

# 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析

傅春<sup>1</sup>, 付耀宗<sup>1</sup>, 肖存艳<sup>2</sup>, 邓俊鹏<sup>1</sup>, 王乐志<sup>1</sup>, 裴伍涵<sup>1</sup>

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 江西省交通技工学校, 江西 南昌 330038)

**摘要:**针对近年来日益严重的城市内涝问题,利用 MIKE FLOOD 模型模拟了鹰潭市月湖新区在遭遇 1 a、3 a、5 a、10 a 及 20 a 重现期降雨时的内涝淹没状态,研究了在不同重现期降雨下城市内涝形成及恢复的完整过程。根据模拟结果统计研究区在各个重现期降雨后的淹没网格数变化,基于系统性能分析研究鹰潭市月湖新区排水内涝弹性,进一步分析研究区对各重现期降雨灾害的防御与恢复能力。结果表明:在不同重现期降雨下,研究区积水面积基本都在 65 min 左右达到最大;在遭遇 1~3 a 低重现期降雨时,研究区排水系统性能变化更为敏感;降雨重现期越低,系统性能恢复越快、越好。

**关键词:**MIKE FLOOD 模型;城市内涝;系统性能;弹性分析;鹰潭市

中图分类号:TV125

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2022)01-0033-07

**Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City**//FU Chun<sup>1</sup>, FU Yaorong<sup>1</sup>, XIAO Cunyan<sup>2</sup>, DENG Junpeng<sup>1</sup>, WANG Lezhi<sup>1</sup>, PEI Wuhan<sup>1</sup>(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Jiangxi Traffic Technical School, Nanchang 330038, China)

**Abstract:** In response to the increasingly serious urban waterlogging problem in recent years, the MIKE FLOOD model was used to simulate the flooding and inundation status of the Yuehu New District in Yingtan City when it encountered rainfall during the return periods of 1 a, 3 a, 5 a, 10 a and 20 a. The complete process of the formation and recovery of urban waterlogging under different return periods of rainfall was investigated. According to the simulation results, the number of submerged grids in the study area after rainfall in each return period were counted. Based on the system performance analysis, the waterlogging elasticity of the Yuehu New District was studied, and the research area's defense and recovery capabilities against rainfall disasters in each return period were further analyzed. The results show that under different return periods of rainfall, the accumulated waterlogging area in the study area basically reaches the maximum at about 65 minutes. The drainage system of the study area is more sensitive to rainfall during the low return period from 1a to 3a. The lower the return period of rainfall, the faster and better the recovery level of the system performance.

**Key words:** MIKE FLOOD model; urban waterlogging; system performance; resilience analysis; Yingtan City

近年来,随着全球气候变化以及城市化的快速发展,我国越来越多的城市遭遇内涝灾害的严重度以及频次前所未有的,造成了巨大社会经济损失,严重威胁了居民的生命财产安全<sup>[1-2]</sup>。为解决这一棘手问题,应运而生了各种水文水利模拟软件,应用比较广泛的有美国 SWMM 软件<sup>[3-4]</sup>、美国 SWAT 软件、丹麦 MIKE 系列软件等<sup>[5-6]</sup>,其中 MIKE 系列软件凭借人性化的用户界面,便捷的操作方式和强大的前处理、后处理功能,得到了众多研究者的青睐<sup>[7-8]</sup>。

近年来,国内外学者将生态学领域的弹性力概念延引至城市内涝研究中,为该领域的研究提供了新思路,有助于深入了解城市内涝从受灾到灾后恢复的完整过程,缓解城市暴雨内涝压力,取得了良好的研究成果。Simonovic 等<sup>[9-10]</sup>首次提出将弹性量

化为时间空间的函数,提高了人们对系统恢复能力的理解。Mugume 等<sup>[11]</sup>将城市排水系统与弹性力联系起来,基于系统性能的损失计算了乌干达坎帕拉市排水管网系统的弹性指数。肖楠<sup>[12]</sup>利用了弹性分析法研究了深圳市坪山新区在不同重现期降雨下遭遇城市内涝时的弹性指数以及计算典型内涝节点的弹性值。本文基于 MIKE FLOOD 模型并结合弹性分析法研究了鹰潭市月湖新区在不同降雨重现期下形成内涝以及淹没退去的完整过程,研究结果有助于更快、更准确地制定出科学合理的抗灾策略。

## 1 研究区域与研究数据

### 1.1 研究区域概况

研究区位于江西省鹰潭市月湖新区,占地面积

约为 3.32 km<sup>2</sup>,地形大致为左高右低,年均降雨量为 1 817.2 mm,雨季一般为每年的 4—10 月,由于研究区为规划区,故将下垫面情况粗略划分为道路用地、建筑用地、绿化用地、人造表面及其他用地。

根据 GB 50014—2006《室外排水设计规范》确定道路用地、建筑用地、人造表面、绿化用地、其他用地等不同类型下垫面的综合径流系数分别为 0.85、0.70、0.65、0.10 和 0.20。模型中各子汇水区的不渗透系数根据综合径流系数方法获得,即统计子汇水区中各种下垫面类型的面积占比与各下垫面对应的综合径流系数自动计算子汇水区的不渗透率<sup>[13-14]</sup>。

## 1.2 设计降雨

研究区域暴雨强度公式为

$$q = \frac{5020(1 + 0.694 \lg P)}{(t + 19.7)^{0.915}} \quad (1)$$

式中: $q$  为暴雨强度; $P$  为降雨重现期; $t$  为降雨历时。

研究区域雨型选择芝加哥雨型,采用短历时降雨,降雨时长 2 h,设置时间步长 1 min,峰值系数 0.4,计算得到 1 a、3 a、5 a、10 a、20 a 等 5 个重现期的设计降雨,各重现期的设计降雨量分别为 39.43 mm、52.48 mm、58.55 mm、66.79 mm 和 75.02 mm,各场设计降雨历程如图 1 所示。

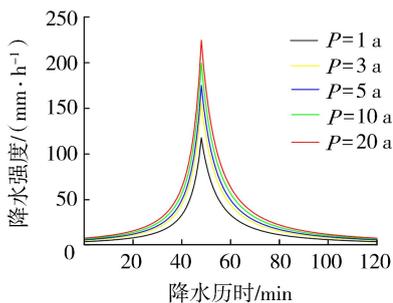


图 1 不同重现期设计降雨过程线

## 1.3 数据来源

研究区域地形 DEM 数据由 ArcGIS 提取规划的 CAD 节点高程数据后,对其进行栅格插值处理而获得。为更好地凸显道路的行洪能力及建筑物的阻水能力,在地形图中将道路用地降低 0.15 m,将建筑物抬高 5 m。

## 2 研究方法

城市内涝弹性是指城市的排水系统遭遇降雨冲刷后,研究区域经历了从内涝灾害到逐渐恢复至原状态的一个过程,其表现为系统遭遇内涝灾害后恢复到指定状态所用时间<sup>[15-16]</sup>。因此,对城市内涝进行弹性分析可以统筹考虑城市抵御内涝灾害以及灾后复原能力<sup>[17]</sup>。城市排水防涝与众多影响因素有关,包括

地形、土地覆被等自然因素以及土地利用情况、管网建设情况等社会因素<sup>[18]</sup>,因此,就算在研究区域的相邻区域,其内涝弹性指数也可能会存在较大差异。

在系统遭受降雨干扰后,研究区排水系统性能开始会下降至一个最低值,到降雨结束后的一段时间,系统性能会逐渐恢复直至降雨前的水平,见图 2。排水系统性能在  $t_1$  时开始呈下降趋势,到  $t_2$  时系统性能降至最小值  $p_1$ 。随着系统自身的适应调节, $t_3$  时系统开始恢复,系统性能逐渐上升,直至  $t_4$  时系统恢复正常。因此,0~ $t_1$  时段称为系统准备阶段; $t_1$ ~ $t_2$  时段为系统的抵御吸收阶段; $t_2$ ~ $t_3$  时段称为系统的自适应调节阶段; $t_3$ ~ $t_4$  时段为系统恢复阶段。

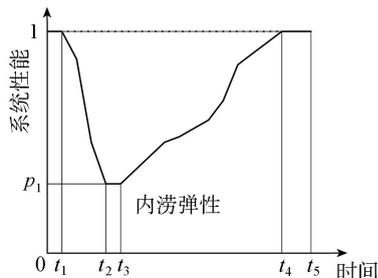


图 2 系统性能函数

在对研究区域进行复杂的网格弹性评价中,可以根据系统的性能函数曲线计算得到洪水的弹性指数。当研究区域遭到洪水袭击后,网格状态可以分为淹没与未淹没两种状态,因此可以通过统计淹没网格个数与未淹没网格个数,用以代表相应的研究区域内淹没面积与未淹没面积<sup>[19]</sup>。当研究区不存在淹没网格时,未淹没面积与总面积比值为 1,此时研究区域系统性能为 1;相反,当研究区网格均被淹没时,系统性能为 0。本文采用未受洪水淹没面积与研究区域总面积之比来代表该区域的系统性能。 $t$  时刻,若第  $i$  个栅格其积水深度大于设定的淹没阈值时,则令  $t$  时刻  $i$  栅格的淹没值  $d_{it} = 1$ ;反之,则令  $d_{it} = 0$ 。研究区的系统性能函数为

$$p_t = 1 - \frac{N_t}{N} \quad (2)$$

式中: $p_t$  为系统性能函数; $N_t$  为  $t$  时刻内区域淹没总网格数量; $N$  为区域内总网格数量。

研究区域的洪水弹性通过计算得到的系统性能函数对其进行积分求得:

$$R = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} p_t dt \quad (3)$$

式中: $R$  为系统洪水弹性; $t_n$  为模型模拟时间。

## 3 模型建立与耦合

### 3.1 一维排水模型

在排水模型建立前,对研究区域的节点(含检

表1 2019年7月6日降雨的模拟与实测结果对比

内涝点	模拟深度/cm	实测深度/cm	误差/%
童家镇政府以南区域	13	12	-8.33
陈家村与吕家村以东的山区	53	50	-6.00
雄鹰大道加油站至大石岭董家	22	23	4.35
东外环路旁边坑洼区域	16	15	-6.67

查井及排水口)和雨水管道概化,概化后共有104个节点与99条管道,节点其中包含5个排水口。节点及管道数据来源于规划部门提供的CAD图纸,包含检查井底标高、管底标高、管径与管长等。研究区管道均为圆管,管道最大直径2000 mm,最小600 mm,总长度约27.32 km。将管道和节点数据导入MIKE URBAN模型后,建立研究区排水系统的拓扑关系,并将降雨数据等边界条件导入模型。

基于研究区内雨水管道系统分区及雨水控制利用的规划布局,对月湖新区进行子汇水区划分。利用系统自有的泰森多边形法将汇水区划分为面积0.26~11.48 hm<sup>2</sup>不等的99个子汇水区,子汇水区划分结果如图3所示。至此,研究区域管网模型建立完成,可对其进行模拟计算得到节点及管网的结果文件。

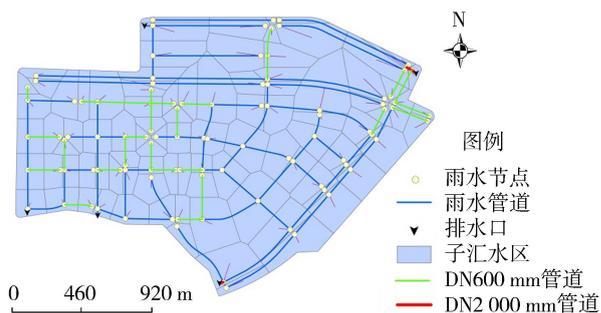


图3 研究区域子汇水区划分

### 3.2 二维地表漫流模型

二维模型的建立要引入地面基础地形数据,基础地形数据的获取需要对研究区域以外的区域进行剔除,将之外的标高数据拔高处理以关闭边界。二维模型的参数设置参考苏晓天<sup>[20]</sup>、孙鸿杰<sup>[21]</sup>研究成果,初始水位设置为0 m,干水深和淹没水深分别设置为2 mm和3 mm,糙率设置为模型默认的32。

### 3.3 耦合模型

二维模型建立完成后,利用MIKE FLOOD模型将MIKE URBAN管网模型与MIKE21二维地表漫流模型进行耦合,将研究区域节点连接到地形文件的网格中实现排水管网模型与二维地表漫流模型的耦合,其中,节点的检查井与地形文件的连接方式为Urban连接。

## 4 模拟结果与分析

### 4.1 模拟结果验证

为验证模型各参数的合理性,选取鹰潭市月湖新区2019年7月6日场次降雨实测数据与模型在相应降雨数据下的淹没点及深度进行比较,通过对各参数进行反复的调整,直至模拟结果具有较高的精确性。观察各个重现期模拟结果可知,研究区易涝点与实际降雨内涝点基本一致,模型模拟所得结果与实际情况较为相似,可信度较高,见表1。

### 4.2 研究区积水情况

MIKE耦合模型的降雨产汇流过程大致可以理解为:当节点水位比其所处地面高程更高时,积水会漫流至地面;反之,当地面高程高于节点水位标高时,积水会回流进而排出排水口<sup>[22-23]</sup>,因此耦合模型可以较为准确地模拟出研究区域遇降雨时的产汇流情况。

根据GB 50014—2006《室外排水设计规范》,当路面积水深度 $H > 15$  cm时,可能会致使车辆熄火;当 $H > 50$  cm时,会造成较为严重的内涝。为便于观察,将本次模拟结果水深以15 cm和50 cm进行内涝严重程度划分。经观察,研究区在80 min时其淹没范围及深度基本达到模拟时段内的最大值。

为便于区分易涝区域,将研究区域按照子汇水区划分为99个集水区。由图4可知,研究区洪水淹没范围随着设计降雨重现期的增大而增大。集水区8、20、55遭遇不同重现期降雨时都出现了积水水深大于50 cm的严重内涝区。结合现场调研可知,研究区中的易涝区为山区的下凹地区,因此,高程是导致上述内涝区容易产生内涝现象的主要影响因素。遭遇大暴雨后,易涝区积水需要长时间的自然渗透才能渗透地底,由于山区中的积水并不会给研究区居民生活带来很多不便,因此本文就不对相应易涝区再做相应的内涝弹性研究。

为对研究区的淹没情况有一个更直观的了解,现统计不同重现期下研究区的积水网格数及积水区平均深度,如表2所示。随着重现期的增长,积水区的平均水深有所增加,增长速度逐渐变慢;同时,研究区总内涝积水范围和不同等级的内涝积水网格数均呈上升趋势。研究区在重现期1 a和3 a的设计降雨下,积水水深及积水范围都有着较大的差异,结合一维管网模拟可知,排水管网系统溢流节点数及超载管渠数的增加幅度更大。因此,研究区在遭遇不同的低重现期降雨时的管网负荷及积水情况差异更明显。

表2 不同重现期80 min积水情况

重现期	积水区 平均 水深/cm	积水网格数			
		$0 < H \leq 15$ cm	$15 \text{ cm} < H \leq 50$ cm	$H > 50$ cm	$H \leq 0$
1 a	2.74	51 636	2 091	40	53 767
3 a	3.28	68 553	3 303	249	72 015
5 a	3.66	72 047	3 899	441	76 387
10 a	4.04	78 187	4 609	756	83 552
20 a	4.29	86 378	5 542	1 076	92 996

■  $H > 50 \text{ cm}$     ■  $15 \text{ cm} < H \leq 50 \text{ cm}$   
■  $0 < H \leq 15 \text{ cm}$     ■  $H \leq 0$

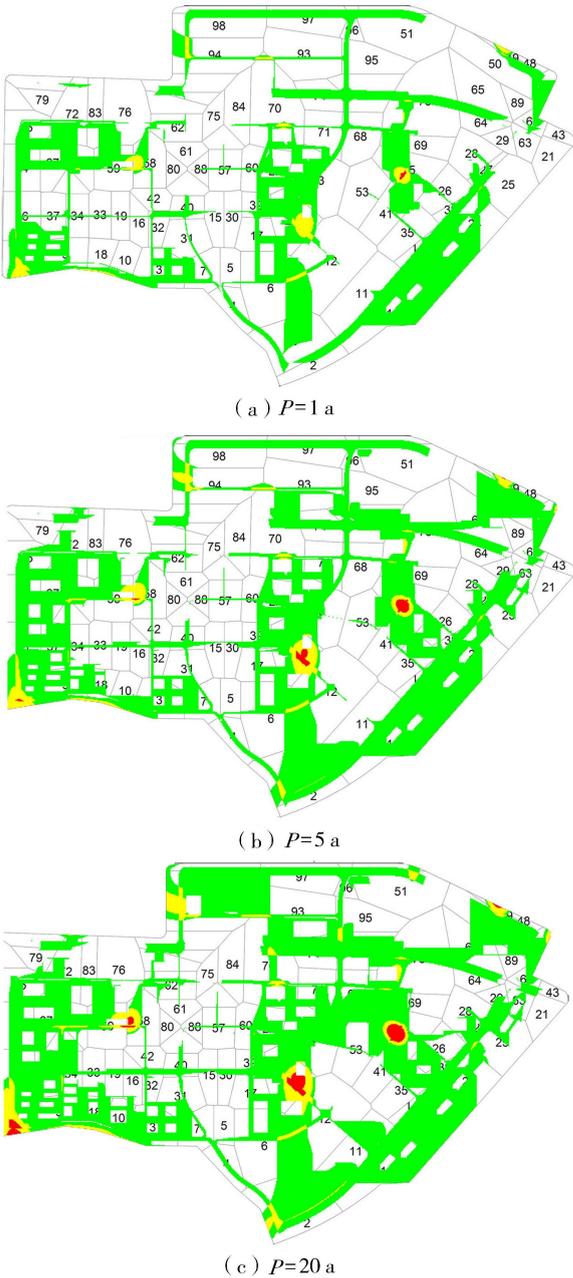


图4 研究区不同重现期 80 min 时的积水水深

### 4.3 内涝弹性分析

采用弹性分析法对研究区内涝情况进行分析,将研究区模拟所得的积水深度减去相应的下垫面的淹没阈值,旨在更合理、更符合现实地分析研究区遭遇洪水灾害后的防洪、承灾及恢复的完整过程,全面了解研究区对于内涝灾害的防御与恢复能力<sup>[24]</sup>。

#### 4.3.1 淹没网格变化

由于 2 h 降雨期间,研究区部分区域还处于淹没状态,不能完整反映降雨后的恢复过程,因此本文将总模拟时长调为 48 h,其中只有前 2 h 经历了设计降雨,这样便能尽可能模拟出研究区遭遇不同重现期降雨后的恢复情况。不同下垫面淹没阈值的设定

关系到相应网格的淹没状态,Yin 等<sup>[25-26]</sup>建议在模拟城市内涝时,淹没阈值的设定应根据汽车排气口距地面的高度设定为 30 cm,但考虑到 30 cm 的积水水深会对研究区当地居民带来诸多不便,在分析相关问卷调查后,将绿地用地的淹没阈值设为 15 cm,道路及人造表面的淹没阈值设为 5 cm,其他用地设为 10 cm。

为更明显表明系统在各种重现期降雨下的淹没状态,将模拟得到的初始进水网格称为积水网格,将处于不同下垫面类型的积水网格水深减去相应淹没阈值后其水深仍大于 0 的网格称为淹没网格。图 5、图 6 表示不同重现期下的积水及淹没网格数变化。

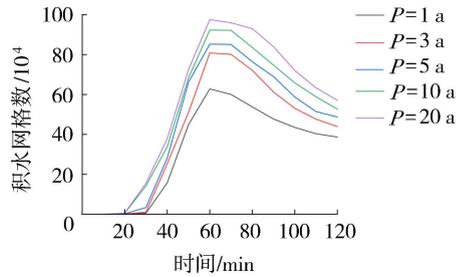


图5 不同重现期积水网格数

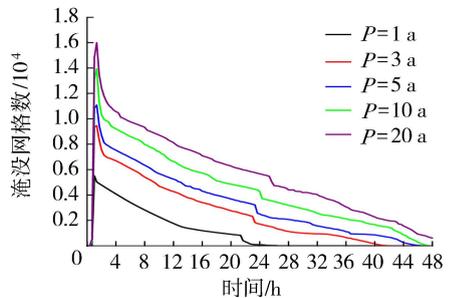


图6 不同重现期淹没网格数

由图 5、图 6 可知,积水网格数与淹没网格数变化趋势大致相似,都是先增加到一个峰值再逐渐降低。研究区在降雨时段 30 ~ 60 min 时,其积水面积增幅最大,且研究区遭遇不同重现期降雨时,基本均在降雨历时 65 min 左右其积水网格数达到峰值。在模拟时段后期,研究区的淹没网格减少速率变缓,主要原因是研究区的土地基本已达到饱和状态,积水下渗速度变慢。图 6 中,不同重现期淹没网格数变化趋势非常相似,在降雨时段 40 ~ 60 min 时淹没网格数迅速增加,其中 1 a 重现期降雨在 60 min 时便达到淹没网格的峰值,主要原因是 1 a 重现期降雨其积水网格大部分的淹没深度相对于淹没阈值较小,淹没网格在 60 min 后便开始逐渐消失;相较而言,3 a、5 a、10 a 及 20 a 重现期降雨在 60 ~ 80 min 时段的淹没网格增长幅度依次增大,这也进一步印证了积水网格水深对于淹没网格变化的影响。在不同重现期淹没网格逐渐消失的过程中都出现了一个下降幅度相对较大的突变时段,且随着降雨重现期的增

长,突变时段逐渐延后,在集水区 1 的绿地用地中其积水深度与淹没阈值接近;同时,集水区 1 经历低重现期降雨时,其水深更快降为淹没阈值,因此低重现期的突变时段会比高重现期的突变时段提前到来。

#### 4.3.2 系统性能

在计算系统性能函数时,由于淹没网格数相较于研究区总网格数占比极少,为更明显地表示出各个不同重现期降雨的系统性能差异,令研究区遭遇 20 a 重现期降雨,80 min 时的积水网格数 92 996 作为式(2)中的总网格数,根据式(2)计算得到研究区系统性能,如图 7 所示。

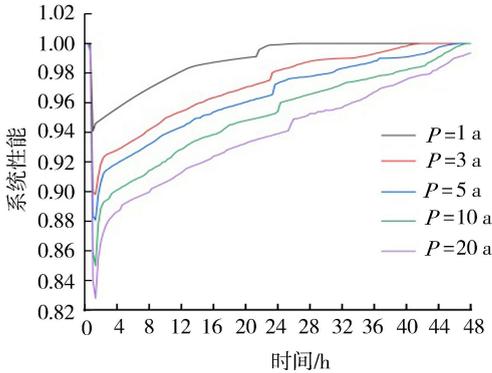


图 7 研究区系统性能

由图 7 可知,不同重现期降雨下系统性能的变化趋势基本相同,都是先降低至一个最低值,再逐步恢复。研究区遭遇 1 a 重现期降雨后的系统性能在 60 min 时达到最小值;而在 3 a、5 a、10 a 及 20 a 重现期降雨下,研究区系统性能在 60 ~ 80 min 降雨时段还存在小幅的下降。80 min 后,不同重现期降雨下研究区系统性能开始逐渐恢复至正常状态,仅有 20 a 重现期降雨在模拟时段 48 h 内未得到完全恢复。在降雨结束后直至系统性能完全恢复之前,不同重现期降雨的系统性能差值并不会随着时间变化而发生较大变化。不同重现期降雨的系统性能值均大于 0.8,主要体现在不同重现期降雨下研究区淹没面积较小,且研究区排水系统的系统性能在 10 a 及以下的重现期降雨均可以在 48 h 内达到完全恢复状态。不同重现期的系统性能恢复时间与对应重现期下的淹没网格消失时间一致,随着重现期的增长,系统性能恢复到正常水平所需时间更久。

#### 4.3.3 内涝弹性

相较于最大淹没水深及淹没面积的分析,内涝弹性分析可以帮助我们综合评估研究区遭遇暴雨袭击后的恢复能力,完善城市洪水灾害评估。根据式(3)分别计算各个重现期降雨下的研究区系统在模拟时段内的弹性值,计算得到的弹性值随时间变化情况如图 8 所示。

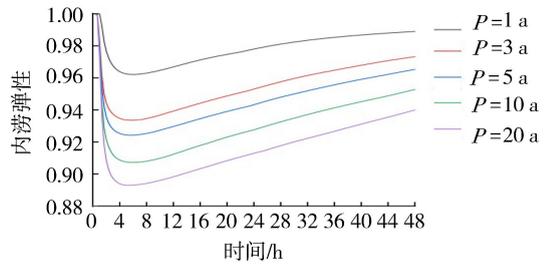


图 8 不同重现期内涝弹性

由图 8 可知,研究区排水系统在 48 h 内的弹性值也是呈现出先降低、后升高的趋势,其中在降雨存在的 2 h 内,系统内涝弹性值的下降幅度最大。内涝弹性值随时间的变化中存在一个最低弹性值,代表了遭受降雨袭击造成的系统性能在单位时间的最大损失,最低弹性值越大越好,表明系统性能所受的损失越小。经计算可知,各重现期降雨下内涝弹性的最低值分别为 0.962、0.933、0.924、0.907 及 0.893,因此,随着降雨重现期的增长,研究区内涝弹性最低值越小。当研究区遭受降雨后的任一时刻,降雨重现期越小,弹性值越大,因此,研究区在遭遇暴雨袭击后的系统性能恢复水平随着重现期的降低而变得更高。观察各重现期下,内涝弹性随时间变化的状态,在出现最低值后,不同重现期之间的内涝弹性值差距随时间变化不大,说明此后不同重现期之间的系统性能恢复能力的差距较小。

内涝弹性的最终值反映了整个过程中研究区的系统性能损失,最终值越大,说明在整个模拟周期内系统性能的单位时间内损失越小,也就说明其恢复能力越好。不同重现期降雨下研究区排水系统在 48 h 时的弹性值如图 9 所示,研究区排水系统在 48 h 时的弹性值随重现期的增长而降低,就降雨重现期的变化而言,20 a 与 10 a 降雨重现期之间弹性值仅相差 0.012,而 3 a 相比 1 a 降雨重现期之间弹性值变化 0.016。因此,研究区对于 1 a 至 3 a 的小重现期降雨更为敏感,低重现期降雨导致的内涝淹没范围及深度变化更大。因此,系统性能的恢复水平随着重现期的减小而变得更高。

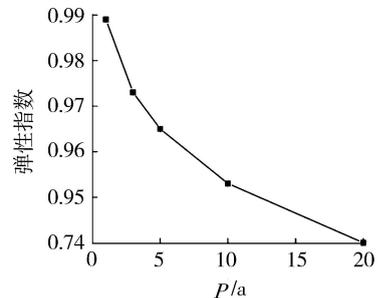


图 9 不同重现期弹性值 ( $t=48\text{ h}$ )

## 5 结 论

a. 相较于高重现期降雨,研究区排水管网系统在 1 a、3 a 设计降雨后,其溢流节点数及超载管渠数的增加幅度更大,其不同程度淹没等级下的淹没范围的增长率以及弹性值差均为最大。从一维管网模拟结果、二维地表漫流结果及内涝弹性分析都可以得出研究区排水系统性能在遭遇 1~3 a 低重现期降雨时变化更为敏感。

b. 在模拟周期内,研究区不同重现期下的弹性值均在 0.89 以上,说明研究区遭遇各个重现期降雨后其灾后恢复能力良好,主要原因是不同重现期降雨下研究区淹没面积较小,且研究区遭遇 10 a 及以下的重现期降雨均可以在 48 h 内恢复至正常状态。同时,随着降雨重现期的降低,其内涝弹性值就更大,系统性能恢复更快、更好。

c. 由于本研究中的城市内涝弹性指标是在研究区淹没网格数变化的基础上进行分析,而淹没阈值对于积水网格是否淹没起决定性作用,因此淹没阈值的合理设定需更紧密结合实际,只有这样内涝弹性分析才能更加科学合理。

### 参考文献:

[1] 宋晓猛,张建云,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 752-764. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II urban stormwater modeling and management [J]. Advance in Water Science, 2014, 25(5): 752-764. (in Chinese))

[2] 傅春,付耀宗,肖存艳. 昌北工业园区不同暴雨强度下不同 LID 布置方式的排水防涝控制效果[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 69-73. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. The effect of drainage and waterlogging control in different lid arrangements under different heavy rain intensities in Changbei Industrial Park [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8): 69-73. (in Chinese))

[3] 陆海明,邹鹰,孙金华等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 58-65. (LU Haiming, ZOU Yin, SUN Jinhua, et al. (Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 58-65. (in Chinese))

[4] 肖存艳,傅春,付耀宗. 区域划分对昌北工业园区的排水防涝技术的优化研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(6): 27-35. (XIAO Cunyan, FU Chun, FU Yaozong. Optimization of waterlogging control technology in Changbei

Industrial Park by regional division [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6): 27-35. (in Chinese))

[5] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 81-88. (in Chinese))

[6] 韩岭,盖永岗,刘杨,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的淠水河上游洪水风险评估[J]. 中国农村水利水电, 2017(7): 161-165. (HAN Ling, GAI Yonggang, ZHANG Ruihai, et al. Risk assessment of floods in the upper reaches of Huangshui River based on mike flood coupled model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(7): 161-165. (in Chinese))

[7] 毛思媛,贾艳红,假冬冬,等. 嫩江下游洪水演进及对洪泛区植被影响分析[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 27-33. (MAO Siyuan, JIA Yanhong, JIA Dongdong, et al. Analysis of flood evolution in lower reaches of Nenjiang River and its impact on vegetation in floodplain [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 27-33. (in Chinese))

[8] 栾慕,袁文秀,刘俊,等. 基于 SWMM-MIKE11 耦合模型的桐庐县内涝风险评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 57-61. (LUAN Mu, YUAN Wenxiu, LIU Jun, et al. Risk assessment of waterlogging in Tonglu County based on SWMM-MIKE11 coupled model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 57-61. (in Chinese))

[9] SIMONOVIC S P, PECK A. Dynamic resilience to climate change caused natural disasters in coastal megacities quantification framework [J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2013, 3(3): 378-401.

[10] SIMONOVIC S P. From risk management to quantitative disaster resilience: a new paradigm for catastrophe modeling [J]. Risk Modeling for Hazards & Disasters, 2018: 281-297.

[11] MUGUME S N, GOMEZ D E, FU Guangtao, et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems [J]. Water Research, 2015, 81: 15-26.

[12] 肖楠. 城市内涝弹性分析与防治措施方案研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

[13] 金牧青. 典型下垫面空间布局对城市降雨径流的影响: 以漯河市为例 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.

[14] 车伍,杨正,赵杨,等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析 [J]. 中国给水排水, 2013, 29(16): 13-19. (CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(16): 13-19. (in Chinese))

[15] 周蕾,吴先华,吉中会. 考虑恢复力的洪涝灾害损失评估研究进展 [J]. 自然灾害学报, 2017, 26(2): 11-21.

- (ZHOU Lei, WU Xianhua, JI Zhonghui. Research advance in flood damage assessment considering resilience [J]. Journal of Natural Disasters, 2017,26(2):11-21. (in Chinese))
- [16] 柯庆,王林森,陶涛. 城市雨水排水系统恢复力评估[J]. 中国给水排水,2016,32(21):6-11. (KE Qing, WANG Linsen, TAO Tao. Resilience assessment of urban rainwater drainage systems [J]. China Water & Wastewater, 2016,32(21):6-11. (in Chinese))
- [17] 张灵,陈晓宏,千怀遂. 北江下游防洪保护区恢复力诊断[J]. 水利学报,2011,42(9):1129-1134. (ZHANG Ling, CHEN Xiaohong, QIAN Huaisui. Diagnosis of resilience to flood hazard in lower reaches of the Beijiang River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42 (9):1129-1134. (in Chinese))
- [18] 焦胜,胡曦,韩宗伟. 多尺度下城市内涝影响因素量化评估研究:以长沙市内五区为例[J]. 生态经济,2020,36(5):222-229. (JIAO Sheng, HU Xi, HAN Zongwei. A study on quantitative evaluation of effect factors of urban waterlogging under multiple scales: taking five internal zones in Changsha as an example [J]. Ecological Economy, 2020,36(5):222-229. (in Chinese))
- [19] WANG Yuntao, MENG Fanlin, LIU Haixing, et al. Assessing catchment scale flood resilience of urban areas using a grid cell based metric[J]. Water Research,2019, 163:1-12.
- [20] 苏晓天. 基于 MIKE FLOOD 的华北典型县域主城区内涝模拟研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2020.
- [21] 孙鸿杰. 基于 Mike 模型某区域内涝模拟及其排水系统优化研究[D]. 成都:西华大学,2019.
- [22] 周小飞. 基于 Mike Flood 的运城市内涝模拟与风险评估[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [23] 项宁,李连文,詹健,等. 模型分析下的汇水区划分方式对水文模拟结果的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(4):87-91. (XIANG Ning, LI Lianwen, ZHAN Jian, et al. Research on the influence of watershed division method on hydrological simulation results based on model analysis[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020 (4):87-91. (in Chinese))
- [24] 刘高峰,龚艳冰,黄晶. 基于流域系统视角的城市洪水风险综合管理弹性策略研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2020, 22(3):66-73. (LIU Gaofeng, GONG Yanbing, HUANG Jing. Research on resilient strategies of urban flood risk comprehensive management from the perspective of river basin system[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2020,22(3):66-73. (in Chinese))
- [25] YIN Jie, YU Dapeng, YIN Zhane, et al. Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: a case study in the city center of Shanghai, China[J]. Journal of Hydrology,2016,537:138-145.
- [26] 王运涛. 基于多源信息的城市洪水模拟与弹性分析[D]. 大连:大连理工大学,2018. (收稿日期:2020-11-30 编辑:骆超)
- 
- (上接第 10 页)
- [68] 张宝森,齐洪海,李国力,等. 利用声发射技术预报堤防工程险情[EB/OL]. (2015-03-30) [2021-09-10]. <https://www.doc88.com/p-1184664395042.html?r=1>.
- [69] 明攀,陆俊,胡少伟,等. 堤基管涌破坏过程中的声发射信号特性研究[J]. 水电能源科学,2018,36(2):176-179. (MING Pan,LU Jun,HU Shaowei,et al. Research on acoustic emission signal characteristic in failure process of levee piping [J]. Water Resources and Power, 2018, 36 (2):176-179. (in Chinese))
- [70] 明攀,耿晓明,陆俊,等. 基于声发射监测的堤防管涌试验[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):33-38. (MING Pan,GENG Xiaoming,LU Jun,et al. Experimental study on monitoring embankment piping based on acoustic emission technology [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):33-38. (in Chinese))
- [71] 明攀,陆俊,蔡新,等. 堤防管涌声发射采集参数设置研究[J]. 水利水电技术,2020,51(4):139-145. (MING Pan, LU Jun, CAI Xin, et al. Study on collection parameters setting of acoustic emission test for dike foundation piping [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2020,51(4):139-145. (in Chinese))
- [72] 黄世强. 水库大坝渗漏探测方法概述[J]. 大坝与安全, 2021(2):42-50. (HUANG Shiqiang. Leakage detection methods for reservoir dams [J]. Dam & Safety,2021(2): 42-50. (in Chinese))
- [73] 王祥,宋子龙. ROV 水下探测系统在水利工程中的应用初探[J]. 人民长江,2016,47(2):101-105. (WANG Xiang,SONG Zilong. Preliminary analysis on application of ROV underwater detect system in water conservancy project [J]. Yangtze River, 2016, 47 (2): 101-105. (in Chinese))
- [74] 赵薛强. 无人船水下地形测量系统的开发与应用[J]. 人民长江,2018,49(15):54-57. (ZHAO Xueqiang. Development and application of unmanned underwater landform surveying vessel system [J]. Yangtze River, 2018,49(15):54-57. (in Chinese))
- [75] 朱征,包腾飞,郑东健,等. 基于无人机倾斜摄影的白格堰塞区三维重建[J]. 水利水电科技进展,2020,40(5):81-88. (ZHU Zheng, BAO Tengfei, ZHENG Dongjian, et al. 3D reconstruction of Baige landslide area based on UAV oblique photographs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (5):81-88. (in Chinese)) (收稿日期:2021-10-11 编辑:郑孝宇)