

设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟

侯精明¹, 郭凯华¹, 王志力², 荆海晓¹, 李东来¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 为分析设计暴雨雨型对城市内涝的影响, 应用耦合了水文和水动力过程的数值模型, 以陕西省西咸新区为研究区域, 对不同重现期及峰值比例设计暴雨条件下的内涝过程进行模拟, 并对内涝积水总量、不同积水深度内涝面积等量值进行对比分析。结果表明: 设计暴雨重现期短于 20 年时, 峰值比例较小的设计暴雨内涝积水总量较大, 而重现期长于 20 年时, 规律相反; 除 2 年一遇设计暴雨外, 峰值比例较大的设计暴雨致涝总面积较大, 但其中影响严重的 IV 级致涝面积较小; 设计暴雨峰值比例越小, 重现期越长, 积水总量峰值时刻相对于暴雨峰值时刻的迟滞时间越长。揭示了暴雨雨型与内涝积水程度的量化规律, 对更合理地开展城市雨洪管理工作具有指导意义。

关键词: 城市内涝; 设计暴雨雨型; 数值模拟; 雨峰; 重现期

中图分类号: P333.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)

目前全球气候剧变, 极端暴雨发生概率激增, 与此同时, 中国暴雨集中^[1-2]且城镇化快速发展, 而大多数城市防洪排涝标准较低^[3], 导致内涝灾害频繁, 如 2012 年北京“7·21”特大暴雨内涝事件, 2016 年西安“7·24”暴雨内涝等, 城市内涝问题已经成为城市健康、可持续发展的巨大挑战。

暴雨作为产生内涝的根本原因, 对内涝的影响因素除雨量、雨强外, 还有一重要因子: 雨型。雨型作为描述暴雨过程的概念, 表现了暴雨强度在时间尺度上的分配过程, 直接关系到内涝积水的最大范围和最大深度, 因此, 研究分析设计暴雨雨型对城市内涝的影响意义重大。但近年来国内外学者在对内涝进行研究分析时, 多选用地区典型雨型, 如王崑^[4]针对双峰雨型城市排水防涝问题, 对各重现期下短历时双峰雨型设计暴雨进行了内涝模拟, 李家科等^[5]研究雨水花园对暴雨径流的削减效果时选用了研究区域西安市典型芝加哥雨型; 或选用多种雨型以避免文中暴雨的特殊性, 如 Forestieri 等^[6]运用水文模型对西西里盆地研究区域不同设计暴雨雨型致洪过程进行了模拟分析, 以得出适用于各种雨型的致灾临界雨量预警机制, Pedrozo-Acuña 等^[7]对墨西哥塔巴斯科州各重现期下不同雨型的历史实测暴雨所导致的洪涝进行了研究分析, 得出识别各雨型下易爆发洪涝点位的方案以及应对措施, 唐双成等^[8]对 4 年间所有实测降雨条件下雨水花园出入流情况进行了监测, 以分析其径流削减效果。但以上研究都未关注不同暴雨雨型下内涝灾害的区别, 因此, 本文从不同雨型对内涝积水影响角度进行数值模拟, 系统地对比分析了陕西省西咸新区不同设计暴雨雨型条件下的城市雨洪过程, 得出不同雨型与内涝灾害的量化关系, 旨在揭示暴雨雨型对内涝积水程度的量化规律, 为城市内涝预警、预报及其他防治工作提供理论依据。

收稿日期: 2017-05-15; **网络出版日期:**

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20171115.1206.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19672016; 41330858)

作者简介: 侯精明 (1982-), 男, 河北省怀安人, 教授, 博士, 主要从事地表水动力及其附随过程数值模型研究。

E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

1 研究区与数据

1.1 研究区域概况

本文选择陕西省西咸新区核心地块为研究区域，面积约为3.68km²。其位于陕西省西安市与咸阳市之间，年均降雨量为520mm，多集中于7—9月份^[9]，研究区域内下垫面情况复杂，且易发生内涝灾害，用此地块研究暴雨雨型对城市内涝的影响规律具有一定的代表性，研究区域区位示意图如图1所示。

1.2 数据

1.2.1 降雨数据

毕旭等^[10]指出西安城区短历时暴雨较为集中，以单峰型居多，综合峰值比例 $r=0.4$ ，因此选用芝加哥雨型作为设计降雨，并选用3种峰值比例 $r=0.2$ 、 $r=0.5$ 、 $r=0.8$ 表征雨型。根据水文手册相关资料，西安市暴雨强度计算式为

$$q = \frac{2210.87 \times (1 + 2.915 \times \lg p)}{(t + 21.933)^{0.974}} \quad (1)$$

式中： q 为暴雨强度，L/(s·hm²)； P 为重现期，a； t 为暴雨历时，min；以峰值比例 r （峰现时间与暴雨时间比值）表征雨型，计算得到6个重现期（2年、10年、20年、50年、100年和500年）下，峰值比例 r 分别为0.2、0.5、0.8，暴雨历时为120min的18场设计暴雨，各场设计暴雨过程如图2所示。

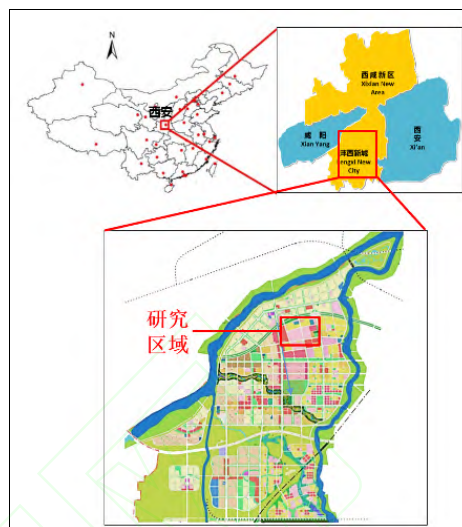


图1 研究区域区位示意

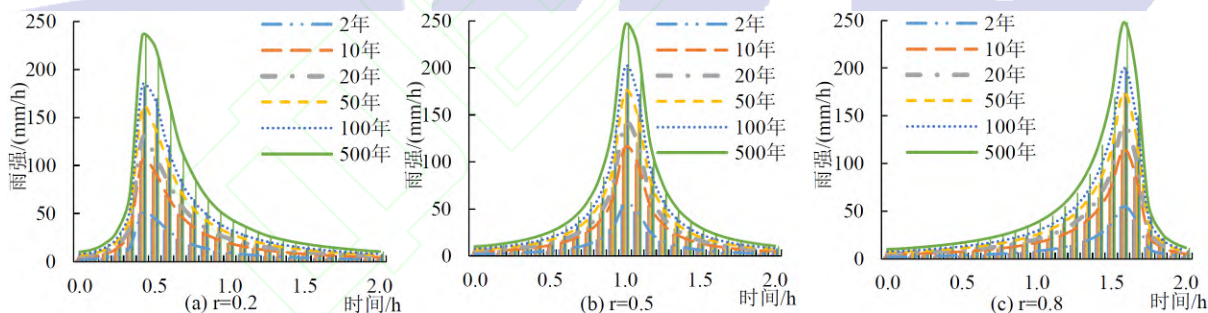


图2 不同重现期设计暴雨过程

Fig.2 Different design hyetograph

1.2.2 地形数据及参数

为保证模拟精确性，选用精度为2m的研究区域数字高程地形数据如图3所示。基于正射影像图划分研究区域内林地、草地、裸土地、交通运输及居住用地5种土地利用类型如图4所示。各土地利用类型曼宁系数及下渗率根据文献[11-13]确定。研究区域排水管网设计标准为1年一遇，根据西安市暴雨公式算得可应对峰值强度为10.74mm/h的降雨，降雨强度小于10.74mm/h部分，管网可将其全部排走，将其视为下渗；降雨强度大于10.74mm/h部分，形成地表径流。各土地利用类型所取参数如表1所示。确定参数文献研究区域与本文研究区域位置相近，气候、土壤等各方面情况相似，且上述参数在研究区域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。

表1 土地利用类型及参数

Table 1 Land use types and parameters

土地利用类型	面积/km ²	占比/%	曼宁系数	下渗率/(mm.h ⁻¹)
居民用地	0.590	16.000	0.015	10.470
交通运输	1.180	32.000	0.014	10.470
裸土地	0.670	18.000	0.030	19.430
草地	0.610	17.000	0.060	28.390
林地	0.630	17.000	0.200	37.550

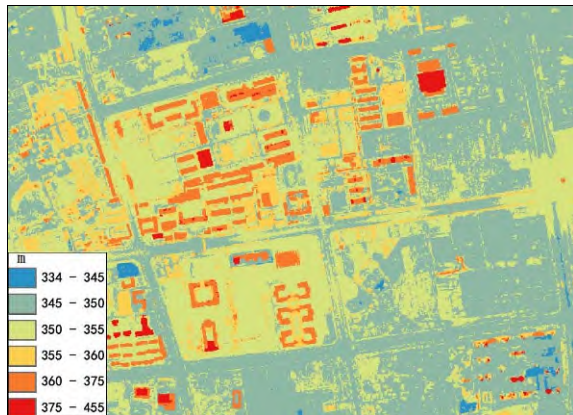


图3 研究区地形数据 (单位: m)

Fig.3 DEM Data in the study area

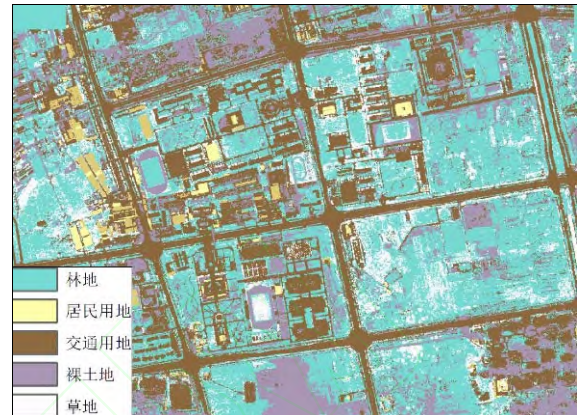


图4 土地利用类型

Fig. 4 Land use map

2 城市内涝积水模拟方法

本文应用笔者开发的耦合了水文和水动力过程的数值模型对研究区域的雨洪过程进行模拟。本模型运用Godunov类型的有限体积法,并应用二阶MUSCL (Monotonic Upwind Scheme for Conservation Laws)方法二阶算法^[14],可严格保持物质守恒并稳健地解决不连续问题。水和动量通量通过HLLC近似黎曼求解器 (Harten, Lax and van Leer approximate Riemann solver with the contact wave restored) 计算。底坡源项采用笔者提出的底坡通量法处理,以适用任何复杂网格,摩阻力计算使用稳定性较好的半隐式法,时间推进采用二步龙格-库塔方法来进行^[15]。且利用GPU (Graphics Processing Unit) 并行计算技术对计算过程进行加速^[16],可以在单机上实现大规模计算。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[16]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。

模型模拟城市雨洪过程中采用开放边界,初始地表无积水,并假设土壤饱和,下渗速率不随时间发生变化,库朗数 (CFL) 设定为0.5,模拟至5h,得到各设计暴雨条件下研究区域内涝积水变化过程。

3 研究区域暴雨雨型对城市内涝积水影响分析

运用上述模型数值模拟,得到研究区域各设计暴雨条件下内涝积水变化过程。图5展示了100年一遇各峰值比例暴雨条件下降雨1h积水分布模拟结果,可见设计暴雨雨型对城市内涝影响较大。

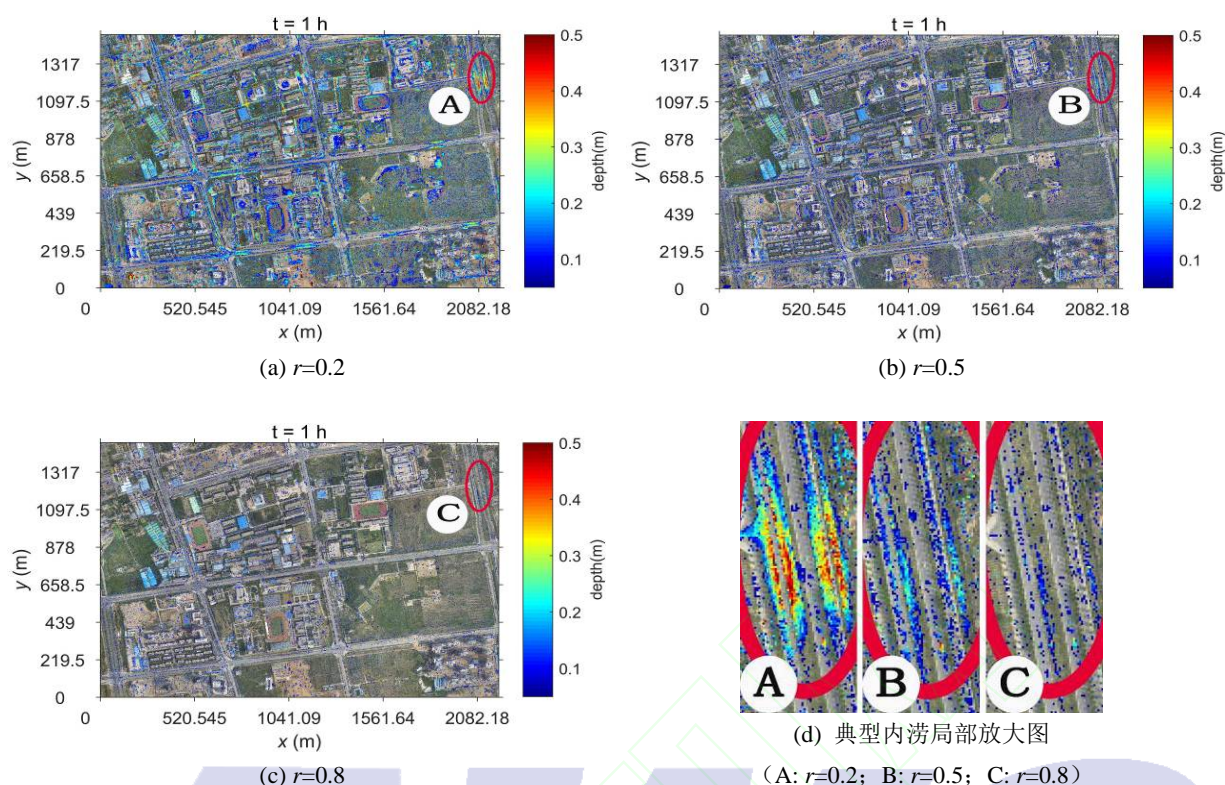
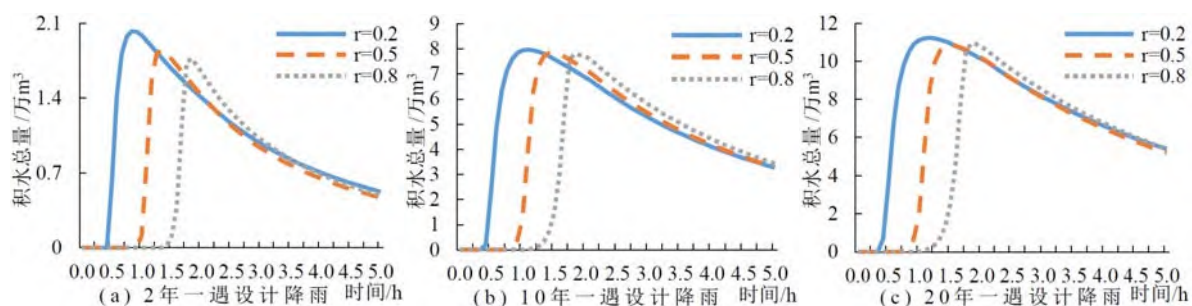


图5 100年一遇不同峰值比例暴雨内涝积水分布图对比 ($t=1\text{h}$)
Fig.5 Flood inundation map for the storm with the return period of 100 years

3.1 内涝积水总量分析

积水总量可表征研究区域的内涝积水情况。对研究区域内各积水点积水量（忽略深度小于3cm的积水）叠加得到区域积水总量，其随时间变化过程见图6。不同重现期各设计暴雨条件下积水总量峰值对比见表2。当重现期短于20年时，峰值比例 $r=0.2$ 时的设计暴雨积水情况最为严重，如设计暴雨重现期为2年时，峰值比例 $r=0.5$ 的积水总量峰值为 18501m^3 ，比峰值比例 $r=0.2$ 时削减了 1740m^3 ，占比达9.4%；峰值比例 $r=0.8$ 的积水总量峰值为 17723m^3 ，比峰值比例 $r=0.2$ 时削减了 2518m^3 ，占比达14.2%。当设计暴雨重现期长于20年时，峰值比例 $r=0.8$ 时积水情况最为严重，虽然差值占比较小，但差值水量较大，如500年一遇设计暴雨，峰值比例 $r=0.8$ 时设计暴雨积水总量比峰值比例 $r=0.2$ 时积水总量峰值增大了 6080m^3 。当暴雨重现期短于20年时，峰现时间较早的暴雨所产生的内涝积水情况最为严重，且重现期越短差别越明显；当暴雨重现期长于20年时，峰现时间较晚的暴雨所产生的内涝积水情况最为严重，且重现期越长差别越明显。建议在应对城市内涝灾害时，对于重现期较短的暴雨，应着重注意峰现时间较早的暴雨，而对于重现期较长的暴雨条件，暴雨峰值出现越晚，所产生的内涝积水程度越严重，应提前做好应对措施。



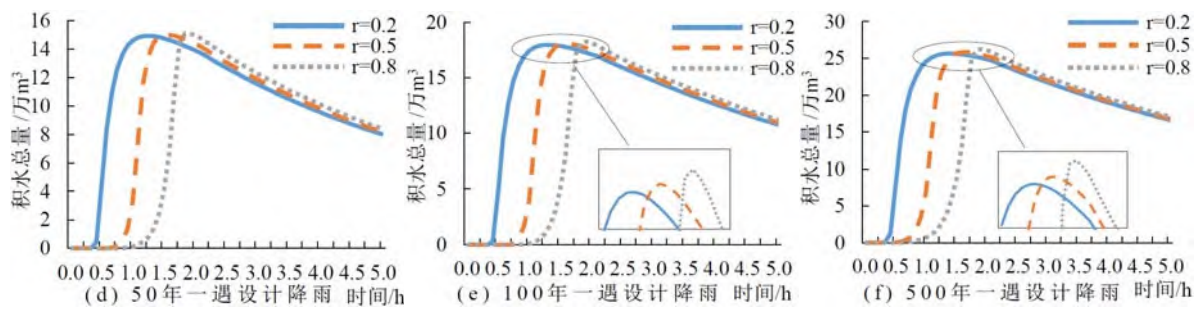


图6 不同频率设计暴雨下内涝积水总量变化过程

Fig.6 Amount of inundation for the storms with different return periods

表2 积水总量峰值比较

Table 2 Comparison of inundation peak values

积水总量峰值比较		$V_{(r=0.5)} - V_{(r=0.2)}$						$V_{(r=0.8)} - V_{(r=0.2)}$					
重现期/a		2	10	20	50	100	500	2	10	20	50	100	500
积水总量差值/m ³		-1740	-1288	-3844	540	1050	1912	-2518	-1568	-3000	1728	2840	6080

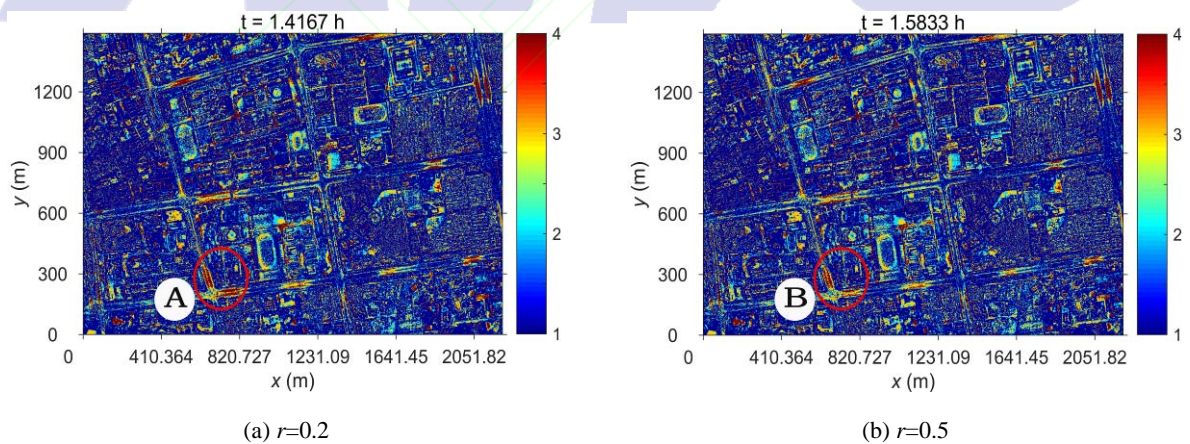
3.2 内涝时间空间分析

3.2.1 内涝空间分析

在借鉴戴晶晶^[17]等对内涝风险等级划分方法的基础上,对城市内涝风险等级按积水深度划分:

- (1) I级(无内涝):城区路面积水深度在0~3cm之间;
- (2) II级(轻度内涝):城区有微量积水,积水深度在3~10cm之间;
- (3) III级(中度内涝):城区有积水,积水深度在10~25cm之间;
- (4) IV级(重度内涝):道路积水严重,积水深度大于25cm。

图7展示了100年一遇各峰值比例设计暴雨条件下暴雨积水总量峰值时刻内涝风险图对比,图例中1、2、3、4分别表示I级、II级、III级、IV级内涝,可见设计暴雨雨型对不同级别内涝影响也较大。



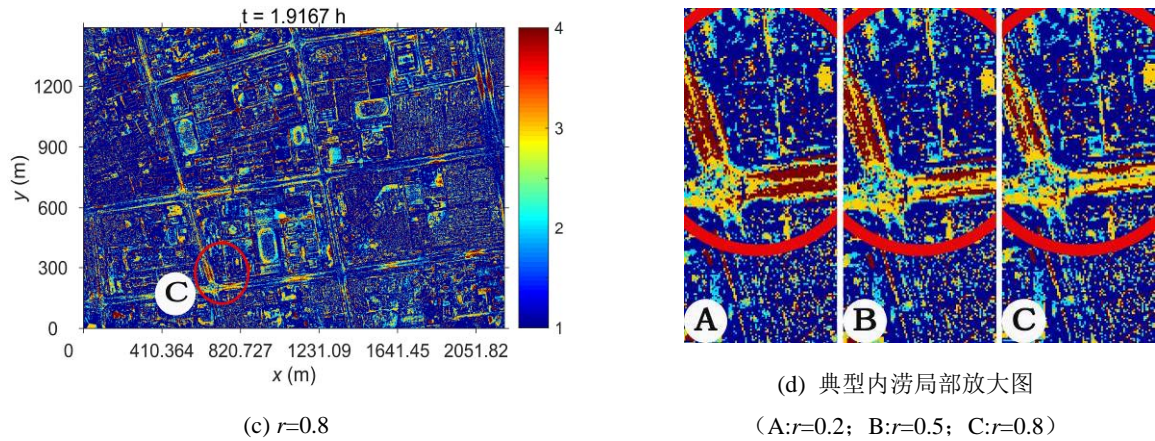


图 7 100 年一遇不同峰值比例暴雨条件下内涝风险图对比

Fig.7 Flood hazard map for the storm with the return period of 100 years

Ⅲ级、Ⅳ级内涝积水深度较大，对于城市居民生产生活影响较为严重，着重对Ⅲ级、Ⅳ级内涝面积进行对比分析。同一重现期不同峰值比例设计暴雨下Ⅲ级、Ⅳ级内涝面积峰值比较如图 8 及表 3 所示。对于Ⅲ级内涝，设计暴雨重现期短于 20 年时，峰值比例 $r=0.2$ 的Ⅲ级内涝面积最大，重现期为 2 年时，峰值比例 $r=0.8$ 时Ⅲ级内涝面积比峰值比例 $r=0.2$ 时削减了 9484m^2 ，差值占比达 20%；重现期长于 20 年时，峰值比例 $r=0.8$ 的Ⅲ级内涝面积较大，且重现期越长差距越为明显，重现期为 500 年一遇时，峰值比例 $r=0.8$ 时Ⅲ级内涝面积比峰值比例 $r=0.2$ 时增加了 49416m^2 ，占比约 6%。对于Ⅳ级内涝，皆为峰值比例 $r=0.2$ 时内涝面积最大。综上可得对于Ⅲ级、Ⅳ级内涝面积，设计暴雨重现期短于 20 年时，峰值比例较小的设计暴雨所产生的Ⅲ级、Ⅳ级内涝面积较大；重现期长于 20 年时，峰值比例较小的设计暴雨所产生的Ⅲ级内涝面积较小，Ⅳ级内涝面积较大。

对于模拟区域不同设计暴雨下（除Ⅰ级内涝外）各级内涝积水面积之和：不同峰值比例设计暴雨，除重现期为 2 年时，均为峰值比例 $r=0.8$ 时内涝总面积较大。可见设计暴雨雨型对Ⅳ级内涝、内涝总面积的影响规律相反，即随着暴雨重现期的增长，峰值比例较大的设计暴雨所产生的内涝总面积较大，致灾严重的Ⅳ级内涝面积较小。应对Ⅳ级内涝，应着重注意峰现时间较早暴雨。

表 3 各级内涝面积峰值比较

Table 3 Comparison of inundation area at the time of inundation peak values

重现期/a	Ⅲ级内涝面积差值/ m^2		Ⅳ级内涝面积差值/ m^2		内涝总面积差值/ m^2	
	$S_{(r=0.5)} - S_{(r=0.2)}$	$S_{(r=0.8)} - S_{(r=0.2)}$	$S_{(r=0.5)} - S_{(r=0.2)}$	$S_{(r=0.8)} - S_{(r=0.2)}$	$S_{(r=0.5)} - S_{(r=0.2)}$	$S_{(r=0.8)} - S_{(r=0.2)}$
2	-7588	-9484	-536	-664	-19908	-29316
10	-6072	-5180	-2332	-3068	-3388	15512
20	-14456	-11548	-7992	-8892	3692	20700
50	4312	14716	-1464	-3860	9640	52508
100	4940	22356	-3800	-6592	17808	41604
500	17672	1396	52052	3332	19688	64912

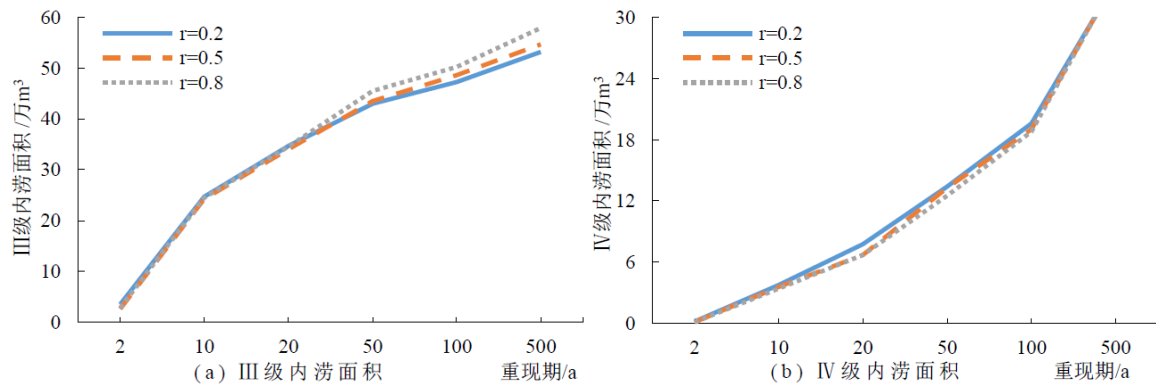


图 8 各级内涝积水面积峰值
Fig.8 Peak values of inundation area

3.2.2 内涝时间分析

城市下垫面及地表覆盖物复杂多样,雨洪需经历复杂的产流、漫流过程才能汇集形成内涝积水,因此内涝积水总量峰值时刻对于暴雨峰值时刻有一定的迟滞时间,不同峰值比例设计暴雨下内涝积水总量峰值的迟滞时间具体见表 4。由表 4 可知,设计暴雨重现期越长,峰值比例越小,积水总量峰值迟滞时间越长,500 年一遇特大暴雨峰值比例 $r=0.2$ 时,积水总量峰值迟滞时间可达 60min。

III级、IV级内涝面积峰值时刻并非积水总量峰值时刻。由表5可知,III级内涝面积峰值时刻提前于内涝积水总量峰值时刻,且设计暴雨峰值比例越小,提前时间越长。IV级内涝面积峰值时刻滞后于内涝积水总量峰值时刻,且设计暴雨峰值比例越小,滞后时间越长。可针对不同级别内涝分别进行有效预警。

3.3 雨型分析比较

为验证芝加哥设计雨型对于城市内涝预警预报工作指导性,以重现期为100年的暴雨为例,将芝加哥设计暴雨雨型降雨条件下与西安水文手册降雨径流查算图表中的100年一遇设计暴雨雨型降雨条件下的内涝积水总量及城市内涝分布图(暴雨结束时)进行对比分析如图10、图11所示。由于西安水文手册为1h、3h雨量时程分配,因此,查算暴雨历时与前文芝加哥设计雨型历时相近的3h水文手册设计雨型如图9所示。可见两种设计暴雨条件下内涝积水总量相当,积水点位对应,因此,芝加哥雨型对于城市内涝的预报预警工作有一定的指导意义。

表 4 内涝积水峰值迟滞时间

Table 4 Hysteresis of inundation		
重现期/a	峰值比例 r	迟滞时间/min
2	$r=0.2$	25
	$r=0.5$	20
	$r=0.8$	15
10	$r=0.2$	40
	$r=0.5$	30
	$r=0.8$	15
20	$r=0.2$	45
	$r=0.5$	30
	$r=0.8$	15
50	$r=0.2$	50
	$r=0.5$	35
	$r=0.8$	15
100	$r=0.2$	55

表 5 III级、IV级内涝面积峰值迟滞时间

Table 5 Hysteresis of the third and fourth degree inundation			
重现期/a	峰值比例 r	III级内涝迟滞时间/min	IV级内涝迟滞时间/min
2	$r=0.2$	5	15
	$r=0.5$	5	15
	$r=0.8$	0	5
10	$r=0.2$	0	15
	$r=0.5$	0	10
	$r=0.8$	0	10
20	$r=0.2$	0	15
	$r=0.5$	0	10
	$r=0.8$	0	10
50	$r=0.2$	-5	15
	$r=0.5$	-5	10
	$r=0.8$	0	10
100	$r=0.2$	-10	5

	$r=0.5$	35		$r=0.5$	-5	10
	$r=0.8$	20		$r=0.8$	-5	10
	$r=0.2$	60		$r=0.2$	-15	0
500	$r=0.5$	40	500	$r=0.5$	-15	5
	$r=0.8$	20		$r=0.8$	-5	5

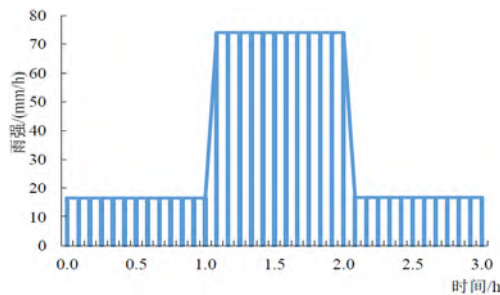


图9 100年一遇西安水文手册设计雨型

Fig.9 Design hyetograph with return period of 100 years

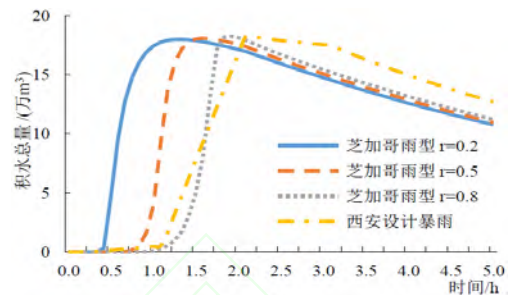
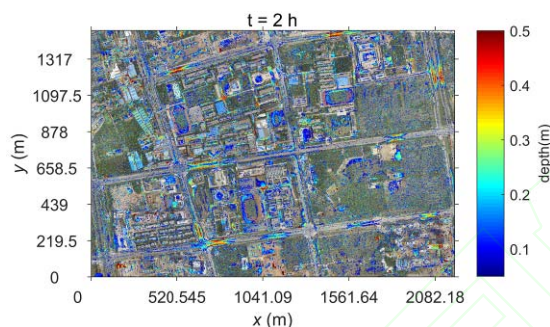
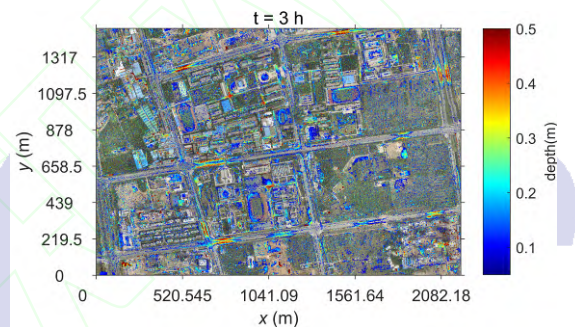


图10 100年一遇内涝积水总量对比

Fig.10 Comparison with the amount of inundation



(a) 西安水文手册设计雨型 ($t=2h$)



(b) 西安芝加哥设计雨型 ($r=0.2, t=2h$)

图11 100年一遇不同设计暴雨内涝分布图对比

Fig.11 Flood inundation map for the design hyetograph storms with the return period of 100 years

4 结 论

(1) 设计暴雨重现期短于20年时, 峰现时间越早的暴雨所产生的内涝积水总量越大, 且重现期越短差别越为明显; 设计暴雨重现期长于20年时, 峰现时间越晚的暴雨所产生的内涝积水总量越大, 且重现期越长差别越为明显。

(2) 设计暴雨峰现时间越早、重现期越长, 内涝积水总量峰值时刻相对于暴雨峰值时刻的迟滞时间越长。

(3) 设计暴雨重现期短于20年时, 峰现时间越晚的设计暴雨所致内涝总面积越大, 而III级、IV级内涝面积越小; 重现期长于20年时, 峰现时间越晚的设计暴雨所致内涝总面积及III级内涝面积越大, 而IV级内涝面积越小。

(4) 积水总量峰值时刻并非III级、IV级内涝面积峰值时刻。对于III级内涝, 设计暴雨峰现时间越早, 面积峰值时刻相对于积水总量峰值时刻提前时间越长; 对于IV级内涝, 设计暴雨峰现时间越早, 面积峰值时刻相对于积水总量峰值时刻滞后时间越长。

本研究有助于进行更为合理有效的内涝防治工作, 有一定的应用前景且对水文学理论的发展有一定意义。但不同下渗率及低影响开发措施下暴雨雨型对城市内涝的影响规律仍有待于进一步的研究。

参考文献

- [1] 严登华, 王浩, 张建云, 等. 生态海绵智慧流域建设——从状态改变到能力提升[J]. 水科学进展, 2017, 28 (2): 302-310. (YAN D H, WANG H, ZHANG J Y, et al. Construction of an ecological sponge-smart river basins from changing status to improving capability [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 302-310. (in Chinese))
- [2] 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27 (4): 485-491. (ZHANG J Y, WANG Y T, HE R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [3] 王静, 李娜, 程晓陶. 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J]. 水利学报, 2010, 41 (12): 1393-1400. (WANG J, LI N, CHENG X T. Improvement and application of numerical model for the simulation of flooding in urban area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1393-1400. (in Chinese))
- [4] 王颀. 基于双雨峰的海城市排水防涝模拟研究[A]. 全国排水委员会 2015 年年会论文集[C]/中国土木工程学会水工业分会排水委员会, 2015: 5. (WANG D. Simulation of Drainage and Waterlogging Prevention in Haicheng City based on double peak rainfall pattern[A]. The National Drainage Committee Proceedings of the 2015 Annual Meeting[C]/Water Industry Branch of China Civil Engineering Society Drainage Committee, 2015:5. (in Chinese))
- [5] 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 J K, LI Y, SHEN B, 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))
- [6] FORESTIERI A, CARACCILO D, ARNONE E, et al. Derivation of rainfall thresholds for flash flood warning in a Sicilian basin using a hydrological model [J]. Procedia Engineering, 2016, 154:818-825.
- [7] PEDROZO-ACUNA A, MORENO G, MEJIA-ESTRADA P, et al. Integrated approach to determine highway flooding and critical points of drainage [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2017, 50:182-191.
- [8] 唐双成, 罗纨, 贾忠华, 等. 雨水花园对暴雨径流的削减效果[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 787-794. (TANG S C, LUO W, JIA Z H, et al. Effect of rain gardens on storm runoff reduction [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 787-794. (in Chinese))
- [9] 胡晖, 张建丰, 张瑞晞. 探讨低影响开发技术在沔西新城的应用[J]. 环境保护科学, 2015,41(6): 90-93+128. (HU H, ZHANG J F, ZHANG R X. Discussion of Application of Low Impact Development Technology in Fengxi New Town [J]. Environmental Protection Science, 2015,41(6): 90-93+128. (in Chinese))
- [10] 毕旭, 程龙, 姚东升, 等. 西安城区暴雨雨型分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(35): 295-297+325. (BI X, CHENG L, YAO D S, et al. Analysis on urban rainstorm pattern of Xi'an [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(35): 295-297+325. (in Chinese))
- [11] 高二鹏. 不同植被边坡糙率研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014. (GAO E P. Research on Manning coefficient of different vegetated slope [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese))
- [12] 郭雨华, 赵廷宁, 孙保平, 等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4):264-267. (GUO Y H, ZHAO T Y, SUN B P, et al. Study on the Dynamic Characteristics of Overland Flow and Resistance to Overland Flow of Grass Slope [J]. Research of Soil and Water Conservation. 2006, 13(4):264-267. (in Chinese))
- [13] 李贵玉. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤入渗性能对比研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. (LI G Y. Comparative study of soil infiltration under different land uses [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese))
- [14] HOU J, LIANG Q, ZHANG H, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2-D shallow water equations [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 66:131-152.
- [15] HOU J, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2013, 257(15): 126-149.

-
- [16] HOU J, ÖZGEN I. A model for overland flow and associated processes within the Hydroinformatics Modelling System [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(2): 375-391.
- [17] 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. 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))

Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation

HOU Jingming¹, GUO Kaihua¹, WANG Zhili², JING Haixiao¹, LI Donglai¹

(1. *School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Aiming to investigate the influence of design storm pattern on urban flood inundation, this work applies a numerical model to simulate the hydrological and hydrodynamic processes and analyze urban flood inundation patterns in Xi'an New Area, Shaanxi Province, China. Design hyetographs with different position coefficients for the storm peak and return period are considered. By comparing the simulation results in terms of water depth and inundation extent, it is found that the lower position coefficients of storm peak with the return period less than 20a may cause more total inundation, but opposite conclusion may be drawn for the storms with the return period greater than 20a. Apart from the return period of 2a, the storms with a higher position coefficient of storm peak will result in more total inundation, but the more serious IV-level inundation is reduced. With a lower position coefficient of storm peak and longer return period, the lag between the times to the peak inundation and to the storm peak becomes bigger. This work demonstrates quantitatively the effects of design storm pattern on urban flood inundation. The research may help make more informed decisions on urban flood management.

Key words: urban flood inundation; design storm pattern; numerical model; storm peak; return period