

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.003

# 降雨雨型对城市内涝的影响

胡彩虹,姚依晨,刘成帅,马炳焱,孙悦

(郑州大学水利科学与工程学院,河南 郑州 450001)

**摘要:**为探究降雨雨型对城市内涝特征的影响,基于 MIKE FLOOD 平台,以郑州市金水区南部为研究区域,对不同重现期及3种单双峰雨型的设计降雨进行内涝过程场景推演,并对淹没量、淹没范围及淹没深度等量值进行对比分析。结果表明:在相同降雨历时及重现期下,相比于单峰型降雨,双峰型降雨具有更高的内涝风险等级;针对单峰型降雨,当重现期低于20 a时,降雨雨峰越靠前产生的淹没情况越严重,当重现期高于20 a时,降雨雨峰越靠后产生的淹没情况越严重;随着重现期的增加,单峰型和双峰型降雨所导致的内涝风险之间的差异在不断减小。

**关键词:**城市内涝;MIKE 模型;单峰雨型;双峰雨型;雨峰系数;场景推演;郑州市

**中图分类号:**TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0015-07

**Effects of rainfall patterns on urban waterlogging**//HU Caihong, YAO Yichen, LIU Chengshuai, MA Bingyan, SUN Yue (School of Hydraulic Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** To analyze the effects of the rainfall pattern on characteristics of urban waterlogging, using the southern Jinshui District of Zhengzhou City as the research area, the waterlogging processes of design rainfall scenes with different return periods and unimodal or bimodal rainfall patterns were investigated based on the MIKE FLOOD platform, and the flooding volume, flooding area, and flooding depth were compared and analyzed. The results show that compared with the unimodal rainfall, the bimodal rainfall leads to a higher risk of waterlogging. For the unimodal rainfall, when the return period is less than 20 a, the inundation caused by the earlier rain peak is more serious; when the return period is higher than 20 a, the inundation caused by the later rain peak is more serious. With the increase of the return period, the difference between the risks of waterlogging caused by unimodal and bimodal rainfall is decreasing.

**Key words:** urban waterlogging; MIKE model; unimodal rainfall pattern; bimodal rainfall pattern; rain peak coefficient; scene deduction; Zhengzhou City

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次评估报告,21世纪前20年全球平均温度比1850—1900年平均值高0.99℃。全球气候变暖,极端降雨概率增加<sup>[1-2]</sup>,城市化进程加快,不透水面增加,使得城市内涝灾害频发<sup>[3]</sup>。2012年“7·21”北京特大暴雨、2014年“7·27”合肥暴雨等极端暴雨事件所导致的内涝问题发人深省。2021年7月郑州发生特大暴雨事件,全省1453.16万人受灾,直接经济损失达1142.69亿元。内涝已经成为我国城市化发展过程中面临的重要问题。

近年来,关于城市内涝问题的研究逐渐增加。降雨作为导致内涝的直接因素,多数学者从降水强

度、降水量入手研究其对城市内涝的影响,如:徐宗学等<sup>[4]</sup>模拟了福州市江北城区500年一遇等特大暴雨的洪涝过程;李智等<sup>[5]</sup>基于SWMM模型模拟了不同重现期降雨下的淹没情况,确定洪灾危险区;李家科等<sup>[6]</sup>基于SWMM模型模拟了不同降水强度下水花园对径流的调控作用。然而,降雨对内涝的影响还存在另一个重要因素:降雨雨型。雨型描述了降水强度随时间的分配,直接影响降雨峰值的大小及位置,更直接关系到城市内涝的严重程度。因此,定性定量分析雨型对城市内涝的影响具有重要意义。近几年有关雨型特征的研究越来越多,如:刘樱等<sup>[7]</sup>统计分析了杭州市的降雨雨型特征;汪婷等<sup>[8]</sup>

基金项目:国家自然科学基金(51739009)

作者简介:胡彩虹(1968—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:hucaihong@zzu.edu.cn

通信作者:姚依晨(1997—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:yaoyichen@gs.zzu.edu.cn

利用芝加哥雨型法和 Pilgrim&Cordery 雨型法推求了昆明市的设计暴雨雨型分布;唐明等<sup>[9]</sup>分析了不同雨型实测暴雨的放大方法;赵琳娜等<sup>[10]</sup>采用模糊识别法对北京降雨过程进行雨型划分。但大多学者仅探究了单一雨型降雨对城市洪涝的影响,如:曹经福等<sup>[11]</sup>评估了不同单峰型降雨对内涝积水总量的影响;雷向东等<sup>[12]</sup>选用典型的芝加哥雨型研究了 LID 措施对城市雨水径流污染过程的改善效果;侯精明等<sup>[13]</sup>设计了不同峰值比例的单峰型降雨,对西咸新区的内涝情况进行模拟分析;王颀<sup>[14]</sup>利用典型场次降雨过程线生成双峰型设计降雨,并对现状区域进行内涝风险分析。然而,降雨过程往往不是简单的单一过程,不同的雨型所造成的内涝及灾害风险程度不同。因此,本文以郑州市金水区南部为例,基于 MIKE 模型,对内涝积水过程进行场景推演,从淹没总量、淹没面积、淹没深度等方面系统分析金水区南部不同设计降雨雨型下的城市内涝淹没情况,分析城市内涝对降雨雨型的响应特点,以期为城市内涝预警预报、灾害防治等工作提供参考。

## 1 研究区概况与基础数据

### 1.1 研究区概况

郑州市位于 112°42'E~114°14'E、34°16'N~34°58'N 之间,地处黄河中下游和伏牛山脉向黄淮平原过渡的交接地带,属于典型的平原型城市,地势西高东低。自 1948 年以来,郑州市借助优越的地理位置和便利的交通,实现了城市化快速发展。金水区隶属于郑州市,位于其东北部,辖区总面积为 235 km<sup>2</sup>,约占郑州市总面积的 3.2%,根据第七次人口普查数据,金水区常住人口数约为 161.75 万人,占全市常住人口的 12.84%,是郑州市人口密度最大的行政区。以金水区南部作为研究区域,该区域面积为 64.42 km<sup>2</sup>,是一个高度城市化区域,土地利用类型多样,包括居住区域(35.92%)、商业区域(13.01%)、工业区域(3.64%)、公共区域(12.47%)、绿地(13.18%)、荒地(2.39%)、道路(13.58%)和水体(5.81%),其土地利用分布情况见图 1。

### 1.2 基础数据

基础数据包括 4 类:地形数据、土地利用数据、排水管网数据和水文数据。地形数据选用地理空间数据云的 30 m×30 m 的 DEM 数据;土地利用数据采用谷歌地图高清影像目视解译,共分为居住区域、商业区域、公共区域、工业区域、绿地、道路、荒地、水体 8 类;排水管网数据来自郑州市相关部门,包括管

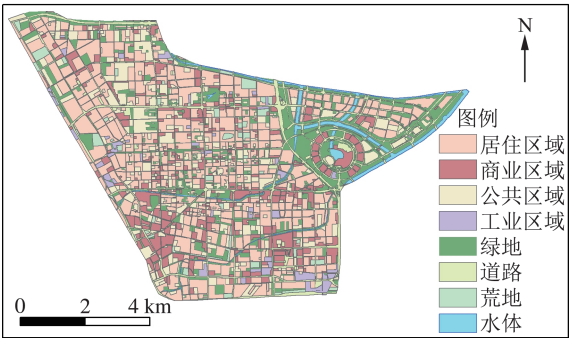


图 1 研究区土地利用分布

Fig. 1 Land use distribution of study area

道和检查井的基本信息,如位置坐标、高程、管径尺寸、编号等;水文数据采用研究区内分布的 4 个雨量站(编号为 50606600、50606601、50606603 和 50606611)所测得的数据。

### 1.3 设计降雨情景

对研究区 2016—2018 年的降雨资料进行统计(表 1),降雨时间分辨率为 10 min。降雨类型主要有均匀型、单峰型、双峰型、多峰型 4 种,其中单峰型和双峰型降雨总占比均超过 65%,双峰型和多峰型降雨总占比均在 50% 以上,说明研究区以单峰型降雨居多,双峰型降雨是较常出现的降雨类型。

表 1 2016—2018 年降雨类型占比统计

Table 1 Statistics of percentages of rainfall types from 2016 to 2018

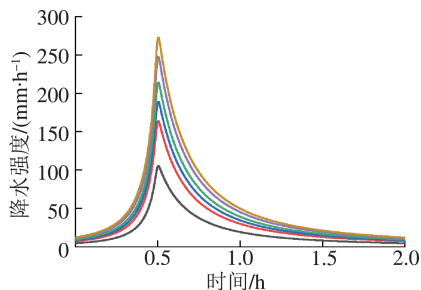
| 降雨类型 | 占比/%   |        |        |
|------|--------|--------|--------|
|      | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 |
| 单峰型  | 28.13  | 39.29  | 35.71  |
| 双峰型  | 37.50  | 35.71  | 33.33  |
| 多峰型  | 21.88  | 14.29  | 19.05  |
| 均匀型  | 12.50  | 10.71  | 11.90  |

结合芝加哥雨型,采用 2013 年由郑州市城乡规划局修订的郑州市暴雨公式生成不同的单、双峰型设计降雨,即:

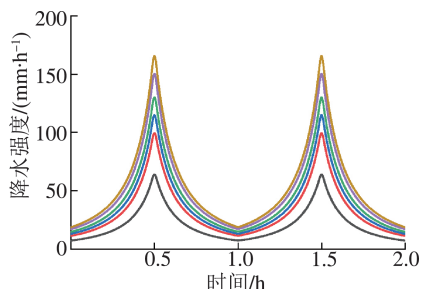
$$q = \frac{6696(1 + 0.794 \lg P)}{(t + 25.8)^{0.948}} \quad (1)$$

式中: $q$  为降水强度, L/(s·hm<sup>2</sup>); $P$  为设计降雨重现期, a; $t$  为降雨历时, min。为表征不同的雨型特征,单峰型降雨的雨峰系数分别取  $r = 0.25$  和  $r = 0.75$ ,双峰型降雨的雨峰系数取  $r = 0.50$ ,计算得到 3 种雨型、6 个重现期、降雨历时均为 120 min 的 18 场设计降雨的时间-强度-频率曲线如图 2 所示。其中,重现期为 1 a、5 a、10 a、20 a、50 a、100 a 的累计降水量分别为 42.9 mm、66.7 mm、77.0 mm、87.2 mm、100.8 mm 和 111.0 mm。

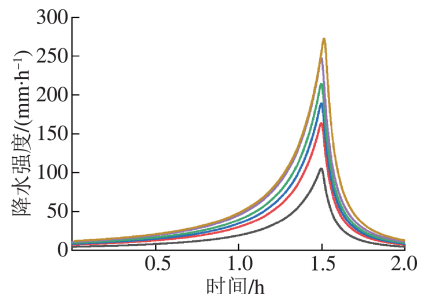
—1年一遇 —5年一遇 —10年一遇  
—20年一遇 —50年一遇 —100年一遇



(a)  $r=0.25$  单峰型降雨



(b)  $r=0.50$  双峰型降雨



(c)  $r=0.75$  单峰型降雨

图2 18场设计降雨的时间-强度-频率曲线

Fig.2 Time-intensity-frequency curves of 18 design rainfall events

## 2 模型构建与验证

### 2.1 模型构建

基于 MIKE FLOOD 平台集成一维雨水管网模型 (MIKE URBAN) 和二维地表漫流模型 (MIKE 21), 构建城市洪涝耦合模型。MIKE URBAN 是一款用于模拟城市排水管网的专业模拟软件, 由丹麦水利研究所 (DHI) 开发, 主要包括降雨入渗模块和管道汇流模块<sup>[15]</sup>, 将其与 MIKE 21 耦合可进行洪涝的二维淹没模拟。研究表明, MIKE URBAN 的建模效率较高, 且基于用户自定义时间面积曲线的建模效果高于 SWMM<sup>[16]</sup>。现阶段 MIKE 系列模型已广泛应用于城市洪涝的相关研究中, 如: 栾慕等<sup>[17]</sup>通过 SWMM-MIKE 11 耦合模型评估了管网系统的排水能力, 验证了该模型在城市内涝风险评估中的应用价值; 卢丽等<sup>[18]</sup>对 MIKE FLOOD 模型进行率定, 验证了该模型在北京清河流域洪涝模拟中的有效

性; 张译心等<sup>[19]</sup>基于 MIKE FLOOD 平台构建了城市内涝耦合模型, 并结合 LID 措施对新建城区防洪排涝情况进行模拟; 栾震宇等<sup>[20]</sup>基于 MIKE FLOOD 平台对典型区域的排涝情景进行模拟和内涝风险评估; 孔宇等<sup>[21]</sup>构建了 SWMM-MIKE 11 耦合模型, 实现两者的优势互补, 并以该模型为工具推进海绵城市河道建设。

将基础数据进行处理, 完善管道和检查井的相关属性信息, 利用 ArcGIS 合并支路管网, 保留主干路管网, 将实际雨水管网概化为管网模型, 该管网模型由 265 个检查井、270 条管道组成, 如图 3 所示。将 DEM 地形数据根据研究区范围进行裁剪, 利用 ArcGIS 转成 ASCII 格式的数据, 叠加土地利用数据, 分别构建一维雨水管网模型和二维地表漫流模型, 在 MIKE FLOOD 中进行动态耦合, 构建城市洪涝耦合模型。

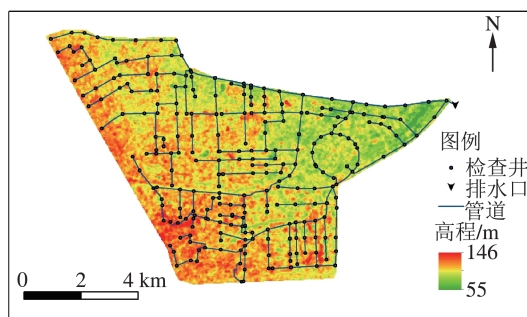


图3 研究区排水管网模型

Fig.3 Drainage network model in study area

### 2.2 模型验证

通过比较模拟结果和实测结果的 Nash-Sutcliffe 系数 (NSE) 和相关性系数 ( $R$ ) 进行校准和验证。NSE 的取值范围为  $-\infty$  至 1, 越接近 1, 表示模型可信度越高。 $R$  是最常用于评价回归模型优劣程度的指标, 是反映模型拟合优度的重要统计量, 在模型评价中,  $R$  越接近 1, 模型可信度越高。

## 3 结果与讨论

### 3.1 校准与验证

#### 3.1.1 流量过程校准与验证

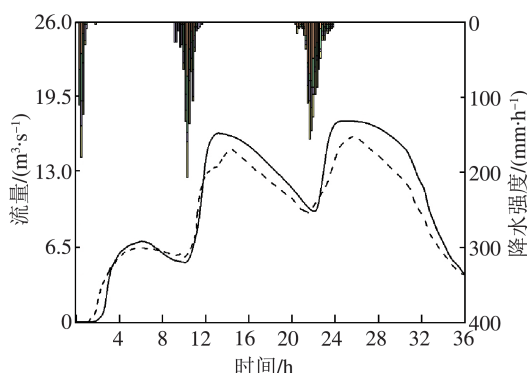
鉴于研究区大部分早已开发完成, 其下垫面情况未发生明显变化, 故选取了 2016—2018 年的 5 场历史暴雨事件对模型进行校准和验证, 结果见表 2。其中, 2 场用于模型校准, 校准结果中 NSE 和  $R$  均高于 0.8; 3 场用于模型验证, 研究区出水口流量过程模拟与实测数据对比见图 4, NSE 均高于 0.86,  $R$  高于 0.9, 模拟结果的峰现时间与实测值误差均不超过 2 h, 整体效果较好。

表2 金水区南部模型校准和验证结果

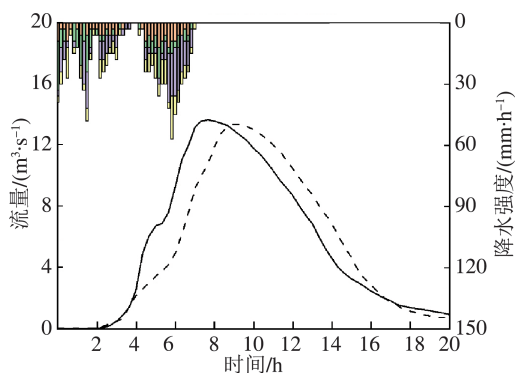
Table 2 Model calibration and verification results in southern part of Jinshui District

| 阶段 | 降雨场次     | NSE  | R       |
|----|----------|------|---------|
| 校准 | 20160719 | 0.81 | 0.944 2 |
|    | 20180626 | 0.87 | 0.925 6 |
| 验证 | 20160605 | 0.91 | 0.985 5 |
|    | 20170730 | 0.86 | 0.927 5 |
|    | 20170812 | 0.97 | 0.991 5 |

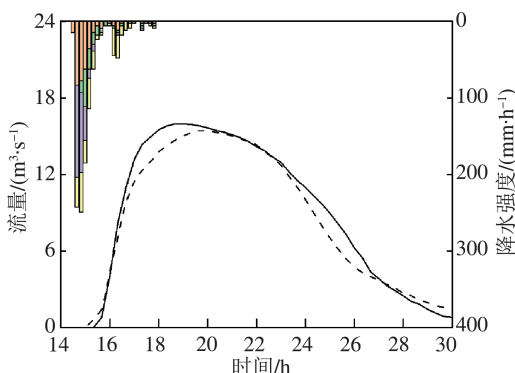
雨量站1降水强度 雨量站2降水强度 雨量站3降水强度  
雨量站4降水强度 — 实测流量 --- 模拟流量



(a) 20160605 场次



(b) 20170730 场次



(c) 20170812 场次

图4 验证期流量过程对比

Fig.4 Comparison of flow process during verification period

### 3.1.2 积水点验证

结合2017年郑州市防汛办对全市可能的积水

点进行的调查,并利用网络爬虫技术捕获大量新闻报道的水位,获得研究区常见积水点的统计数据,图5为常见积水点和模拟结果的对比图。可见,模拟结果覆盖了多数常见的积水点。结合研究区的用地类型分布来看,淹没大多分布在西北以及中部地区,该地区工商业用地密集,建筑稠密且地表硬化面积大,不透水率大,汇流速度最快,易产生淹没;研究区东北部淹没较少,该区域位属郑东新区,开发程度低,建筑稀疏,绿化面积大,相对于其他地区产生的积水少。以上结果定性地证明了模型模拟结果基本符合实际情况。

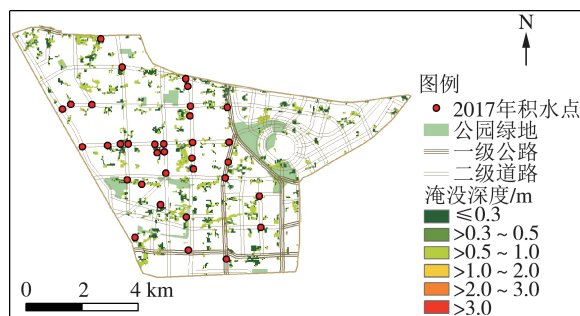


图5 实测与模拟积水情况对比

Fig.5 Comparison of actual and simulated waterlogging situation

### 3.2 淹没总量变化分析

将18场设计降雨用于模型模拟,对淹没区域的淹没网格、淹没深度进行统计,叠加计算出不同重现期下各雨型的淹没总量变化过程(图6)。双峰型降雨导致的内涝比单峰型降雨更严重。对两个单峰型降雨而言,当重现期低于20a时, $r=0.25$ 的单峰型降雨会产生更多的淹没量,如降雨重现期为5a时, $r=0.25$ 的单峰型降雨产生的淹没量峰值达16.2663万 $m^3$ ,比 $r=0.75$ 时的淹没量峰值高11.2%。当重现期高于20a时, $r=0.75$ 的单峰型降雨比 $r=0.25$ 的单峰型降雨产生的淹没量峰值高,但随着降水强度增大,雨峰系数的不同所导致的淹没量峰值间的差异也在减小,如重现期为100a时, $r=0.75$ 的单峰型降雨比 $r=0.25$ 的单峰型降雨仅多了0.95%。由此可见,在不同类型的降雨中,双峰型降雨产生的淹没量最大,导致的内涝风险最高;针对单峰型降雨,当降雨重现期低于20a时,降雨的雨峰越靠前产生的淹没情况越严重,当降雨重现期高于20a时,降雨的雨峰越靠后产生的淹没情况越严重,但随着重现期的增长,不同类型降雨所带来的淹没量峰值差异也在不断减小。

### 3.3 内涝场景推演

对18场设计降雨进行了淹没场景推演,按照SL 483—2010《洪水风险图编制导则》对淹没深度进

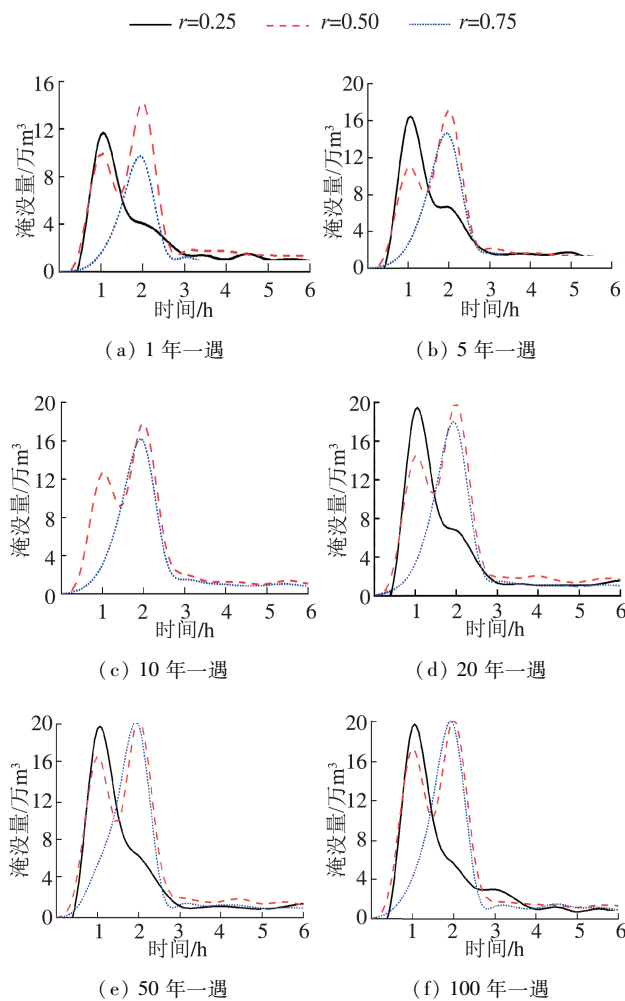


图6 不同重现期下3种雨型的淹没总量随时间的变化

Fig.6 Time course of total inundation of three types of rain with different return periods

行等级划分,共划分为6个等级: $\leq 0.3\text{ m}$ 、 $>0.3\sim 0.5\text{ m}$ 、 $>0.5\sim 1.0\text{ m}$ 、 $>1.0\sim 2.0\text{ m}$ 、 $>2.0\sim 3.0\text{ m}$ 、 $>3.0\text{ m}$ 。

图7展示了50年一遇的各雨型条件下的最大淹没风险图。将典型区域局部放大,对比分析不同雨型导致的淹没深度分布的差别,可见,双峰型降雨导致的淹没范围最大, $r=0.75$ 的单峰型降雨次之, $r=0.25$ 的单峰型降雨导致的淹没范围最小。

为了更直观地反映不同降雨雨型导致的淹没面积的差异,表3统计了淹没面积峰值以及相邻重现期之间淹没面积的增长率。可见,随着重现期的增加,淹没面积随之增大,由于降水强度不断增大,低洼区域被洪水覆盖,随之建筑物周围较高区域也逐渐被洪水淹没,到100年一遇降雨,除去建筑物覆盖区域,基本全部被淹没,故淹没面积的增长趋势逐渐变缓。在相同的降雨重现期下,不同雨型导致的淹没面积峰值存在一定的差别。其中,双峰型降雨产生的淹没面积均高于单峰型降雨。在重现期低于或等于20a时, $r=0.25$ 的单峰型降雨产生的淹没范围均大于 $r=0.75$ 的单峰型降雨;当重现期高于20a时, $r=0.25$ 的单峰型降雨产生的淹没范围低于 $r=0.75$ 的单峰型降雨。

### 3.4 三维淹没深度分析

为分析不同降雨情景下相同位置的淹没深度差异,本文选取100个淹没单元作为样本,所对应的区域多为低洼涵洞等地势较低的易涝区域,绘制三维空间分布图(图8), $x$ 轴代表 $r=0.25$ 的单峰型降雨

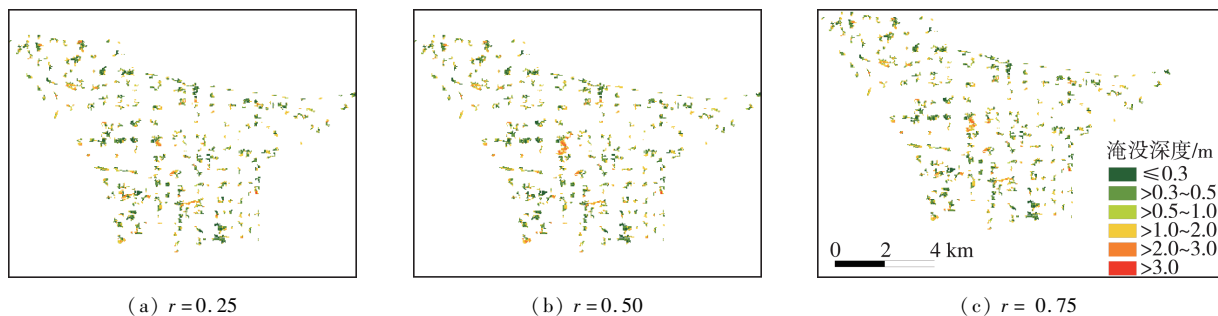


图7 50年一遇不同雨型条件下的最大淹没风险图

Fig.7 Maximum inundation risk map under different rainfall pattern conditions with a return period of 50 years

表3 不同降雨情景下内涝淹没面积峰值及增长率

Table 3 Peak and growth rate of inundation area under different rainfall scenarios

| 重现期/a | 淹没面积峰值/万 $\text{m}^2$ |          |          | 增长率/%    |          |          |
|-------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|       | $r=0.25$              | $r=0.50$ | $r=0.75$ | $r=0.25$ | $r=0.50$ | $r=0.75$ |
| 1     | 471.7                 | 488.0    | 454.0    | 0        | 0        | 0        |
| 5     | 535.3                 | 538.4    | 525.5    | 13.48    | 10.33    | 15.75    |
| 10    | 553.9                 | 564.9    | 541.8    | 3.47     | 4.92     | 3.10     |
| 20    | 573.4                 | 578.1    | 561.7    | 3.52     | 2.34     | 3.67     |
| 50    | 597.3                 | 601.9    | 599.1    | 4.17     | 4.12     | 6.66     |
| 100   | 602.0                 | 604.9    | 603.0    | 0.79     | 0.50     | 0.65     |

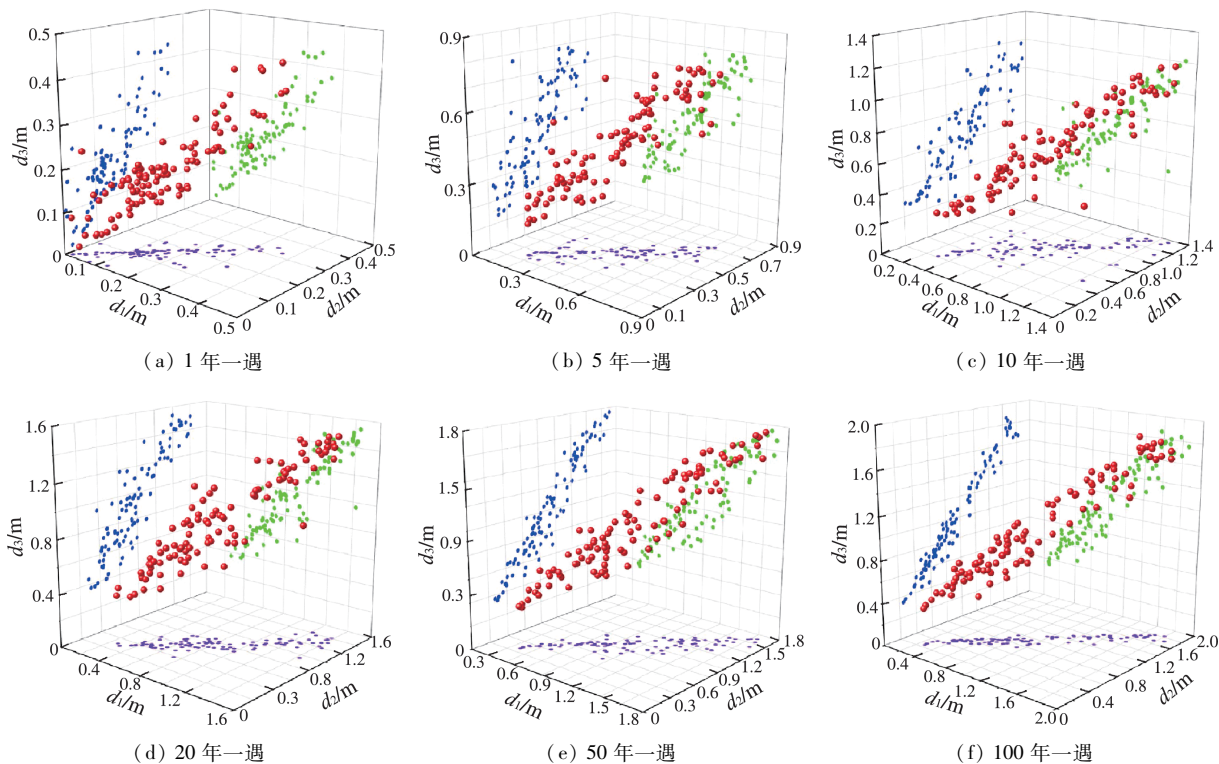


图8 不同重现期下3种雨型的淹没深度空间分布

Fig.8 Spatial distribution of inundation depth of three types of rain with different return periods

的淹没深度  $d_1$ ,  $y$  轴代表  $r=0.75$  的单峰型降雨的淹没深度  $d_2$ ,  $z$  轴代表  $r=0.50$  的双峰型降雨的淹没深度  $d_3$ , 3 个投影面分别为每两种雨型的淹没深度散点图。

由图8可见,重现期为1a的降雨产生的淹没深度在0~0.5m之间,且分布位置在中下部较为密集;5年一遇的降雨产生的淹没深度相对较为分散,处于0.1~0.8m之间;10年一遇的降雨产生的淹没深度在0.2~1.2m之间;20年一遇的降雨产生的淹没深度在0.3~1.6m之间,空间分布相比于10年一遇的降雨明显更向  $x=y=z$  直线集中;50年一遇的降雨产生的淹没深度主要在0.4~1.8m之间;100年一遇的降雨产生的淹没深度主要在0.4~1.9m之间,空间分布更加集中。由此可见,随着降雨重现期的增加,淹没深度所处范围值增大,从空间分布可见,降水强度越大,3种雨型降雨所产生的淹没深度差异越小,其空间分布越向  $x=y=z$  直线集中。

不同重现期下,3个投影面所代表的淹没深度散点图存在一定的相似性和不同。对于  $XOZ$  投影面,散点分布随着重现期的增大而越向  $x=z$  集中,但点主要分布在  $x=z$  直线的上方,说明相同的降水强度下,相同位置上  $r=0.25$  的单峰型降雨产生的淹没深度多数低于双峰型降雨产生的淹没深度。对于  $YOZ$  投影面,散点主要分布在  $y=z$  直线的上方,

说明相同的降水强度下,相同位置上双峰型降雨产生的淹没深度多数高于  $r=0.75$  的单峰型降雨产生的淹没深度。当重现期为50a和100a时,出现多个点重叠的现象,点分布更加密集,可见降水强度过大时,不同雨型导致的最大淹没深度的差异的确较小。而对于  $XOY$  投影面,当重现期低于20a时,点大多分布在  $x=y$  直线的下方,说明重现期较低时,相同位置上  $r=0.25$  的单峰型降雨产生的淹没深度多数高于  $r=0.75$  的单峰型降雨产生的淹没深度;当重现期高于20a时,点大多分布在  $x=y$  直线的上方,说明重现期较高时,相同位置上  $r=0.25$  的单峰型降雨产生的淹没深度多数小于  $r=0.75$  的单峰型降雨产生的淹没深度,由于重现期较大,点的集中程度更高,两者差异较小,更接近于  $x=y$  直线。结合淹没总量峰值可知,两者的规律是相似的,说明淹没越深,淹没总量越大,两者成正比关系。

## 4 结 论

a. 金水区南部暴雨以单峰型降雨居多,双峰型降雨次之。

b. 3种雨型的设计降雨中,双峰型降雨所产生的淹没量峰值最大,导致的内涝风险最高;针对单峰型降雨,当降雨重现期低于20a时,降雨的雨峰越靠前,产生的淹没情况越严重,当降雨重现期高于20a时,雨峰越靠后,产生的淹没情况越严重。随着重现

期的增加,不同类型降雨所导致的淹没量峰值间的差异在不断减小。

c. 通过对内涝过程进行场景推演,可知3种雨型的设计降雨所产生的淹没面积峰值均随着重现期的增大而增长,增长趋势逐渐变缓。在相同重现期下,不同雨型的设计降雨导致的淹没面积峰值存在差异,其中,双峰型降雨产生的淹没面积最大,两种单峰型降雨间的淹没面积差异规律与其淹没量峰值的变化规律相同。

d. 选取的100个淹没单元中,双峰型降雨产生的淹没深度绝大部分高于单峰型降雨产生的淹没深度,2种单峰型降雨的淹没深度分布根据重现期的不同存在一定的差异,其分布规律和淹没总量峰值的变化规律相同。

## 参考文献:

[1] SOOMRO Shan-e-hyder, HU Caihong, BOOTA Muhammad Waseem, et al. Assessment of the climatic variability of the Kunhar River Basin, Pakistan[J]. Water, 2021, 13 (13): 1740.

[2] SOOMRO Shan-e-hyder, HU Caihong, JIAN Shengqi, et al. Precipitation changes and their relationships with vegetation responses during 1982-2015 in Kunhar River basin, Pakistan[J]. Water Supply, 2021, 1(29): 2166.

[3] HU C, LIU C, YAO Y, et al. Evaluation of the impact of rainfall inputs on urban rainfall models: a systematic review[J]. Water, 2020, 12(9): 2484.

[4] 徐宗学, 叶陈雷. 从“城市看海”到“城市看江”: 极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 12-20. (XU Zongxue, YE Chenlei. From “city looking at the sea” to “city looking at the river”: simulation and risk analysis of flood and waterlogging process in Fuzhou under extreme rainstorm scenario[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 12-20. (in Chinese))

[5] 李智, 刘玉菲, 任星芮男, 等. 基于SWMM的城市洪涝风险管理研究[J]. 水力水电技术, 2019, 50(11): 35-42. (LI Zhi, LIU Yufei, REN Xingruinan, et al. Research on urban flood risk management based on SWMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(11): 35-42. (in Chinese))

[6] 李家科, 李亚, 沈冰, 等. 基于SWMM模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 60-67. (LI Jiake, LI Ya, SHEN Bing, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4): 60-67. (in Chinese))

[7] 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(4): 15-22. (LIU Ying, YANG Ming, XU Jiyun. Analysis and research on urban

rainstorm patterns in Hangzhou[J]. Bulletin of Science and Technology, 2021(4): 15-22. (in Chinese))

- [8] 汪婷, 包云轩, 陈黎, 等. 昆山市暴雨短历时设计雨型的推求[J]. 气象科学, 2021, 41(2): 259-269. (WANG Ting, BAO Yunxuan, CHEN Can, et al. The design of the short-duration rain pattern of the rainstorm in Kunshan City[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2021, 41(2): 259-269. (in Chinese))
- [9] 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. (TANG Ming, XU Wenbin, YAO Junhui, et al. Research on design rainstorm pattern based on numerical simulation of urban waterlogging[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5): 97-105. (in Chinese))
- [10] 赵琳娜, 王彬雁, 白雪梅, 等. 北京城市暴雨分型及短历时降雨重现期研究[C] // 中国气象学会 2016 年会议论文集. 西安: 第 33 届中国气象学会年会, 2016.
- [11] 曹经福, 杨艳娟, 郭军, 等. 天津市短时暴雨雨型时空分异及其对城市内涝的影响[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(4): 114-121. (CAO Jingfu, YANG Yanjuan, GUO Jun, et al. Temporal and spatial differentiation of short-term rainstorm patterns in Tianjin and its impact on urban waterlogging [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37(4): 114-121. (in Chinese))
- [12] 雷向东, 赖成光, 王兆礼, 等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. The impact of LID reconstruction on urban waterlogging and non-point source pollution[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 131-139. (in Chinese))
- [13] 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. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of the impact of design rainstorm patterns on urban waterlogging[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 820-828. (in Chinese))
- [14] 王岷. 基于双雨峰的海城市排水防涝模拟研究[C] // 全国排水委员会 2015 年年会论文集. 杭州: 中国土木工程学会水工业分会排水委员会, 2015.
- [15] 任梅芳, 徐宗学, 初祁, 等. 济南市历下区立交桥区域暴雨内涝积水模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 9-15. (REN Meifang, XU Zongxue, CHU Qi, et al. Simulation of rainstorm and waterlogging in the overpass area of Lixia District, Jinan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 9-15. (in Chinese))
- [16] 刘兴坡, 王天宇, 张倩, 等. EPA SWMM 和 Mike Urban 等流时线模型比较研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(24): 30-35. (LIU Xingpo, WANG Tianyu, ZHANG Qian, et al. Comparative study on isostream time line models of EPA SWMM and Mike Urban[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(24): 30-35. (in Chinese))

(下转第 87 页)

- CHEN Xinguo. Discussion on inflow of Three Gorges Reservoir forecasted by clustering model [J]. Yangtze River, 2011, 42(6): 57-60. (in Chinese))
- [15] SAJI N H, GOSWAMI B N, VINAYACHANDRAN P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. Nature, 1999, 401: 360-363.
- [16] CHEN C J, GEORGAKAKOS A P. Hydro-climatic forecasting using sea surface temperatures: methodology and application for the southeast US [J]. Climate Dynamics, 2014, 42: 2955-2982.
- [17] 吴旭树, 郭生练, 巴欢欢, 等. 基于海温多极指标的长期降水预报方法[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1276-1283. (WU Xushu, GUO Shenglian, BA Huanhuan, et al. Long-range precipitation forecasting based on multi-pole sea surface temperature [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(10): 1276-1283. (in Chinese))
- [18] 罗连升, 徐敏, 梁树猷. 厄尔尼诺/拉尼娜与淮河流域汛期降水年际关系的稳定性分析[J]. 气象, 2018, 44(8): 1073-1081. (LUO Liansheng, XU Min, LIANG Shuxian. Stability analysis of the interannual relationship between El Nino/La Nina and the summer rainfall over Huaihe River Basin [J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(8): 1073-1081. (in Chinese))
- [19] GERRITYJ R, JOSEPH P. A note on Gandin and Murphy's equitable skill score [J]. Notes and Correspondence, 1992, 120: 2709-2712.
- [20] GANDIN L S, MURPHY A H. Equitable skill scores for categorical forecasts [J]. Monthly Weather Review, 1992, 120: 361-370.
- [21] YUAN Yuan, YANG Hui, ZHOU Wen, et al. Influences of the Indian Ocean dipole on the Asian summer monsoon in the following year [J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(14): 1849-1859.
- [22] 周波涛. 冬季澳大利亚东侧海温与长江流域夏季降水的联系及可能物理机制[J]. 科学通报, 2011, 56(16): 1301-1307. (ZHOU Botao. Association between winter SST over eastern Australia and summer precipitation over the Yangtze River Basin and its possible physical mechanism [J]. Chinese Science Bulletin, 56(16): 1301-1307. (in Chinese))
- [23] WEI Jia, WANG Weiguang, SHAO Quanxi, et al. Influence of mature El Niño-Southern Oscillation phase on seasonal precipitation and streamflow in the Yangtze River Basin, China [J]. International Journal of Climatology, 2020, 40: 3885-3905.
- [24] KUMAR Arun, CHEN Mingyue. Understanding skill of seasonal mean precipitation prediction over California during boreal winter and role of predictability limits [J]. Journal of Climate, 2020, 33(14): 6141-6163.
- [25] POVAK N A, HESSBURG P F, MCDONNELL T C, et al. Machine learning and linear regression models to predict catchment-level base cation weathering rates across the southern Appalachian Mountain region, USA [J]. Water Resources Research, 2014, 50(4): 2798-2814.

(收稿日期: 2021-09-03 编辑: 王芳)

(上接第 21 页)

- [17] 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))
- [18] 卢丽, 潘学标, 张立祯, 等. MIKE FLOOD 模型在北京清河流域洪涝模拟中的有效性验证[J]. 水利水电技术, 2021, 5(8): 148-151. (LU Li, PAN Xuebiao, ZHANG Lizhen, et al. Validation of MIKE FLOOD model in flood simulation of Qinghe River Basin in Beijing[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 5(8): 148-151. (in Chinese))
- [19] 张译心, 郝敏, 方晴, 等. 基于 Mike Flood 耦合模型的新建城区防洪排涝模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2021, 23(7): 15-18. (ZHANG Yixin, HAO Min, FANG Qing, et al. Simulation of flood control and drainage in newly-built urban areas based on Mike Flood coupling model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021, 23(7): 15-18. (in Chinese))
- [20] 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. Research on waterlogging in typical urban areas based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 81-88. (in Chinese))
- [21] 孔宇, 孙巍, 李小龙, 等. 河道海绵建设中 SWMM-MIKE 11 耦合模型的构建及应用思路[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 74-79. (KONG Yu, SUN Wei, LI Xiaolong, et al. Application of SWMM-MIKE 11 coupling model in sponge channel construction[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 74-79. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-09-15 编辑: 俞云利)