DOI:10.3969/j.issn.1672 - 1144.2019.03.043

基于高精度 MIKE 模型的居住小区雨水系统评价及内涝积水分析

杨　静,洪德松,张　斌
(新城市规划建筑设计股份有限公司 环境与基础设施研究中心, 广东 深圳 518172)

摘　要: MIKE FLOOD 是一款功能强大的水动力模型,常被用作对精度要求不高的市级或流域尺度的雨洪模拟。针对居住小区的重要性和小尺度性特点,以深圳某居住小区为例,基于 MIKE FLOOD 构建 1.5 m×1.5 m 精度的管网和地表耦合模型。模拟结果显示,有 33%的管网排水能力小于 1 a,54.5%的管网排水能力大于 5 a。模拟 50 年一遇暴雨条件下,区域内共有 6 处积水情况,其中最大积水深度高于 1.2 m,且最大积水时长大于 19 h。研究结果,为工程提供科学的决策依据。

关键词: 居住小区;MIKE 模型;雨水系统;积水模拟
中图分类号: TU99　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1672—1144(2019)03—0236—06

Rainwater System Evaluation and Analysis of Waterlogging in Residential Area Based on High Precision MIKE Model

YANG Jing, HONG Desong, ZHANG Bin
(*New City Planning, Architecture and Design Co., Ltd. Environment and Infrastructure Research Center, Shenzhen, Guangdong* 518172, *China*)

Abstract: MIKE FLOOD, as a powerful hydrodynamic model, has been widely used as a rain or flood simulation at a municipal or basin scale with less stringent accuracy requirements. Aiming at the importance and small-scale characteristics of the building community, a residential area in Shenzhen is taken as an example to build a 1.5 m × 1.5 m precision pipe network and surface coupling model based on Mike Flood. The simulation results show that 33% of the pipe network drainage capacity is less than 1 year, and 54.5% of the pipe network drainage capacity is greater than 5 years. Under the simulated 50-year rainstorm conditions, there are six water accumulation conditions in the region, the maximum depth of which is higher than 1.2 m, and the maximum water accumulation time is longer than 19 hours. The research results could provide scientific decision-making basis for engineering.

Keywords: residential area; MIKE model; rainwater system; flood simulation

快速的城市化效应就像催化剂,加速了水文循环。这使得强降雨事件频发,城市内涝风险不断攀升[1-3]。雨水管网对于暴雨的脆弱性和区域内的积水风险,一直以来被看作不确定性问题[4-5]。为分析此类问题,一系列的水文水动力模型随之发展,如 InfoWorks ICM、PCSWMM、MIKE 等[6-8]。MIKE 模型作为一个较为成熟的雨洪模型,在工程和学术领域均得到了广泛的应用。由于 MIKE 模型包含多个计算模块,其应用方向也不尽相同。一些研究者单纯利用 MIKE 模型的一个模块进行建模,如郜国明等[9]利用 MIKE21 模块模拟分析了河道溃坝后河水向城市内部的演进过程。陈璇等[10]基于 MIKE11 构建流域河道模型,实现洪水的储蓄和调度。谢家强等[11]通过 MIKE URBAN 重点研究了雨水管网在多种降雨下的表现。另一方面,一些学者则将 MIKE 模型的多个模块进行耦合,进行 1D - 2D 动态水文分析。如姚斯洋等[12]将 MIKE 11 和 MIKE 21 模块耦合,分析了多情景下的河岸周边区域的洪水风险。任梅芳等[13]在 MIKE FLOOD 中将 MIKE URBAN 和 MIKE 21 耦合,并针对立交桥这一典型城市区域进

收稿日期:2019-03-06　　**修稿日期:**2019-04-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178321)
作者简介:杨　静(1992—),女,湖南永州人,硕士,主要从事海绵城市和排水系统优化研究。E-mail:1927812860@qq.com

行内涝积水分析。

上述文献表明,基于 MIKE FLOOD 耦合一维管网和二维地表建模的研究相对较少,且研究者们多以流域尺度和行政区为研究对象。这可能是因为较大区域的管网涉及到较多数据处理难度,此外,二维地表模型对地形精度的要求较高。因此,模型工程师在构建 1D – 2D 耦合模型时,其积水栅格的精度往往难以保障(像元大小一般在 10 m 以上)。居住小区是城市的重要组成部分,其区域重要性程度较高。因此,需对其进行雨水系统的安全性分析和积水风险分析。以往的研究多以 SWMM 或 MIKE URBAN 模型作为雨水系统的安全性分析的工具,却无法模拟小区内的实际积水情景。借助于居住小区尺度小的特点,通过精细划分实测高程点,高精度的二维地表模型有实现的可能。因此,本文基于 MIKE FLOOD 构建居住小区的高精度 1D – 2D 耦合模型。以期提供居住小区耦合建模的思路,以及进一步为小区雨水系统提供安全性评估和积水风险分析。

1　MIKE 模型原理

1.1　MIKE URBAN

MIKE URBAN 是城市管网分析的重要工具,包括地表径流计算、管网汇流计算两个模块。MIKE URBAN 假定地表和管网的水流为均质且不可压缩流体,并认定水流不同时进行二维流动。所以,MIKE URBAN 本质上是一个一维模型。以质、能守恒方程为前提,其核心控制方程为圣维南方程[14]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial A}{\partial t} + \dfrac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \dfrac{\partial Q}{\partial t} + \dfrac{\partial(\alpha \dfrac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA\dfrac{\partial h}{\partial x} + \dfrac{gQ}{C^2}\dfrac{|Q|}{AR} = 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中:Q 为流量;q 为侧流量,m^3/s;α 为动量修正系数;R 为水力半径,m;t 为时间,s;A 为流域单元断面面积,m^2。

1.2　MIKE 21

MIKE 21 模型是二维地表模型,可以模拟水流在地表的二维流动。MIKE 21 模型建模时,需将二维地表概化为三角形或矩形栅格,以建立数字高程模型 DEM。在水动力计算时,忽略水流跌落的重力加速度,依据纳维 – 斯托克方程求解模型,方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \tag{2}$$

动量方程:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t} + u\dfrac{\partial u}{\partial x} + v\dfrac{\partial u}{\partial y} + g\dfrac{\partial z}{\partial x} + g\dfrac{u\sqrt{u'^2 + v'^2}}{C^2 h} = \\ v_t(\dfrac{\partial^2 u'}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 u'}{\partial y^2}) \\ \dfrac{\partial v}{\partial t} + u\dfrac{\partial v}{\partial x} + v\dfrac{\partial v}{\partial y} + g\dfrac{\partial z}{\partial y} + g\dfrac{v\sqrt{u'^2 + v'^2}}{C^2 h} = \\ v_t(\dfrac{\partial^2 v'}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 v'}{\partial y^2}) \end{cases} \tag{3}$$

式中:u 为 x 方向流速;v 为 y 方向流速;z 为水深;h 为水位;u'、v' 为流速在 x、y 的分量;g 为重力加速度;v_t 为黏性系数。

1.3　MIKE FLOOD 耦合模型

MIKE URBAN 与 MIKE 21 独立运行后,可在 MIKE FLOOD 中通过人孔连接完成一维管网和二维地表模型的耦合,实现水量的动态交换过程。

2　研究区及模型构建

2.1　研究区自然概况

2.1.1　研究区下垫面分析

研究为某居住小区,位于深圳市盐田区,占地面积达 61 729 m^2。根据现状下垫面的特点,将区域下垫面分为六类:屋面、水体、铺装、绿地、裸土、路面,见图 1。经采用 GIS 数据功能,对不同下垫面进行分割和分类后解析,绿地(包括生态草坡和绿地)面积约为16 227 m^2,屋面面积为 20 182 m^2,裸土面积(包括土堆和沙丘)为 969 m^2,铺装面积为 32 872 m^2,路面面积(包括场地道路和运动场)为 10 959 m^2,水体面积为 1 576 m^2。其中绿地占比为 19.60%,屋面占比为 24.37%,裸土占比为 1.17%,铺装占比为 39.60%,路面占比为 13.23%。

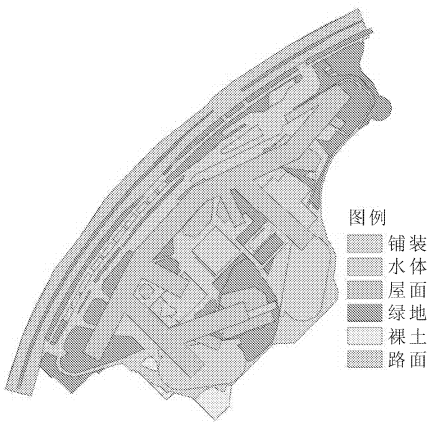
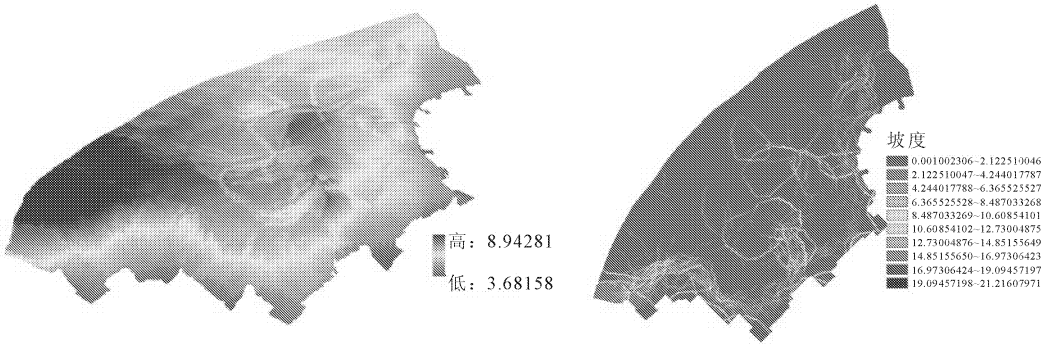


图 1　研究区下垫面解析

2.1.2 研究区竖向分析

为获取研究区的高精度 DEM 模型,本项目前期对居住小区进行了高程布点和高程实测。随后,在 ArcGIS 中利用克里金插值法将高程点制作成 1.5 m ×1.5 m 的高精度栅格。地块的竖向高程对于地表的产汇流过程和 MIKE 模型耦合时的积水二维演进都有着极强的影响,坡度在一定程度上可以反映地表径流的流速和流向。因此,很有必要对研究区进行竖向高程分析和坡度分析。图 2(a)为研究区的 3D 高程图,不难发现居住小区的整体地势由西北偏向东南,东南区域由于毗邻人工湖,其高程在 3.68 m 左右。研究区最大高程为 8.94 m,绝大部分区域位于西南角。借助于 3D ANALYST 工具,可得到研究区的坡度图,见图 2(b)。坡度图表明,研究区的的坡度起伏并不是很大,大多数区域的坡度在 6.36° 以下。从图 2(b)还可以看出研究区有较多条状或环状坡度线,这可能是由于小区内存在多处景观造坡、山体防护挡墙以及下凹田径场等变坡处。总的来说,借助于高精度 DEM 模型,研究区的竖向地形得以被具体化展现。



(a) 3D高程图 (b) 坡度图

图 2 研究区竖向分析

2.2 一维管网模型构建

2.2.1 设计降雨

以芝加哥雨型作为设计降雨雨型,采用深圳盐田区最新的暴雨强度公式[4]计算:

$$q = \frac{1450.293(1 + 0.5941\mathrm{g}\ P)}{(t + 11.13)^{0.55}} \tag{4}$$

式中:q 为雨强,L/(s·hm^2);t 为降雨持续时间,min;P 为重现期,a。

本次建模取雨峰系数为 0.35,降雨持续时间为 120 min。

2.2.2 管网概化

本文用于建模的管网数据来源为研究区的 CAD 施工图,在实际施工过程中,各节点和管道可能和设计图纸存在偏差。为此,项目组在建模前对居住小区内的管网位置、管径和检查井井深等情况进行了实地调研与修正。经统计,研究区现有排水管道 8 733 m,其中雨水管道有 5 865 m,污水管道有 2 868 m。建模前,需先在 ArcGIS 中将 CAD 格式的管网数据转换为 shp 数据并建立管网、节点的建模参数属性表。随后,在 MIKE URBAN 中将管网系统的空间和数据属性一一对应完成 GIS 数据向 MIKE 数据的转换。最终,将研究区的管网概化为 711 条管段,检查井共计 132 个。

2.2.3 子汇水区划分

MIKE URBAN 提供了子汇水区自动划分的功能,其划分法以泰森多边形为原理。自动划分法虽省去了构、建筑物轮廓勾勒的繁琐步骤,但由于缺失了下垫面属性,使得子汇水区的径流系数、不渗透率等参数难以估计。为此,本文采用自动加手动划分的方式,在泰森多边形划分的基础上,将屋顶、运动场等下垫面进行手动划分。此外,模型运行前,还需计算各子汇水区的不渗透率。在下垫面分析中,研究区用地被分为六类,因此,在 URBAN 模型中,将屋面、道路、铺装、裸土、绿地、水体的不渗透率依次设为 95%、85%、60%、45%、15%、0%,并完成子汇水区不渗透率的加权平均计算。最终,研究区共概化为 580 个子汇水区,子汇水区和管网概况如图 3 所示。

2.3 二维地表模型构建

二维地表模型以 DEM 为基础,但 MIKE 无法识别 GIRD 格式的 DEM 数据。因此,需要在 ArcGIS 中将 GRID 高程先转换 ASCII 码,再利用 MIKE ZERO 将 DEM 输出为 dfs2 格式的 MIKE21 地形文件。考虑到建筑物对于二维水流的阻碍作用,以及道路对于地表径流的行泄能力,将建筑物图层和道路图层以自然地形为底图进行叠加。最终,建筑物图层在底

图的基础上被设定抬高为 30 m,道路图层设定降低 0.15 m。模型的精度依然为 1.5 m×1.5 m。

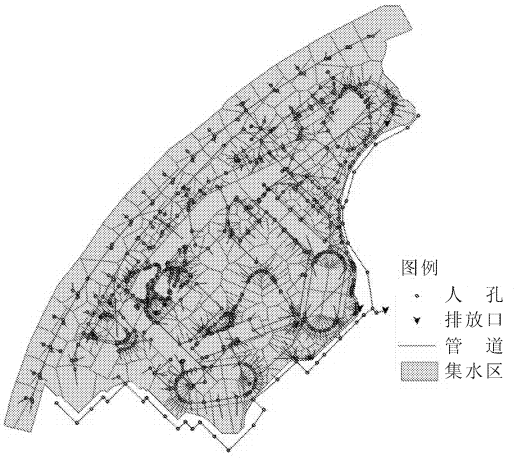


图 3　管网及子汇水区

2.4　模型校验

采用文献[15]的方法对耦合模型进行校验,降雨数据来自盐田区“20180606”场次降雨,总降雨量为 432.5 mm。校验结果显示研究区 3 个排放口出流过程线的平均相对误差分别为 6.68%、7.21%、8.56%,纳什系数分别为 0.81、0.79、0.77;二维积水深度的平均相对误差为 12.36%。校验数据显示耦合模型具备良好的拟合精度,可进行后续分析工作。

3　结果与分析

3.1　管网及径流分析

3.1.1　雨水径流分析

由于市政管网设计重现期一般不超过 5 a,所以在进行管网及径流分析时,以 1 a、3 a 和 5 a 降雨作为边界降雨条件。分析径流模型模拟结束后,可以获取每个子汇水区的最大、最小和汇流累积量等统计报告。通过结果加载、计算工具得到每个子汇水区的径流系数。表 1、图 4 是小区内的雨水径流统计数据和各汇水区的径流系数。

经过模拟分析,子汇水区的径流系数随着降雨量的增加而增大。但笔者发现若采取同样的径流系数分级间隔点对各汇水区进行分类,研究区的径流系数分布图几乎无变化。故本文以 5 a 一遇降雨为例,采用自然断点法对径流系数进行分类评估并作出图 4。从图 4 可以看出,研究区大部分汇水区被分类为第 4 级,即径流系数在 0.49 ~ 0.64 之间。最小一级的径流系数出现在研究区的西南角和东北角,在 0.03 ~ 0.24 之间,说明这两个片区的下垫面类型较为一致且可能该区域植被覆盖率较高。建筑物由于屋面良好地抗渗性,被分类为第 5 级径流系数,其数值高于 0.65。

为进一步分析系统雨水的径流情况,笔者统计了径流参数,见表 1。

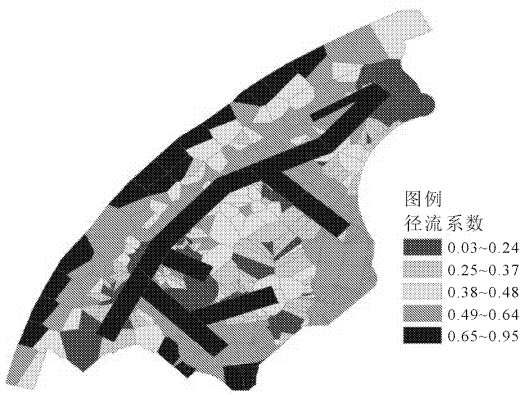


图 4　各子汇水区的径流系数分类

表 1　系统雨水径流统计

重现期 /a	降雨深度 /mm	最大径流流量 /($m^3 \cdot s^{-1}$)	总储水量 /mm	总入渗量 /mm	综合径流系数
1	82.53	1.26	0.833	7.950	0.47
3	89.86	1.68	1.124	8.108	0.52
5	99.18	2.25	1.313	8.165	0.62

由表 1 可以看出,各指标均与重现期呈正相关关系。虽然降雨重现期间隔均为两年,但各指标的增长幅度却不均匀。其中从 1 a 到 3 a 以及 3 a 到 5 a,系统最大径流量的增幅分别为 33.33%、25.33%,总储水量的增幅分别为 25.89%、14.39%,总入渗量的增幅分别为 1.95%、0.70%,综合径流系数的增幅分别为 9.62%、16.13%。上述数据表明,仅有综合径流系数的第二次增幅大于第一次增幅,说明 3 a 以后,大多数子汇水区的入渗和储水量已达到饱和,地表径流量明显增多。特别是总入渗量,在各重现期下,增幅均在个位数以内。总储水量第一次增幅与第二次增幅之差也达到 11.60%,说明 3 a 一遇降雨时,地表洼地蓄水也基本快要达到最大值。

3.1.2　管网排水能力评估

管网排水能力评估,对后续易涝点原因分析及采用何种工程措施有着重要的意义。本论文以管道最大充满度作为依据进行评估。当管道最大充满度大于 1 时,则认为不满足管道排水设计能力;当管道最大充满度小于等于 1 时,认为管道能满足排水设计能力。采用不同重现期 1 a、3 a 和 5 a 的降雨来评估管道的排水能力,并将管网的排水能力分为 4 级,

见图 5。管网的排水能力统计见表 2。

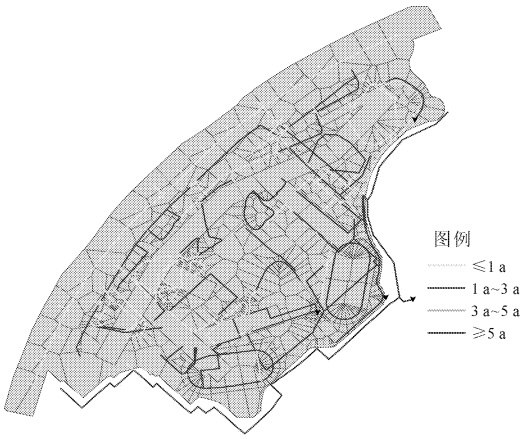


图 5 管网排水能力图

表 2 管网排水能力一览表

排水能力/a	≤1	1~3	3~5	≥5	合计
管长/m	2427	814	109	4297	7437
占管网比例/%	33.0	11.0	1.5	54.5	100.0

由图 5、表 2 可以看出,研究区大部分管网的设计重现期超过 5 a,其百分比为 54.5%。5 a 以上重现期的管网主要集中在排放口附近,说明本小区在设计规划阶段考虑了排放口附近的排水负荷,对管网的设计重现期留有余地。此外,其余地区也有一些散乱的 5 a 以上管网,这可能是由于管网衔接的汇水区径流量不大或管网坡度较大,排水能力较好。除 5 a 以上管网外,小于等于 1 a 重现期管网的比重也较大,为 33%。这表明研究区的管网规划不均衡,呈现两极分化特征。因为存在较多瓶颈管网,整体的雨水系统极易出现卡脖子现象。由表 2 还可以看出,3 a~5 a 的管网的比重极小,为 1.5%,这表明研究区各设计重现期的管网没有一个良好的过渡。

3.2 研究区积水分析

3.2.1 积水深度分析

低重现期下,管网节点的溢流情况还尚不明显。但当研究区遭遇 50 a 暴雨时,节点已几乎全部超载。故本项目以 MIKE FLOOD 平台为基础,将一维排水管网模型(MIKE URBAN)与二维地表径流模型(MIKE 21)耦合,且认为地表积水是管网无法排除而溢流至地表所产生的。积水模拟分析时,以 50 a 暴雨为例,并在 MIKE FLOOD 中将模拟时长设为 24 h。研究区的积水分布图如图 6 所示。

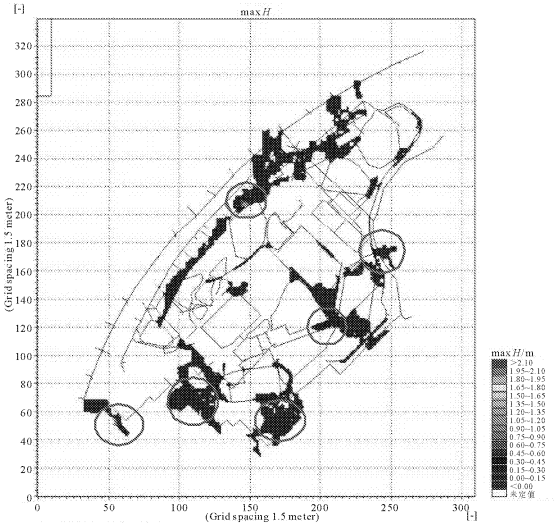


图 6 研究区积水深度(单位:m)

从最大积水深度成果图可以发现,地表积水点或区域多出现在某些道路铺装及沿线、地势低洼等区域。淹没区域大部分集中在中下部,其原因在于部分区域存在地势相对低洼,管径偏小、逆坡等现象,更容易产生积水。研究区共有六处积水深度在 0.3 m 以上的区域,这些积水多数是由于地势低洼且管径偏小的原因造成。特别地,研究区北部某一区域积水深度在 1.2 m 以上。经过管网的纵断面分析和实地调研,发现该区域的管网逆坡现象严重且排水极度不畅。在坡度和地势的双重作用下,致使该区域积水最为严重。从整体上来看,研究区虽局部积水严重,但并未发生大片区的范围性积水。临近管网排放口一带的积水面积较大,但积水深度均在 0.15 m 以下,对车辆和行人的出行影响并不大。

3.2.2 积水时长分析

积水时长反映了积水的持续性作用,图 7 给出了研究区的积水时长分布。

由图 7 可以发现:最大积水时长和最大积水深度的时空分布并不一致。也就是说,积水深度大的区域积水时长并不一定大。如图 6 中最大积水深度大于 1.2 m 的区域,其积水时长仅为 9.0 h~11.0 h 之间,而最大积水深度出现在其东北侧的区域。这说明积水深度大的局部管网虽瞬时溢流量大,但持续泄流能力也可能较大。从整体上来看,研究区的的积水时长多在 10 h 以下,部分区域积水时长在 19 h 以上。其中东北部区域的积水时长整体高于其他区域,可能是由于该区域不渗透率较高和管网密度偏小的缘故。

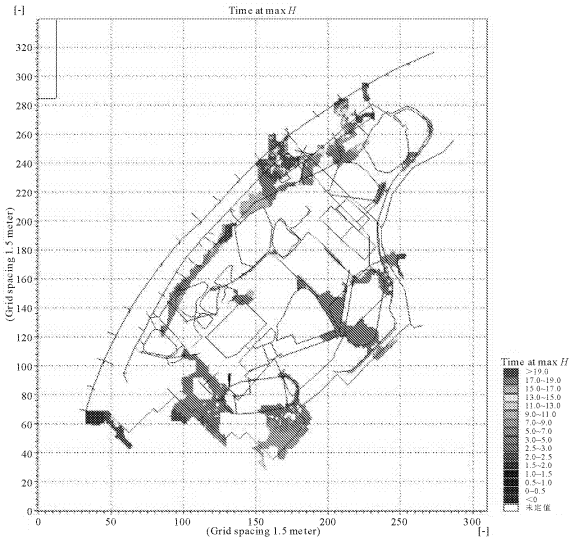


图 7　研究区积水时长(单位:m)

4　结　语

本文以高精度 MIKE 模型构建了居住小区尺度的 1D－2D 耦合模型,并以此为基础分析了研究区管网的排水能力和地表积水情景。得出以下结论:

(1) 高精度 MIKE 模型适用于居住小区尺度的雨洪模拟,但需以高精度的数字高程模型(DEM)为基础。为此,需进行精细的前期高程布点和测量工作。由于小区车道路的最小宽度为 3.5 m,建议 MIKE 模型的栅格像素元控制在 3.5 m×3.5 m 以下。

(2) MIKE 模型能够真实地反映研究区的管网输送负荷,进而协助工程师和科研工作者们在规划、改造阶段进行管网排水能力分析。本案例模拟结果显示,虽然半数以上管网的设计重现期大于等于 5 a,但整体的排水管网设计得并不均衡,存在大量卡脖子管网。

(3) 研究区在 50 a 的二维淹没模拟结果显示,研究区多数区域积水深度在 0.3 m 以下,且积水时长多在 10 h 以下。小区整体内涝风险不大,但局部区域的积水深度高度 1.2 m 以上,积水时长也接近 24 h,可借助 MIKE 模型进行下一步的改造方案设计和结果分析。

参考文献:

[1] 陈　扬.南京市暴雨地表产流模型研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(1):102-104.

[2] 王志强,刘邑婷,左亚会.绿色建筑雨水资源的利用[J].水利与建筑工程学报,2011,9(5):108-112.

[3] Singh P, Sinha V S P, Vijhani A, et al. Vulnerability assessment of urban road network from urban flood[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018(28):237-250.

[4] Behzad Jamalia, Roland Löwec, Peter M. Bachade, et al. A rapid urban flood inundation and damage assessment model[J]. Journal of Hydrology, 2018,564:1085-1098.

[5] 王晓霞,徐宗学.城市雨洪模拟模型的研究进展[C]//中国水利学会 2008 学术年会论文集.北京:中国水利学会学术年会,2008.

[6] 周小飞.基于 Mike Flood 的运城市内涝模拟与风险评估[D].西安:西安理工大学,2017.

[7] 李帅杰.数学模型在城市排水防涝综合规划中的应用[J].中国给水排水,2017,33(15):98-103.

[8] 朱颖蕾,于永强,俞芳琴,等.基于 MIKE21 和 MIKE Urban 耦合的湖区平原城市内涝模拟应用研究[J].中国农村水利水电,2018(10):177-181,185.

[9] 郜国明,李书霞,郭晓明,等.黄河濮阳段防洪保护区洪水风险分析[J].人民黄河,2018,40(8):36-38,43.

[10] 陈　璇,杨根林,杨红卫.基于 MIKE11 模型的秦淮河流域洪水调度方案[J].水电能源科学,2019,37(1):70-73.

[11] 谢家强,廖振良,顾献勇.基于 MIKE URBAN 的中心城区内涝预测与评估——以上海市霍山－惠民系统为例[J].能源环境保护,2016,30(5):44-49.

[12] 姚斯洋,刘成林,魏博文,等.基于 MikeFlood 的组合情景洪水风险分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):61-69.

[13] 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.

[14] 王洪祥.圣维南方程组在水文测验上的应用[J].江苏水利,1997(A03):52-58.

[15] 蔡　甜,詹　健,肖存艳,等.基于 SWMM 模型的不同气象条件下城市雨水径流污染特性分析[J].中国农村水利水电,2017(11):63-67.