

InfoWorks ICM 在山地丘陵城市内涝治理中的应用

王 滢, 周小伟

(江西省城乡规划设计研究总院, 江西 南昌 330000)

摘 要: 吉安市是典型的南方山地丘陵城市,三面环山,地面起伏较大、地形复杂,河网、湖泊密布,闸门和电排站较多,内涝风险较大。为此,借助 InfoWorks ICM 软件构建吉安市排水系统水力模型,辅助制定吉安市的最优内涝治理方案。重点介绍了模型构建时在水系和地形的数据处理方法。同时,以后河流域为例,采用模型进行现状排水能力和内涝风险评估,并在结合地形特点及不改造电排站的基础上,充分利用洼地构建调蓄水面,根据各个内涝点的具体成因分析,分别提出单因素或多因素组合的内涝治理规划方案,采用模型对规划方案进行反复优化与评估,直至方案达到最优。

关键词: 山地丘陵城市; 内涝治理; InfoWorks ICM; 内涝风险评估

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)19-0118-06

Application of InfoWorks ICM in Control of Urban Waterlogging in Mountainous and Hilly Cities

WANG Ying, ZHOU Xiao-wei

(Jiangxi Province Urban and Rural Planning and Design Research Institute, Nanchang 330000, China)

Abstract: Ji'an City is a typical mountainous and hilly region in south China which is surrounded by mountains on three sides. Its surface is undulating and the terrain is complex. Ji'an City is densely covered by the river network and lakes. Moreover, there are substantial amounts of sluice gates and electrical drainage station. All the above factors contribute to a great risk of waterlogging. Therefore, with the help of InfoWorks ICM software, a hydraulic model of the drainage system in Ji'an was built which assisted to establish the optimal scheme for the control of urban waterlogging. The data processing methods for water system and terrain were highlighted. Meanwhile, taking the Houhe River basin as an example, the risk of current drainage capacity and waterlogging was evaluated by the model, and the forming reasons of waterlogging points were analyzed. On the basis of the features of the terrain and no reconstruction of the electric discharge station, swales were fully utilized to increase the storage capacity. According to specific causes of each waterlogging point, the waterlogging management plans with single factor or combination of multiple factors were proposed respectively. The plans were repeatedly optimized and evaluated by the model until optimum results were obtained.

Key words: mountainous and hilly city; waterlogging control; InfoWorks ICM; waterlogging risk evaluation

InfoWorks ICM 模型将城市排水管网及河道的一维水力模型与城市流域二维洪涝淹没模型结合在

一起,对城市区域内涝模拟效果较佳,在我国运用较广,但对于山地丘陵及河网密布城市,国内对模型构

建和内涝治理研究尚不多见。丘陵地区地面起伏大、地形复杂,涝水形成时间短、流量大,相对于其他区域内涝风险更大。笔者以吉安市为例,介绍了河网密布的山地丘陵城市水力数学模型的构建方法,并以后河流域为例进行排水能力和内涝风险评估,分析内涝成因,结合数学模型以确定最佳的排水防涝系统规划方案。

1 城市概况

吉安市中心城区属山地丘陵盆地地貌,东、西、南三面环山,赣江、禾河将城区分割成河西、河东和河南三大片区,另有内河 14 条,且水系上游大多接纳城市规划范围外的山体来水,片区内还有水库 32 座。大部分城市雨水通过管渠流入内河,最终排入赣江和禾河。

吉安市属亚热带季风气候,年均降雨量为 1 549 mm,且年内分布不均,4 月—7 月的降雨量占全年降雨量的 30% ~ 65%,且中心城区极端降雨常有发生,例如,2010 年 6 月 18 日,日降雨量达到 167.4 mm,重现期为 10 年一遇;2013 年 7 月 14 日,日降雨量达到 244.3 mm,重现期为 70 年一遇。根据江西省气候中心编制的《吉安市中心城区暴雨公式编制技术报告》,吉安市近年来短历时(5 min/10 min/15 min)的极端降雨有增强趋势,降水更加集中,降水强度增强。吉安市近几年遭受到了不同程度的内涝,对人民的 lives 和安全产生影响,因而解决内涝成为迫切需求。

2 模型构建

2.1 排水管网

根据现状排水管网的原始数据情况,转换成 csv、shap、dwg 等常用格式,导入检查井的坐标、地面高程、井面高程、井底高程,管渠的口径、上下游管渠内底高程、粗糙度系数,以及增加相应的阀门、泵站、堰门等对象。进行排水管网数据拓扑结构检查,删掉多余的节点和管道;查看管道中是否有重复的两根或多根管道;确保每个管道末端都连接到出水口;并确认管道的水流方向、逆坡、大管接小管等情况和实际情况是否相符。为了反映排水管网的真实情况,只做部分简化,模拟主干道路和支路,以及历史原因形成的布置在地势较低用地内的排水管渠。并结合现状管网淤堵的情况增加一定的淤堵系数。

2.2 河道和水库

规划区内水系发达,将中心城区的河道分为外

河和内河。外河主要有赣江和禾河,防洪标准分别为 100 年一遇和 50 年一遇,仅结合水文资料设置各汇水区排出口洪水位。考虑到吉安市核心区域为电排区,因电排区受外江水位影响较小,以及防洪水位和内涝水位的错峰等因素,内涝评估时外江水位取 30 年一遇。城区内河受规划范围外山体来水影响的主要包括河西片区的螺湖水、河东片区的草坪水和河南片区的君山水库溢流通道,需要考虑外水对内河的影响;其余如后河、东河等只需设置初始景观控制常水位。内河结合水利部门提供的河道特征高程值(平面桩号走向、逐桩横断面)建立河网模型,并与排水管网连接,对无内涝风险的河道可以简化成明渠进行设置,减少模型的计算量。在河道数据不完善的区域,需对典型断面进行补测。小型水库可设置水面面积、调蓄容量、库底高程、常水位、最高水位和溢流通道;大中型水库可以建立河道型水库模型,对区域内涝影响面较小的水库也可同小型水库的设置方法。

2.3 产流表面

模型设置参数主要有初期损失、产流模型和汇流模型。初期损失在城市内涝情况下影响较小。产流表面分为透水表面和非透水表面,其中透水表面采用 SCS 模型,非透水表面采用固定径流模型,分别要确认径流曲线数(CN)和固定径流系数。考虑区域内无高精度遥感数据,土地利用采用区域最新总体规划中的土地利用现状图,并结合 Google 地图和近两年建设项目红线图进行更新。将土地利用划分为居住、公建、工业用地、绿地、道路、未开发用地等 6 类,除了绿地定义为透水表面外,其余 5 种都定义为非透水表面。选择区域内几个典型的居住小区,结合小区用地平面图计算小区加权平均径流系数,工业用地和公建用地的径流系数计算方法同上。汇流模型采用 SWMM 汇流模型,SWMM 模型在我国应用较多,且仅需要确定地面曼宁系数。

2.4 汇水区划分

计算地表雨水汇流量的方法有等雨量线法、算数平均法、三角形法、格点法、泰森多边形法等。本研究采用泰森多边形法。泰森多边形法考虑就近原则,无需考虑地形、现状布管以及实际的一些分水岭信息(比如路网、水系、地块规划等),所以在一个很大的面积范围内直接采用泰森多边形法来划分,很显然上述这些因素都无法考虑进去。为此,可依托

管网规划所划分的汇水区,或是通过现场勘查获得的汇水边界信息,或是根据地形、道路、小区等信息判断出来的边界区域先划定出小的片区后,再通过泰森多边形法进行划分。

2.5 地形

吉安市建设局提供的高程数据格式为 CAD 高程点,由于城市建设日新月异,需要同步更新地形高程数据,对于高程点缺失的区域,考虑到吉安市管线普查工作开展不久,可将管线普查的检查井地面高程作为地形高程点的参考,但需要检查并去除其中明显的错误点,对于高架桥、立交桥、河网周边等特殊地方需要结合情况进行精细化处理,建立的地面高程需要和水系进行耦合。对于零散分布的池塘,为避免影响模拟结果,可对地形进行填平处理,模型中设置为调蓄设施。道路竖向和地形是城市内涝的重要原因^[1],采用 GIS 建立吉安市中心城区数字地面高程,总体地势坡向河道,利用空间分析技术,得到低洼分布点热点,能够较直观地发现城区经常积水的分布区域。在内涝点区域,应对地形加密测量,在适当区域保留房屋、围墙等建筑物,道路建立网格化区间,降低 10 ~ 20 mm 的高度,以真实反映区域地貌。

2.6 降雨雨型

降雨雨型是排水系统模拟的基础,分为短历时雨型和长历时雨型。短历时 2 h 雨型根据修订后的暴雨强度公式,采用芝加哥法确定,并确定雨峰系数。经推算,吉安市中心城区的综合雨峰系数 $r = 0.49$,考虑安全性,模拟时按 0.45 取值,建立 1、2、3 和 5 年一遇的短历时雨型。长历时 24 h 雨型采用同频率分析法推求最小间隔 5 min 设计降雨雨型^[2]。

2.7 模型参数率定和验证

考虑到研究区域无完整的监测网络,结合历史积水资料和相关文献,采用人工率定法进行模型参数的率定,径流曲线数(CN)取值为 77.4,地面和河道曼宁系数取值分别为 0.013、0.03。采用类比城市内涝防治标准的实际 24 h 降雨时的内涝情况进行验证。吉安市规划内涝防治标准为 30 年,经调取近 50 年的实际降雨数据,均无类似雨强降雨场次,因而选取接近场次,分别为 2010 年 6 月 18 日和 2013 年 7 月 14 日的暴雨事件,对模型进行校核。经调查,吉安市内涝点主要分布在河西片区的田侯

路和高峰坡路交叉口、鹭州东路北侧支巷,河东片区的上坊村、青原大道和铁路交叉口,河南片区的富川大道和庐陵大道交叉口、深圳大道等,共 22 处。模拟显示的积水区域和现场调查的积水范围基本吻合,说明采用建立的模型对研究区域进行内涝风险评估分析具有一定的科学性和可靠性。

3 内涝点治理

选取吉安市中心城区的后河流域作为内涝治理的典型示例。后河流域位于河西片区,汇水面积为 30.48 km²,现状水面面积为 1.94 km²,由部分吉州老城区和城南新区组成,地面高程为 44.9 ~ 122.6 m,坡度区间为 0.008° ~ 15.746°。流域西侧现状有几座小型水库和后河连通。后河流域平面布置如图 1 所示。

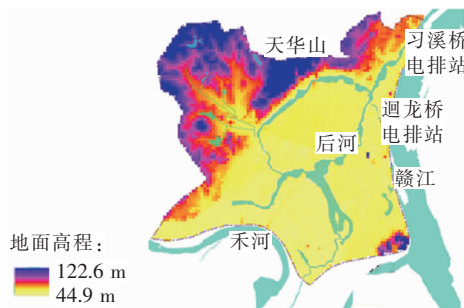


图1 后河流域平面示意

Fig.1 Plan sketch of Houhe River basin

为减轻末端电排站的压力,设计遵循“高水高排、低水低排”的原则,对于后河流域的西部地势较高、满足防洪标高的区域直接导入禾河,避免接入位于低区的后河。后河汇水分区内的西北面山体雨水通过截洪沟直排入河道,平坦区域的场地雨水则通过管道收集后就近散排入后河。后河末端现状通过习溪桥电排站和迳龙桥电排站与赣江连通,习溪桥电排站设计排涝面积约为 6 km²,排涝流量为 7.0 m³/s;迳龙桥电排站设计排涝面积为 12 km²,排涝流量为 24 m³/s,电排站的设计排涝能力不能满足要求。后河正常蓄水位为 47.70 m,起排水位为 48.13 m,设计内水位为 48.43 m,相应涝区最高滞蓄水位为 48.73 m。

3.1 排水能力评估与分析

排水管道能力评估模拟分析时评估的是管道自身(管径、坡度)是否满足相关标准,不考虑管道模型下游边界条件的影响^[3],研究区域雨水汇流到河道的时间小于 1 h,采用短历时 2 h 设计降雨雨型进

行管网能力评估可以满足要求。评估结果见图 2。



图 2 现状排水管道排水能力评估

Fig. 2 Assessment of drainage capacity of current drainage pipe in core area

排水能力 <1 年重现期的管道比例为 11.54%，排水能力不足的主要原因是：①上游汇水面积较大，而现状排水管道管径偏小，排水能力严重不匹配，如老城区的水巷下水道（合流盖板沟）位于房屋下，过水断面只有 $0.5\text{ m} \times 0.15\text{ m}$ ，吉福路—井冈山大道—中山东路沿线、田侯路、高峰坡路等雨水管管径不足；②下游排水管道管径不足，对上游管道造成顶托，如城南新区的崇义路、冬青路；③存在逆坡、大管接小管等瓶颈地段。考虑到模型软件在产汇流计算上与传统推理公式法差别较大，参数的设置导致软件与推理公式法计算流量差别较大^[3]，在相同流量系数情况下，模型计算出的排水能力大于推理公式法，因此实际排水能力 <1 年重现期的排水管道将更多。另外，排水能力 ≥ 5 年重现期的管道比例达到 77.45%，该部分管道主要集中在城南新区，现状雨水管渠重现期较大的主要原因是：①城南新区管段的汇水区存在大量未开发用地，产流量少；②由于城区管网系统不完善或两侧用地未开发，一些地块的雨水通过地表漫流至沟渠，使得雨水管道的实际汇水区比设计汇水区小。规划不能片面地以一维管道满流衡量其应对内涝重现期的排水能力，而应将管道排水能力作为辅助参考依据^[4]。

3.2 内涝风险评估与分析

城市的内涝风险评估，需要考虑河道的顶托、电排站的排水能力，汇流时间较长，研究认为在 10 年重现期以上长历时的雨强精度会比通过暴雨强度公式推导的更高^[5]，因此根据吉安市的内涝防治标准要求，通过构建 30 年一遇 24 h 长历时雨型来进行

评估分析。根据《吉安市中心城区排水（雨水）防涝综合规划》（2015 年—2030 年），将城市内涝风险水平划分为高风险区（积水深度 $H \geq 500\text{ mm}$ ）、中风险区（ $300\text{ mm} \leq H < 500\text{ mm}$ ，积水时间 $> 0.5\text{ h}$ ）和低风险区（ $150\text{ mm} \leq H < 300\text{ mm}$ ，积水时间 $> 0.5\text{ h}$ ）3 个等级。对于 30 年一遇的降雨，低风险区面积为 6.73 hm^2 ，占现状建成区面积的 1.0%；中风险区面积为 1.98 hm^2 ，占 0.48%；高风险区面积为 0.56 hm^2 ，占 0.47%。

根据二维内涝风险评估和一维管道排水能力评估结果，并结合调查和分析，发现内涝点主要集中在老城区，内涝的主要原因如下：①随着城市开发与建设用地的不断拓展，城市下垫面硬化比例增加，原有的坑塘、渠道等水面未得到充分保护，而被回填和侵占，老城区建筑密布和不透水地面比例较大，而场地几乎无调蓄设施，导致雨水外排量较大；②部分道路交叉口因竖向设计缺陷造成地势凹处，且排水管道能力不足，如老城区的吉安大桥西侧桥下、田侯路和高峰坡路交叉口、文山路和中山东路交叉口，城南新区的文忠路和北京路的交叉口；③局部场地标高低于周边道路，而内部排水通道不通畅，如南刘家巷场地标高比后河东路低 0.5 m 且无排水管道，吉安军分区比周边区域低 1.4 m 且排水管道堵塞；④由于城市建设的变化，部分排水管道的汇水面积过大，如鹭洲东路现状 DN1 200 雨水管的汇水面积达到了 58.7 hm^2 ；⑤后河为了打造景观的需要而常水位较高，末端电排站设计排水能力不足，强降雨下不能有效抽排，导致沿河管道水力坡度小于管道坡度，淹没出流，降低了管道的排水能力；⑥城市基础设施日常管理跟不上，管渠存在一定程度的淤堵，同时超强降雨时的应急管理措施也不到位。

3.3 内涝点治理规划方案

内涝点的成因不同，则治理规划方案亦不同，主要采取调整场地竖向、提高管渠排水能力、治理水系、新增调蓄设施等措施。针对各内涝点的成因分析，分别采用单因素或多因素措施组合的方案，结合 ICM 模型对方案进行模拟评估，反复优化以期实现内涝消除为最佳方案的目的。

3.3.1 源头控制

充分保护并利用现状水面和洼地，建立雨水调蓄设施；在城南新区建设和老城区更新中推行低影响开发建设，控制开发强度，降低不透水地面比例；

对于地势低洼且排水系统改造难度较大的区域,结合棚户区改造等契机,对地势进行适当抬填,消除积涝的可能性。

3.3.2 中途控制

基于现状模型的评估结果,改造并梳理排水管网系统,提高排水管道的标准,降低过大的汇水分区,本研究结合后河老城区提出排水管网的改造方案,详见图 3。吉福路—井冈山大道—中山东路、高峰坡路—田侯西路、长岗路—阳明西路—人民路、书街路—沿江路,现状为合流区域,且排水管道质量不好,结合分流改造,废弃现状排水管道,增大雨水管管径,使其满足 3 年一遇的排水能力;针对田侯东路、上下后街等排水能力不足而管道质量尚可的道路,则新增排水通道;汇水分区 1 现状排入下游井冈山大道北侧管网,而下游管网排水能力不足,本次改造将分区 1 的雨水结合人民路雨水管的改造,整体排入后河。



图3 后河流域老城区内涝治理示意

Fig. 3 Waterlogging control of old urban area of Houhe River basin

3.3.3 水系治理

考虑到现状两座电排站能力不足,但用地局促、扩建难度大,而后河流域城南新区正处于开发阶段,有条件充分利用现状洼地对水系进行梳理,因此规划提出在不改造电排站的情况下,通过增加后河的调蓄容积来提高内涝防治的能力,具体如下:①结合后河三期治理,进行清淤、疏通,利用洼地打造后河双环水系,增加调蓄水面,使后河流域水面面积达到 2.47 km^2 ;对甫塘水库、北瓜塘水库和大兴塘水库进

行清淤、加固,提高水库库容,并对水库的下泄通道进行整治,断面尺寸为 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \sim 5.7\text{ m} \times 1.8\text{ m}$, 长度为 6.7 km ,坡度为 $0.4\% \sim 0.95\%$ 。②加强气象部门和水利部门的联动,强降雨来临前,先期对后河进行抽排,降低后河水位,以提高后河的调蓄容积,并降低水面对排水管渠的顶托作用。

3.4 规划方案模型评估

针对上述规划方案,建立模型进行多轮的排水能力和内涝风险评估直至方案达到最优。

规划后河流域排水管渠设计重现期为3年,采用3年一遇短历时降雨进行评估,雨峰峰值流量降低,老城区改造管网排水能力大幅提升,内涝积水改造段的排水管道已无冒井现象。

采用 30 年一遇长历时设计降雨对规划方案进行内涝风险评估,结果表明,积水情况大为改善,后河流域中风险、高风险内涝消除,只存在少量的低风险区域,面积为 2.22 hm^2 。

4 结论

模型软件作为城市内涝治理的技术支撑,数据整理和处理的合理性是前提,需要建模人员根据实际情况在管网、河道和水库、产流表面、汇水区划分、雨型建立等方面做出合理的处理,特别是水系和地形,需要根据山地丘陵城市的特点进行细化处理,模型模拟结果的质量将影响到治理方案的合理性。

借助模型手段进行排水能力和内涝风险评估,可为内涝原因分析提供科学支持。内涝点的治理需在水系梳理的基础上,综合考虑源头控制、中间控制和末端控制来实现。对内涝点逐一综合分析后,先形成多个选择性规划初步方案,再借助模型辅助手段不断进行优化,从而达到技术和经济的最佳目标。可见,通过规划模型的可靠评估,可以为内涝点的治理方案提供有力参考。

参考文献:

- [1] 王乾勋,赵树旗,周玉文,等. 基于建模技术对城市排水防涝规划方案的探讨——以深圳市沙头角片区为例[J]. 给水排水,2015,41(3):34-38.
Wang Qianxun,Zhao Shuqi,Zhou Yuwen,*et al.* Probe into urban drainage and waterlogging prevention plan based on modeling—case study on ShaTauKok district of Shenzhen[J]. Water & Wastewater Engineering,2015,41(3):34-38(in Chinese).
- [2] 俞露,荆燕燕,许拯民. 辅助排水防涝规划编制的设计

降雨雨型研究[J]. 中国给水排水,2015,31(19):141-145.

Yu Lu,Jing Yanyan,Xu Zhengmin. Study on design rainfall pattern supporting urban drainage and waterlogging prevention planning[J]. China Water & Wastewater, 2015,31(19):141-145(in Chinese).

- [3] 马洪涛,周凌. 关于城市排水(雨水)防涝规划编制的思考[J]. 给水排水,2015,41(8):38-44.

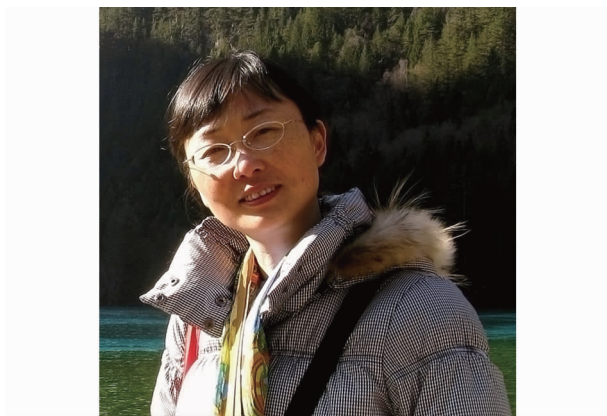
Ma Hongtao,Zhou Ling. Discussion on issues about urban drainage system and local flood control planning[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015,41(8):38-44(in Chinese).

- [4] 靳俊伟,黄丽萍,章卫军,等. 基于水力模型的重庆都市核心区排水防涝风险评估[J]. 中国给水排水,2015,31(11):120-123.

Jin Junwei,Huang Liping,Zhang Weijun,et al. Risk assessment of drainage and waterlogging prevention system for Chongqing core area based on hydraulic model[J]. China Water & Wastewater,2015,31(11):120-123(in Chinese).

- [5] 唐颖,周玉文,赵见,等. 长历时暴雨强度公式的推求方法[J]. 河北工业科技,2014,31(5):378-383.

Tang Ying,Zhou Yuwen,Zhao Jian,et al. Derivation method for long-duration storm intensity formula[J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology,2014,31(5):378-383(in Chinese).



作者简介:王滢(1971-),女,河北临西人,大学本科,高级工程师,长期从事排水规划和设计工作。

E-mail:442662785@qq.com

收稿日期:2018-05-18

(上接第 117 页)

Huang Guoru,Huang Wei,Zhang Lingmin,et al. Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2015,26(4):1-6(in Chinese).

- [4] 陈小龙,陆露,盛政,等. 城市排水防涝地表二维模拟评估方法研究[J]. 中国给水排水,2015,31(23):116-119.

Chen Xiaolong,Lu Lu,Sheng Zheng,et al. Study on 2D simulation of urban drainage and waterlogging prevention[J]. China Water & Wastewater,2015,31(23):116-119(in Chinese).

- [5] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,等. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型[J]. 中国给水排水,2008,24(7):88-91.

Zhao Dongquan,Chen Jining,Tong Qingyuan,et al. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS[J]. China Water & Wastewater,2008,24(7):88-91(in Chinese).

- [6] Zhou Q,Panduro T E,Thorsen B J,et al. Verification of flood damage modelling using insurance data[J]. Water Sci Technol,2013,67(6):425-432.

- [7] Zhou Q,Panduro T E,Thorsen B J,et al. Adaption to extreme rainfall with open urban drainage system;an integrated hydrological cost-benefit analysis[J]. Environ Manage,2013,51(3):586-601.



作者简介:周倩倩(1984-),女,浙江乐清人,博士,讲师,主要研究方向为市政排水。

E-mail:qiaz@gdut.edu.cn

收稿日期:2018-04-20