

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0082

陈光照,侯精明,张阳维,等.西咸新区降雨空间非一致性对内涝过程影响模拟研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):37-45. CHEN G Z, HOU J M, ZHANG Y W, et al. Effects of rainfall spatial inconsistency on flood inundation processes in the Xixian New Area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 37-45. (in Chinese)

西咸新区降雨空间非一致性对内涝过程影响模拟研究

陈光照,侯精明,张阳维,康佩颖,同玉,魏炳乾

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048)

摘要:为分析降雨空间分布非一致性对城市内涝的影响,应用耦合了水文和水动力过程的数值模型,以陕西省西咸新区海绵城市部分核心试点区为研究区域,对不同重现期设计暴雨及离差系数 C_v 条件下的内涝过程进行模拟,并对内涝积水总量峰值、重度内涝积水总量峰值及其与均匀降雨情况下的内涝积水削减进行对比分析。结果表明:相比于空间均匀降雨,各重现期下空间分布不均匀的内涝积水量均会减少。各重现期下, C_v 值越大,即降雨越不均匀,相比于均匀情况内涝积水削减量越大。当 C_v 值为 0.07、0.11、0.15 及 0.2 时,积水总量削减率分别为 1.94%~2.05%、3.00%~3.17%、4.08%~4.23%、4.86%~5.15%。重度内涝情况下,同一 C_v 值,相比于均匀情况内涝积水削减量随设计降雨重现期变长而增多,当 $C_v = 0.07$ 、 $C_v = 0.11$ 、 $C_v = 0.15$ 、 $C_v = 0.20$ 时,削减率的范围分别为 2.00%~2.51%、2.60%~3.82%、3.66%~4.98%、3.80%~5.83%。研究结果揭示了降雨空间分布非一致性对内涝的影响规律,为城市内涝防治工作提供了理论依据。

关键词:降雨空间分布;城市内涝;离差系数;Thiessen 多边形法;数值模拟;积水量

中图分类号:P333.2 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of rainfall spatial inconsistency on flood inundation processes in the Xixian New Area

CHEN Guangzhao, HOU Jingming, ZHANG Yangwei, KANG Peiyong, TONG Yu, WEI Bingqian

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The effects of rainfall spatial inconsistency on urban flood inundation was investigated in this study with a numerical model under the conditions of designed rainstorm and uneven coefficient C_v from different return periods for the Xixian New Area, Shaanxi Province, China. Total volumes of peak waterlogging, volumes of severe peak waterlogging and their reduction rates under uniform rainfall were compared and analyzed. It is found that the waterlogging volumes under uneven spatial distribution decreases in each return periods in comparison with the spatial uniform rainfall. The waterlogging reduction magnitudes under uneven rainfall increases as the C_v value increases for every return period. For example, when the C_v values are 0.07, 0.11, 0.15 and 0.2, the reduction rates are 2.05%~1.94%, 3.00%~3.02%, 4.23%~4.08%, 4.86%~5.10%, respectively. In the case of severe waterlogging, in comparison with spatial uniform rainfall with same C_v values, the longer the return period, the higher the reduction amount of waterlogging increases. For example, when the C_v value are 0.07, 0.11, 0.15 and 0.2, the reduction rates are 2.00% to 2.51%, 2.60% to 3.82%, 3.66% to 4.98%, and 3.80% to 5.83%, respectively. The simulation demonstrates the effects of rain-

收稿日期:2018-12-20 修回日期:2019-03-20 网络出版时间:2019-04-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190409.0946.002.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(19672016);陕西省国际科技合作交流计划项目(2017KW-014);陕西省水利科技项目(2017slki-14; 2017JQ3043);西咸新区沣西新城海绵城市基础研究资金资助(2018610002000097)

作者简介:陈光照(1996—),男,福建屏南人,主要从事城市水文学方面研究。E-mail:2180420076@stu.xaut.edu.cn

通信作者:同玉(1984—),女,陕西咸阳人,讲师,博士,主要从事水生态修复、水分-土壤-植物相互关系研究。E-mail:tongyu@xaut.edu.cn

fall spatial inconsistency on urban flood inundation and provides a theoretical basis for urban flood management.

Key words: spatial distribution of rainfall; urban flood inundation; non-uniform coefficient; Thiessen polygon method; numerical simulation; accumulated water volume

长期以来,洪涝灾害是城市最主要又频发的自然灾害之一^[1-2],鉴于城区面积较小,城市雨洪管理基本不考虑降雨空间分布特性,而是在江河流域方面开展研究^[3-5]。但随着城市化进程不断加快,降雨逐渐呈现出了城市雨岛分布特征^[6-7]。中国城市建设统计年鉴指出,我国城市建成区面积逐年递增^[8],大面积的人工设施对生态环境的干扰必将带来降雨空间分布不均匀现象,且由于热岛效应,使得城市降雨空间分布的不均匀性逐渐增大^[9]。而降雨的空间分布不均匀特性对城市径流及内涝都有影响,V. P. Singh 等^[10]指出降雨的空间分布不均匀是影响径流的主要因素之一。随着城市排水防涝工作越来越精细化,考虑降雨不均匀性对城市内涝的影响显得尤为重要。

近年来国内外学者在流域尺度进行了大量研究,如 Emmanuel 等^[11]研究降雨空间分布对流域出口水文特征的影响,发现流域出口处峰值流量对降雨空间分布变化存在明显的响应;田风霞等^[12]使用空间插值方法分析了黄土高原降雨空间分布规律,研究得出降水量沿东南向西北递减;张雪松等^[13]通过对洛河卢氏水文站以上流域进行径流及泥沙模拟,分析得出降雨空间分布变化对流域径流及泥沙模拟有重要影响;王莉萍等^[14]应用改进的中国区域降水过程综合强度评估方法统计珠江、海河、松辽等流域降雨时空变化,得出各流域降雨空间分布及持续时间特征。除此以外,相关学者在洪水预报方面也进行了相关研究,如 Audrey Douinot 等^[15]提出了一种改进的山洪指导方法(FFG),通过考虑降雨的空间分布不均匀提高了山洪预报的准确性;Changhwan Kim 等^[16]研究了降雨时空变化与精确预测洪水所需降雨空间分辨率之间的关系,发现降雨时空变化对于洪水预报是一个重要因素。关于城市区域降雨的空间分布不均匀现象及其影响的研究较少,刘成林等^[17]研究得出降雨空间分布的不均匀性会对城市排水系统造成影响;陈云浩等^[18]研究了不同热力背景对城市降雨空间分布的影响。但以上研究均未关注到城市降雨空间分布对内涝过程的影响。本文以陕西省西咸新区海绵城市部分核心试点区为研究对象,该区域与大尺度流域相比面积较小,但根据实测降雨数据,区域内 3 个气象站同一场降雨的面雨量相差达 45%,降雨空间非一致性情况较

为显著,加之城市内涝现象愈发频繁,故本文从不同的降雨空间分布出发,系统对比分析不同降雨空间分布情况下的城市雨洪过程,得出不同降雨空间分布以及不同面雨量对内涝积水影响的量化关系,揭示降雨空间分布非一致性对内涝的影响规律,旨在为城市内涝防治工作提供理论依据。

1 研究区域及基础数据

1.1 研究区域概况

陕西省西咸新区沣西新城海绵城市部分核心试点区总面积 13.29 km²,区域内有 3 个气象站,分别位于西部云谷、总部经济园和康定和园。该区域位于陕西省西安市与咸阳市之间,沣河以西,渭河以南,处于半湿润大陆性季风气候区,雨水多集中于 7—9 月,内涝灾害频发^[19]。研究区域内存在四种土地利用类型,下垫面情况复杂,且气象站实测资料表明当地降雨存在明显的空间分布不均匀情况,故利用该地区研究其对城市内涝的影响规律具有一定的实际意义。研究区域区位、气象站区位详见图 1、2。



图 1 研究区域区位示意

Fig. 1 Location of study area



图2 气象站区位示意

Fig. 2 Location of meteorological stations

1.2 基础数据

1.2.1 地形及下垫面条件

研究区地势呈西高东低,坡度约为 1/1 000,地形整体起伏不大。为保证模拟的准确性,本研究在沣西新城管委会的支持下,采用无人机航测技术对研究区的地形进行航测,获得正射影像图及分辨率为 3 m×3 m 的高精度 DEM 数据。区域数字高程信息见图 3。

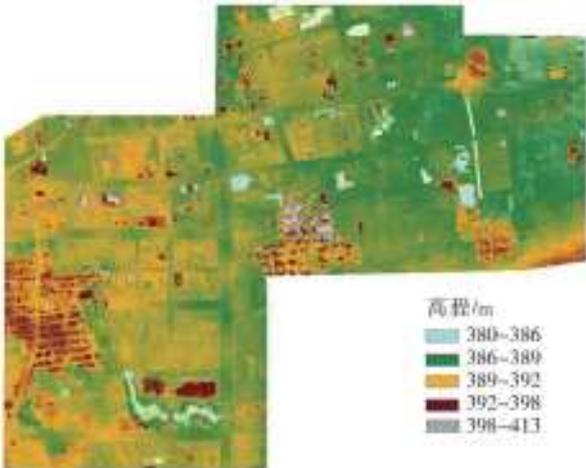


图3 研究区域数字高程地形

Fig. 3 DEM in the study area

基于正射影像图划分研究区下垫面为道路、林地、建筑、裸土共 4 种土地利用类型,见图 4。将管网排水能力按照等效下渗方法处理,即按照实际管网排水设计标准,将管网最大排水能力等效为下渗率叠加于土地利用下渗率上,等效下渗的水量认为是管网的外排水量^[20]。研究区域排水管网设计标准为 1 a 一遇,根据暴雨公式算得应对于峰值强度为 10.47 mm/h 的降雨,故管网的等效下渗值为 10.47 mm/h。即降雨强度小于峰值的部分,管网

可将其全部排走;其余部分由土地利用下渗进行消纳,超过土地利用下渗能力的,便形成地表径流。各土地利用类型曼宁系数根据相关文献确定^[21]。根据侯精明等^[21]在其文章中的描述,上述曼宁参数在西咸新区海绵城市研究区实测暴雨内涝模拟结果中内涝点位与实测积水点位相对应,验证了参数的合理性。不同土地利用类型下渗率通过在相应的土地利用区域分别进行双环下渗实验获得,同一种土地利用采用一种下渗率,不考虑土地利用类型在不同区域的差异,曼宁系数及下渗率具体取值详见表 1。

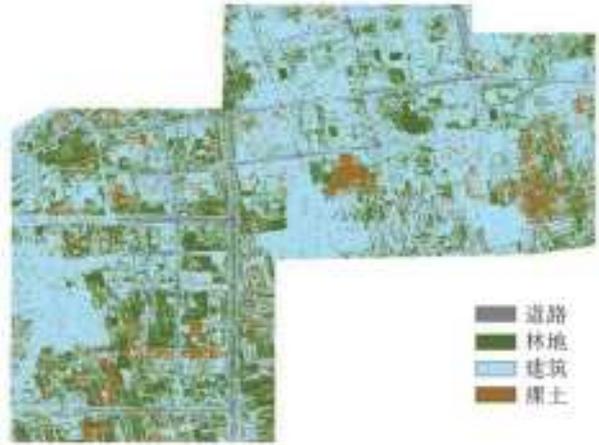


图4 土地利用类型

Fig. 4 Land use map

表 1 土地利用类型及参数

Tab. 1 Land use types and parameters

土地利用类型	面积占比/%	下渗率/(mm·h ⁻¹)	曼宁系数
道路	4.97	10.47	0.014
林地	23.83	55.54	0.200
建筑	63.70	10.47	0.015
裸土	7.59	149.26	0.030

1.2.2 降雨空间区域划分

本文采用降雨空间区域划分定量描述降雨空间分布不均匀现象,将研究区划分为 3 个更小的子区域,认为同一子区域内降雨量相同。根据气象站的经纬度坐标及研究区域总面积,采用 Thiessen 多边形法划分各气象站控制区域。Thiessen 多边形法在降雨空间分布方面应用广泛,通过该方法计算所得的面雨量较为准确^[22-23]。基于 DEM 数据,借助 ArcGIS 平台,构建 Thiessen 多边形,其工作原理是将研究区内的气象站两两相连,并做各条连接线的垂直平分线,以其为边界将研究区域划分为 3 个多边形,每个多边形对应一个气象站,代表该气象站的降雨控制区域。区域划分结果见图 5,各控制区域参数见表 2。

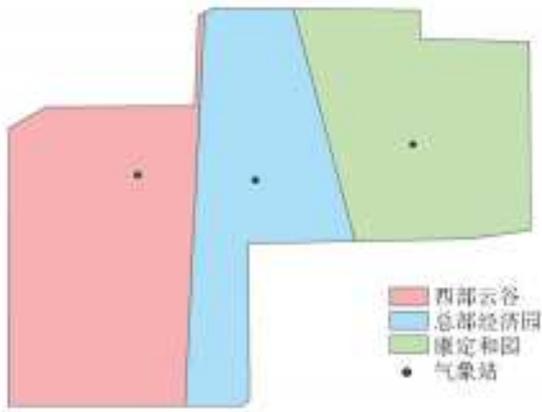


图 5 降雨空间分区

Fig. 5 Rainfall spatial distribution

表 2 气象站位置及编号

Tab. 2 Location and number of meteorological stations

气象站	西部云谷气象站	总部经济园气象站	康定和园气象站
编号	1号	2号	3号
经纬度坐标	34°17'36"N, 108°41'55"E	34°17'36"N, 108°42'30"E	34°17'47"N, 108°43'36"E
控制面积/km ²	4.19	5.37	3.73

1.2.3 降雨数据

本文采用咸阳气象站 30 a 以上实测降雨数据推求的沔西新城设计暴雨公式^[24], 选用重现期分别为 2 a、5 a、10 a、30 a 和 50 a, 降雨历时 120 min 的设计暴雨。暴雨强度公式为

$$i = \frac{1239.91 \times (1 + 1.971 \times \lg P)}{167 \times (t + 7.4246)^{0.8124}} \quad (1)$$

式中: i 为设计暴雨强度 (mm/min); P 为重现期 (a); t 为降雨历时 (min)。

不同重现期设计降雨过程见图 6, 雨峰位置系数为 0.3, 均为前峰降雨, 降雨历时 120 min, 雨峰出现在 40 min 处, 80% 的降雨量集中在 30~70 min 时段内。

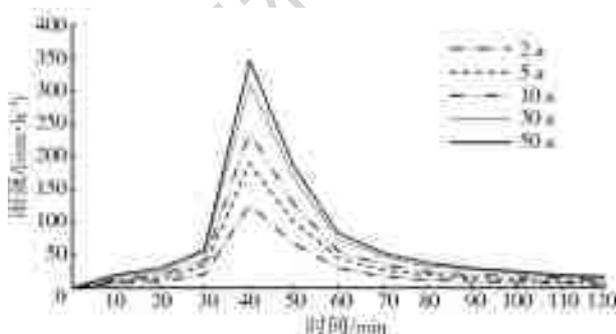


图 6 不同重现期设计降雨过程

Fig. 6 Different design hyetographs

段文军等^[25]研究表明, 采用面雨量离差系数 C_v 来评价降雨空间的不均匀性是合理的。故在文中采用 C_v 值评价降雨空间分布不均匀程度, C_v 越接近 1, 表示离散程度越大, 即降雨空间分布越不均

匀; C_v 越接近 0, 则离散程度越小, 即降雨空间分布越均匀; 当 C_v 等于 0 时, 降雨空间视为等面雨量均匀分布。其计算公式为

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

$$K_i = H_i / H_a \quad (3)$$

式中: H_i 为研究区某一雨量站的降雨量 (mm); H_a 为研究区域均匀雨量 (mm); n 为雨量站个数。

刘成林等^[17]研究表明, 降雨空间存在多种不均匀分布情况。根据研究区气象站实测降雨数据统计结果, 3 个气象站的降雨量大小排序为 2 号区域降雨量 > 3 号区域降雨量 > 1 号区域降雨量, 故文中降雨不均匀情况按此情形设计, 以 3 号区域气象站为基准站点, 1 号区域和 2 号区域的设计降雨量按照表 3 的比例得到。由于 3 个气象站历史实测降雨量最大差异为 45%, 故均按不大于此最大差异值设置 4 组 C_v 值, 每组 C_v 值所对应的区域总面雨量相等, 以此 C_v 表征降雨空间分布不均匀性逐渐增大, 并设置 1 组 $C_v = 0$ 时的均匀降雨情况作为对照。采用沔西短历时降雨时程分配过程线对面雨量进行分配, 得到相应的降雨过程线。分配比例如表 3 所示, 以 2 a 一遇降雨为例, 3 个子区域的降雨过程线见图 7。

表 3 降雨量分配

Tab. 3 Distribution of rainfall

分组编号	雨量分配比例/%			C_v 值
	西部云谷	总部经济园	康定和园	
1	95	108	100	0.07
2	90	112	100	0.11
3	85	116	100	0.15
4	80	120	100	0.20

2 模型及其验证

2.1 模型简介

文中采用耦合水文和水动力过程的数值模型 GAST (GPU accelerated surface water flow and associated transport) 对研究区域的降雨过程进行模拟。模型运用 Godunov 类型的有限体积法求解二维浅水方程, 可严格保持物质守恒并稳健地解决不连续问题。且利用 GPU (graphics processing unit) 并行计算技术对计算过程进行加速^[26], 能实现大规模高效计算。该模型有较高的精度和计算效率, 适用于尺度大、过程复杂的城市雨洪过程模拟, 且在文献^[26]中通过对一小流域模拟结果与实测数据的良好对比分析获得验证。

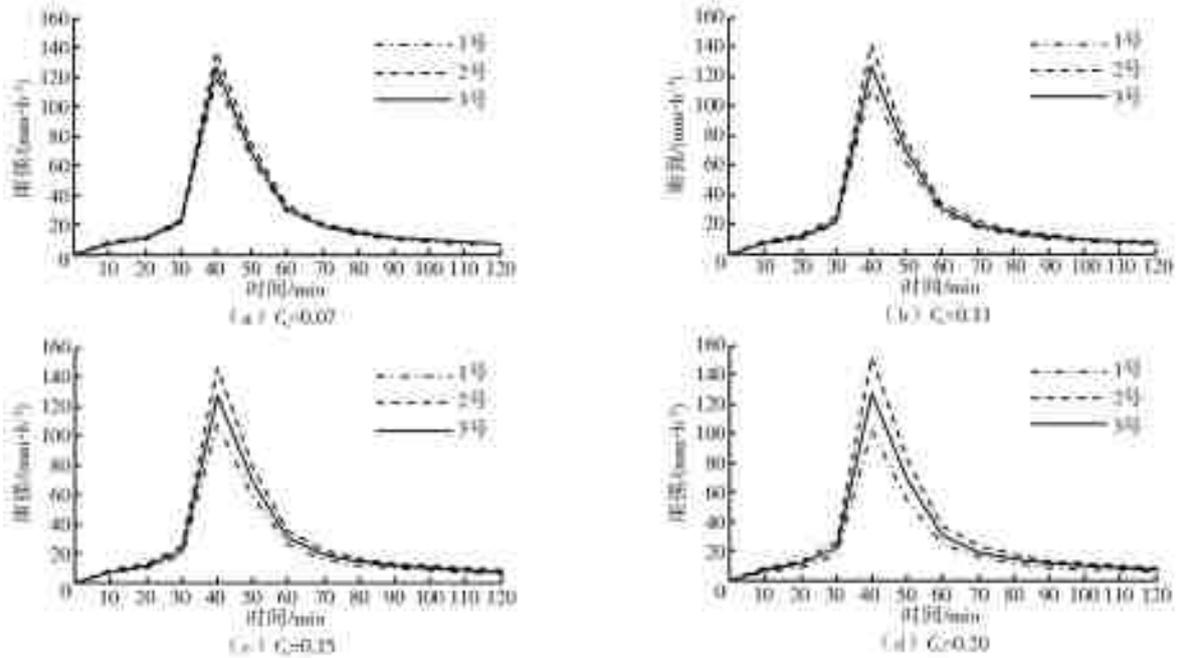


图 7 不同 C_v 下 2 a 一遇降雨过程线

Fig. 7 Design hyetographs of the storm with different C_v values in the return period of 2 years

2.2 模型验证

为验证模型模拟准确性,本文设计了 4 个面积为 100 m^2 的计算区域,见图 8。A、B、C、D 区域降雨量分别为 12、16、20、24 mm;模拟中采用闭边界,初始地表无积水,无下渗,区域曼宁值均采用 0.1,库朗数(CFL)为 0.5。降雨历时 3 600 s,模拟历时 7 200 s,按公式(4)计算积水量得到各区域积水变化过程并与解析解对比,模拟积水量与解析解误差范围在 0.06%~1.30%,对比结果见图 9。本文利用同一模型对研究区域 2016 年 8 月 25 日实测降雨进行模拟,得到积水水深和积水面积,

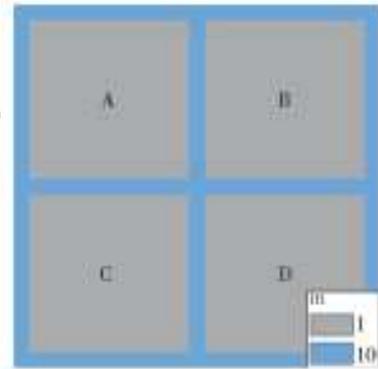


图 8 模型验证地形

Fig. 8 Topography of model verification

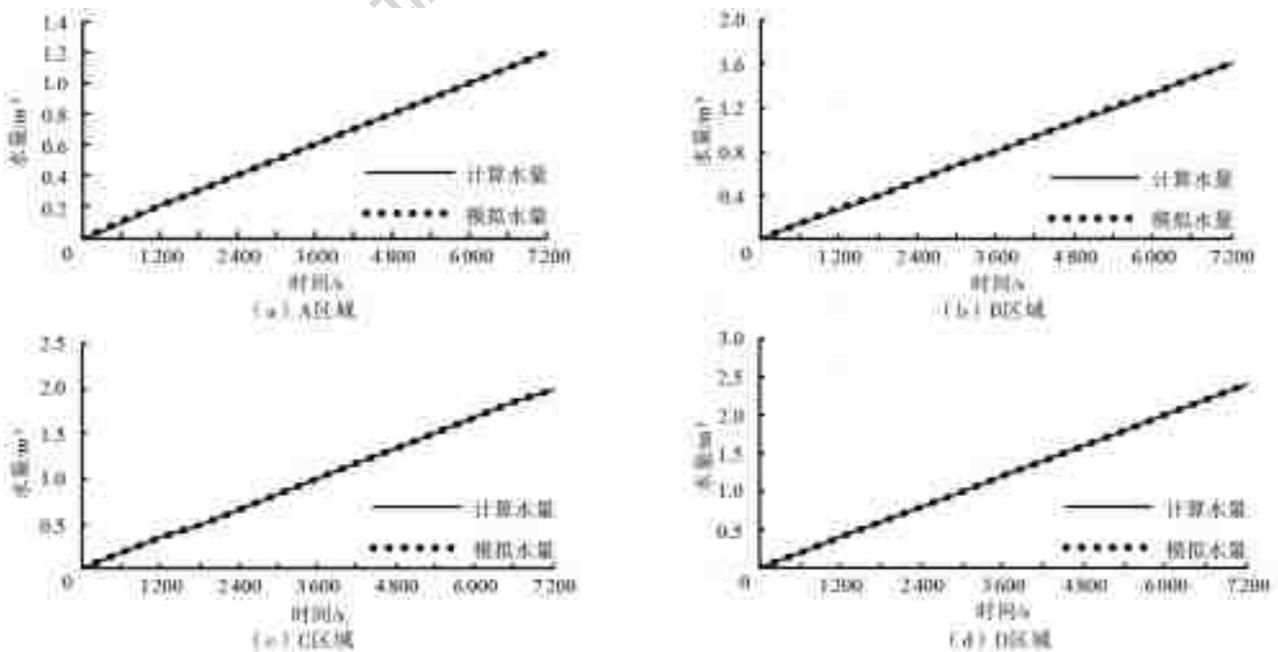


图 9 积水量增长过程模拟与解析解对比

Fig. 9 Comparisons of simulated and analytical water volumes

并与实测数据进行对比^[20]。对比结果见表 4,各点积水程度模拟值与实测数据相近,表明模拟的城市内涝积水过程与实际监测过程相符。可见模型各参数设计合理,模拟精度较高,可合理运用于降雨空间分布非一致性对城市内涝影响数值模拟研究。

$$Q = \sum_{i=1}^n (h_i \times A_i) \quad (4)$$

式中: Q 为积水量(m^3); i 为网格单元编号; n 为网格单元总数; h_i 为网格水深(m); A_i 为网格面积(m^2)。

表 4 模拟积水程度与实测情况对比

Tab. 4 Comparisons of simulated and measured inundations

内涝位置	内涝点面积/ m^2		内涝点水深/ cm	
	模拟	实测	模拟	实测
白马河北段	1 621.51	>1 600	55	>50
统一路东段	464.21	>480	35	>30
统一路西段	1 566.12	>1 600	40	>40
永平路西入口	916.94	>1 000	50	>25
康定路东段	770.11	>800	33	>30

3 结果分析

3.1 内涝积水总量分析

本文采用积水削减率量化评价降雨空间不均匀程度对内涝积水的影响,计算公式为

$$f = (Q_2 - Q_1) / Q_2 \times 100\% \quad (5)$$

式中: f 为积水削减率(%); Q_1 为降雨空间不均匀情况下积水总量峰值(m^3); Q_2 为降水空间均匀情况下积水总量峰值(m^3)。

总积水量可表征研究区内涝积水情况。为忽略因地面洼地造成的积水,本研究考虑水深大于 3 cm 积水,将其累加得到研究区域积水总量。将不同 C_v 值下的积水总量峰值进行比较,各重现期的统计数据见图 10,不同 C_v 值下的削减率统计结果见图 11。

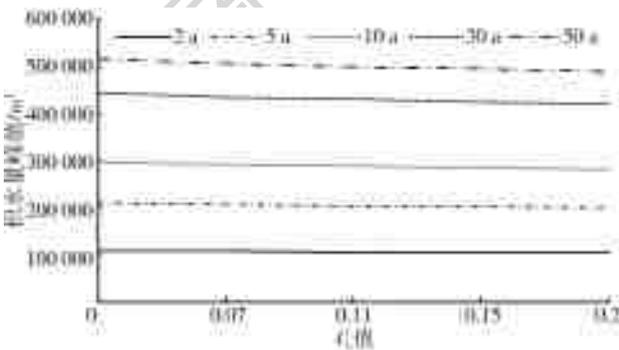


图 10 内涝积水总量峰值
Fig. 10 Peak volumes of inundation

从图 10 可以看出,在同一重现期下,随着 C_v 值增加,积水总量峰值减少,即降雨空间非一致性越显著,积水总量越小。通过对研究区域地形及降雨

空间分布情况进行分析,发现 1 号区域属于洼地较多且降雨较小的区域,而 2 号区域地形平坦降雨较大,由此导致在降雨发生时,1 号区域虽然易产生洼地积水,但降雨空间非一致情况下较小的降雨量使得蓄水总量不会太大;2 号区域产生的径流由于地形平坦不易蓄存,降雨空间非一致情况下该地降雨虽多,但无法存蓄水量,加之平坦区域地形整体较低,外排水量无法进入低洼地区。故造成降雨空间非一致下积水总量小于等面雨量均匀降雨的积水总量。随着 C_v 值的增加,积水总量减少越大。随着降雨重现期增长, C_v 值越大积水总量峰值减少越明显,且随着 C_v 值的增大,各重现期积水削减率逐渐增大。以降雨空间分布最不均匀($C_v = 0.2$)情况为例,当重现期为 50 a、30 a、2 a 时,积水总量相比于等面雨量均匀降雨情况下分别减少了 26 300 m^3 、22 770 m^3 、5 610 m^3 。这是因为重现期越长降雨量越大,相同条件下的积水总量越大,故在相同不均匀情况下,随着降雨重现期变长,产生的积水变化量就越大。

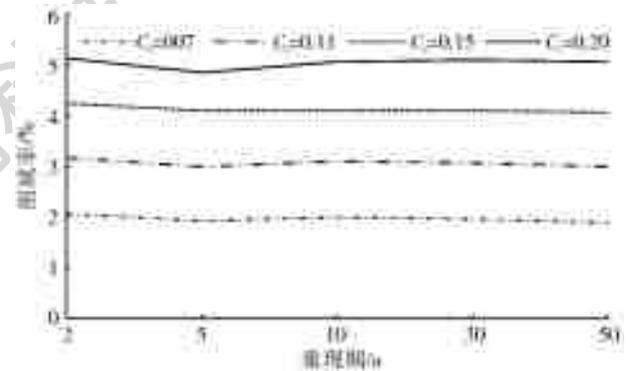


图 11 积水总量峰值削减率
Fig. 11 Peak volume decrements of inundation

从图 11 可以看出,相同 C_v 情况下,随重现期变长削减率变化不大。当 $C_v = 0.07, 0.11, 0.15$ 及 0.20 时,削减率分别为 1.94%~2.05%, 3.00%~3.17%, 4.08%~4.23%, 4.86%~5.15%。 C_v 越大,代表降雨空间分布越不均匀,对积水总量峰值产生的影响越剧烈,说明降雨空间分布对城市内涝的影响不容忽视。

3.2 重度内涝积水总量分析

据戴晶晶等^[27]对内涝风险等级划分方法的研究,积水深度大于 25 cm 的区域为重度内涝区域。在将积水深度小于 25 cm 的区域积水量排除后,研究区各位置积水量累加得到重度内涝积水总量。2 a 重现期形成重度内涝区域较少,故略去。将不同 C_v 值下的积水总量峰值进行计算,绘制不同重现期重度内涝积水量峰值统计结果见图 12,不同 C_v 值

下的削减率统计结果见图 13。

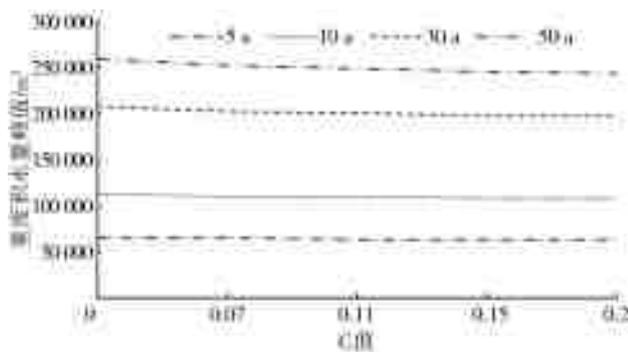


图 12 重度内涝积水总量峰值

Fig. 12 Peak volumes of serious inundation

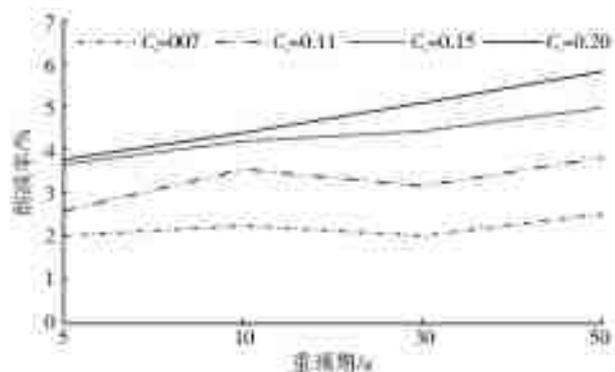


图 13 重度内涝积水总量峰值削减率

Fig. 13 Peak volume decrements of serious inundation

从图 12、13 可以看出,同一重现期下 C_v 值越大,重度内涝积水总量峰值越小,降雨重现期越长减少越明显。同一不均匀情况下,降雨重现期越长,其积水总量峰值减少量也越大。如降雨空间分布最不均匀($C_v=0.2$)时,重现期为 50、30、2 a,积水总量峰值相比于等面雨量均匀降雨情况分别减少了 15 080、10 530、2 480 m^3 ;当 $C_v=0.15$ 时,分别减少了 12 890、9 180、2 390 m^3 。而削减率随 C_v 值的增大而增大,且随着重现期越长,削减率有上升趋势。当 $C_v=0.11$ 、 $C_v=0.15$ 、 $C_v=0.20$ 时,削减率范围分别为 2.60%~3.82%、3.66%~4.98%、3.80%~5.83%。说明相比于积水总量峰值削减率,重度内涝积水量削减率变化范围更大,削减率最小值更小。当不均匀性较小时($C_v=0.07$),重度内涝积水量削减率变化范围更大,但削减率最小值变化不显著。由于大部分积水较浅,属于非重度内涝范围,故去除较浅的积水后,重度内涝积水总量的变化较大。

4 结论

本文考虑了降雨空间分布非一致情况下的城市暴雨内涝过程,以陕西省西咸新区海绵城市部分核

心试点区为研究对象。模拟了降雨重现期为 2 a、5 a、10 a、30 a 及 50 a 的 4 种不均匀情况($C_v=0.07$ 、 $C_v=0.11$ 、 $C_v=0.15$ 、 $C_v=0.20$)下的内涝积水情况,并将其与等面雨量情况下均匀降雨产生的内涝积水进行对比,结果如下。

(1)相比于空间均匀降雨即有代表性的以点代面,降雨空间非一致情况下即精细化考虑城市降雨,各重现期下计算得出的内涝积水总量均会减少。

(2)各重现期下, C_v 值越大,即降雨越不均匀,相比于均匀情况内涝积水总量削减量也越大。在 C_v 值为 0.07、0.11、0.15、0.2 时,各重现期积水总量峰值削减率分别为 1.94%~2.05%、3.00%~3.17%、4.08%~4.23%、4.86%~5.15%。

(3)相同 C_v 情况下,随重现期变长,积水总量峰值削减率变化不大。当 $C_v=0.2$ 时,2 a、5 a、10 a、30 a 及 50 a 的积水量削减率分别为 5.15%、4.86%、5.08%、5.13%、5.10%,随着 C_v 减小,该值对应减小。

(4)重度内涝情况下,同一 C_v 值,设计降雨重现期越长,相比于均匀情况内涝积水削减量越多。相比于积水总量峰值削减率,重度内涝积水总量峰值削减率变化范围更大。当 $C_v=0.07$ 、 $C_v=0.11$ 、 $C_v=0.15$ 、 $C_v=0.20$ 时,各重现期的削减率范围分别为 2.00%~2.51%、2.60%~3.82%、3.66%~4.98%、3.80%~5.83%。

对于在城市中发生的降雨,其降雨空间分布情况对于城市防洪排涝有着一定的影响,在进行排涝相关的规划、设计、管理工作时应加以考虑。考虑到内涝情况受降雨及地形影响较大,不同区域降雨及地形情况各异,本文所介绍的研究成果为西咸新区海绵城市部分核心试点区的防洪排涝提供了一定指导,其研究方法可应用至其他区域,以当地实际降雨数据及地形条件进行具体分析得出适应当地的规律,后续研究将会进行深入探讨。

参考文献(References):

- [1] 吴泽宁,申言霞,王慧亮.基于能值理论的洪涝灾害脆弱性评估[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):9-14.(WU Z N,SHEN Y X,WANG H L.Assessment of vulnerability to flood disasters based on emergy theory [J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2018,16(6):9-14.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0146.
- [2] 胡俊锋,杨月巧.基于气象水文要素的洪涝灾害损失评估[J].南水北调与水利科技,2014,12(1):26-31.(HU J F,YANG Y Q.Flood and waterlogging disaster loss

- assessment based on meteorological and hydrological elements[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(1): 26-31. (in Chinese) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2014. 01026.
- [3] 王远见, 傅旭东, 王光谦. 黄河流域降雨时空分布特征[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(11): 972-978. (WANG Y J, FU X D, WANG G Q. Precipitation variations in the Yellow River basin of China[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2018, 58(11): 972-978. (in Chinese) DOI: 10. 16511/j. cnki. qhdxxb. 2018. 26. 043.
- [4] 吴凯, 王晓琳, 许怡, 等. 中国大陆降水时空格局演变新事实[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(3): 30-36. (WU K, WANG X L, XU Y, et al. New facts about evolution of spatial and temporal pattern of precipitation over Chinese mainland[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(03): 30-36. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 03. 006.
- [5] 王刚, 严登华, 张冬冬, 等. 海河流域 1961—2010 年极端气温与降水变化趋势分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(1): 1-6. (WANG G, YAN D H, ZHANG D D, et al. Trend analysis of variations in extreme precipitation and temperature in the Hai River basin from 1961 to 2010[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(1): 1-6. (in Chinese) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2014. 01001.
- [6] 梁萍, 丁一汇, 何金海, 等. 上海地区城市化速度与降水空间分布变化的关系研究[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(4): 475-483. (LIANG P, DING Y H, HE J H, et al. Study of relationship between urbanization speed and change of spatial distribution of rainfall over shanghai[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(4): 475-483. (in Chinese) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1004-4965. 2011. 04. 005.
- [7] 刘钰, 谭军利, 李壬成, 等. 银川市气候变化趋势及其与城市发展的关系[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(5): 837-841. (LIU Y, TAN J L, LI W C, et al. Relationship between climate change and urban development in Yinchuan City [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(5): 837-841. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2015. 05. 005.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴. 2012[M]. 中国计划出版社, 2013. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Statistical Yearbook of Urban and Rural Construction in China. 2012*[M]. China Planning Press, 2013. (in Chinese))
- [9] 朱焱, 杨金彪, 朱莲芳, 等. 苏州城市化进程与城市气候变化关系研究[J]. *气象科学*, 2012, 32(03): 317-324. (ZHU Y, YANG J B, ZHU L F, et al. The investigation of the relationship between urbanization process and climate change in Suzhou[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2012, 32(03): 317-324. (in Chinese) DOI: 10. 3969/2012jms. 0010.
- [10] SINGH V P. Effect of the duration and direction of storm movement on planar flow with full and partial areal coverage[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(7): 1479-1511. DOI: 10. 1002/hyp. 358.
- [11] EMMANUEL I, HERVÉ ANDRIEU, LEBLOIS E, et al. Influence of rainfall spatial variability on rainfall-runoff modelling: Benefit of a simulation approach? [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 337-348. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2015. 04. 058.
- [12] 田风霞, 赵传燕, 冯兆东. 黄土高原地区降水的空间分布[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(5): 1-5. (TIAN F X, ZHAO C Y, FENG Z D, Spatial distribution of precipitation in the Loess Plateau region [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2009, 45(5): 1-5. (in Chinese) DOI: 10. 13885/ j. issn. 0455-2059. 2009. 05. 008.
- [13] 张雪松, 郝芳华, 张建永. 降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙模拟影响研究[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(1): 9-12. (ZHANG X S, HAO F H, ZHANG J Y. Study on effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on runoff and sediment modeling[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(1): 9-12. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-3409. 2004. 01. 003.
- [14] 王莉萍, 王维国, 张建忠. 我国主要流域降水过程时空分布特征分析[J]. *自然灾害学报*, 2018(2): 161-173. (WANG L P, WANG W G, ZHANG J Z. Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of precipitation processes over main river basin in China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018(2): 161-173. (in Chinese) DOI: 10. 13577/j. jnd. 2018. 0219.
- [15] AUDREY D, HÉLÈNE R, PIERRE-ANDRÉ G, et al. Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood forecasting[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2015. 08. 024.
- [16] KIM C, KIM D H. Effect of rainfall spatial distribution and duration on rainfall spatial resolution for surface runoff prediction accuracy [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2018, 20. DOI: 10. 1016/j. jher. 2018. 04. 001.
- [17] 刘成林, 周玉文, 隋军, 等. 城市排水防涝系统降雨空间分布特性研究[J]. *给水排水*, 2016, 42(1): 46-49.

- (LIU C L, ZHOU Y W, SUI J, et al. Study on Spatial distribution characteristics of rainfall in urban drainage and flood control system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(1): 46-49. (in Chinese)) DOI: 10. 13789/ j. cnki. wwe1964. 2016. 0009.
- [18] 陈云浩, 史培军, 李晓兵. 不同热力背景对城市降雨(暴雨)的影响(I)——降雨分布的空间差异[J]. 自然灾害学报, 2001(2): 37-42. (CHEN Y H, SHI P J, LI X B. Effect of different thermal background on urban rainfall (rainstorm) (I); Spatial difference of rainfall distribution[J]. Journal of Natural Disasters, 2001(2): 37-42. (in Chinese)) DOI: 10. 13577/ j. jnd. 2001. 0207.
- [19] 胡晖, 张建丰, 张瑞晞. 探讨低影响开发技术在沣西新城的应用[J]. 环境保护科学, 2015(6): 90-93. (HU H, ZHANG J F, ZHANG R X. Discussion of application of low impact development technology in Fengxi New Town [J]. Environmental Protection Science, 2015(6): 90-93. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1004-6216. 2015. 06. 020.
- [20] 侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 40-49. (HOU J M, WANG R, LI G D, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 40-49. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/ slfdxb. 20180305.
- [21] 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 J M, GUO K H, WANG Z L, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 820-828. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/ j. cnki. 32. 1309. 2017. 06. 003.
- [22] 张涛, 王祥, 杨欣玥, 等. 面雨量计算方法对水文模拟的影响[J]. 人民长江, 2017, 48(19): 42-47. (ZHANG T, WANG X, YANG X Y, et al. Influence of area rainfall calculating method on hydrological simulation [J]. Yangtze River, 2017, 48(19): 42-47. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/ j. cnki. 1001-4179. 2017. 19. 008.
- [23] 钱程, 武雄, 穆文平, 等. GIS 技术在水文地质领域的应用进展[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 115-122. (QIAN C, WU X, MU W P, et al. Application advances of GIS in hydrogeology field[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 115-122. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/ j. cnki. nsbdqk. 2016. 03. 021.
- [24] 侯精明, 郭凯华, 刘菲菲. 西咸新区沣西新城设计暴雨雨型分析及暴雨强度公式推求成果报告[R]. 西咸新区: 沣西新城管委会, 2017. (HOU J M, GUO K H, LIU F F. The report of analysis of designed rainstorm patterns and formula of rainstorm intensity in Fengxi New City of Xixian New Area[R]. Xixian New Area: Fengxi New City Management Committee, 2017 (in Chinese))
- [25] 段文军, 王金叶, 张立杰, 等. 1960~2010 年漓江流域降水变化特征研究[J]. 水文, 2014, 34(5): 88-93. (DUAN W J, WANG J Y, ZHANG L J, et al. Characteristics of Precipitation in Lijiang River basin during 1960~2010 [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(5): 88-93 (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1000-0852. 2014. 05. 016.
- [26] HOU J, ZHEN L. A model for overland flow and associated processes within the hydroinformatics modeling system[J]. Journal of Hydroinformatics, 2014, 16(2): 375-391. DOI: 10. 2166/ hydro. 2013. 173.
- [27] 戴晶晶, 刘增贤, 陆沈钧. 基于数值模拟的城市内涝风险评估研究——以苏州市城市中心区为例[J]. 中国水利, 2015(13): 20-23. (DAI J J, LIU Z X, LU S J. Risk-assessment of city waterlogging based on numerical simulation: Case study on urban center of Suzhou[J]. China Water Resources, 2015(13): 20-23. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1672-2469. 2015. 06. 013.