

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0015

王浅宁,邹德昊,王清正,等.地表径流速度对城市内涝影响规律[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):131-140.  
WANG Q N,ZOU D H,WANG Q Z,et al. Influence of surface runoff velocity on urban flood inundation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(1):131-140. (in Chinese)

# 地表径流速度对城市内涝影响规律

王浅宁<sup>1</sup>,邹德昊<sup>1</sup>,王清正<sup>2</sup>,彭勇<sup>1</sup>,吴剑<sup>1</sup>

(1.大连理工大学建设工程学部,辽宁 大连 116024;2.珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广州 510610)

**摘要:**为分析地表径流速度对城市内涝的影响,采用一维地下排水管网与二维城区地形的动态耦合模型,选取大连市某排水区块作为研究区域,设置 4 种地表径流速度 10 种设计降雨场景,模拟分析在不同重现期设计降雨及不同地表径流速度下研究区的内涝积水特性。结果表明:随着地表径流速度降低,管道排水压力变小,管道排水达标率最高可提升 48.05%,且降雨重现期越短,地表径流流速对管道排水压力的削减效果越明显;地表径流流速对检查井溢流量影响显著,随着地表径流速度降低,检查井溢流量峰值最高可减小 2 750 m<sup>3</sup>,峰现时间最长可滞后 56 min,同时随着降雨重现期增长,地表径流流速对检查井溢流量的削减效果减弱;研究区低、高风险区淹没面积随地表径流速度降低,最高可分别减小 1.64 万、8.37 万 m<sup>2</sup>,但中风险区淹没面积变化反复。

**关键词:**城市内涝;地表径流速度;MIKE 耦合模型;重现期;内涝风险

中图分类号:TV125:P333.2 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



近年来,随着全球气候的极端变化,我国极端暴雨多发频发<sup>[1]</sup>,城市内涝形势严峻。城市暴雨内涝模拟计算作为城市防洪排涝核心技术之一,其模型参数的选取对模拟结果的影响不可忽视。地表径流速度作为坡面水文过程重要参数之一,对流域水文学计算、城市暴雨内涝模拟计算等至关重要。地表径流速度即地表坡面水流汇集运动过程时水流的流速<sup>[2]</sup>。在流域产汇流方面,地表径流速度控制降雨向径流和下渗的分配<sup>[3]</sup>,直接影响产流量,因此为计算符合实际的径流系数,需要准确估算地表径流速度<sup>[4-5]</sup>。在水文水动力学原理方面,地表径流速度常用于推导雷诺数、曼宁系数等水文参数<sup>[6-7]</sup>。在城市暴雨内涝模拟计算方面,地表径流速度的准确估计对于计算集水区径流过程至关重要<sup>[8]</sup>。Li 等<sup>[9]</sup>在海绵城市洪涝及水质模拟中明确指出地表径流速度对城市洪水总径流量、洪峰流量和水质均有较大影响。

目前,国内外学者对地表径流速度的研究大多围绕山区流域或高原土壤展开<sup>[10-12]</sup>,侧重于对产沙过程及土壤侵蚀影响进行分析<sup>[13-15]</sup>,鲜有涉及地表径流速度对城市内涝灾害模拟的影响。地表径流速度作为 MIKE-URBAN 模型中集水区产汇流模块的重要参数之一,可通过修改 URBAN 模型中对应参数来设置地表径流速度取值。因此,本文设置系列地表径流速度方案,模拟研究区在不同频率暴雨条件下的内涝积水过程,并量化分析地表径流速度对研究区内涝灾害的影响规律,为城市暴雨内涝模拟分析以及洪涝灾害预防、治理提供支撑。

## 1 研究区概况与资料分析

### 1.1 研究区概况

研究区位于大连市沙河口区北部,见图 1,面积为 0.91 km<sup>2</sup>。该区域城市化程度较高,排水体系相

收稿日期:2021-05-25 修回日期:2021-09-15 网络出版时间:2021-09-28  
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210927.2149.004.html  
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0406005)  
作者简介:王浅宁(1996—),男,河南周口人,主要从事水文学及水资源学研究。E-mail:wqunp@mail.dlut.edu.cn  
通信作者:彭勇(1979—),男,湖北公安人,教授,主要从事水文学及水资源学研究。E-mail:pengyong@dlut.edu.cn

对独立,下垫面属性复杂,产汇流特征不明显,地形起伏较大,是沙河口区内涝积水多发区域。



图 1 研究区  
Fig. 1 Study area

## 1.2 基础资料

### 1.2.1 设计降雨

根据住建部《试点城市内涝积水点分布图绘制说明》,对 1、2、5 a 一遇的场景计算时推荐采用短历时(2 h 或 3 h)设计降雨雨型,对 50 a 一遇及以上的场景计算时推荐采用 24 h 长历时设计降雨雨型。本文设置 1、2、3、5、10、20 a 一遇短历时 2 h 以及 50、100、200、500 a 一遇长历时 24 h 共 10 种设计降雨作为模型输入。Qin 等<sup>[16]</sup>的研究指出,芝加哥雨型在中国城市排水设计中有较好的应用效果。根据历史暴雨统计资料,大连市中心城区暴雨历时短且以单峰型为主。因此,本文选取芝加哥雨型作为短历时 2 h 设计降雨雨型,雨峰系数(峰现时间与暴雨历时的比值) $r=0.5$ 。根据《大连市中心城区暴雨强度公式及查算图表》,采用式(1)计算研究区暴雨强度。

$$q = \frac{A(1+C \lg P)}{167(t+b)^n} \quad (1)$$

式中: $q$  为降雨强度,mm/min; $A=1\ 230.157$ ; $C=$

$0.724$ ; $P$  为重现期,a; $t$  为降雨历时,min; $b=5.783$ ; $n=0.661$ 。图 2 为大连市中心城区 1、2、3、5、10、20 a 一遇短历时 2 h 降雨过程线,时段长为 5 min。其中,不同重现期 2 h 总降雨量为 36.5~70.8 mm。

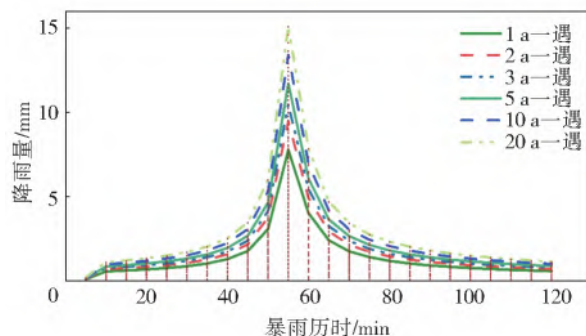


图 2 短历时 2 h 设计降雨过程线  
Fig. 2 Design rainfall hydrograph with short duration of 2 h

选取 2009 年 7 月 17 日实测降雨过程作为长历时 24 h 设计降雨雨型,该场降雨实测总降雨量为 104.2 mm,具有降雨总量大、峰值大、降雨集中且降雨时程分布偏于不利的特点。将实测降雨过程同倍比放大后得研究区 50、100、200、500 a 一遇 24 h 设计降雨过程,见图 3,时段长为 5 min,倍比系数由《辽宁省水文手册》查算得到。各重现期长历时 24 h 设计暴雨特征值见表 1。

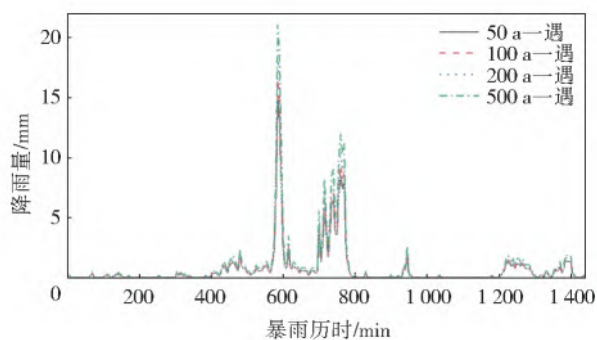


图 3 长历时设计降雨过程线  
Fig. 3 Long duration design rainfall hydrograph

表 1 长历时 24 h 设计降雨特征值

Tab. 1 Characteristic values of long duration (24 h) design rainfall

重现期/a	最大雨强 (mm · h <sup>-1</sup> )	1 h 最大降雨量/ mm	3 h 最大降雨量/ mm	6 h 最大降雨量/ mm	12 h 最大降雨量/ mm	总降雨量/ mm
50	180.1	65.6	109.8	159.0	167.6	198.0
100	199.1	72.5	121.4	175.8	185.2	218.8
200	222.2	80.9	135.5	196.2	206.8	244.3
500	252.7	91.9	154.0	223.1	235.1	277.7

### 1.2.2 地形、土地利用及管网现状

研究区内地形高程空间分布见图 4。基于

Landsat TM 遥感影像反演得到研究区域内建筑、道路及人造表面等 3 种土地利用类型。研究区地下

排水管网排水设计标准一般为 1 至 5 a 一遇,总长 9.76 km,管网空间布置见图 5。

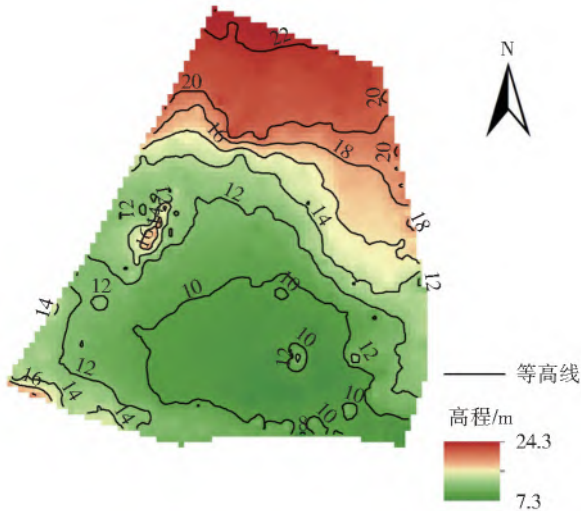


图 4 研究区 DEM 高程

Fig. 4 DEM elevation map of study area

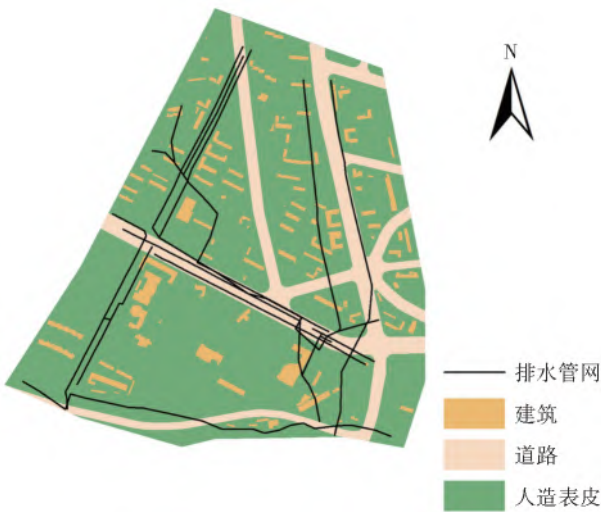


图 5 研究区土地利用及管网分布

Fig. 5 Land use and pipeline distribution map of the study area

## 2 研究区暴雨内涝模拟方法

### 2.1 模型构建

采用丹麦水利研究所(Danish hydraulic institute, DHI)开发的水文水动力数值模型,模型具有较高的模拟精度和计算速度,已被广泛应用于城市内涝灾害模拟并得到了较好的验证<sup>[17-20]</sup>。研究区主要包含地下排水管网和地表地形,构建一维排水管网模型和二维地表模型的耦合数值模型,对研究区暴雨积水内涝过程进行模拟。

#### 2.1.1 一维管网模型

研究区一维管网模型构建主要包含产流模块、汇流模块以及排水管网水动力模块。首先,产

流模块采用泰森多边形法将研究区划分成与人孔(Manhole)同等数量的子集水区(Catchment),计算子集水区综合不渗透系数,降雨经产流模块转化成地表径流量;接着,汇流模块将子集水区产生的径流汇入与之相连的人孔,水流汇集时间受地表径流速度参数的影响,参数越大汇集时间越短,从而影响了人孔处水流的汇集过程。研究区各子集水区水流汇集时间计算公式为

$$T_i = L_i / V \quad (2)$$

式中: $T_i$ 为第*i*个子集水区的水流汇集时间,s; $L_i$ 为第*i*个子集水区边界到相应人孔的最大距离,m; $V$ 为地表径流速度,m/s。

最后,排水管网水动力模块运用隐式有限差分法求解圣维南方程组,并用自适应步长法推进模拟时间,高效准确的计算多连通的分支环管网的水动力过程。经概化,研究区一维地下排水管网模型共包含 181 个人孔、4 个排放口(Outlet)、193 条排水管道(Link)以及 181 个子集水区,其中,子集水区最大面积为 2.29 万  $m^2$ ,最小面积为 116  $m^2$ 。

#### 2.1.2 二维地表模型

研究区二维地表模型构建主要包含模型边界、剖分网格、特殊地物处理等内容。二维地表模型边界是人孔处的雨水溢流。模型采用有限体积法对原始方程进行空间离散,并将连续介质细分为不重叠的单元,使空间域离散化。二维地形模型采用矩形结构化网格进行剖分划分为 4 032 个矩形网格,网格大小 15 m×15 m。同时,为真实反映研究区域实际地形,对房屋、道路等特殊地物进行处理,将建筑物处地形高程抬高 0.7 m,道路处地形高程降低 0.15 m。

### 2.2 参数确定

构建的模型参数分为确定性参数和不确定性参数。模型中管道长度、管径、管底埋深以及管道曼宁系数等确定性参数根据管网实测资料确定。其中,曼宁系数是影响排水管道中水流水动力特征的重要因素,曼宁系数的改变势必会引起管道内水流状态的变化。郭永鑫等<sup>[21]</sup>指出混凝土排水管曼宁系数为 0.011~0.015,考虑到研究区管道磨损情况,模型排水管道曼宁系数取 0.012。模型中不确定性参数则需根据历史实测水文数据率定得到,包括地表糙率、不透水系数、折减系数等。根据文献<sup>[22-26]</sup>确定模型的不确定性参数,具体见表 2。



采用 2017 年 8 月 3 日暴雨事件的实测降雨及内涝积水数据验证模型参数,该场次暴雨总降雨量为 163.3 mm,超过研究区 20 a 一遇标准。通过实地调研、社交媒体等方式收集到研究区该场次暴雨事件的积水点位置分布,见图 6。表 3 为积水点模

拟、实测水位对比结果。由图 6 和表 3 可知,研究区实测暴雨模拟结果中模拟积水点位置与实测积水点位置基本相符,积水点水深误差均在 15% 以内,表明模型建立符合实际,参数设置合理,可用于研究区地表径流速度对内涝影响规律研究。

表 2 模型参数取值

Tab. 2 The values of model parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值
初损雨量/m	0.02	湿水深/m	0.100	建筑区不透水系数	0.95
水文折减系数	0.9	干水深/m	0.005	道路区不透水系数	0.80
排水管道曼宁系数	0.012	浸没水深/m	0.050	人造表皮不透水系数	0.60

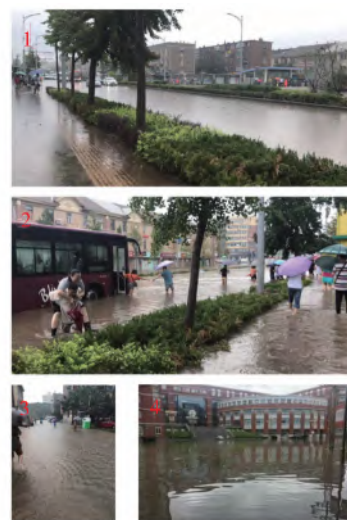
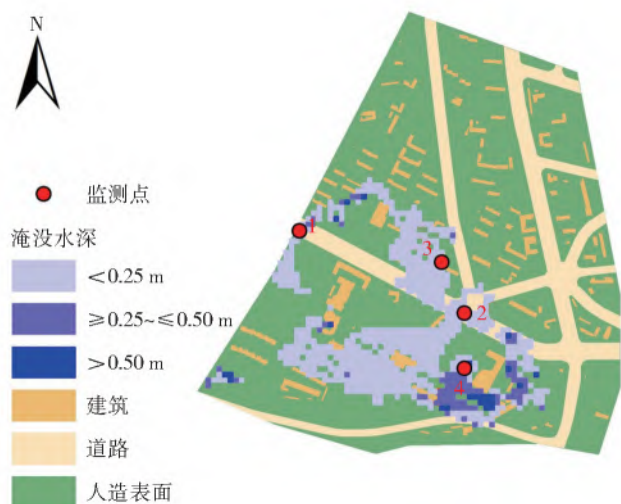


图 6 研究区 2017 年 8 月 3 日暴雨事件积水点位置

Fig. 6 Flood inundation map of the study area on August 3, 2017

表 3 积水点验证信息汇总

Tab. 3 Summary of verification information of flood points

点号	实际淹没水深/m	模拟淹没水深/m	误差/%
1	0.300	0.290	3.3
2	0.250	0.257	2.8
3	0.150	0.146	2.7
4	0.300	0.341	13.7

### 2.3 方案设置

模型中地面径流速度取值直接影响区域内涝模拟结果,其取值目前仍没有统一的经验公式和方法。其中:吴淑芳等<sup>[27]</sup>指出在不同径流调控措施下坡面径流流速大致范围为 0.03~0.23 m/s;杨大明等<sup>[28]</sup>模拟在自然降雨条件下不同坡度对应的坡面流运动情况,得出流速分布为 0.08~0.40 m/s。因此,本文设置地表径流速度为 0.02、0.05、0.10 和 0.30 m/s 共 4 种场景。按穷举法设计不同重现期降雨、不同流速的多种组合工况,最终共确定 40 个模拟方案。

### 2.4 评估指标

以管道充满度评估管道承载状态,该指标表示管道内水流的充满程度,以管道水深高程与管径之比表示<sup>[29]</sup>。在不同重现期设计降雨条件下,管道充满度大于 1 时表示管道内水位超过管道顶端高程,管道已经变成有压管道,不再是重力流排水,严重影响了周围相邻管道雨水的正常排放,很容易导致管道漫溢,不满足当前降雨的排水需求。管道充满度小于 1 时表示管道可满足当前降雨的排水需求,故选取  $F < 1$  作为管道是否达标的判定标准。具体公式为

$$F = \frac{W_{\text{level}} - P_{\text{inertlevel}}}{P_{\text{height}}} \quad (3)$$

式中: $F$  为管道充满度; $W_{\text{level}}$  为水位高程, m;  $P_{\text{inertlevel}}$  为管道底高程, m;  $P_{\text{height}}$  为管道高度, m。

采用人孔溢流量表征研究区域的内涝积水情况。为进一步评估研究区地表径流速度对研究区内涝风险的影响,需对研究区内涝淹没进行风险等级

划分。在借鉴赵燕霞<sup>[30]</sup>、戴晶晶等<sup>[31]</sup>以及侯精明等<sup>[32]</sup>对城区的内涝风险等级划分方法的基础上,综合考虑积水深度和积水历时两方面因素,并按如下标准划分研究区内涝风险等级:低风险区为路面积水深度 $>0.03\sim\leq 0.25$  m且积水历时大于30 min;中风险区为路面积水深度 $>0.25\sim\leq 0.50$  m且积水历时大于60 min;高风险区为路面积水深度超过

0.50 m且积水历时大于60 min。

### 3 地表径流速度对研究区内涝灾害影响分析

#### 3.1 管网排水能力分析

基于6种短历时2 h设计降雨条件模型模拟结果,统计在不同重现期设计降雨和地表径流速度条件下达标管道长度及其与管道总长的比值,结果见表4。

表4 各重现期降雨条件下管道达标统计  
Tab.4 Statistical table of pipeline return period

地表径流速度/ ( $m\cdot s^{-1}$ )	设计降雨重现期/a											
	1		2		3		5		10		20	
	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%
0.02	8.1	83.30	5.6	57.30	5.5	56.70	4.9	50.10	4.5	46.60	4.2	42.80
0.05	5.2	53.40	4.9	50.40	4.5	46.60	4.2	42.80	4.1	42.42	4.1	41.60
0.10	4.8	49.70	4.4	45.60	4.3	43.80	3.8	39.20	3.7	38.00	3.6	37.30
0.30	4.6	47.10	4.2	43.10	3.9	39.80	3.6	37.10	3.5	36.12	3.4	35.25

由表4可知,地表径流速度越低,管道排水负荷越小,管道达标率越高,同时随着降雨重现期变短,地表径流流速对管道排水负荷的削减效果变得明显。比如:在20 a一遇设计降雨条件下,地表径流速度0.02、0.05、0.10 m/s比地表径流速度0.30 m/s的管道达标百分率提高7.6%、6.4%、2.1%;在5 a一遇设计降雨条件下对应提高13.0%、5.7%、2.1%;在1 a一遇设计降雨条件下对应提高36.2%、6.3%、2.6%。降雨沿集水区坡面汇流至雨水井口后流入排水管道,当地表径流速度变小时,集水区汇流时间相应变长,进而导致管道排水过程延长,排水负荷变小。当下渗能力相同时,设计降雨重现期越短,集水区产流量越小,进入排水管道的水量越少,故降低地表径流速度可明显缓解管道排水负荷,同时设计降雨重现期越短,地表径流流速对管道排水负荷的削减效果越明显。

#### 3.2 内涝积水分析

模型中入孔的溢流量决定了内涝积水量,对模型

中各入孔溢流量叠加得到研究区总溢流量,其随时间变化过程见图7。在不同重现期设计降雨条件下溢流量峰值及峰现迟滞时间见表5。由表5和图7可知,地表径流速度越低,检查井溢流量峰值越小,峰现时间滞后越长,随着降雨重现期增长,溢流量的削减效果减弱。比如:在20 a一遇设计降雨条件下,当地表径流速度为0.02、0.05、0.10 m/s时,比地表径流速度0.30 m/s的溢流量峰值分别降低了2 750、893、312  $m^3$ ,峰现时间分别滞后56、14、5 min;在5 a一遇设计降雨条件下,地表径流速度为0.02、0.05、0.10 m/s时,比地表径流速度0.30 m/s的溢流总量分别减少了1 776、538、207  $m^3$ ,峰现时间分别提前53、11、4 min。地表径流速度降低导致汇流时间增长,当下渗能力相同时,下渗水量增多,进而对检查井溢流量起削减和延缓的作用。因此,在应对城市内涝积水时,可通过改变下垫面条件等方式降低地表径流速度,达到对洪量的削减、滞留,进而减少内涝积水造成的损失。

表5 溢流量峰值及其迟滞时间汇总  
Tab.5 Summary of peak value and delay time of overflow

降雨重现期/a	地表径流速度/( $m\cdot s^{-1}$ )							
	0.02		0.05		0.10		0.30	
	溢流量 峰值/ $m^3$	迟滞时间/ min	溢流量 峰值/ $m^3$	迟滞时间/ min	溢流量 峰值/ $m^3$	迟滞时间/ min	溢流量 峰值/ $m^3$	迟滞时间/ min
1	987	116	1 233	73	1 295	67	1 322	63
2	2 060	112	2 786	72	3 007	65	3 110	62
3	2 973	114	3 942	73	4 226	66	4 358	62
5	4 239	116	5 477	74	5 808	67	6 015	63
10	6 059	119	7 626	76	8 093	68	8 363	63
20	8 045	120	9 902	78	10 483	69	10 795	64

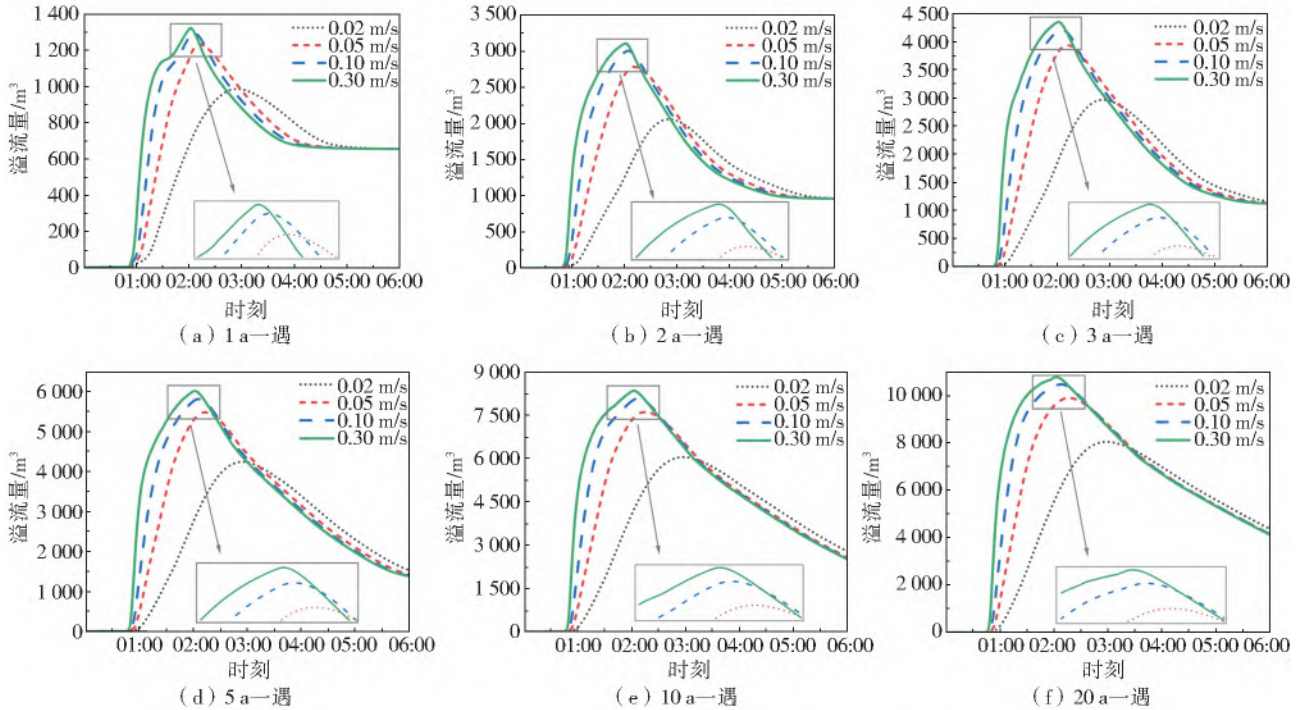


图 7 不同重现期设计降雨溢流量变化过程

Fig. 7 Variation of design rainfall overflow in different return periods

### 3.3 内涝风险影响分析

采用上述内涝风险等级划分方法,得到研究区各等级风险区淹没面积随地表径流速度及设计降雨

重现期变化,见图 8,可见地表径流速度对研究区内涝风险影响较大。表 6 为在不同地表径流速度下各等级风险区淹没面积。

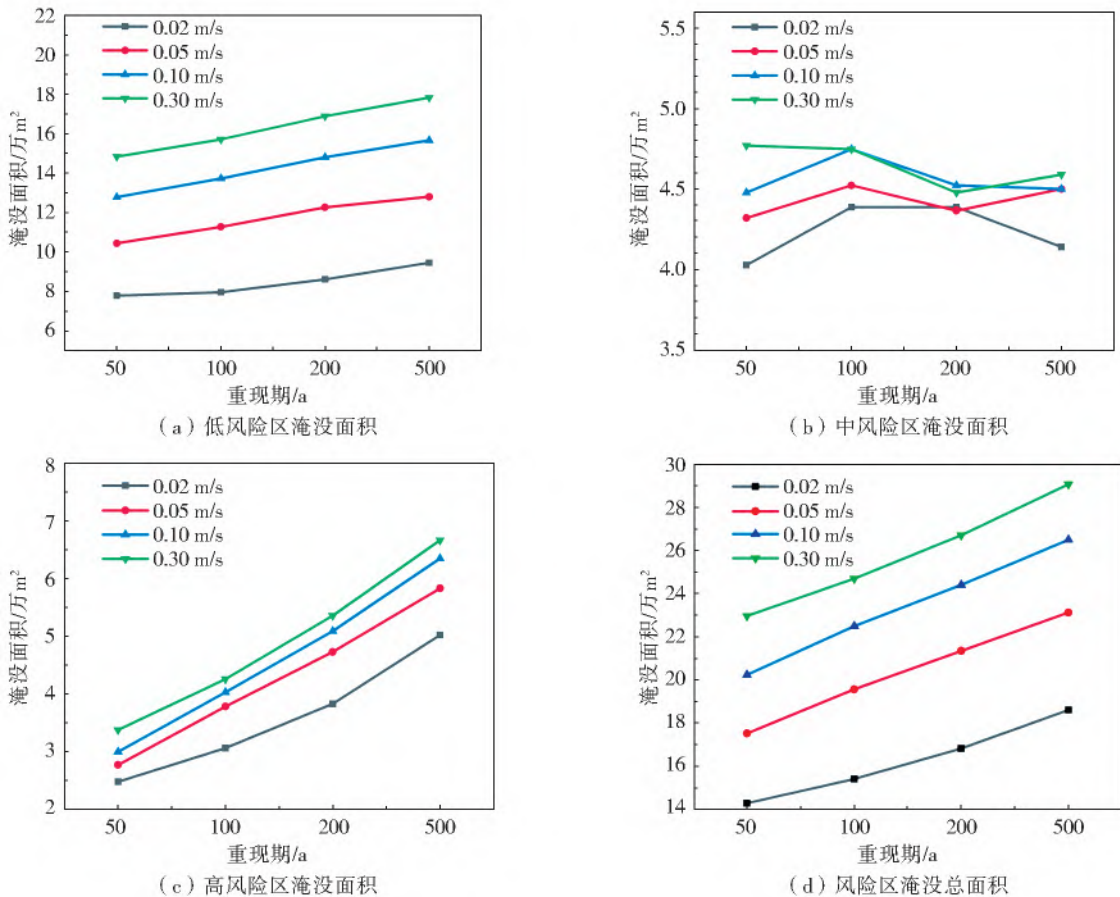


图 8 研究区各等级风险区淹没面积汇总

Fig. 8 Summary of risk area in study area



表 6 研究区各等级风险区评估指标  
Tab. 6 Index table of risk assessment in study area

地表径流速 度/(m·s <sup>-1</sup> )	高风险区淹没面积/万 m <sup>2</sup>				中风险区淹没面积/万 m <sup>2</sup>				低风险区淹没面积/万 m <sup>2</sup>			
	50 a一遇	100 a一遇	200 a一遇	500 a一遇	50 a一遇	100 a一遇	200 a一遇	500 a一遇	50 a一遇	100 a一遇	200 a一遇	500 a一遇
0.02	2.48	3.06	3.83	5.02	4.03	4.39	4.39	4.14	7.79	7.97	8.62	9.45
0.05	2.77	3.78	4.73	5.83	4.32	4.52	4.37	4.50	10.44	11.27	12.26	12.80
0.10	2.99	4.03	5.09	6.35	4.48	4.75	4.52	4.50	12.78	13.73	14.81	15.66
0.30	3.38	4.25	5.36	6.66	4.77	4.75	4.48	4.59	14.83	15.71	16.88	17.82

由表 6 可知,研究区高风险区和低风险区淹没面积变化趋势规律一致,在相同重现期设计降雨条件下,研究区低、高风险区淹没面积随地表径流速度降低明显减小,在地表径流速度为 0.02 m/s 时淹没面积最小,且设计降雨重现期越长淹没面积差距越明显。在 50 a 一遇设计降雨条件下,地表径流速度 0.02 m/s 比地表径流速度 0.30 m/s 的高风险区淹没面积降低了 0.9 万 m<sup>2</sup>,低风险区淹没面积降低了 7.04 万 m<sup>2</sup>;在 500 a 一遇设计降雨条件下,地表径流速度 0.02 m/s 比地表径流速度 0.30 m/s 的高风险区淹

没面积降低了 1.64 万 m<sup>2</sup>,低风险区淹没面积降低了 8.37 万 m<sup>2</sup>;研究区中风险区淹没面积随地表径流速度及设计降雨重现期变化反复。在 50 a、100 a 和 500 a 一遇设计降雨条件下,地表径流速度 0.02 m/s 的中风险区淹没面积最小,分别为 4.03 和 4.14 万 m<sup>2</sup>;在 200 a 一遇设计降雨条件下,地表径流速度 0.05 m/s 的中风险区淹没面积最小,为 4.37 万 m<sup>2</sup>。为进一步分析中风险区淹没面积变化反复原因,给出研究区不同地表径流速度场景下内涝风险区分布,见图 9。

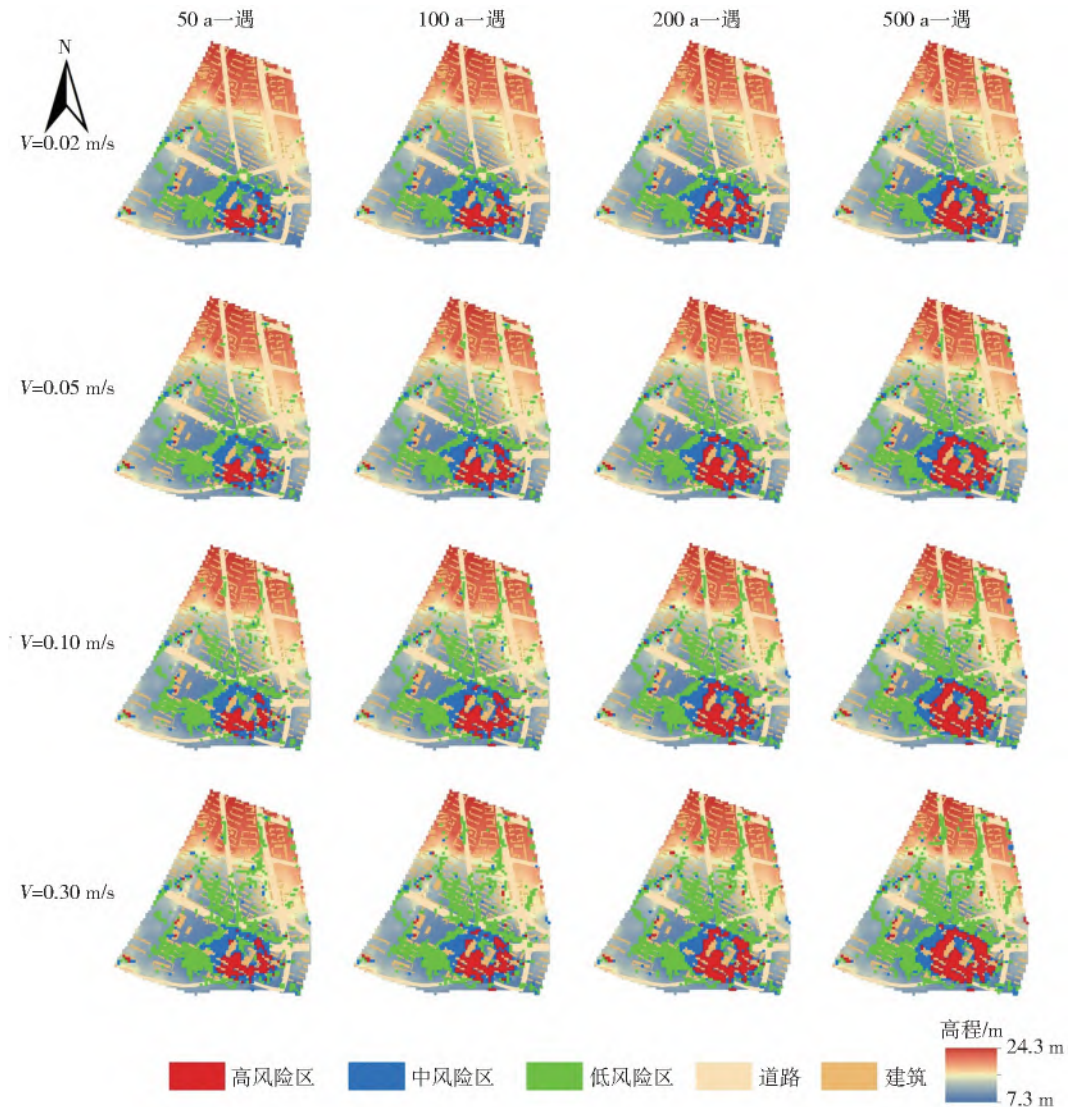


图 9 研究区不同场景内涝风险区分布

Fig. 9 Distribution of flood inundation risk areas under different scenarios in the study area

由图 9 可知,中、高风险区淹没面积主要位于研究区地势低洼区域。在 200 a 一遇设计降雨条件下,随着地表径流速度由 0.30 m/s 降低至 0.02 m/s,高风险区淹没面积有 1.35 万  $\text{m}^2$  降为中风险区,中风险区淹没面积有 0.97 万  $\text{m}^2$  降为低风险区,低风险区淹没面积有 9.32 万  $\text{m}^2$  降为无风险区。结合内涝积水结果可知,地表径流速度变小或设计降雨重现期变短均会减少研究区的内涝积水,从而使部分高等级风险区转为低等级风险区,且低风险区转为无风险区易于中风险区转为低风险区。因此,当地表径流流速降低、设计降雨重现期变短时,低、高风险区淹没面积大幅降低,中风险区淹没面积变化反复。

#### 4 结 论

通过设置系列地表径流速度模拟方案,分析研究区不同重现期设计降雨条件下的内涝积水过程,探讨了地表径流速度对研究区管网排水能力、内涝积水以及内涝风险区淹没面积等的影响规律,主要结论如下:

在短历时 2 h 设计降雨条件下,地表径流速度越低、降雨重现期越短,降雨后管道的排水负荷越小,管道达标率越高,地表径流流速对管道排水负荷的削减效果越明显。随着地表径流速度降低,达标管道长度和管道达标率最大可分别提高 4.7 km 和 48.05%。

地表径流流速对内涝积水影响显著,地表径流速度越低,降雨产生的内涝积水峰值越小,峰现时间滞后越长。随着降雨重现期增长,内涝积水的削减效果减弱;随着地表径流速度降低,溢流总量峰值最大可降低 2 750  $\text{m}^3$ ,峰现时间最长可滞后 56 min。

在长历时 24 h 设计降雨条件下,研究区低、高风险区面积随地表径流速度降低明显减小,且设计降雨重现期越长风险区面积削减量越大。随着地表径流速度降低,低、高风险区面积最高可分别降低 1.64 万、8.37 万  $\text{m}^2$ ,但中风险区面积变化反复。

本文设置的地表径流速度场景虽然是针对本文研究区域的特殊地形和土地利用状况的,但对其他影响内涝模拟结果的因素的研究有较好的参考价值,可为城市规划、建设提供基础支撑依据。此外,本文采用穷举法的方式设计了不同重现期降雨、不同流速的多种组合工况,避免了降雨重现期与流速相关性的考量。同时,本文也未考虑坡度对地表水流汇集速度大小的影响,仅探究了在均匀流速下改变地表径流速度大小对研究区内涝模拟的影响,以上不足将是作者今后研究当中的重要工作之一。

#### 参考文献(References):

- [1] 任国玉,柳艳菊,孙秀宝,等. 中国大陆降水时空变异规律: III. 趋势变化原因[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 327-348. (REN G Y, LIU Y J, SUN X B, et al. Temporal and spatial variation of precipitation in Chinese mainland. III. Reasons for the trend of change[J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (3): 327-348. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2016.03.001.
- [2] 杨达源. 自然地理学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001. (YANG D Y. Physical geography[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001. (in Chinese))
- [3] GONG T X, ZHU Y J. Application of digital image processing in slope surface runoff velocity analysis under simulated rainfall conditions[J]. Hydrology Research, 2018, 49 (4): 1304-1312. DOI:10.2166/nh.2017.040.
- [4] GIUDICE G D, PADULANO R, RASULO G. Spatial prediction of the runoff coefficient in Southern Peninsular Italy for the index flood estimation[J]. Hydrology Research, 2014, 45(2): 263-281. DOI:10.2166/nh.2013.243.
- [5] ZHANG G H, LIU G B, YI L, et al. Effects of patterned *Artemisia capillaris* on overland flow resistance under varied rainfall intensities in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2014, 62(4): 334-342. DOI:10.2478/johh-2014-0035.
- [6] PHILIP J R. An infiltration equation with physical significance[J]. Soil Science, 1954, 77 (2): 153-157. DOI:10.1097/00010694-195402000-00009
- [7] FOHRER N, J BERKENHAGEN, HECKER M, et al. Changing soil and surface conditions during rainfall: Single rainstorm/subsequent rainstorms [J]. Catena Giessen then Amsterdam, 1999, 37(3): 355-375. DOI: 10.1016/S0341-8162(99)00026-0.
- [8] FU S H, MU H L, LIU B Y, et al. Effect of plant basal cover on velocity of shallow overland flow[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 947-986. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123947.
- [9] LI J K, ZHANG B, MU C, CHEN L. Simulation of the hydrological and environmental effects of a sponge city based on MIKE FLOOD[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(2): 32-48. DOI: 10.1007/s12665-018-7236-6.
- [10] 杨大明. 黄绵土细沟侵蚀水流水动力学试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019. (YANG D M. Experimental study on water dynamics of rill erosion in Huangmian soil[D]. Zibo: Shandong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese))
- [11] 高晨焱. 黄土丘陵沟壑区坡面水流输沙能力计算模型研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019. (GAO C



- Y. A study on the calculation model of sediment transport capacity of slope water flow in Loess Hilly and gully region[D]. Xiayang: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2019. (in Chinese))
- [12] 班云云. 高海拔寒区融冻坡面水动力特征与侵蚀过程研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019. (BAN Y Y. Hydrodynamic characteristics and erosion process of thawed slope in high altitude cold region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese))
- [13] 王林华. 黄土坡耕地地表粗糙度对入渗、产流及养分流失的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017. (WANG L H. Effect of surface roughness on infiltration, runoff yield and nutrient loss of loess slope farmland [D]. Xiayang: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2017. (in Chinese))
- [14] 张宽地. 坡面径流水动力学特性及挟沙机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011. (ZHANG K D. Study on dynamic characteristics and sediment carrying mechanism of runoff on slope [D]. Xiayang: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2011. (in Chinese))
- [15] 吴淑芳. 坡面径流调控效应及其机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2006. (WU S F. Study on regulation effect and mechanism of slope runoff[D]. Xiayang: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2006. (in Chinese))
- [16] QIN H P, LI Z X, FU G T. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129(2): 577-585. DOI: 10. 1016/j. jenvman. 2013. 08. 026.
- [17] 李品良, 覃光华, 曹冷然, 等. 基于 MIKE URBAN 的城市内涝模型应用[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 11-16. (LI P L, QIN G H, CAO L R, et al. Application of urban flood inundation model based on MIKE URBAN[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2018, 49 (12): 11-16. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2018. 12. 002.
- [18] 王领元. 应用 MIKE 对河流一、二维的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (WANG L Y. One and two dimensional numerical simulation of rivers using MIKE[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [19] 王世旭. 基于 MIKE FLOOD 的济南市雨洪模拟及其应用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015. (WANG S X. Research on simulation and application of rain and flood in Jinan City based on MIKE FLOOD[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015. (in Chinese))
- [20] 刘龙志, 马宏伟, 杜垚, 等. 基于 Mike 模型的海绵城市内涝整治方案效果分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(12): 13-18. (LIU L Z, MA H W, DU Y, et al. Effect analysis of flood inundation treatment scheme in sponge city based on Mike model[J]. China Water Supply and Drainage, 2019, 35 (12): 13-18. (in Chinese)) DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2019. 12. 003.
- [21] 郭永鑫, 郭新蕾, 杨鹏志, 等. 管道水力摩阻系数的敏感性分析[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 1021-1028. (GUO Y X, GUO X L, YANG P Z, et al. Sensitivity analysis of hydraulic friction coefficient of pipeline[J]. Journal of Water Conservancy, 2019, 50 (8): 1021-1028. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20181090.
- [22] 曾照洋, 王兆礼, 吴旭树, 等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 68-77. (ZENG Z Y, WANG Z L, WU X S, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models[J]. Journal of Hydropower, 2017, 36 (5): 68-77. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SFXB. 0. 2017-05-010.
- [23] 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(4): 264-267. (GUO Y H, ZHAO T N, SUN B P, et al. Study on hydrodynamic characteristics of grassland slope and its mechanism of delaying surface runoff[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2006 (4): 264-267. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STBY. 0. 2006-04-082.
- [24] 马萌华, 李家科, 邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 62-72. (MA M H, LI J K, DENG C N. Simulation analysis of urban flood inundation and non-point pollution based on SWMM model[J]. Journal of Hydropower, 2017, 36 (11): 62-72. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SFXB. 0. 2017-11-007.
- [25] 童旭, 覃光华, 王俊鸿, 等. 基于 MIKE URBAN 模型研究设计暴雨雨型对城市内涝的影响[J]. 中国农村水利水电, 2019(12): 80-85. (TONG X, QIN G H, WANG J H, et al. Study on the influence of design storm pattern on urban waterlogging based on MIKE URBAN model[J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2019 (12): 80-85. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZNSD. 0. 2019-12-017.
- [26] 冯文强, 徐奎, 郭祺忠, 等. 城市内涝风险区划集成模型及其敏感性研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(5): 56-67. (FENG W Q, XU K, GUO Q Z, et al. Integrated model and sensitivity analysis of urban waterlogging risk zoning[J]. Journal of Hydropower, 2021, 40 (5): 56-67. (in Chinese))

- [27] 吴淑芳,吴普特,原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 14-19. (WU S F, WU P T, YUAN L F. Experiment on hydraulic characteristics of thin layer flow controlled by slope runoff[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2010, 26(3): 14-19. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; NYGU. 0. 2010-03-004.
- [28] 杨大明,高佩玲,刘小媛,等. 坡面薄层水流流速研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 72-80. (YANG D M, GAO P L, LIU X Y, et al. Study on flow velocity of thin layer on slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 72-80. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stbxb. 2019. 04. 011.
- [29] MAHMOUD S H, GAN T Y. Urbanization and climate change implications in flood risk management: developing an efficient decision support system for flood susceptibility mapping[J]. Science of The Total Environment, 2018, 636(2): 152-167. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2018. 04. 282.
- [30] 赵燕霞. 基于水力学模型的城市除涝方案分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. (ZHAO Y X. Analysis of urban waterlogging control scheme based on hydraulic model [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [31] 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. Urban waterlogging risk assessment based on numerical simulation: A case study of Suzhou City Center[J]. China Water Conservancy, 2015(13): 20-23. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; SLZG. 0. 2015-13-013.
- [32] 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 the influence of design rainstorm pattern on urban waterlogging[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 820-828. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2017. 06. 003.

### Influence of surface runoff velocity on urban flood inundation

WANG Qianning<sup>1</sup>, ZOU Dehao<sup>1</sup>, WANG Qingzheng<sup>2</sup>, PENG Yong<sup>1</sup>, WU Jian<sup>1</sup>

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Pearl River Water Resources Commission, Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** To analyze the impact of surface runoff velocity on urban flood inundation, the dynamic coupled model is applied to generate the flood inundation map of a typical area in Dalian. The characteristics of flood inundation are compared and analyzed under several combinations between surface runoff velocities and return periods of design rainfall. A series of surface runoff velocity schemes are set up to simulate the dynamic process of flood inundation given different return periods of design rainfall, and also to quantitatively analyze the influence of surface runoff velocity on flood inundation, which provides support for urban flood analysis as well as flood disaster prevention and control.

The one-dimensional pipe network model consists of 181 manholes, 4 outlets, 193 drainage pipelines and 181 sub-catchments. The largest and minimum area of sub-catchments is  $2.29 \times 10^4 \text{ m}^2$  and  $116 \text{ m}^2$ , respectively. The two-dimensional terrain model is divided into 4 032 rectangular grids with a grid size of  $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ . The surface runoff velocity is set to be 0.02 m/s, 0.05 m/s, 0.1 m/s and 0.3 m/s. 40 simulation schemes are generated in combination with ten types of rainfall return periods. The pipeline pressure state is evaluated by the pipe filling, and the water accumulated over the study area is evaluated by manhole overflow. The risk of flood inundation is divided into three levels, namely, high-, medium-, and low-risk areas.

The results show that the drainage load of the pipeline becomes smaller and the qualified rate of the pipeline becomes higher with the decrease of surface runoff velocity under the two-hourly design rainfall. And the qualified length and rate can be increased by 4.7 km and 48.05% with the decrease of surface runoff velocity. Moreover, surface runoff velocity has a significant influence on the volume of accumulated water. When the surface runoff velocity decreases, the peak value of accumulated water volume becomes smaller, and the delay of peak time is longer. The reduction effect of accumulated water is weakened with the increase of rainfall return period. With the decrease of surface runoff velocity, the peak value of total accumulated water can be reduced by  $2\,750 \text{ m}^3$  at most, and the peak time can be delayed by 56 min at most. Meanwhile, under the 24-hourly design rainfall, the area of low-risk and high-risk areas decreases largely as the surface runoff velocity decreases. With the decrease of surface runoff velocity, the areas of low-risk and high-risk areas can be reduced by  $1.64 \times 10^4 \text{ m}^2$  and  $8.37 \times 10^4 \text{ m}^2$ , respectively, while the area of a medium-risk area changes irregularly.

The main conclusions are as follows: The surface runoff velocity has a significant impact on urban flood inundation. It affects the degree of urban flood inundation by changing the drainage load of the pipeline, the amount of ponding, and the area of the risk area. Overall, the decrease of surface runoff velocity, the harm of urban flood inundation is smaller. The relevant conclusions can provide decision-making references for relevant workers.

**Key words:** urban flood inundation; surface runoff velocity; MIKE coupled model; return period; urban flood risk