区土地利用类型分布如图1所示。该地区夏季炎热多雨,雨量年际变化较大,年内分布不均。年均降雨量为1 103.3 mm,降水较为集中,多在6—8月,以7月最多,灾害性城市内涝多发生在这一期间。

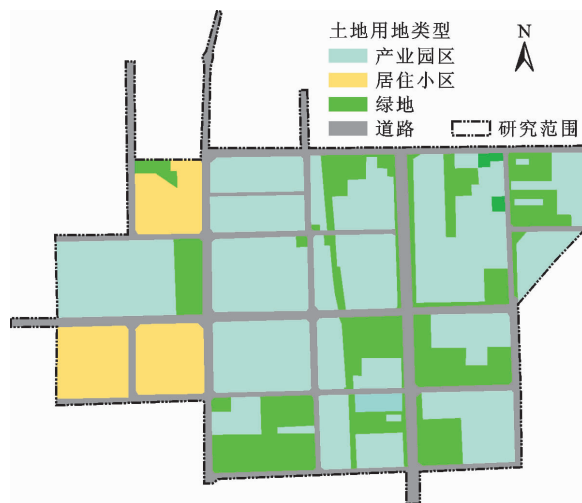


图1 研究区土地利用类型分布

### 2.3 汇水区划分

研究区域排水体制为雨污分流,雨水管径为DN300~DN2000,总长为46.46 km。将管网普查数据进行拓扑结构分析与检查后导入模型得到研究区的排水系统概化图,包括3 205条雨水管道、1 835个雨水口、1 361个检查井和7个排口。以雨水口为

节点对研究区中的道路进行子汇水区划分<sup>[21]</sup>,以检查井为节点对研究区中剩余的地块进行子汇水区划分。最终,模型中共得到2 889个子汇水区。

## 2.4 模型参数设置

结合《室外排水设计标准》(GB 50014—

2021)<sup>[22]</sup>、模型帮助文件以及相关文献<sup>[23]</sup>进行模型参数设置。产业园区、小区和道路的产流模型采用固定径流系数法(Fixed),绿地采用霍顿下渗模型,地表汇流采用SWMM非线性水库法进行计算,雨水管道糙率系数为0.014,具体参数设置见表1。

表1 子汇水区产汇流参数设置

产流表面	初损类型	初期损失值/mm	径流量类型	固定径流系数	初渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	稳渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	衰减率/h <sup>-1</sup>	汇流模型	汇流参数
产业园区	Abs	2	Fixed	0.80				SWMM	0.012
小区	Abs	3	Fixed	0.75				SWMM	0.013
道路	Abs	2	Fixed	0.95				SWMM	0.011
绿地	Abs	4	Horton		200	12.7	2	SWMM	0.150

## 2.5 设计降雨

短历时设计降雨主要作为现状管网及排涝系统模拟评估的输入数据,用于评估城市排水系统的排水能力和城市内涝的风险。研究区排水管网设计重现期为3年一遇,局部重要地区的设计重现期为5年一遇,内涝防治标准为有效应对不低于30年一遇的暴雨。因此,采用3、5、30、50年一遇设计降雨对研究区的内涝积水情况进行模拟研究。

$$q = \frac{4849.7(1 + 0.846 \lg P)}{(t + 19.1)^{0.896}} \quad (1)$$

式中: $q$ 为设计暴雨强度,L/(s·hm<sup>2</sup>); $t$ 为降雨历时,min; $P$ 为设计重现期,a。

重现期为3、5、30、50年的1 h累计降雨量分别为48.71、55.23、78.07、84.59 mm;2 h累计降雨量分别为58.75、66.61、94.16、102.02 mm;3 h累计降雨量分别为63.91、72.45、102.43、110.97 mm。

## 2.6 设计降雨雨型

本文采用综合流域排水模型(InfoWorks ICM)构建城市内涝模型,而降雨是城市内涝模型中最重要的输入数据之一,它影响着地表产流、汇流以及内涝积水情况等。在内涝风险评估过程中通常采用设计降雨,因其具有方便、灵活的优点,可以根据需求推求不同降雨历时、不同重现期的降雨过程。目前,在城市内涝风险评估和研究中应用较多的设计降雨雨型有芝加哥雨型、三角形雨型以及Pilgrim & Cordery雨型等。

**2.6.1 芝加哥雨型** 芝加哥雨型是由Keifer和Chu在1957年根据降雨强度-历时-频率曲线关系得到的一种不均匀设计雨型<sup>[24]</sup>,又称K&C雨型。芝加哥雨型是以暴雨强度公式为基础设计的典型降雨过程,通过引

入雨峰位置系数 $r$ 来描述暴雨峰值发生的时刻,将暴雨历时时间序列分为峰前和峰后两个部分<sup>[25]</sup>。 $r$ 表示降雨的峰现时间与降雨总历时的比值, $0 < r < 1$ ,通常是根多年降雨资料统计分析得出,一般在0.3~0.5之间。因此,一定重现期条件下的峰前、峰后瞬时降雨强度可由以下公式计算得出。

$$i_a = \frac{A \left[ \frac{(1-n)t_a}{r} + b \right]}{\left( \frac{t_a}{r} + b \right)^{n+1}} \quad (2)$$

$$i_b = \frac{A \left[ \frac{(1-n)t_b}{1-r} + b \right]}{\left( \frac{t_b}{1-r} + b \right)^{n+1}} \quad (3)$$

$$A = A_1(1 + C \lg P) \quad (4)$$

式中: $i_a$ 、 $i_b$ 分别为峰前、峰后瞬时降雨强度,mm/min; $t_a$ 为峰前降雨历时,min; $t_b$ 为峰后降雨历时,min; $r$ 为雨峰位置系数; $A_1$ 、 $C$ 、 $b$ 、 $n$ 为暴雨强度公式中的参数。

芝加哥雨型是目前我国应用较多的一种单峰型雨型,通常适用于汇流面积相对较小或中等的城镇地区,降雨历时一般在1~4 h之间。由于研究区降雨的雨峰大多位于前部和中部,故本次雨峰位置系数取值为0.4。基于重现期、降雨历时和雨峰位置系数计算出相应的降雨时程分布,以30年一遇重现期为例,不同降雨历时的芝加哥雨型雨量过程线如图2所示。

**2.6.2 三角形雨型** 三角形雨型是由Yen和Chow于1980年应用统计矩法提出的一种雨型,为不对称三角形雨型,其雨峰位置是根据三角形的无因次一阶矩与当地暴雨过程的平均无因次一阶矩相等的条件来确定<sup>[26]</sup>,可由下式计算得出。

$$t_1 = (3K_t - 1)D \quad (5)$$

式中: $t_1$  为最大雨强时刻,min;  $D$  为总降雨历时,min;  $K_t$  为雨型参数,根据历史降雨资料确定。

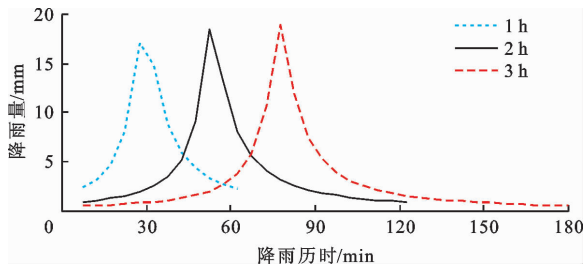


图 2 不同降雨历时的芝加哥雨型雨量过程线 ( $P = 30$  a)

三角形雨型是以推理公式原理为基础而进行推导的,方法比较简单,主要用于小流域排水区域的径流计算<sup>[27]</sup>。以 30 年一遇重现期为例,不同降雨历时的三角形雨型雨量过程线如图 3 所示。

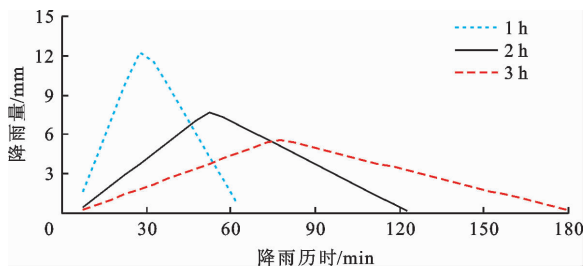


图 3 不同降雨历时的三角形雨型雨量过程线 ( $P = 30$  a)

2.6.3 Pilgrim & Cordery 雨型 Pilgrim & Cordery 雨型(简称 P&C 雨型)是由 Pilgrim 和 Cordery<sup>[28]</sup>于 1975 年提出的一种无级序平均法推求设计雨型。P&C 雨型将雨峰时段设在出现可能性最大的位置上,而雨峰时段在总雨量中的比例取各场降雨雨峰所占比例的平均值,其他各时段的位置和比例也用同样方法确定<sup>[25]</sup>。

虽然 P&C 雨型推求过程较为复杂,而且需要大量的实际降雨数据支撑,但是推导出的雨型与实际降雨过程最为相似,适用于汇水面积为中等的流域。以 30 年一遇重现期为例,不同降雨历时的 P&C 雨型雨量变化过程线如图 4 所示。

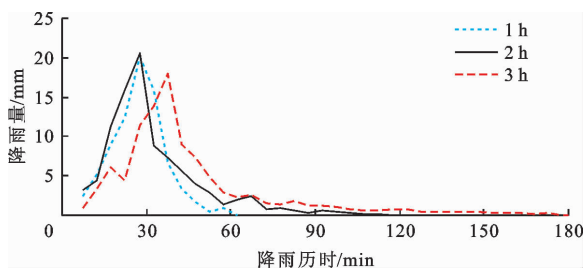


图 4 不同降雨历时的 P&C 雨型雨量变化过程线 ( $P = 30$  a)

### 3 结果与分析

#### 3.1 积水点验证

结合调研的积水点信息和近年来的新闻报道对模拟结果进行验证,发现研究区有 2 个十字路口经常发生积水,将调研历史积水点与模拟结果进行对比,如图 5 所示。由于十字路口地势相对较低,现状管网设计标准为 1 年一遇,加之周边产业园区较为密集且硬化面积大,从而导致发生内涝积水的频率较高。综合多渠道信息证明该模型的模拟结果基本符合实际情况,可以用于研究区域的内涝积水特征分析。

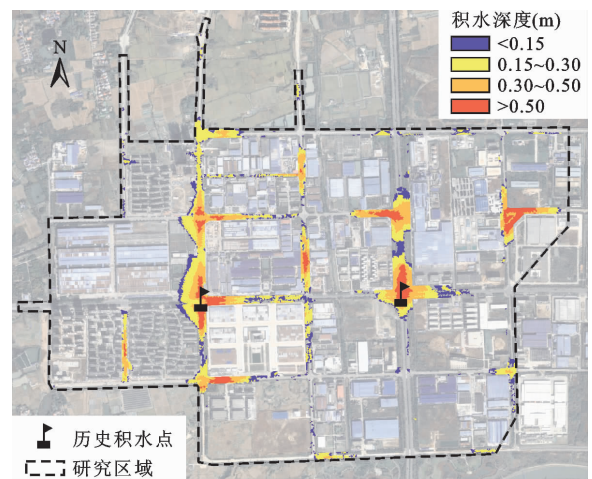


图 5 研究区调研历史积水点与模拟结果对比图

#### 3.2 降雨特征对积水深度的影响

为了研究不同模拟情景下短历时设计降雨特征对积水深度的影响规律,对不同设计降雨情景的模拟结果进行了统计,结果如图 6 所示。

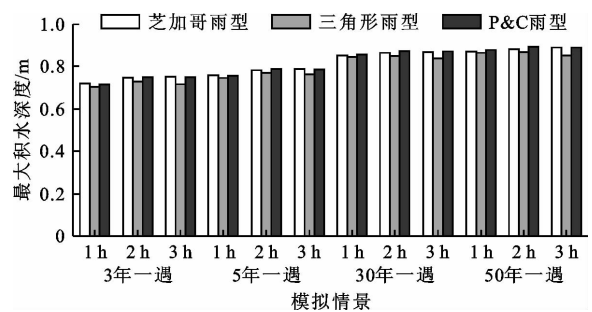


图 6 不同降雨情景下的最大积水深度情况

由图 6 可知,在同一降雨雨型和降雨历时的情况下,随着重现期的增加,最大积水深度逐渐增大。以 P&C 雨型为例,3、5、30、50 年一遇降雨历时为 2 h 情景中最大积水深度分别为 0.750、0.788、0.873、0.894 m。主要是在相同的降雨雨型和降雨历时情况

下,降雨量随着重现期的增加逐渐增大,产流量超过现状管网的排水能力,不能将超标降雨径流及时排走,从而导致地势低洼处的积水深度逐渐增加。

在降雨雨型和重现期相同的情况下,不同降雨历时导致的最大积水深度存在一定的差别。其中,芝加哥雨型中降雨历时为3 h的积水深度最大,而三角形雨型和P&C雨型降雨历时为2 h的积水深度最大。通过对比不同设计降雨的峰值降雨强度和峰前雨量发现,芝加哥雨型的峰值降雨强度差别不大,而芝加哥雨型的峰前雨量为3 h>2 h>1 h,说明最大积水深度受降雨的峰前雨量影响较大,当采用芝加哥雨型模拟时设计降雨历时的选取对内涝积水深度的影响较为敏感。P&C雨型的峰值降雨强度为2 h>1 h>3 h,而P&C雨型的峰前雨量均为3 h>2 h>1 h,说明采用P&C雨型模拟的最大积水深度受峰值降雨强度影响较大。三角形雨型的峰值降雨强度为1 h>2 h>3 h,峰前雨量为3 h>2 h>1

h,说明采用三角形雨型模拟的最大积水深度受峰值降雨强度和峰前雨量的双重影响。因此,分析影响最大积水深度的因素时除了考虑峰值降雨强度之外,还需要考虑峰前雨量的影响。综合分析36种降雨情景模拟结果发现,在低重现期条件下,芝加哥雨型降雨历时为3 h的积水深度最大;在高重现期条件下,P&C雨型降雨历时为2 h的积水深度最大。

### 3.3 降雨特征对积水面积的影响

基于《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)<sup>[22]</sup>地面积水深度的规定和《洪水风险图编制导则》(SL 483—2017)<sup>[29]</sup>中城市暴雨积水深度分级标准,将本文研究区的积水深度划分为4个等级,即小于0.15 m,0.15~0.30 m,0.30~0.50 m,大于0.50 m。采用不同降雨雨型、重现期以及降雨历时的设计降雨对城市内涝积水情况进行情景模拟,在研究区域内涝防治重现期(30年一遇)条件下的最大积水面积如图7所示。

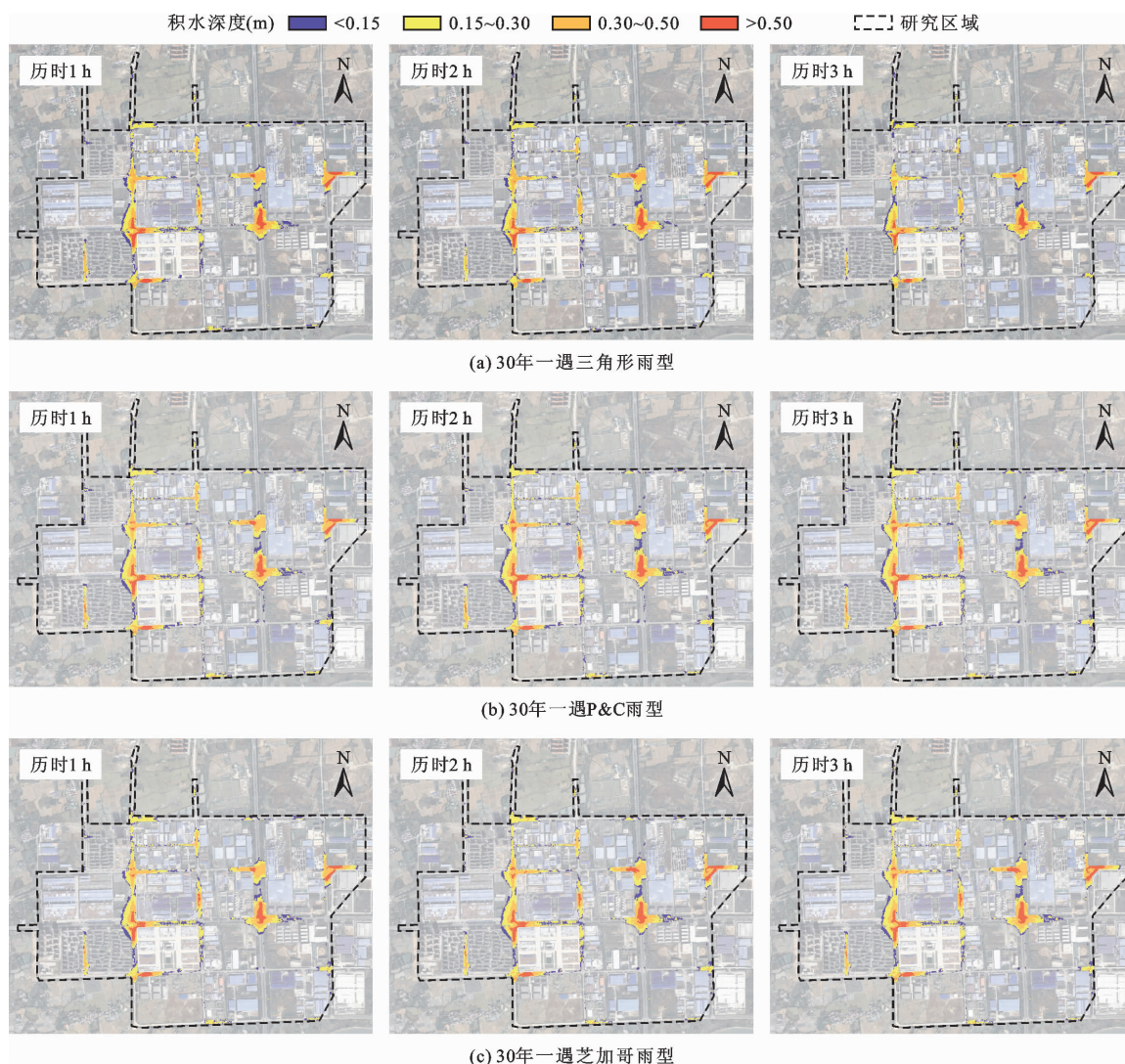


图7 30年一遇不同降雨雨型下研究区积水分布

对比分析不同降雨雨型、降雨历时在 30 年一遇重现期情景下的内涝积水分布图可知,尽管降雨雨型、降雨时间各不相同,但是内涝积水点位置基本一致。造成这一现象的主要原因是这些内涝积水点地势相对较低,当降雨产生的径流量超过排水管网的排水能力后,就会沿着地形漫流至地势低洼处积存,最终形成内涝积水点。

为了更直观地反映出降雨雨型和降雨历时对城市内涝积水面积的影响程度,统计分析了 36 种降雨情景下的最大积水面积及其增长率,具体结果如表 2 所示。

表 2 不同降雨情景下的最大积水面积及增长率

降雨情景	最大积水面积/hm <sup>2</sup>			增长率/%		
	三角形雨型	芝加哥雨型	P&C雨型	三角形雨型	芝加哥雨型	P&C雨型
3a-1h	17.63	20.82	22.89			
5a-1h	22.27	25.43	27.45			
30a-1h	36.64	39.61	42.27			
50a-1h	40.20	42.98	46.20			
3a-2h	14.95	22.66	23.63	-15.20	8.84	3.23
5a-2h	18.77	27.16	28.12	-15.72	6.80	2.44
30a-2h	33.85	41.76	43.99	-7.61	5.43	4.07
50a-2h	37.21	45.44	48.09	-7.44	5.72	4.09
3a-3h	11.19	23.32	23.34	-36.53	12.01	1.97
5a-3h	14.97	27.61	27.76	-32.78	8.57	1.13
30a-3h	28.45	42.24	43.04	-22.35	6.64	1.82
50a-3h	32.31	46.15	47.04	-19.63	7.38	1.82

注:增长率为降雨历时为 2、3 h 情景下的最大积水面积与降雨历时为 1 h 情景下的最大积水面积相比得出。

三角形雨型的城市内涝模拟情景中,对于同一重现期的降雨,随着降雨历时的增加,最大积水面积逐渐降低,以 30 年一遇重现期的设计降雨为例,降雨历时为 2、3 h 的最大积水面积比降雨历时为 1 h 的减少了 7.61%、22.35%。芝加哥雨型的城市内涝模拟情景中,对于同一重现期的降雨,随着降雨历时的增加,最大积水面积逐渐增加,以 30 年一遇重现期的设计降雨为例,降雨历时为 2、3 h 的最大积水面积比降雨历时为 1 h 的增大了 5.43%、6.64%。而在 P&C 雨型的城市内涝模拟情景中,对于同一重现期的降雨,降雨历时为 2 h 的积水面积最大,比降雨历时为 1、3 h 的最大积水面积增加了 4.07%、2.20%。究其原因主要是在相同重现期条件下,积水面积受降雨强度影响最大,尤其是当降雨强度超过管网瞬时排水能力时最容易导致地表积水。P&C 雨型中最大降雨强度排序为 2 h > 1 h > 3 h,芝加哥雨型中最大降雨强度排序为 3 h > 2 h > 1 h,三角形雨型中最大降雨强度排序为 1 h > 2 h > 3 h。因此,三角形雨型中降雨历时为 1 h 的积水面积最大,P&C 雨型中降雨历时为 2 h 的积水面积最大,而芝加哥雨型中降雨历时为 3 h 的积水面积最大。由此可知,降雨雨型和降雨历时对城市内涝积水面积的影响较为显著。

### 3.4 降雨特征对积水量的影响

积水量在一定程度上反映了城市发生内涝的风险等级,通过对积水区域的积水量进行统计分析,得到不同设计降雨情景下的内涝积水量变化过程线,选取 30 年一遇重现期的内涝积水量变化过程为例进行讨论分析,如图 8 所示。

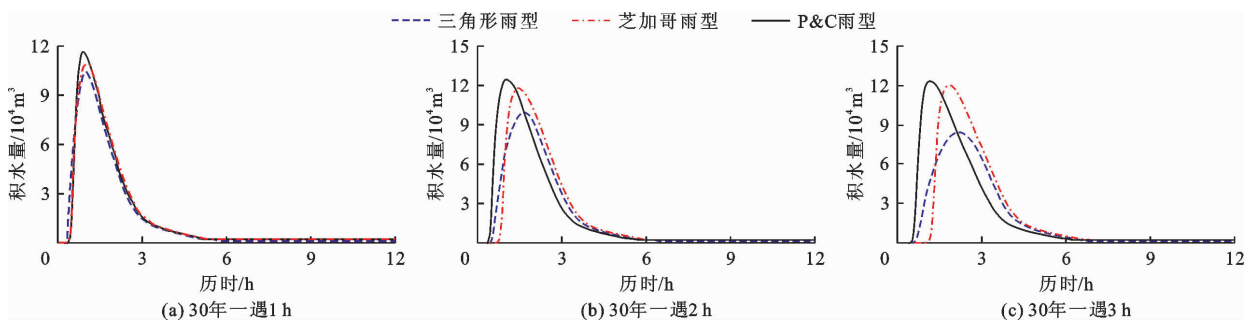


图 8 30 年一遇不同降雨雨型下研究区内涝积水量变化过程线

由图 8 可知,3 种降雨历时模拟情景中均为 P&C 雨型的峰值积水量最大,芝加哥雨型次之,三角形雨型的峰值积水量最小,说明降雨雨型对峰值积水量的影响最大,受降雨历时的影响较小。随着降雨历时的增加,P&C 雨型和芝加哥雨型的峰值积

水量差异逐渐减小,三角形雨型的峰值积水量差异逐渐增大。P&C 雨型和芝加哥雨型在降雨历时为 1 h 的峰值积水量分别为  $11.69 \times 10^4$ 、 $10.94 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,在降雨历时为 3 h 的峰值积水量分别为  $12.32 \times 10^4$ 、 $12.02 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,差异率由 6.42% 降低至

2.44%。而三角形雨型在降雨历时为1 h的峰值积水量为 $10.39 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,在降雨历时为3 h的峰值积水量为 $8.42 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,差异率由11.12%增加至31.66%。

对每个时刻的积水量进行统计分析,发现随着降雨历时的增加,研究区域内的积水总量也逐渐增大。降雨历时为3 h的降雨情景中,P&C雨型、芝加哥雨型以及三角形雨型比降雨历时为2 h的积水总量分别增加了6.47%、0.94%、6.50%,比降雨历时1 h的积水总量分别增加了25.89%、17.30%、24.33%。因此,也间接说明了当重现期一定时,积水总量受降雨历时的影响较大。

## 4 讨论

由于城市内涝模拟结果受研究区域下垫面特征、排水管网能力、降雨特征等多因素的影响,城市发生内涝的成因也比较复杂。因此,本研究采用了单因素变量法,即在下垫面特征和排水管网能力均相同的情景下,模拟分析不同降雨雨型和降雨历时对城市内涝模拟结果的影响。为了进一步探讨研究结果的合理性,将本研究结果与前人研究结果进行对比发现:(1)在城市内涝积水深度的模拟情景中,对于同一降雨雨型和降雨历时,随着重现期的增加,积水深度逐渐增大,这与廖如婷等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。影响内涝积水深度的因素除了峰值降雨强度之外,还包括峰前雨量的影响,与韩亚静等<sup>[15]</sup>发现的导致城市发生内涝灾害的因素包括雨强致灾、雨量致灾和双致灾有相似之处;(2)针对城市内涝积水面积的模拟情景,在相同的重现期条件下,不同降雨雨型模拟的最大积水面积各不相同,与胡彩虹等<sup>[13]</sup>的研究结论基本一致,不同之处体现在本文采用了3种不同降雨雨型,而前者采用不同雨峰位置的芝加哥雨型来表示不同降雨。(3)刘家宏等<sup>[31]</sup>通过TELEMAC-2D城市内涝模型模拟分析了不同雨峰系数的内涝积水情况,发现雨峰越靠后,积水量越大,与本研究的结果相同,只不过本研究的雨峰位置是随着降雨历时的增加而逐渐靠后。

本研究中设计降雨特征的样本量较少,无法覆盖全部降雨特征,缺乏实测降雨数据的验证,可能会造成模拟结果与实际情况有所偏差。但是,研究设计降雨特征对城市内涝模拟结果影响的特点和规律仍然能够为城市内涝预警以及应急管理等工作提供技术支撑。未来将侧重于对多年历史实测降雨数据的模拟分析,进一步研究导致城市发生内涝

的降雨量阈值、降雨雨型、降雨历时以及内涝积水点的概率分布等内容。

## 5 结论

基于InfoWorks ICM模型构建的我国南方某城市内涝模型,对不同降雨雨型、降雨历时以及重现期情景下的城市内涝积水深度、积水面积和积水量进行量化分析,主要结论如下:

(1)峰值降雨强度和峰前雨量是影响内涝积水深度的重要因素。在低重现期条件下,芝加哥雨型降雨历时为3 h的积水深度最大;在高重现期条件下,P&C雨型降雨历时为2 h的积水深度最大。

(2)城市内涝积水面积受降雨强度影响最大,而降雨雨型和降雨历时决定了降雨强度的大小。其中,P&C雨型的积水面积最大,芝加哥雨型次之,三角形雨型最小。

(3)降雨雨型对峰值积水量的影响较大,受降雨历时的影响较小,而积水总量则受降雨历时的影响较大。其中,P&C雨型的峰值积水量和积水总量最大,芝加哥雨型次之,三角形雨型最小。

(4)在城市内涝模拟过程中,不仅仅需要考虑所选设计降雨的雨型,同时也需要考虑降雨历时的长短。常用的芝加哥雨型在一定程度上可能会高估或者低估城市内涝发生的风险,因此建议在城市内涝评估时选择符合本地降雨特征的典型降雨。

### 参考文献:

- [1] 张金萍,曾苜翔,郭元.基于WRF的郑州市暴雨中心最大时降雨过程模拟分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(3):1-11.
- [2] 张楚汉,王光谦,李铁键.变化环境下城市暴雨致灾防御对策与建议[J].中国科学院院刊,2022,37(8):1126-1131.
- [3] 国务院灾害调查组.河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R].北京:国务院灾害调查组,2022.
- [4] 徐珺,李如梦,张庆红,等.从大尺度环流解读河南“21·7”特大暴雨事件的极端性[J].中国科学:地球科学,2022,52(10):1873-1886.
- [5] CHENG Tao, XU Zongxue, YANG Xuhong, et al. Analysis of effect of rainfall patterns on urban flood process by coupled hydrological and hydrodynamic modeling[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2020, 25(1): 04019061.
- [6] 张旭,李占斌,张洋,等.基于MIKE耦合模型的绿化率对城市内涝影响研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(3):137-144.
- [7] 周思敏,侯精明,高徐军,等.西安老城区海绵改造内涝

- 削减效果数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(1): 124-129.
- [8] 宋瑞宁,任梦瑶,闫攀,等. 基于行人安全的城市内涝风险等级评估[J]. 给水排水, 2021, 57(2): 40-45.
- [9] 梅超,陈宇枫,刘家宏,等. 基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 31-38.
- [10] MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Urban flood inundation and damage assessment based on numerical simulations of design rainstorms with different characteristics[J]. Science China (Technological Sciences), 2020, 63(11): 2292-2304.
- [11] MU Dengrui, LUO Pingting, LYU Jiqiang, et al. Impact of temporal rainfall patterns on flash floods in Hue City, Vietnam[J]. Journal of Flood Risk Management, 2020, 14(1): e12668.
- [12] 雷向东,王兆礼,曾照洋,等. 基于 ANUGA 和 SWMM 耦合模型的车陂涌流域内涝模拟分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 82-90.
- [13] 胡彩虹,姚依晨,刘成帅,等. 降雨雨型对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 15-21+87.
- [14] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 820-828.
- [15] 韩亚静,吴泽宁,郭元,等. 芝加哥雨型与城市灾害性降水的比较研究[J]. 人民长江, 2022, 53(5): 35-40+52.
- [16] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 101-108+133.
- [17] 刘樱,杨明,徐集云. 杭州市城市暴雨雨型分析研究[J]. 科技通报, 2021, 37(4): 15-22.
- [18] 汪婷,包云轩,陈粲,等. 昆山市暴雨短时设计雨型的推求[J]. 气象科学, 2021, 41(2): 259-269.
- [19] 唐明,许文斌,尧俊辉,等. 基于城市内涝数值模拟的设计暴雨雨型研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(5): 97-105.
- [20] HAMMOND M J, CHEN A S, DJORDJEVIĆ S, et al. Urban flood impact assessment: a state-of-the-art review [J]. Urban Water Journal, 2015, 12(1): 14-29.
- [21] 宋瑞宁,宫永伟,李俊奇,等. 汇水区节点选取对城市雨洪模拟结果的影响[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 75-79.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准: GB 50014—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [23] 王诗婧. 全过程内涝防治体系对缓解城市内涝的效果分析[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 108-113.
- [24] KEIFER C J, CHU H H. Synthetic storm pattern for drainage design [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1957, 83(4): 1-25.
- [25] 孙伟,沈建,蒋小欣,等. 江苏苏州市市区短历时暴雨雨型研究分析[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(9): 18-23.
- [26] 岑国平,沈晋,范荣生. 城市设计暴雨雨型研究[J]. 水科学进展, 1998(1): 42-47.
- [27] 李俊,吴珊,赵昕,等. 雨型选择对 LID 措施效果影响的分析探讨[J]. 给水排水, 2018, 54(5): 21-27.
- [28] PILGRIM D H, CORDERY I. Rainfall temporal patterns for design floods [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1975, 101(1): 81-95.
- [29] 中华人民共和国水利部. 洪水风险图编制导则: SL 483—2017 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [30] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 109-117.
- [31] 刘家宏,李泽锦,梅超,等. 基于 TELEMAC-2D 的不同设计暴雨下厦门岛城市内涝特征分析[J]. 科学通报, 2019, 64(19): 2055-2066.