

不同城市化程度对内涝弹性的影响研究

傅春¹ 黄金燕¹ 付耀宗¹ 邓俊鹏¹ 王乐志¹ 裴伍涵¹¹

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

【摘要】: 近年来, 城市内涝问题威胁了越来越多的城市安全, 利用耦合雨洪模型模拟了南昌市朝阳新城在遭遇 1、3、5、10 及 20a 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, 结合弹性分析法研究了南昌市朝阳新城片区对洪灾的抵御及其恢复能力。同时, 分析了研究区 3 种不同年份的土地利用情况, 探究城市化的发展对于研究区在遭受降雨袭击后防御与恢复能力的影响。结果表明: 城市化的发展以及降雨重现期的增加都会导致研究区对洪灾的抵御及恢复能力降低。该研究结果有助于在以后的防洪排涝工作中更快更准确地制定出科学合理的抗灾策略, 同时使人们更直观地了解城市化进程对于区域防御内涝灾害及其恢复能力的影响。

【关键词】: MIKEFLOOD 模型 城市内涝 弹性分析 不同城市化

【中图分类号】: TU992;X171 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)06-1402-11

在全球气候变化的大背景下, 过快的城市化建设导致部分建筑规划存在问题, 进而造成土地不透水面积大幅增加, 城市在面对极端天气时, 会出现如道路积水、雨污合流、城市内涝等问题。原本城市在面对恶劣气候时, 会有自我调节能力, 但随着城镇化率越来越高, 改变了原始的下垫面, 导致自然汇水方式被迫改变, 暴雨之后的城市恢复力就在逐渐下降。因此, 对于内涝灾害的灾后恢复过程的研究逐渐成为一个热点话题。Holling^[1]于 1973 年将生态恢复力定义为生态系统在受到干扰后恢复平衡或稳定状态的能力。将弹性概念延引至城市内涝灾害的研究中, 为研究城市内涝灾害的形成与恢复过程提供了新思路, 有助于深入了解城市内涝形成机理, 缓解城市暴雨内涝压力。

在内涝弹性值的计算方法上, 归纳起来主要分为两大类: 利用数学模型进行分析计算和构建指标体系进行评价。在数学模型的应用中, Simonovic 等^[2,3]首次提出将弹性量化为时间空间的函数, 提高了对系统从灾难事件中恢复能力的理解。Seith 等^[4]利用 SWMM 模型模拟了排水管网在遭遇随机不定的可能故障时, 分析各故障情景下的总洪水量和洪水持续时间, 并通过相应的计算公式将总洪水量和持续时间结合成单个度量的弹性系数, 并将其应用于量化不同的排水系统故障下的系统剩余功能。张灵等^[5]利用恢复力这一概念形象表述了北江下游的防洪保护区在遭受洪灾后恢复至灾前状态的综合能力, 选定影响恢复力的驱动因素构建系统恢复力评价指标体系, 为区域的灾后恢复力评估诊断提供了方向, 对研究调整社会发展以适应洪水的减灾策略提供基础。

本文基于 MIKEFLOOD 模型并结合弹性分析法研究了南昌市朝阳新城在不同降雨重现期下形成内涝以及淹没退去的完整过程, 并研究了不同城市化程度对于内涝弹性的影响。

1 研究区域

作者简介: 傅春(1966~), 女, 教授, 主要研究方向为海绵城市与经济管理. E-mail: ccfu@ncu.edu.cn

基金项目: 国家社会科学基金项目(18BGL187); 江西省自然科学基金项目(20181BAB206046); 江西社会科学规划项目(18GL34)

1.1 研究区域概况

研究区域位于南昌市的朝阳新城片区，是南昌市西湖区新城中心区，该区城市化程度较高，建筑物密度相对较高，地势起伏不大，最大高程为 24.5m，最低的地势也有 18.8m，最大高差在 6m 以内。研究区年均降雨为 1600mm，降雨四季分布不均，4~6 月持续降雨明显，约占全年总降雨量一半以上。具体研究区域由西面的赣江旁的沿江南大道，东面的真君路，南面的昌南大道以及北部的水厂路围合而成，研究区域总面积约为 10.81km²，具体区域如图 1 所示。

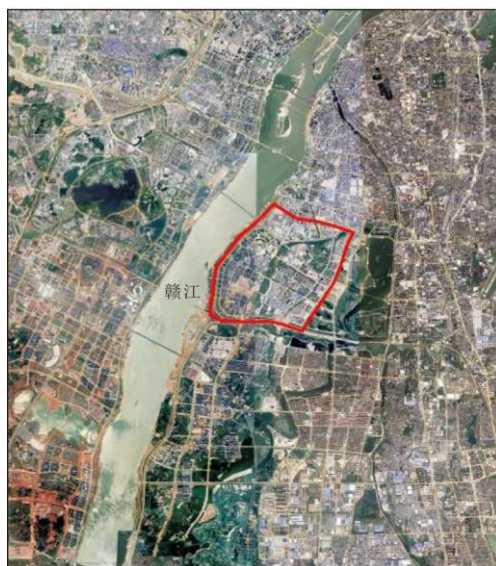


图 1 研究区具体范围图

本研究中在整理研究区土地利用类型 DWG 文件的基础上，对研究区域进行实地调研，将研究区分为建筑用地、道路用地、人造表面、绿化用地、河流湖泊以及其他用地等 7 种下垫面类型，研究区用地类型概化如图 2 所示。其中，人造表面包括休闲广场、室外停车场等路面，绿化用地包含路边绿化、公园绿化以及河流岸滩部分用地。

参考文献[6, 7]及《室外排水设计规范》(GB50014-2006)来确定不同类型下垫面的综合径流系数，具体参数见表 1。

1.2 设计降雨

南昌市的降雨雨型可利用芝加哥雨型合成而得^[6]，因此南昌市的降雨强度公式如式(1)所示：

$$q = \frac{1598(1 + 0.69\lg P)}{(t + 1.4)^{0.64}} \quad (1)$$

式中：q 为暴雨强度，L/(s·hm²)；P 为降雨重现期，a；t 为降雨历时，min。

在芝加哥雨型中，雨峰系数即为设定雨峰出现的时间段，由于南昌市的实际降雨中雨峰位置偏前，故雨峰系数设置为 0.4，取 1、3、5、10 以及 20a 等 5 种降雨设计重现期，降雨历时设置为常引起城市内涝的短历时降雨 2h。因此，合成的研究区设计降雨过程如图 3 所示。



图 2 研究区用地概化图

表 1 不同类型下垫面综合径流系数

编号	下垫面类型	综合径流系数	面积占比 (%)
1	道路用地	0.85	18.13
2	建筑用地	0.88	10.36
3	人造表面	0.70	33.91
4	绿化用地	0.12	14.01
5	河流湖泊	1.00	7.40
6	待建设用地	0.43	9.91
7	其他用地	0.38	6.28

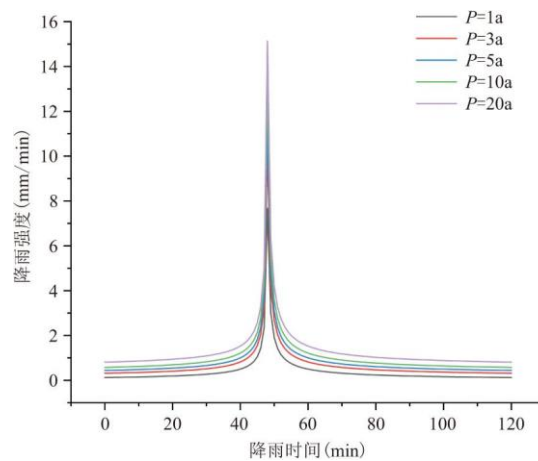


图 3 不同重现期设计降雨过程线

1.3 数据来源

研究区域中的 CAD 管网节点和管道数据是由规划部门提供，降雨量数据由南昌市气象局官网获取，实际积水深度由实地调研结合相关网络媒体、新闻报道获得。研究区域地形 DEM 数据是由 ArcGIS 提取规划的 CAD 节点高程数据后，对其进行栅格插值处理选用克里金法，可以生成 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 栅格地形数据。为了更好凸显道路的行洪能力及建筑物的阻水能力，在地形图中对道路用地进行降低 0.15m ，对建筑物拔高 5m ，由于道路的马路牙子一般为 0.15m ，为凸显道路的行洪能力，此处将道路用地进行降低 0.15m 处理，为突出建筑用地的阻水作用，将建筑用地拔高至积水深度不太可能达到的高度（此处设为 5m ），经上述处理后的地形数据将更加接近实际情况。最终得到的二维地形数据如图 4 所示。

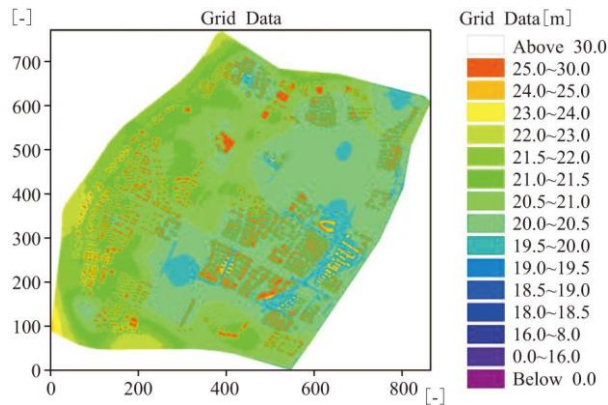


图 4 研究区域地形图

2 研究方法

城市内涝弹性是指城市的排水系统遭遇降雨的冲袭后，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的时间^[9,10,11]。因此，对城市内涝进行弹性分析可以统筹考虑到城市抵御内涝灾害以及灾后复原能力^[12,13]。

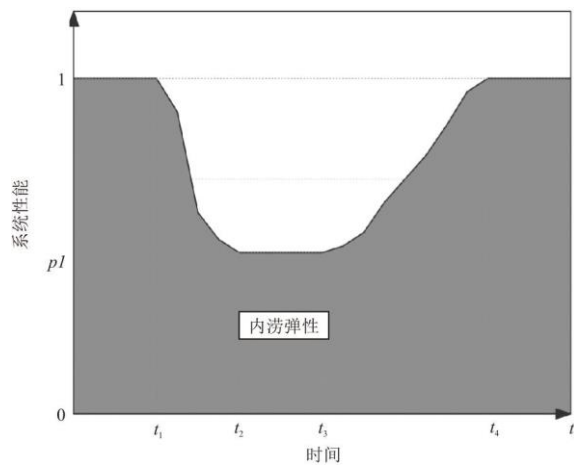


图 5 系统性能函数示意图

在系统遭受降雨干扰后，研究区排水系统性能会开始下降至一个最低值，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，图 5 为系统性能函数示意图，即为研究区在遭受降雨干扰前后的理论响应过程。排水系统系统性能在 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， $0-t_1$ 时段称为系统的准备阶段； 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 时段为系统的恢复阶段。因此本研究中以系统性能函数为基础，进而计算研究区域的内涝弹性值。

在对研究区域进行复杂的网格弹性评价中，Ganin 等^[14]在复杂的网络弹性评价模型中研究网络系统遭受攻击扰动后，假设网络节点只存在两种状态，即有效和无效，而有效网络节点个数与总节点数的比值即作为系统性能函数，因此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，因此可以统计淹没网格个数与未淹没网格个数，相应的代表研究区域内淹没面积与未淹没面积。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，则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，系统性能即为 0。因此，本研究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 $d(i, t)=1$ ；反之，如果栅格 i 的水深小于淹没阈值时，则 $d(i, t)=0$ 。由于人们对于不同下垫面的需求不同，因此，不同下垫面的淹没阈值也不同。研究区的系统性能计算如式 (2) 所示。

$$p(t) = 1 - \frac{N(t)}{N} \quad (2)$$

$$N(t) = \sum_{i=1}^N d(i, t)$$

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，即 $N(t) = \sum_{i=1}^N d(i, t)$ ； N 为区域内总网格数量。

在模拟时段内，统计各个时刻研究区的淹没网格数，计算相应时刻的系统性能值，进而根据具体的系统性能值绘出其变化曲线。研究区域的洪水弹性通过对系统性能变化曲线进行积分而求得，如式 (3) 所示。

$$Res_0 = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} p(t) dt \quad (3)$$

式中： Res_0 为系统洪水弹性； t_n 为模型模拟时间。结果根据积分的几何意义即求梯形面积之和进行计算。

3 模型建立与耦合

3.1 一维排水模型

在排水模型建立前，对研究区域的节点和雨水管道概化，节点包含检查井及排水口。研究区域的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。研究区域排水系统经概化后节点共 219 个节点，其中包含 34 个排水口，共有 185 条管道连接，管道均为圆管，最大直径为 2200mm，最小为 800mm，管道总长约为 43.88km。将管道和节点数据导入 MIKEURBAN 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。利用泰森多边形法将划分为 185 个面积 1.12~17.29 hm^2 不等的子汇水区，研究区子汇水区划分结果如图 6 所示。

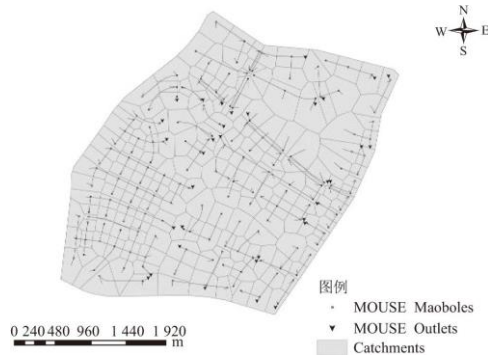


图 6 研究区域子汇水区划分图

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，基础地形数据根据上文处理得到，并对研究区域以外的区域进行剔除，将之外的标高进行拔高处理以关闭边界。二维模型的参数设置根据文献确定，初始水位设置为 0m，干水深和淹没水深分别设置为 2 和 3mm，糙率设置参考相关文献^[15]，混凝土路面的糙率值设为 40；绿地糙率值设为 32。

3.3 耦合模型

二维模型建立完成后，利用 MIKEFLOOD 模型将 MIKEURBAN 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，选择节点中的检查井与地形文件的连接方式为 Urban 连接。

3.4 模拟结果验证

为验证模型各参数的合理性，在建模完成之后，需要对模型所得模拟结果进行率定与验证。由于此次建成模型为耦合模型，输出结果为耦合网格的淹没水深，因此，在此次的模型验证中，输入实测降雨作为模型的降雨边界条件，将模拟结果与实际内涝点及其积水深度进行比较，以此进行模型的率定与验证，进而使模拟结果具有较高的可信度。

本文首先采用 2020 年 6 月 1 日朝阳新城 24h 实测降雨量对模型进行率定，降雨量数据由南昌市气象局官网获取，实测数据如图 7 所示。

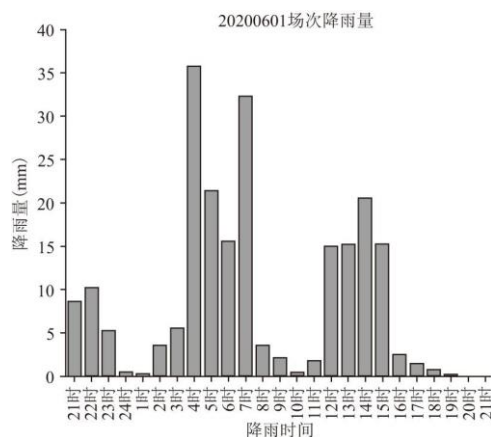


图 7 20200601 场次降雨量

因此，通过已建成模型模拟 20200601 场次降雨实测数据，对比实际积水情况，调整下垫面不透水率，计算相应内涝点的积水深度误差情况，控制在-20%~10%即视作率定成功。模型模拟得到的内涝范围及积水深度情况如图 8 所示。

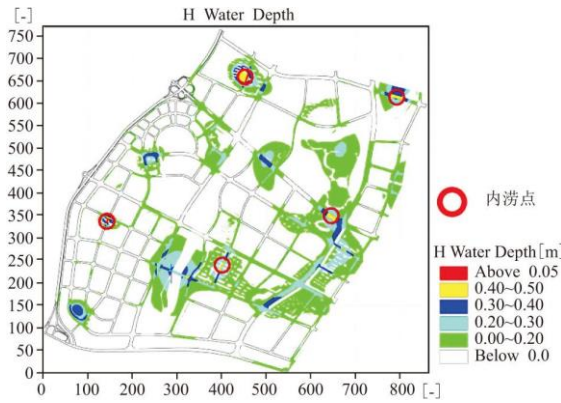


图 8 模拟与实际内涝点情况对比

由图 8 可知，模拟结果中内涝点位置与实际降雨情况基本一致，表 2 为上述内涝点实际积水深度与模拟所得积水深度的对比以及相对误差。

表 2 内涝点积水深度对比

内涝点	模拟积水深度 (m)	实测积水深度 (m)	相对误差
凉伞树路康桥绿城处路段	0.508	约 0.5	1.6%
云飞路与桂殿路交汇处	0.516	约 0.5	3.2%
水厂路与桃花南路交汇处	0.420	约 0.4	5%
九洲大街南昌第三医院路段	0.468	约 0.5	-6.4%
丹桂路十里桃花路段	0.406	约 0.4	1.5%

由图 8 与表 2 所述，研究区 5 个内涝点的位置及其积水深度的模拟结果与实际情况基本一致，积水深度在误差允许范围之内^[16,17]，因此可初步判断模型在研究区域具有良好的适用性，模拟结果可信度较高。

通过调整后，各种下垫面的综合径流系数参数见表 3 所示。

表 3 不同类型下垫面参数

下垫面类型	综合径流系数	下垫面类型	综合径流系数

道路用地	0.88	绿化用地	0.15
建筑用地	0.90	待建设用地	0.45
人造表面	0.75	其他用地	0.40

4 研究区内涝弹性分析

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，结合弹性分析法对研究区内涝情况进行分析，有助于全面了解研究区对于内涝灾害的防御与恢复能力^[18,19]。

4.1 研究区的淹没网格变化

通常情况下，由于 2h 降雨期间，研究区部分区域还处于淹没状态，不能很好反映降雨后的恢复过程，因此经反复试验后，本文将总模拟时长调整为 36h，其中只有前 2 个小时经历了设计降雨，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直接影响到相应网格的淹没状态，因此，淹没阈值的设定对于系统洪水弹性有着决定性的影响。参考相关研究文献，Yin 等^[20]与王运涛^[21]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 0.30m，但考虑到 0.30m 的积水水深会对研究区当地居民带来诸多不便，在询问专家意见后，本研究中针对不同下垫面设定不同的淹没阈值，其中绿地用地的淹没阈值设为 0.15m，道路及人造表面的淹没阈值为 0.05m，待建设用地与其他用地的淹没阈值设定为 0.10m。

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 9、图 10 分别表示不同重现期下的研究区的积水及淹没网格数变化情况。

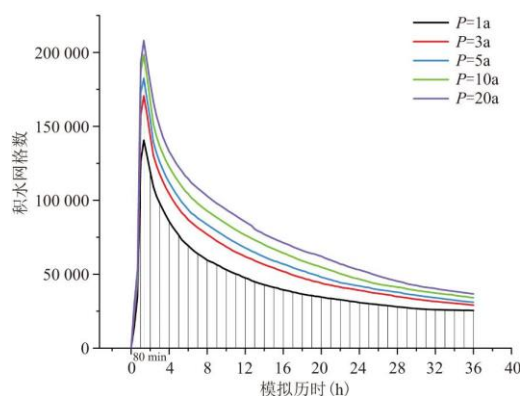


图 9 不同重现期积水网格数

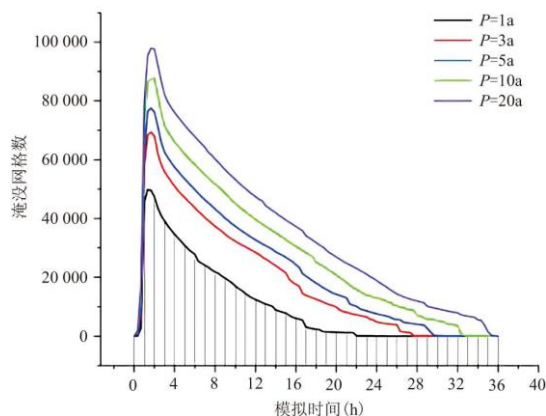


图 10 不同重现期淹没网格数

结合图 9、图 10 可知，在不同重现期降雨下，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，但很明显，研究区积水网格与淹没网格的峰值及其时间还是存在较大差异。不同重现期下积水网格数在 80min 时基本都达到了各自的峰值，但研究区的淹没网格数相对于积水网格的峰值时间有一个滞后，滞后的时间在 20~40min 之间。观察不同重现期下的淹没网格数变化(图 10)，淹没网格数在达到峰值后也逐渐降低，直至消失，重现期降雨的频率越高，网格数消失的时间越提前，各重现期降雨下，淹没网格数消失时间大致为 1520、1940、2020、2060 以及 2160min，在 1 与 3a 降雨重现期之间的网格消失时间相隔最久。

4.2 研究区系统性能

对研究区排水系统的性能进行计算，有助于了解在遭遇暴雨袭击后研究区的剩余排水能力随时间的变化情况。因此，根据公式(2)计算研究区排水系统的性能，计算得到研究区系统性能函数，如图 11 所示。

由图 11 可知，不同重现期降雨下系统性能变化趋势基本相同。观察系统性能随时间变化可知，各重现期系统性能恢复时间与淹没网格的消失时间一致，因此，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。通过计算可知，不同重现期下研究区系统性能的最小值分别为 0.885、0.840、0.821、0.797 和 0.773，系统性能最小值对应时间分别是 80、100、100、100 及 100min，1 与 3a 降雨重现期之间的最小值差距最大，说明研究区的系统性能变化在遭遇低重现期时更为敏感。

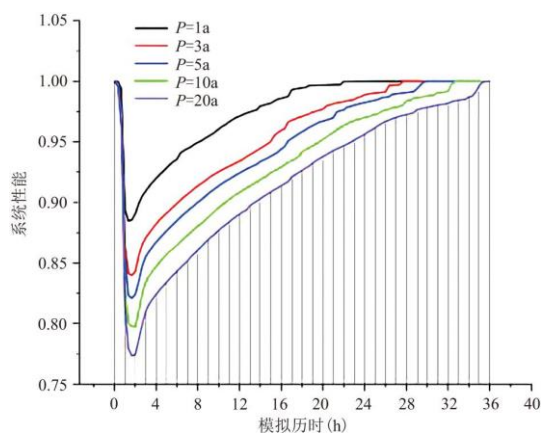


图 11 研究区系统性能

4.3 洪水内涝弹性

相较于最大淹没水深及淹没面积的分析，洪水弹性分析可以帮助我们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12所示。

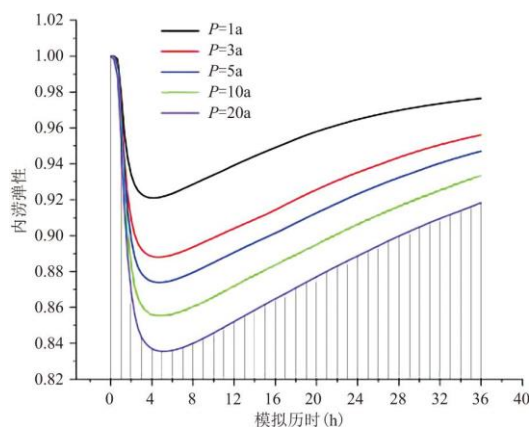


图 12 不同重现期内涝弹性值

由图12可知，研究区排水系统在36h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2h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，其代表了在模拟期间由于遭受降雨袭击造成的系统性能的最大损失，最低弹性值越大，表明系统性能所受损失越小。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，系统性能的恢复水平随着重现期的减少而变得更好。

不同重现期在36h时的内涝弹性最终值如图13所示。内涝弹性的最终值代表了在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的单位时间系统性能损失越小，也就说明其恢复能力越好。各重现期下研究区内涝弹性最终值分别为0.976、0.956、0.947、0.933与0.918。在经过降雨期与恢复期后，系统性能总损失随着降雨重现期的变大而增大，而研究区排水能力的恢复就越差。

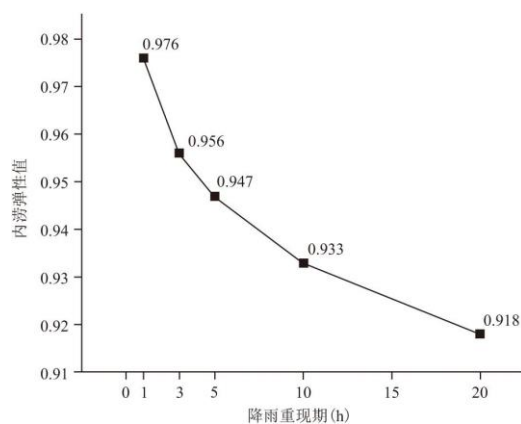


图 13 不同重现期内涝弹性值 (t=36h)

就降雨重现期的变化而言， $P=20a$ 与 $P=10a$ 降雨重现期之间相差 $10a$ ，但弹性值的最低值仅相差 0.015 ，而 $P=3a$ 相比 $P=1a$ 降雨相差 $2a$ ，但系统弹性值变化 0.02 。因此，研究区对于 $P=1a$ 至 $P=3a$ 的小重现期降雨其弹性值变化更为敏感，研究区排水系统对于 $1\sim3a$ 的低重现期降雨导致的内涝淹没范围及深度变化更大。

5 不同城市化的内涝弹性分析

5.1 不同城市化程度

本文为研究城市化进程中下垫面的改变对地表降雨径流的规律所产生的影响，分析南昌市过去年份的遥感影像数据，并结合南昌市的用地规划资料，选择研究区 2013、2016 以及 2020 年现状的土地利用情况即可分别代表 3 种不同程度的城市化程度：低度等城市化、中等城市化以及高等城市化。其中，前文中研究结果即为高等城市化程度。现将研究区的土地利用类型解译成绿地、水体、建筑用地、道路用地、人造表面、待建设用地以及其他用地等 7 种下垫面类型。下垫面的概化结果如图 14 所示。

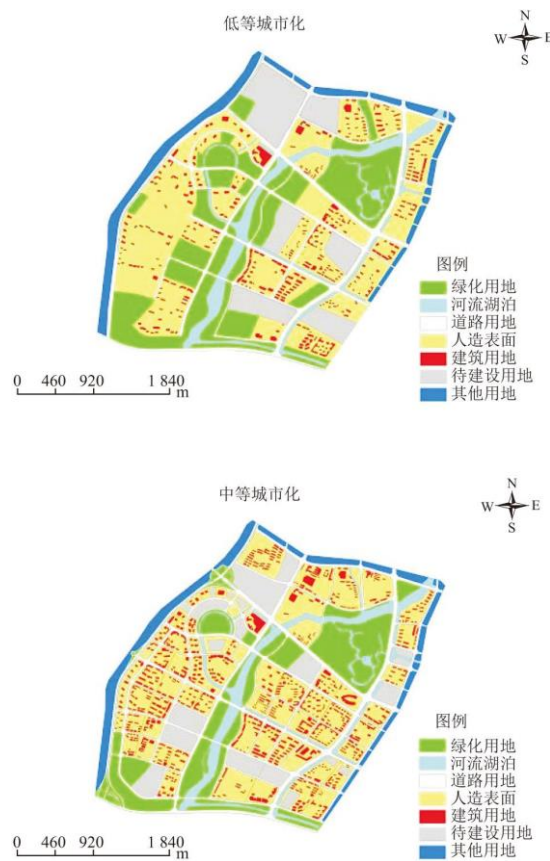


图 14 不同城市化程度下垫面概化

由图 14 可知，相较于中等城市化的土地利用，低等城市化中的绿化用地明显更多，而象征着城市化程度的建设用地以及道路用地占比显然更少。不同城市化程度下的土地面积占比以及综合径流系数情况如表 4 所示。

表 4 不同城市化的土地面积占比及径流系数

不同下垫面类型	城市化发展程度	面积占比 (%)	综合径流系数
---------	---------	----------	--------

建设用地	高等	10.36	0.9
	中等	7.54	0.9
	低等	3.83	0.9
绿化用地	高等	14.01	0.15
	中等	16.54	0.13
	低等	22.60	0.12
河流湖泊	高等	7.40	1
	中等	7.39	1
	低等	7.56	1
待建设用地	高等	9.91	0.45
	中等	10.60	0.43
	低等	11.42	0.40
道路用地	高等	18.13	0.88
	中等	16.25	0.86
	低等	11.59	0.85
人造表面	高等	33.91	0.75
	中等	35.40	0.70
	低等	36.51	0.65
其他用地	高等	6.28	0.40
	中等	6.28	0.38
	低等	6.49	0.35

如表 4 可知，除建设用地以及河流湖泊的径流系数取值固定外，各种下垫面的径流系数取值都随着城市化程度的升高而升高，由于在不同城市化过程中，每种下垫面的土壤性质和土质构造会有一定程度的改变。因此可以计算得到不同城市化程度下研究区的综合不透水率分别为 67.18%、61.92%及 54.15%。

5.2 不同城市化程度的淹没网格变化

在获取不同城市化程度下的土地利用情况后，对不同的城市化状态进行模拟，其中降雨时长、模拟总时长以及不同下垫面淹没阈值均与上文中一致，但由于下垫面的分布情况有所改变，研究区整体的淹没阈值也需要另行设置。在此次模拟中，以 10a 一遇 2h 设计降雨为例，分析不同城市化程度下的内涝弹性。首先，根据耦合模拟结果，提取出各种城市化状态下的积水网格数以

及淹没网格数随时间变化情况。如图 15、16 分别为 10a 一遇降雨下不同城市化程度研究区的积水及淹没网格数变化情况。

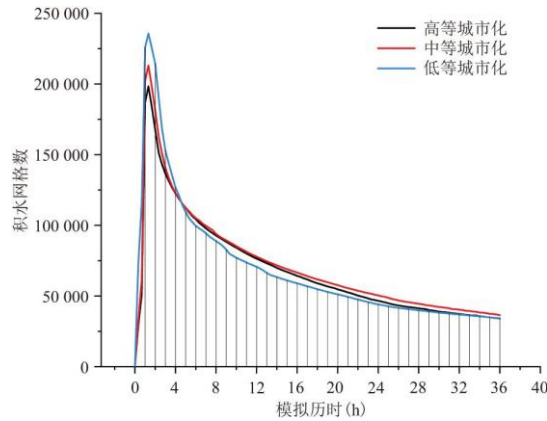


图 15 10a 不同城市化积水网格数

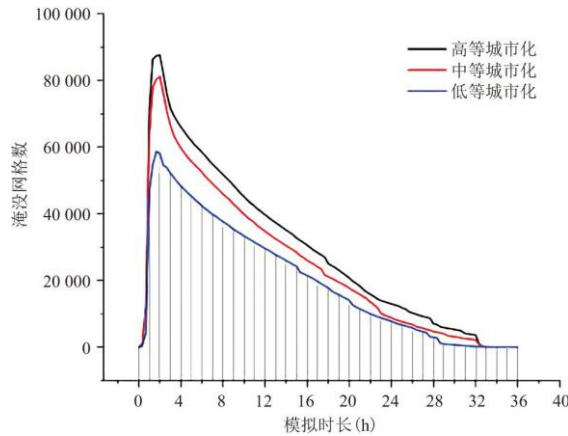


图 16 10a 不同城市化淹没网格数

由图 15 可知，3 种不同城市化条件下的积水网格数随时间的变化，其相互之间的大小关系也会发生一定的变化，其根本原因在于 MIKE 耦合模型中，为突出房屋建筑的阻水作用，将房屋的地形拔高 5m，因此，建设用地的下垫面不会存在积水网格。而低等城市化的下垫面中建设用地占比仅为 3.83%，远低于中等、高等城市化的 7.54%、10.36%，因此，积水网格数的最大值随着城市化的发展而逐渐降低。但在降雨停止后，低等城市化的综合径流系数更小，能更快地将地面积水排除，在模拟历时为 5h 时，高等城市化的积水网格数>中等城市化>低等城市化，并且这种趋势将一直维持至模拟结束，甚至直到积水网格数逐渐消失。观察图 16 可知，不同城市化的淹没网格数随时间变化的趋势基本一致，都是先增加至一个最大值，再逐步降低直至消失。相较于积水网格数的变化，淹没网格数可以更直观地反映不同城市化在遭遇同等降雨条件下的内涝灾害情况。低等城市化的淹没网格数最大值在三种城市化程度下是最小的，其淹没网格数的消失时间最早，并且在整个模拟时段，淹没网格数都是高等城市化>中等城市化>低等城市化，因此，在相同的降雨条件下，高等城市化遭受的内涝灾害最为严重。

5.3 不同城市化程度的内涝弹性分析

系统性能的变化可以更加直接地反映不同城市化研究区排水系统的剩余排水能力，同样地，根据公式 (2) 分别计算不同城市化程度在遭遇 10a 一遇的设计降雨后，研究区的系统性能变化。如图 17 所示，即为 10a 降雨下不同城市化的系统性能变化。

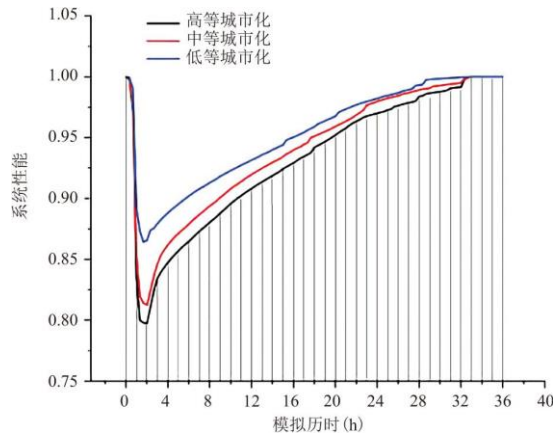


图 17 不同城市化系统性能

根据图 17 可知，3 种不同城市化状态下的系统性能都是先降低至一个最小值，然后再逐步回升至原有状态。经过计算可知，高等、中等和低等城市化下研究区的系统性能最低值分别为 0.797、0.812 和 0.864，而高等和中等城市化的系统性能最低值出现在降雨结束后，即模拟历时 2h 时刻，而低等城市化在降雨还未结束，模拟时间 100min 时刻便达到了系统性能最低值，这也直接说明了低等城市化的排水能力可以较好应对 10a 一遇的设计降雨。在到达系统性能的最低值后，模拟时段为 2~4h，高等城市化与中等城市化的系统性能的恢复速度较快，恢复能力良好，这是因为低等城市化在此之前就已通过排水系统将淹没网格排除，这也侧面反映了低等城市化的排水能力更强。系统性能恢复至原有状态 1 的时间也可以反映不同城市化的排水能力，恢复时间随着城市化的发展而延后。

基于上文中计算得到的系统性能，根据式(3)计算不同城市化程度下研究区系统在模拟时段内的内涝弹性值，计算得到的弹性值随时间变化情况如图 18 所示。

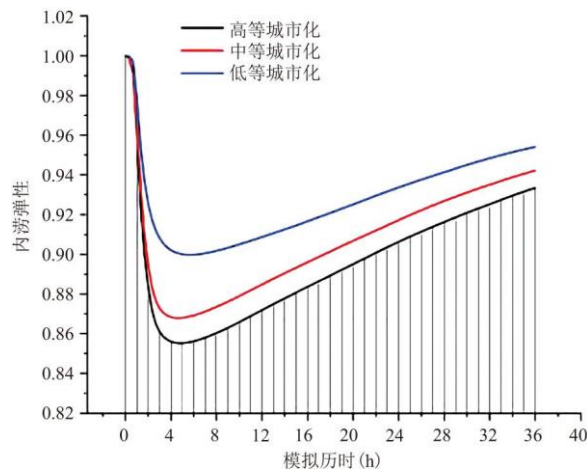


图 18 不同城市化内涝弹性值

由图 18 可知，不同城市化程度下的内涝弹性值随时间的变化趋势基本一致，先是迅速降低至最小值，然后再逐步增加至弹性值最终值。3 种不同城市化的内涝弹性值在模拟时段内都是高等城市化<中等城市化<低等城市化。这 3 种城市化程度的内涝弹性值产生差异的根本原因在于不同的综合径流系数，三者之间的综合径流系数分别相差 5.26 与 7.77，差值之间相差不大，但三

者的内涝弹性最小值分别为 0.855、0.868 及 0.900, 高等城市化与中等城市化的内涝弹性最小值之差为 0.013, 小于中等到低等城市化的差值 0.032, 可见内涝弹性最小值对于更小的综合径流系数之间的变化更为敏感, 同时弹性最低值对应的时间分别是 280、300 及 340min, 可见城市化发展程度越高, 也就更快达到对研究区排水系统造成最大冲击的时刻。3 种不同城市化的内涝弹性最终值分别为 0.933、0.942 和 0.954, 单就最终值可知, 低等城市化的系统系统总损失最小, 排水能力恢复得更好。

6 结论

本文分析了南昌市朝阳新城片区在 1、3、5、10 及 20a 重现期降雨事件下, 研究当排水系统遭受降雨干扰后, 以系统性能函数为基础的内涝弹性, 用内涝弹性指数定量指标进行量化, 利用 Mikeflood 藕合模型来模拟研究区域的积水情况和内涝淹没状态, 进而对相应的淹没情况进行内涝弹性分析。在此基础上分析研究区 3 个不同年份(2013、2016、2020 年)土地利用情况, 进而根据耦合模拟结果计算比较了 10a 一遇降雨下不同城市化发展程度对于内涝弹性值的影响。本文主要结论如下: (1) 随着重现期的降低, 系统性能总损失减小, 研究区内涝的恢复能力显著提高。(2) 相较于高重现期降雨, 研究区在遭遇低重现期降雨时的淹没网格数、系统性能与弹性指数的变化更敏感。(3) 在遭遇相同的设计降雨后, 城市化发展程度越高, 对研究区排水系统的冲击越大, 将更快达到对研究区排水系统造成最大冲击。同时, 随着城市化的发展, 研究区排水能力及其恢复能力也越差。(4) 研究结果有助于在以后的防洪排涝工作中更快更准确地制定出科学合理的抗灾策略, 同时使人们更直观地了解城市化进程对于区域防御内涝灾害的能力及其恢复能力的影响。

参考文献:

- [1] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1):1-23.
- [2] SIMONOVIC S P, PECK A. Dynamic resilience to climate change caused natural disasters in coastal megacities quantification framework[J]. British Journal of Environment & Climate Change, 2013, 3(3):378-401.
- [3] SLOBODAN P, SIMONOVIC. From risk management to quantitative disaster resilience: A new paradigm for catastrophe modeling[J]. Risk Modeling for Hazards & Disasters. 2018:281-297.
- [4] MUGUME S N, GOMEZ D E, FU G, et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems[J]. Water Research, 2015, 81:15-26.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李连文. 基于 MIKE 模型的城市水利除涝与市政排水衔接研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [9] 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.
- [10] 陈燕飞, 张翔. 河流水环境的可恢复性及其评价研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(1):34-46.

-
- [11]崔鹏.我国城市社区复合生态系统适灾弹性的度量研究[D].南京:东南大学,2019.
- [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]陈卫佳.可持续城市雨水系统的弹性评估研究[D].重庆:重庆大学,2019.
- [14]GANIN A A, MASSARO E, GUTFRAIND A, et al. Operational resilience: Concepts, design and analysis[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1):19540.
- [15]任梅芳, 徐宗学, 黄子千, 等. 北京莲花桥区域暴雨积水模拟研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(12):10-18.
- [16]苏晓天. 基于 MIKE FLOOD 的华北典型县域主城区内涝模拟研究[D]. 河北: 河北工程大学, 2020.
- [17]LI J, ZHANG B, MU C, 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.
- [18]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.
- [19]王维俊, 郑颖, 黎昔春. MIKE URBAN 模型在华容县城市内涝分析中的应用[J]. 市政技术, 2019, 37(4):194-196, 236.
- [20]YIN J, YU D, YIN Z, 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.
- [21]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.