

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221144

基于 Infoworks ICM 模型的沿海城市暴雨内涝分析

封天雨^{1a,1b}, 雷晓辉^{1a,2}, 王家彪³, 张钰彬^{1a,1b}

(1. 河北工程大学 a. 水利水电学院; b. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 针对沿海城市特大暴雨及其引发的城市内涝问题,以福州市为例,构建了基于 Infoworks ICM 的城市一维排水管网和二维陆面水动力精细化耦合模型,并将该模型应用于福州市古田路片区 2021 年 8 月“卢碧”台风暴雨内涝分析,验证了模型模拟精度较高,进而基于此模型,分析了不同重现期下古田片区暴雨内涝过程,提出了两种“海绵化”改造方案并模拟其对研究区暴雨内涝的缓解效果,发现增大管径更有利于改善研究区内涝现状。研究成果可用于准确计算福州市城区地下排水和陆面积水过程,为沿海城市防洪排涝实时决策提供技术支持。

关键词: Infoworks ICM; 城市内涝; 精细化模型; 成因分析; 海绵措施

中图分类号: TV122; TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)06-0064-05

1 概况

福建省福州市地处中国东南沿海,其江北片区是福州市开发强度最大的主城区,该区域东西北三面环山,南面临江,总面积 159.77 km²[1]。福州市是典型的海洋性亚热带季风气候,由于台风的强烈影响,每年 7~9 月是台风活动期,年均台风直接登陆次数为 2 次。台风引发的暴雨天气,给城区带来严重内涝,交通堵塞乃至瘫痪,也造成了巨大的经济损失。构建精细化城市暴雨内涝模型,围绕内涝灾害预警预测、风险评估和调度决策等开展深入研究,是实现城市防涝减灾的重要举措[2-4]。2006 年,刘俊等[5]基于 SWMM,建立了适合上海市区雨水径流、排水及防洪管理的城市雨洪管理模型;2017 年,黄国如等[6]以海口市主城区为例,构建了基于 Infoworks ICM 的城市综合流域排水模型,模拟和评估了研究区排水管网系统在不同设计重现期下的排水能力和积水深度;2020 年,王盼等[7]构建了基于 MIKE 11、MIKE FLOOD、MIKE URBAN 的一维水动力模型和管道水流耦合模型,模拟了城市设计洪水。综合来看,现有研究主要应用雨洪模型模拟城市

内涝积水过程,对排水管网尤其是其溢流过程存在不同程度的简化,各模型模拟精度差异较大,现有模型应用于极易受极端天气影响的沿海城市,预测精度普遍偏低,导致在遇到严重的洪涝灾害时难以提前制定可靠的应急预案。因此,本文基于 Infoworks ICM 构建了一、二维精细化耦合的福州市城市洪涝模型,分析不同降雨情景下管网排水能力及内涝积水情况,以为城市制定防洪排涝调度方案提供理论支撑。

2 研究区域及研究方法

2.1 研究区域

福州市江北主城区古田路片区地处福州市鼓楼区,位于琼东河以西、安泰河以南、东西河以北,由 3 条城区内河环绕。古田路片区靠近“军门社区”雨量监测站,附近有 3 个河道水位测站,区域内有 3 个积水测站、5 个雨水井井下液位测站。研究区位置及各测站分布情况见图 1。

2.2 研究方法

流域综合排水模型 Infoworks ICM 集成了城市陆面、地下所有雨水系统,并基于一、二维水

收稿日期: 2022-05-28, **修回日期:** 2022-08-16

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3001405);广东省区域联合基金—青年基金项目(2020A1515110906);国家自然科学基金青年基金项目(52109047)

作者简介: 封天雨(1998-),女,硕士研究生,研究方向为水资源调度,E-mail:1849711826@qq.com

通讯作者: 王家彪(1990-),男,讲师,研究方向为水文水资源,E-mail:wangjb35@mail.sysu.edu.cn

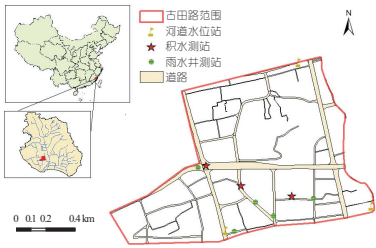


图 1 研究区位置及各测站分布情况

Fig. 1 Location of study area and distribution of gauging stations

动力方程实现全城市雨水系统的动态模拟,可用于分析城市积水、河道溢流等诸多问题^[8,9]。基于 Infoworks ICM 构建精细化城市内涝模型,即首先构建产汇流与一维排水管网耦合模型,通过地表产汇流模型计算汇水区汇聚的水量过程,模拟排水管网内水流运动过程,然后构建二维城市陆面水动力模型,将一维精细化管网模型与二维城市陆面水动力模型耦合,最终实现精细化内涝模拟。

2.2.1 一维排水管网模型

Infoworks ICM 提供了多种陆面产汇流模型,采用霍顿下渗和固定径流模型耦合 SWMM 计算产汇流。

通过求解一维圣维南方程组计算管网汇流,公式分别为:

$$\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0 \quad (2)$$

式中, A 为管道断面面积, m^2 ; t 为时间, s ; Q 为流量, m^3/s ; x 为沿水流方向管道长度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为水深, m ; S_0 为管底坡度; K 为流阻系数。

2.2.2 二维城市陆面水动力模型

建立二维陆面水动力模型,并将其与一维管网模型耦合,可模拟管网与地表的复杂水量交换过程。二维模型通过求解浅水流方程组实现,公式分别为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q_{1D} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = S_{0,x} - S_{f,x} + q_{1D}u_{1D} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = S_{0,y} - S_{f,y} + q_{1D}v_{1D} \quad (5)$$

式中, h 为水深, m ; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速分量, m/s ; $S_{0,x}$ 、 $S_{0,y}$ 分别为 x 、 y 方向上的底

坡分量; $S_{f,x}$ 、 $S_{f,y}$ 分别为 x 、 y 方向上的摩擦分量; q_{1D} 为单位面积的出流量, m/s ; u_{1D} 、 v_{1D} 分别为 q_{1D} 在 x 、 y 方向上的速度分量, m/s 。

3 模型率定及验证

3.1 研究区模型构建

利用福州市古田路片区雨水点和雨水线原始数据进行排水管网建模分析,并根据历史积水点范围和实际积水情况对原始数据进行局部处理,经处理后共有 1 878 个排水管网节点、20 个排水口和 1 878 条管道。考虑河道和主干道对汇水水流的阻断作用,根据河道和道路分布,划分不同的汇水区,并根据排水口与排水管网节点的对应关系手动调整各子汇水区。最终,得到 1 878 个子汇水区。

在排水管网模型的基础上构建二维陆面水动力模型,实现一、二维的耦合。通过 GIS 技术可去除房屋等不透水区域的影响,并充分利用人工测绘的雨水井顶部高程数据和道路区域数据修正地形,提升研究区地表高程精度,然后制作研究区 DEM 文件并导入 Infoworks ICM 构建地面 TIN 模型。最后,将 2D 区间内雨水井的洪水类型设置为 2D 即可实现一维排水管网模型与二维城市陆面水动力模型的耦合,完成内涝模型的构建。

3.2 管网模型率定

将 2021 年 8 月 5 日发生的“卢碧”台风两场降雨数据(表 1)作为一维排水管网模型的输入条件,选定下游各排水口东西河的水位过程线作为水位边界,调整模型参数使测站点对应雨水井井下液位模拟值与实测值尽可能相等。

表 1 “卢碧”台风两场降雨基本信息

Tab. 1 Basic information of two rainfall events of “Lubi” typhoon

| 降雨 编号 | 开始 时间 | 结束 时间 | 降雨总 量/mm | 最大 1 h 降 雨量/mm | 平均雨强 ($mm \cdot h^{-1}$) |
|----------|---------------|---------------|-------------|-------------------|-------------------------------|
| 降雨 1 | 8 月 5 日 09:00 | 8 月 6 日 00:00 | 100.4 | 75.0 | 6.7 |
| 降雨 2 | 8 月 6 日 00:00 | 8 月 7 日 14:00 | 143.6 | 40.8 | 3.8 |

以五一广场周边雨水井测站为例,通过参数率定后,得到“卢碧”台风两场降雨中实测井下液位与模拟液位对比情况见图 2。由图 2 可看出,在降雨 1 中,模型模拟五一广场周边井下液位峰值时间误差为 0 min,峰值大小误差为 0.2 m,相对误差为 15.0%, N_{NSE} 为 0.93;在降雨 2 中,模型峰值时间误差为 0 min,峰值大小误差为 0.06 m,相对误差为 3.0%, N_{NSE} 为 0.94。模型

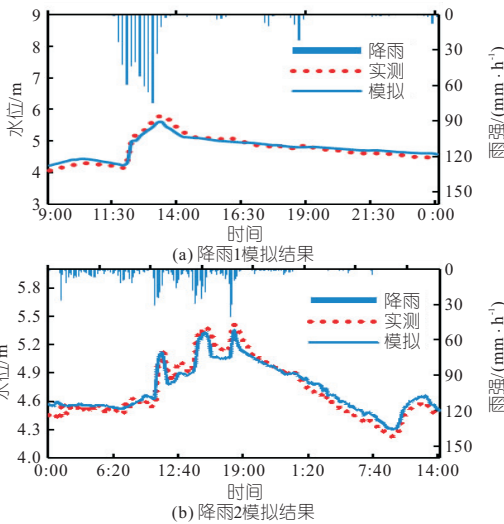


图 2 模型模拟五一广场周边井下液位与实测液位对比
Fig. 2 Comparison of measured liquid level and simulated underground liquid level around Wuyi Square

结果拟合度较高,模拟效果较好。

采用纳什效率系数 (N_{NSE}) 对率定模型进行评价,并通过对比分析峰值和峰现时间,进一步阐述模型的精确性。最终得到研究区两场降雨中各雨水井测站模拟井下液位结果见表 2。

表 2 “卢碧”台风两场降雨中模型模拟古田路片井下液位结果

Tab. 2 Simulation results of underground liquid level in Gutian road section during two rainfall events of “Lubi” typhoon

| 井下液 位测站 | 降雨 场次 | 开始 时间 | 结束 时间 | 峰值 /m | 峰现 时间 | 峰值相 对误差/% | 峰现时间 误差/min | N_{NSE} |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------------|-----------|
| 乌山路 | 降雨 1 | 12:00 | 14:10 | 7.62 | 13:20 | 24.0 | 10 | 0.63 |
| | 降雨 2 | 17:00 | 19:30 | 7.28 | 18:00 | 24.0 | 0 | 0.64 |
| 新权南路 | 降雨 1 | 12:00 | 14:10 | 6.79 | 13:10 | 2.0 | 10 | 0.98 |
| | 降雨 2 | 17:00 | 16:00 | 6.67 | 18:00 | 2.0 | 0 | 0.96 |
| 五一广场周边 | 降雨 1 | 12:00 | 14:10 | 5.80 | 13:20 | 15.0 | 0 | 0.93 |
| | 降雨 2 | 17:00 | 19:30 | 5.41 | 18:00 | 3.0 | 0 | 0.94 |
| 广大路和高 | 降雨 1 | 12:00 | 14:10 | 5.33 | 13:20 | 3.0 | 10 | 0.75 |
| 桥路交叉口 | 降雨 2 | 17:00 | 19:30 | 5.14 | 18:00 | 6.0 | 0 | 0.71 |
| 八一七路与高 | 降雨 1 | 12:00 | 14:10 | 6.96 | 13:50 | 7.0 | 10 | 0.74 |
| 桥路交叉口 | 降雨 2 | 17:00 | 19:30 | 6.88 | 18:20 | 0.4 | 20 | 0.86 |

由表 2 可知,模型能较好地模拟井下液位峰现时间和具体峰值,其中,峰现时间偏差小于 30 min,峰值相对误差小于 25%,同时纳什效率系数 N_{NSE} 均大于 0.5。

3.3 一、二维精细化内涝模型验证

受“卢碧”台风短时强降雨影响,古田路片区 3 处历史易涝点积水严重,分别为新权南路、乌山路和广场南路积水点。选用“卢碧”两场降雨进行地表积水模拟,并根据积水分布情况和积水点监测数据对陆面内涝模型进行率定和验证。

图 3 为两场降雨中模拟积水位置与历史积水点的对比情况。由图 3 可看出,模拟积水点与历史积水点位置基本吻合。其中,降雨 1、2 的最

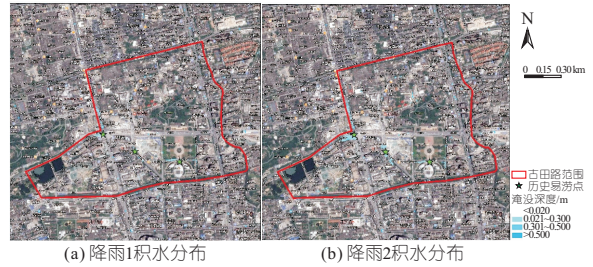


图 3 “卢碧”台风两场降雨中模拟积水点与历史易涝点对比

Fig. 3 Comparison of simulated waterlogging points and historical waterlogging points in two rainfall events of “Lubi” typhoon

大淹没历时分别为 1.5、9.6 h,最大淹没面积分别为 3 407、11 719 m^2 。

通过进一步对比监测数据与模拟积水结果(图 4),发现古田路片区 3 处积水点的监测最大积水深度与模拟最大积水深度误差均在 15% 以内,模型模拟结果精度可行。此外,3 处积水点附近排水管网均设有井下液位监测站。通过地表积水测站和井下液位测站的联合分析,验证了一、二维耦合模拟结果的有效性。

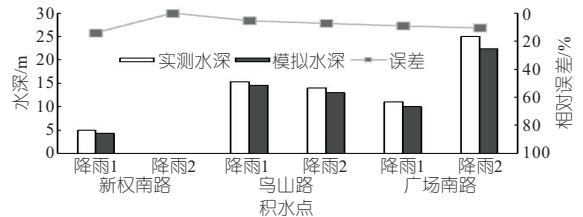


图 4 各积水点模拟积水深与监测水深对比

Fig. 4 Comparison of simulated water depth and monitored water depth at each waterlogging guard point

4 福州市城市内涝分析

4.1 基本结果分析

依据福建省城市及部分县城暴雨强度公式,由芝加哥雨型过程线^[10,11]设计研究区 10、20、50 年一遇 3 种降雨情景(降雨历时为 2 h,雨峰位置 $r=0.4$,时间间隔为 1 min),得到各重现期下设计暴雨雨强过程见图 5。

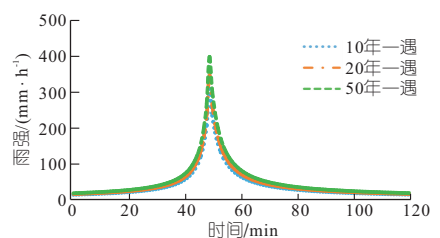


图 5 研究区不同重现期下降雨强度设计过程线

Fig. 5 Design process line of rainfall intensity under different return periods in study area

其中,福州市设计暴雨强度公式为:

$$q = [2\ 136.312(1 + 0.700\lg T)] / (t + 7.576)^{0.711} \quad (6)$$

式中, q 为暴雨强度, mm/min; T 为设计重现期; t 为降雨历时, min。

应用构建的排水管网模型,计算不同重现期设计暴雨下的研究区节点溢流情况见表 3。由表 3 可看出,随着重现期的增大,降雨总量逐步增加,溢流节点数和溢流峰值流量呈显著增加趋势。

表 3 研究区不同重现期下节点溢流结果

Tab. 3 Results of node overflow under different return periods in study area

| 暴雨 重现期 | 最大雨强 (mm · h ⁻¹) | 总降雨 量/mm | 峰值溢流 量/m ³ | 溢流节 点数/个 | 溢流节点 占比/% |
|-----------|---------------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------|
| 10 年一遇 | 309.22 | 83.62 | 4 471.2 | 885 | 47.5 |
| 20 年一遇 | 347.55 | 93.98 | 4 711.3 | 994 | 53.3 |
| 50 年一遇 | 398.21 | 107.68 | 5 058.5 | 1 124 | 60.3 |

由城市陆面模型计算不同重现期设计暴雨下的陆面产流模拟结果,分析研究区各易涝点的积水情况,见表 4。由表 4 可看出,在 10、20 年一遇设计暴雨下,乌山路淹没深度最大。原因为该处地势低洼且下游排水管道管径较小,仅 200 mm (临近其他管道管径为 800 mm),排水能力不足。同时,随着重现期的增大,乌山路淹没深度增加速率较其他两处积水点更慢,原因为乌山路积水处局部高程为 7 m,周围高程为 7.7 m,低洼地势落差较小(为 0.7 m),而 10 年一遇设计暴雨下淹没深度为 0.62 m,故乌山路淹没深度的增加速率较慢。特别地,在 50 年一遇设计暴雨下,广场南路的淹没深度最大,且 3 种重现期下广场南路的淹没深度增加速率较其他两处积水点更快。经实地调研资料分析,广场南路地势平坦且较于附近路段高程低、落差大,导致广场南路淹没范围较广、淹没深度较大且淹没深度增加速率较快。

表 4 不同重现期下研究区淹没情况统计

Tab. 4 Statistics of submergence in study area under different return periods

| 重现期 | 淹没深度/cm | | |
|--------|---------|-----|------|
| | 新权南路 | 乌山路 | 广场南路 |
| 10 年一遇 | 35 | 62 | 50 |
| 20 年一遇 | 43 | 65 | 58 |
| 50 年一遇 | 52 | 68 | 72 |

4.2 研究区内涝改造方案分析

2016 年 3 月,福建省出台了《实施城市内涝防治三年行动计划(2016-2018)》,提出“要加强源头径流控制,建设海绵城市,提高蓄水、滞水和渗水能力”。尽管如此,福州市江北城区防洪排涝设

施现状标准仍很低,排水管网中 1、2 年一遇管道比重高达 71% 以上,66% 雨水管渠直径小于 500 mm。为此,针对古田路片区提出了两种“海绵化”内涝改造方案分别进行模拟分析。具体分析方案如下:①方案 1。研究区内管径小于 300 mm 管道均增至 300 mm。通过增大管径可直接扩大管网排水能力,使城市路面积水迅速排出。②方案 2。增大地表初期入渗率。通过增大下垫面上的入渗率,使初期进入排水管网的径流量减少,进而减轻管网排水压力。

应用所构建的内涝模型分别模拟分析两种改造方案下的节点溢流情况与地表淹没面积情况,见表 5。由表 5 可看出,经过两种方案的调整,研究区溢流节点数和最大淹没面积均有所下降,两种方案均有利于改善研究区内涝情况,但方案 1 较方案 2 改善效果更佳。经方案 1 改造后,研究区在 10、20、50 年一遇设计暴雨下的溢流节点削减比分别达 19.8%、19.4%、17.0%,且重现期越小对管网排水能力的提升越显著。

表 5 不同重现期下两种“海绵化”内涝改造方案对研究区内涝改善结果

Tab. 5 Waterlogging improvement results of two "sponge" waterlogging reconstruction schemes under different return periods in study area

| 改造 方案 | 重现 期 | 溢流节 点数/个 | 溢流节点 占比/% | 溢流节点 削减比/% | 最大淹没 面积/m ² | 最大淹没面 积削减比/% |
|----------|---------|-------------|--------------|---------------|---------------------------|-----------------|
| 原始 | 10 年一遇 | 885 | 47.5 | 0 | 419 287 | 0 |
| | 20 年一遇 | 994 | 53.3 | 0 | 479 063 | 0 |
| | 50 年一遇 | 1 124 | 60.3 | 0 | 550 935 | 0 |
| 方案 1 | 10 年一遇 | 710 | 38.1 | 19.8 | 405 063 | 3.4 |
| | 20 年一遇 | 801 | 42.9 | 19.4 | 461 412 | 3.7 |
| | 50 年一遇 | 933 | 50.0 | 17.0 | 528 729 | 4.0 |
| 方案 2 | 10 年一遇 | 799 | 42.8 | 9.7 | 409 145 | 2.4 |
| | 20 年一遇 | 877 | 47.0 | 11.8 | 466 248 | 2.7 |
| | 50 年一遇 | 985 | 52.8 | 12.4 | 533 017 | 3.3 |

5 结论

a. 以福州市为例,构建了基于 Infoworks ICM 的一维排水管网和二维城市陆面水动力精细化耦合模型,并由实测暴雨事件对模型进行了率定和验证。在福州市古田路片区的应用结果表明,该模型能较准确地模拟出研究区域内涝积水过程。

b. 以 3 种重现期设计暴雨作为输入条件,模拟研究区内涝积水情况、评估管网排水能力,发现乌山路在 10、20 年一遇的设计暴雨下积水深度最大但增加速率最慢,广场南路在 50 年一遇的设计暴雨下积水深度最大且增加速率最快,内涝最

为严重。

c. 基于所构建的模型,以管网溢流节点数和最大淹没面积为评价指标,对比分析了扩大管径和增大下渗率两种“海绵化”改造方案,确定扩大管径方案更有利于研究区管网排水能力的提升,研究结果可为该类型区域防洪排涝建设提供借鉴。

参考文献:

[1] 王峰. 福州市主城区内涝后的反思[J]. 水利科技, 2006(3):4-5.

[2] 张立洪,武永新. 沿海城市潮、雨遭遇下内涝模型及应用[J]. 水电能源科学,2017,35(6):42-46.

[3] 宋瑞宁,任梦瑶,刘强,等. 基于 InfoWorks ICM 模型的内涝预警降雨量阈值研究[J]. 水电能源科学, 2021,39(2):5-8,73.

[4] 陈嘉雷,陈文杰,黄国如. 基于情景模拟与多源数据的城市内涝风险评估[J]. 水电能源科学,2021,39(6):55-59.

[5] 刘俊,郭亮辉,张建涛,等. 基于 SWMM 模拟上海

市区排水及地面淹水过程[J]. 中国给水排水,2006(21):64-66,70.

[6] 黄国如,王欣,黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学,2017,35(2):66-70,60.

[7] 王盼,何洋,杜志水. 基于水动力数值计算的城市设计洪水模拟研究[J]. 西安理工大学学报,2020,36(3):362-366.

[8] 黄维. 城市排水管网水力模拟及内涝风险评估[D]. 广州:华南理工大学,2016.

[9] SIDEK L M, JAAFAR A S, MAJID W H A W A, et al. High-resolution hydrological-hydraulic modeling of urban floods using InfoWorks ICM[J]. Sustainability, 2021,13(18):10259.

[10] 张大伟,赵冬泉,陈吉宁,等. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用[J]. 给水排水,2008,44(增刊1):354-357.

[11] 孙翀,王春婷,张泽玉,等. 芝加哥降雨过程线模型的改进[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022,53(1):157-162.

Analysis of Rainstorm Waterlogging in Coastal Cities Based on Infoworks ICM Model

FENG Tian-yu^{1a,1b}, LEI Xiao-hui^{1a,2}, WANG Jia-biao³, ZHANG Yu-bin^{1a,1b}

(1a. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power;

1b. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Aiming at the problem of urban waterlogging caused by heavy rainstorms in coastal cities, this paper takes Fuzhou City as an example and constructs a fined coupling model of urban one-dimensional drainage network and two-dimensional land surface hydrodynamics based on Infoworks ICM. The model was applied to the analysis of rainstorm waterlogging in Gutian Road area of Fuzhou during Typhoon "Lubi" in August 2021, which verified the high simulation accuracy of the model. Based on this model, the rainstorm waterlogging process in Gutian area under different recurrence periods was analyzed, and two "sponge" reconstruction schemes were proposed. It is found that increasing the pipe diameter is more conducive to improving the waterlogging situation in the study area. The study can be used to accurately calculate the process of urban underground drainage and land area water in Fuzhou City, which provide technical support for the real-time decision of flood control and drainage in coastal cities.

Key words: Infoworks ICM; urban waterlogging; refined modeling; causal analysis; sponge measures



(上接第 157 页)

[12] 孙晓东. 基于灰色关联分析的几种决策方法及其应用[D]. 青岛大学,2006.

[13] 刘思峰,党耀国,方志耕. 灰色系统理论及其应

[M]. 北京:科学出版社,2004.

[14] 孙开畅,马文俊,李权. 基于 IAHP-直觉模糊集的水利工程应急救援方案决策[J]. 水利水电技术,2018,49(6):135-140.

Multi-attribute Group Decision Making Method for Hydraulic Engineering Considering Regret Theory and Grey Relational Analysis

CHEN Qian-qing, SUN Kai-chang

(School of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at the nonlinear problem of regret value when regret theory is used to solve multi-attribute group decision making problems in hydraulic engineering, a multi-attribute group decision making method combined with grey correlation analysis method is proposed. Firstly, the regret theory was used to obtain the decision maker's perceived utility for each option and determine the regret decision matrix. Secondly, according to the nonlinear problem between regret values, the weight of attributes and the comprehensive regret value of each scheme were calculated by grey correlation analysis, and then the best scheme was obtained according to the ranking of the comprehensive regret value. Finally, the feasibility of the method was verified by case analysis. The results show that this method can solve the nonlinear characteristics and weight problems in regret theory, and make decision-making more reasonable when considering psychological factors.

Key words: multi-attribute group decision making; regret theory; grey correlation analysis; scenario sorting