

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.009

基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估

李国一¹, 刘家宏^{1,2,3}

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038)

摘要: 基于TELEMAC-2D模型构建深圳市深圳河流域洪涝仿真模型,选取两场实测暴雨(20180607和20180916)的内涝淹没资料对模型进行验证,结果表明所构建的模型具有较好的可靠性和精度。采用构建的仿真模型模拟暴雨重现期为50年一遇、雨峰系数为0.4条件下,降雨历时分别为30 min、60 min、90 min和120 min 4种情景下洪涝发生的过程,获取积水深度、积水面积和流速等致灾因子,考虑不同流速和积水深度组合情境下对深圳河流域进行内涝风险评估。结果表明:随着降雨历时的增加,积水深度、积水面积和流速均增大;根据积水深度和流速对深圳河流域进行洪涝风险分区,中高风险区面积随着降雨历时的增加不断增大;中高风险区占流域总面积比例较小,但容易出现人员伤亡和财产损失,当出现中高风险区时,应及时发布信息,积极采取应急减灾措施。

关键词: TELEMAC-2D模型;城市内涝;风险评估;深圳河流域;深圳市

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)05-0058-07

Flood risk assessment of Shenzhen City based on TELEMAC-2D model // LI Guoyi¹, LIU Jiahong^{1,2,3} (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Water Resources and Water Ecological Engineering Technology Research Center of Ministry of Water Resources, Beijing 100044, China; 3. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on TELEMAC-2D model, a flood simulation model of the Shenzhen River Basin in Shenzhen City was established. Two measured rainstorm events (20180607 and 20180916) were selected for model verification. The results show that the established model has good reliability and accuracy. The established model was used to simulate the process of flood and waterlogging under the conditions that the return period of rainstorm is 50 years, the rainfall peak coefficient is 0.4, and the rainfall duration is 30 min, 60 min, 90 min and 120 min, respectively, to obtain the disaster causing factors such as the ponding depth, ponding area and flow velocity. Considering the combination of different flow velocity and ponding depth, the risk assessment of waterlogging in the Shenzhen River Basin was carried out. The results show that with the increase of rainfall duration, the ponding depth, ponding area and flow velocity increase. According to the ponding depth and flow velocity, the flood risk zoning of the Shenzhen River Basin is carried out. The areas of medium- and high-risk zone increase with the increase of rainfall duration. Medium- and high-risk zone areas account for a small proportion of the total area of the basin, but are prone to casualties and property losses. When medium and high-risk zone occur, information shall be released in time and emergency and disaster reduction measures shall be actively taken.

Key words: TELEMAC-2D model; urban waterlogging; risk assessment; Shenzhen River Basin; Shenzhen City

随着我国城市化进程不断加快,加之全球气候发生变化,我国城市内涝灾害发生频率增加、灾害损失加剧,已成为影响经济社会发展的一种主要自然灾害^[1-3]。截至2020年,我国城镇化率超过

60%^[4]。城市化本质是社会经济变化的过程,1978年至今是我国城市化稳定快速发展时期,在城市化发展带来诸多积极意义的同时,也会产生一系列环境、社会和经济问题,例如土壤污染、空气污染、热岛

基金项目:国家自然科学基金(51739011,51979285);流域水循环模拟与调控国家重点实验室基金(SK12022TS11)

作者简介:李国一(1992—),男,博士研究生,主要从事城市水文研究。E-mail: 1969687116@qq.com

通信作者:刘家宏(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail: liujh@iwhr.com

效应、雨岛效应、水资源短缺、酸雨等。其中城市内涝问题近几年表现尤为突出,“城市看海”的现象时有发生,城市内涝造成人员伤亡、财产损失的事件屡见不鲜,如2012年北京强降雨造成道路、桥梁等工程受损,几十人遇难;2014年深圳市两次遭遇强降雨,市内约有200处发生积水内涝,约2000辆汽车被淹。城市内涝的发生主要由两方面导致:①气候变化导致极端降水事件发生的强度和频率增加,尤其是短历时强降雨;②城市建设规划设计存在局限性,基础设施建设滞后于城市发展速度。城市暴雨洪水模拟是城市防灾减灾的关键技术之一,国内学者开展了很多相关研究,并取得了丰硕的成果。陆海明等^[5]基于SWMM模型在铁心桥实验基地开展内涝防治效果模拟;栾震宇等^[6]基于MIKE FLOOD耦合模型,以新化县为典型研究区建立城市内涝模型,对城市内涝风险进行评估;黄锦松等^[7]基于二维水动力城市雨洪模型,对海绵城市建设前后的内涝积水情况进行模拟,分析海绵城市内涝削减效果;向小华等^[8]通过耦合SWMM和LISFLOOD-FP模型构建响水县城区内涝模型,并采用GPU并行计算技术加速城市二维内涝模型的运算;冯钧等^[9]通过构建城市内涝事理图谱,消除城市内涝事件突发性和空间易变性对城市内涝灾害决策调度的影响。

深圳市是国家海绵城市建设试点城市之一^[10],深圳市投入大量人力物力进行城市改造,本文以深圳市深圳河流域为研究对象,基于TELEMAC-2D水动力学模型构建二维城市内涝仿真模型,考虑不同降雨历时对城市内涝的影响,分析内涝发生时积水深度、积水面积、流速等指标,同时对城市不同内涝风险区进行划分,为深圳市减少城市内涝、加快海绵城市建设提供参考。

1 研究区概况

深圳市(东经113°43′~114°38′,北纬22°24′~22°55′)地势东南高、西北低,境内地形复杂,地貌类型多样且大部分为低丘陵地,低山、台地、阶地和平原间或其中。深圳市属于亚热带海洋性气候,气候温和,光照充足,多年平均气温为22.4℃;每年4—9月为雨季,汛期降雨约占全年降水量的85%左右,年均降水量为1933.3mm,水量充沛。常年主导风向为东南风,平均每年受台风影响四五次。深圳河是深圳市主要河流之一,属于珠江水系,发源于牛尾岭,流经深圳与香港,自东北向西南流入深圳湾。深圳河在深圳市内流域面积约为190km²,主要包括罗湖区、福田区大部以及龙岗区一部分,属于深圳市经济发达、人口密度较大区域,对此区域进行城市内涝

风险评估具有重大意义。

2 TELEMAC-2D 模型构建

TELEMAC-MASCARET是由法国国家水力学与环境实验室开发的开源河流、河口和海岸的一维、二维和三维水力学模型系统^[11],主要由咨询和研究机构组成的联合体进行管理(相关信息可登录www.opentelemac.org查看)。本文所采用的TELEMAC-2D是其中的一个二维水动力计算模块^[12-14],该模块主要用于求解二维浅水方程,计算每个节点上的水深和流速等,在海岸等大范围的风暴潮洪水模拟中应用广泛^[15-16],而专门用于城市洪涝淹没模拟的研究相对较少。

2.1 模型原理

TELEMAC-2D采用有限元方法对浅水方程进行求解,该模块可同时求解以下4个水动力学方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla h + h \nabla \cdot \mathbf{U} = S_h \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla u = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_t \nabla u) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla v = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_t \nabla v) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla T = S_0 + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_0 \nabla T) \quad (4)$$

式中: h 为水深,m; $\mathbf{U}$ 为合速度,m/s; u 、 v 分别为速度分量,m/s; g 为重力加速度,m/s²; Z 为自由表面高程,m; t 为时间,s; x 、 y 为空间坐标; ν_t 、 ν_0 分别为动量扩散系数、示踪剂扩散系数,m²/s; S_h 为流体源或汇项速度,m/s; T 为示踪剂浓度,g/L; S_x 、 S_y 分别为 x 和 y 方向的底摩阻项,m/s²; S_0 为示踪剂源或汇项速度,m/s;

TELEMAC-2D模块采用SCS(soil conservation service)模型进行降雨产流模拟的计算。SCS模型是由美国Soil Conservation Service根据不同地区小流域降雨径流资料得到的一个经验性模型^[12]。SCS模型计算公式为

$$Q = \frac{(P_1 - I_a)^2}{P_1 - I_a + S} \quad (5)$$

其中 $I_a = 0.2S$ $S = \frac{1000}{C_N} - 10$

式中: Q 为径流量,m³; P_1 为降水量,mm; S 为土壤最大蓄水量,mm; C_N 为径流曲线数; I_a 为初损值,mm。 I_a 为在径流产生之前损失的雨量,包括蒸发、填洼、下渗和植物截留等,主要与土壤类型和土地利用方式有关^[17]。

2.2 模型构建

2.2.1 设计暴雨情景

根据《城市暴雨强度公式编制和实际暴雨雨型

确定技术导则》，2015 年深圳市气象局联合其他部门基于深圳市 1961—2014 年降水资料，编制了最新暴雨强度公式：

$$i = \frac{8.701(1 + 0.594\lg P)}{0.555(t_1 + 11.13)} \quad (6)$$

式中： i 为暴雨强度，mm/min； P 为重现期，a； t_1 为降雨历时，min。

采用国际上常用的芝加哥雨型对降雨时程进行分配，可分别得到在 50 年一遇、雨峰系数 r 为 0.4、时间间隔为 1 min 的条件下，降雨历时分别为 30 min、60 min、90 min 和 120 min 的 4 种降雨过程。由于在研究区内获取排水管网资料非常困难，参考文献[11-12]，采用等效排水的方法对排水管网进行概化。同时，结合实地调研情况，考虑到管网堵塞、淤积、老化等不利影响，深圳河流域排水管网实际排水能力多为 1 年一遇。根据深圳市暴雨强度公式求得的 1 年一遇降水量作为管网的估算排水量，在降雨数据中将此部分等效水量进行扣减，视为通过排水管网排掉的水量。此概化方法在降雨发生时间内对降水量进行适当的折减，所以在地表淹没计算过程中结果合理可靠。综合降雨和排水管网的排水作用，设计暴雨过程如图 1 所示。

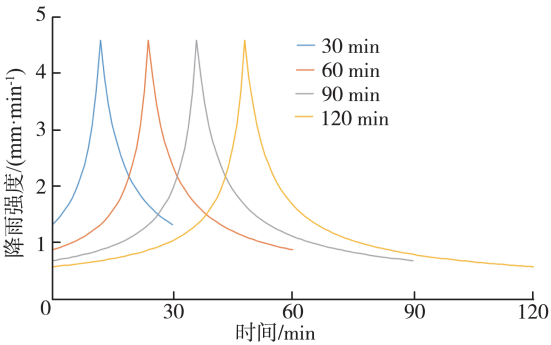
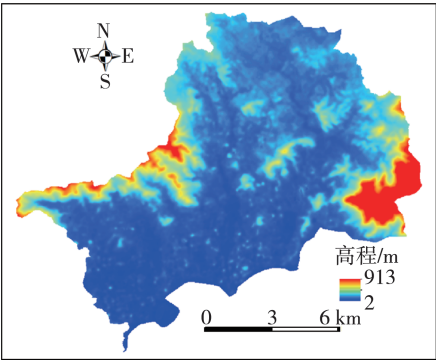


图 1 设计暴雨过程

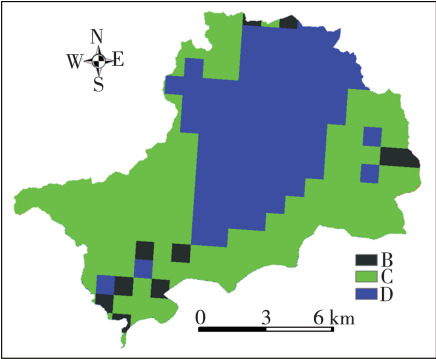
Fig.1 Design rainfall process

2.2.2 构建过程

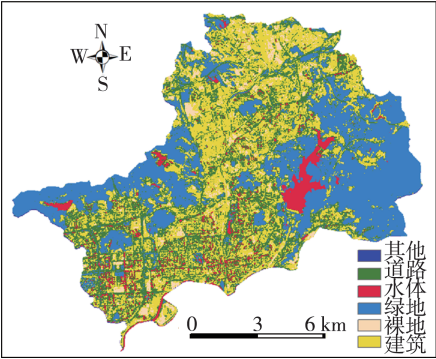
图 2 为深圳河流域下垫面数据。构建模型所需的高程数据可由地理空间数据云下载，精度为 30 m × 30 m。同时，使用 ArcGIS 水文分析工具对高程数据进行预处理，主要包括洼地填充等。处理后的数据基本可以满足研究区内涝分析的要求。土壤类型数据从寒区旱区科学数据中心下载获取，根据世界土壤数据库和美国 SCS 模型土壤分类标准^[18]，可将深圳河流域土壤分为 B、C、D3 类，其中 B 为砂土和少量砂壤土，透水性较好；C 为砂黏土、粉砂壤土和少量黏土，透水性中等；D 为黏土，透水性较差。土地利用类型数据通过遥感影像解译获得，遥感影像可由地理空间数据云下载，分辨率为 30 m × 30 m。



(a) 高程



(b) 土壤类型



(c) 土地利用类型

图 2 深圳河流域下垫面数据

Fig.2 Underlying surface data of the Shenzhen River Basin

根据研究需要将深圳河流域土地利用类型划分为建筑、绿地、水体、道路、裸地和其他共 6 类。参考与本区域气候环境相近的地区，根据土地利用类型和土壤水文分组分别赋值不同的曼宁系数 n ，建筑为 0.2，绿地为 0.08，水体为 0.015，道路为 0.05，裸地为 0.065，其他为 0.05。

使用 ArcGIS 对高程数据、土壤类型数据和土地利用类型数据进行整合，再由 BlueKenue 软件将研究区域划分为非结构化三角形网格，网格边长为 30 m，共计 477 797 个网格，240 570 个节点。模型边界条件设置为自由出流边界条件，即降雨过后的积水仅在重力作用下外排，假设初始地表无积水，库朗数设为 0.75。按照 SCS-CN 方法，参考文献[19]，考虑到深圳市地处东南沿海，气候温和湿润，前期土壤

含水量设为 AMC-II,即中等情况。模拟时长为 360 min,时间步长 0.5 s。为提高径流曲线数的准确性,结合土地利用类型和水文土壤分类结果确定径流曲线数,具体见表 1。

表 1 径流曲线数

Table 1 Values of runoff curve number

土壤类型	建筑	绿地	水体	道路	裸地	其他
B	90	61	98	98	83	80
C	92	74	100	98	88	88
D	94	80	100	98	90	97

2.3 模型验证

为验证模型的准确性和可靠性,根据收集到的实测降雨资料、积水资料对模型进行验证。选取 20180607 和 20180916 两场降雨进行模拟,将模拟结果与实际积水监测数据进行对比分析,积水监测点位置分布见图 3。降雨数据来源于流域内雨量站实测数据,积水数据由深圳市设立的积水监测设备实时收集,结果见表 2 和表 3。根据结果,模型模拟

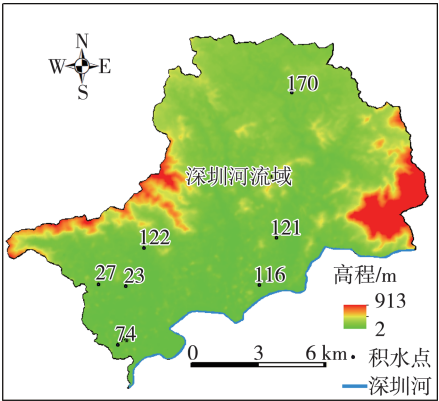


图 3 积水监测点位分布

Fig.3 Distribution of water monitoring points

表 2 20180607 验证结果

Table 2 Verification result of 20180607

积水监测站号	位置	实测积水深度/cm	模拟积水深度/cm	误差/cm
23	红荔路彩田路西	5	3.0	-2.0
27	新洲路福田中心	29	42.4	13.4
74	益田路福民路南	2	3.2	1.2
116	文锦南路	20	18.1	-1.9
170	金鹏物流园	40	48.0	8.0

表 3 20180916 验证结果

Table 3 Verification result of 20180916

积水监测站号	位置	实测积水深度/cm	模拟积水深度/cm	误差/cm
23	红荔路彩田路西	4	4.5	0.5
116	文锦南路	14	13.9	-0.1
121	爱国路高架西	20	17.8	-2.2
122	梅林街道北环大道	2	2.6	-0.6

得到的易涝点与实际易涝点位置基本吻合,表明该模型可较好地模拟研究区淹没情况;同时,两场实测降雨模拟所得的淹没水深与实际监测的淹没水深误差较小,表明该模型模拟精度较高。

3 深圳市内涝风险评估

3.1 积水深度、积水面积、流速分析

根据 GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》等设计规范并参考相关文献[20-22],将不同降雨情景下积水深进行等级划分。当积水深度小于 0.15 m 时,基本不会对行人和机动车通行产生影响,可认为没有内涝风险;当积水深度为 0.15 ~ 0.3 m 时,会影响行人通行,致使机动车行驶速度变缓,一般不会造成人员伤亡和财产损失,可认为低内涝风险;当积水深度为 0.3 ~ 0.5 m 时,对行人和机动车产生很大影响,可能造成人员伤亡和财产损失,可认为是中内涝风险;当积水深度大于 0.5 m 时,会影响日常生活,发生人员伤亡和财产损失的概率大,可认为是高内涝风险。图 4 为不同降雨历时下的积水深度,可见,随着降雨历时的增大,最大积水深度不断增加,在降雨历时分别为 30 min、60 min、90 min 和 120 min 时,最大积水深度分别为 0.71 m、0.80 m、0.90 m 和 1.12 m,积水深度峰值大约出现在降雨结束时刻。降雨结束后,水流在重力作用下向地势低洼的地方流动,使得积水深度减小,但会出现积水面积增大的情形。在不同降雨情景下,发生积水的位置具有一致性,主要集中在流域中部地区,主要是因为流域地势周边高中间低,水流易于在低洼处聚集导致。

表 4 为不同降雨历时下的积水面积峰值,可见,

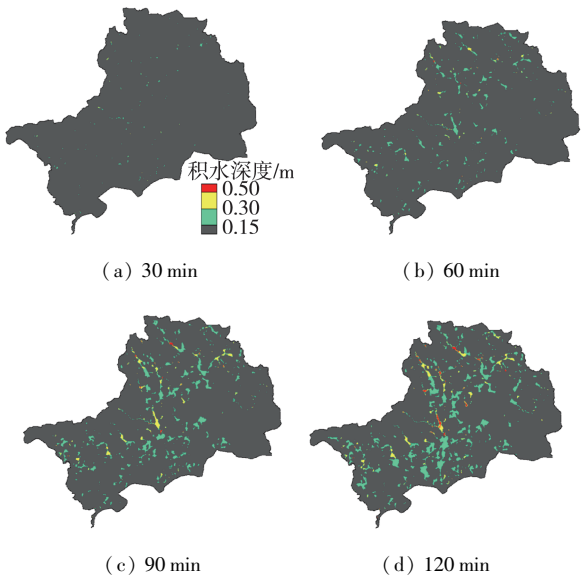


图 4 不同降雨历时下的积水深度

Fig.4 Ponding depth under different rainfall duration

表 4 不同降雨历时下积水面积峰值

Table 4 Peak of ponding area under different rainfall durations

降雨历时/ min	积水面积峰值/hm ²			占流域面积比例/%		
	积水深度 0.15~0.30 m	积水深度 0.30~0.50 m	积水深度大于 0.50 m	积水深度 0.15~0.30 m	积水深度 0.30~0.50 m	积水深度大于 0.50 m
30	13.81	1.28	0.35	0.0007	0.0001	0.0002
60	290.32	26.45	2.72	0.0153	0.0014	0.0001
90	652.41	123.02	12.67	0.0343	0.0065	0.0007
120	1068.81	183.31	31.91	0.0563	0.0096	0.0017

随着降雨历时的增加,不同积水深度对应的积水面积不断增大。降雨历时分别为 30 min、60 min、90 min、120 min 时,积水深度大于 0.5 m 的积水面积分别为 0.35 hm²、2.72 hm²、12.67 hm² 和 31.92 hm²。虽然积水深度大于 0.5 m 下的积水面积占流域面积比值较小,但随着降雨历时的增大,其增速较大,而且一旦出现此情形,会产生很大的危害,需要特别注意。

在进行城市洪涝分析时,通常对积水深度、积水历时和积水面积关注较多,对流速的分析相对较少。当地面产流以后,水的流动主要靠重力作用,水流方向和速度与地形坡度密切相关。图 5 为不同降雨历时下流速分布,可见,大部分区域流速均小于 0.2 m/s。随着降雨历时的增加,流速会相应增加,流速大于 0.2 m/s 的面积持续增大,最大流速出现在流域中部靠近边界的位置,此处地势高差大,当出现地面积水时,其流速相对较大。表 5 为不同降雨历时下最大流速和最大积水深度情况,可见,随着降雨历时的增大,流速的最大值也在不断增大,降雨历时为 30 min、60 min、90 min

表 5 不同降雨历时下最大流速和最大积水深度

Table 5 Maximum flow velocity and maximum ponding depth under different rainfall duration

降雨历时/ min	最大流速/ (m·s ⁻¹)	流速峰值 时刻/s	最大积水 深度/m	降雨峰值 时刻/s
30	0.90	1260	0.71	720
60	1.12	1800	0.80	1440
90	1.25	2700	0.90	2160
120	1.36	3420	1.12	2880

和 120 min 时,最大流速分别为 0.90 m/s、1.12 m/s、1.25 m/s 和 1.36 m/s,流速最大值出现的时刻并不是降雨峰值出现的时刻,而是出现在降雨峰值之后。

3.2 城市内涝风险评估

城市暴雨内涝会产生人员伤亡和财产损失,本文重点关注内涝对行人安全的影响。关于此方面,国内外学者开展了诸多研究,Foster^[23]测试了在水深 0.09~0.41 m、流速 0.76~3.12 m/s 条件下的男性儿童在水流作用下的稳定性问题;宋瑞宁等^[24]基于行人安全对城市内涝风险等级进行评估;Jonkman 等^[25]在水深 0.26~0.35 m、流速 2.4~3.1 m/s 条件下,对一名成年人在水流下的稳定性进行测试。本文借鉴国际上常用的洪水风险评价标准,主要考虑积水深度和流速 2 个因素来进行风险评估,具体计算公式为

$$R = d(v_1 + c) + f \quad (7)$$

式中: R 为风险等级; d 为积水深度, m; v_1 为流速, m/s; c 为常数,通常取 0.5; f 为水深危害参数。 $d \leq 0.15$ m 时, $f=0.5$; $d > 0.15$ m 时, $f=1.0$ 。

根据计算出的内涝风险指数,风险等级划分如下:当 $R \leq 0.75$ 时,属于极低风险区,区域内积水较浅,流速缓慢;当 $0.75 < R < 1.25$ 时,属于低风险区,对于易受灾体会产生一定影响;当 $1.25 \leq R < 1.5$ 时,属于中风险区,积水较深,流速较大,需尽量远离此区域;当 $R \geq 1.5$ 时,属于高风险区,极易造成人员伤亡和财产损失,应及时发布预警预告,做好应急救援措施。根据上述洪涝风险评估公式,对积水深度和流速进行叠加计算,得到不同降雨历时下内涝风险等级分布,见图 6。

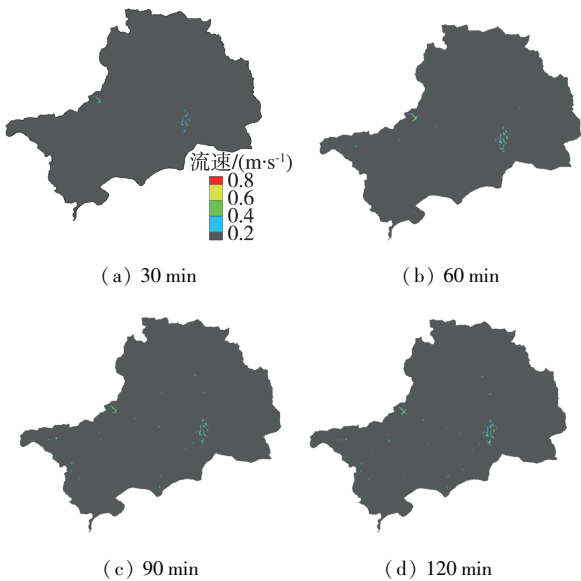


图 5 不同降雨历时下流速分布

Fig. 5 Distribution of flow velocity under different rainfall durations

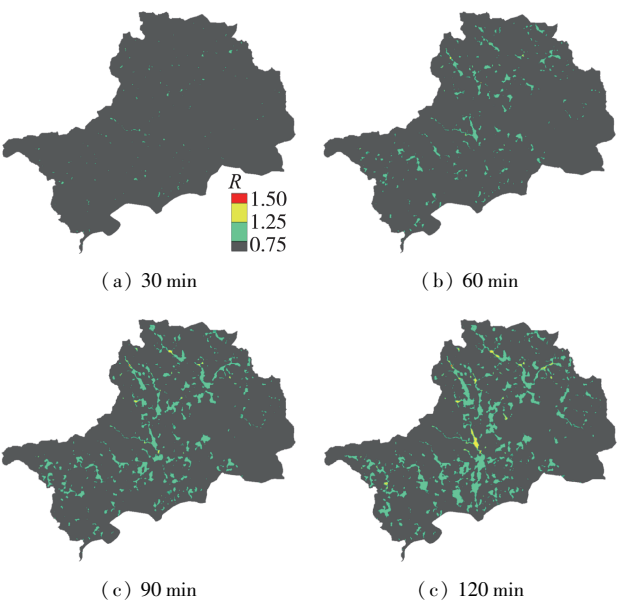


图 6 不同降雨历时下内涝风险等级分布

Fig. 6 Risk grade distribution of waterlogging under different rainfall durations

表 6 为不同降雨历时下内涝风险等级面积,可见,随着降雨历时的增大,极低风险区域占比逐渐减小,其他风险等级占比均出现不同程度增加。随着降雨历时的增大,地面积水范围不断增大,积水深度更深,流速加快,所以低风险、中风险和高风险区面积均不断增大。其中低风险区面积增加最多,随着降雨历时由 30 min 分别增加到 60 min、90 min、120 min,其面积分别增加 274.98 hm²、480.68 hm²和 444.68 hm²;中风险区面积增速最快,随着降雨历时由 30 min 分别增加到 60 min、90 min、120 min,其增加比例分别为 785%、497% 和 221%。在降雨历时超过 60 min 后,逐渐出现高风险区,高风险区面积相对较小;降雨历时为 90 min 和 120 min 时,面积分别为 0.61 hm²和 0.94 hm²,占流域总面积比例较小,但其危害性大,需重点关注。中高风险区主要集中在

表 6 不同降雨历时下内涝风险等级面积

Table 6 Waterlogging risk grade area under different rainfall durations

降雨历时/ min	面积/hm ²			
	极低风险区	低风险区	中风险区	高风险区
30	19 623.56	15.09	0.35	0
60	19 345.83	290.07	3.10	0
90	18 849.12	770.75	18.52	0.61
120	18 363.13	1 215.43	59.50	0.94

降雨历时/ min	占流域面积比例/%			
	极低风险区	低风险区	中风险区	高风险区
30	99.921	0.077	0.002	0
60	98.507	1.477	0.016	0
90	95.978	3.925	0.094	0.003
120	93.503	6.189	0.303	0.005

在流域中部,此处地势平坦,积水深度相对较大,且积水不易排出,导致积水历时和范围都比较大。

4 结 论

a. 阐述了 TELEMAC-2D 水动力模型的基本原理,构建深圳市深圳河流域城市洪涝风险评估模型,采用等效排水法对管网进行概化,同时对 20180607 和 20180916 两场实测降雨进行模型计算并与实测结果进行对比,结果表明所构建的模型具有可靠性和准确性。

b. 在降雨条件为 50 年一遇、雨峰系数为 0.4 的条件下,降雨历时分别为 30 min、60 min、90 min 和 120 min 的情景下对深圳河流域进行洪涝过程模拟。发现随着降雨历时的增大,流域内积水深度增大,最大积水深出现在降雨结束时刻;不同积水深度对应的积水面积不断增大,尤其是积水深度为 0.15 ~ 0.3 m 时,积水面积增加最大,积水深度大于 0.5 m 的积水面积占流域总面积比例较小,但此水深的出现危险性较大,需要重点关注,应及时发布预警预告信息,采取合理措施排走积水。

c. 对深圳河流域进行洪水风险分区,随着降雨历时的增大,低风险区、中风险区和高风险区均出现不同程度增加,其中,中高风险区主要集中在流域中部,此处积水较深,流速较大,很容易造成人员伤亡和财产损失。

参考文献:

[1] 王浩,梅超,刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. 水利学报, 2018, 48(9): 1009-1014. (WANG Hao, MEI Chao, LIU Jiahong. Systematic construction pattern of the sponge city[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 48(9): 1009-1014. (in Chinese))

[2] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))

[3] 宋晓猛,张建云,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 752-764. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II. urban stormwater modeling and management [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 752-764. (in Chinese))

[4] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 国民经济和社会发展统计公报[N]. 北京: 国家统计局, 2021

- [5] 陆海明,邹鹰,孙金华,等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护,2020,36(1):58-65. (LU Haiming,ZOU Yin,SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):58-65. (in Chinese))
- [6] 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. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):81-88. (in Chinese))
- [7] 黄绵松,杨少雄,齐文超,等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护,2019,35(5):13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):13-18. (in Chinese))
- [8] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6):528-533. (in Chinese))
- [9] 冯钧,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6):479-487. (in Chinese))
- [10] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建[Z]. 北京:住房和城乡建设部,2014.
- [11] 刘家宏,李泽锦,梅超,等. 基于 TELEMAC-2D 的不同设计暴雨下厦门岛城市内涝特征分析[J]. 科学通报,2019,64(19):2055-2066. (LIU Jiahong, LI Zejin, MEI Chao, et al. Urban flood analysis for different design storm hyetographs in Xiamen Island based on TELEMAC-2D[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(19):2055-2066. (in Chinese))
- [12] 李泽锦. 基于水动力模拟的城市洪涝及其对交通影响的动态评估[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2020.
- [13] 胡文燕,李梦雅,王军,等. 暴雨内涝影响下的城市道路交通拥挤特征识别[J]. 地理科学进展,2018,37(6):772-780. (HU Wenyan, LI Mengya, WANG Jun, et al. Urban traffic congestion caused by rainstorms and innudation[J]. Progress in Geography, 2018, 37(6):772-780. (in Chinese))
- [14] SU B, HUANG H, LI Y. Integrated simulation method for waterlogging and traffic congestion under urban rainstorms[J]. Nature Hazards,2016,81(1):23-40.
- [15] 梅超. 城市水文水动力耦合模型及其应用研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2019.
- [16] SEENATH A, WILSON M, MILLER K. Hydrodynamic versus GIS modelling for coastal flood vulnerability assessment; which is better for guiding coastal management [J]. Ocean & Coastal Management,2016,120:99-109.
- [17] MILLER N , CRONAHEY R G . Urban hydrology for small watersheds (revised 1985) [C] // Watershed Management in the Eighties. New York: ASCE, 2015.
- [18] 林美霞. 基于海绵城市建设的厦门城市暴雨内涝灾害风险研究[D]. 西安:西安科技大学,2017.
- [19] 肖以恒. 基于 GIS 支持下福州城区景观格局与地表径流量关系研究[D]. 福州:福建农林大学,2017.
- [20] 王慧斌,荣宏伟,王竞茵. 水力模型在城市内涝灾害风险评估中的应用[J]. 中国给水排水,2015,31(19):133-136. (WANG Huibin, RONG Hongwei, WANG Jingyin. Application of hydraulic model to risk assessment of urban waterlogging disasters [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(19):133-136. (in Chinese))
- [21] 维英,李明,李菁. 西安城市内涝分布特征及其与降雨量的关系[J]. 陕西气象,2014(2):17-20. (WEI Ying, LI Ming, LI Jing. Distribution characteristics of urban waterlogging and its relationship with rainfall in Xi'an[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2014(2):17-20. (in Chinese))
- [22] 王成坤,黄纪萍,曾胜,等. 基于积水特征和暴露脆弱性的城市内涝风险评估[J]. 中国给水排水,2019,35(5):125-130. (WANG Chengkun, HUANG Jiping, ZENG Sheng, et al. Urban flooding risk assessment based on coupling of waterlogging characteristics and exposed vulnerability[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(5):125-130. (in Chinese))
- [23] FOSTER D H. Australian rainfall and runoff [R]. Sydney: Institution of Engineers, 1987.
- [24] 宋瑞宁,任梦瑶,闫攀,等. 基于行人安全的城市内涝风险等级评估[J]. 给水排水,2021,57(2):40-45. (SONG Ruining, REN Mengyao, YAN Pan, et al. Urban waterlogging risk level assessment from the perspective of pedestrian safety[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(2):40-45. (in Chinese))
- [25] JONKMAN S N, PENNING-ROWSELL E. Human instability in flood flows [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(4):1-11.

(收稿日期:2021-09-15 编辑:王芳)