

Waterlogging Simulation and Risk Analysis in Wuhu Urban Area

Qinghua Yue, Cheng Wen, Juan Yang, Jianfeng Zhao

Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou Zhejiang
Email: 1025781333@qq.com

Received: Oct. 11th, 2019; accepted: Nov. 13th, 2019; published: Nov. 20th, 2019

Abstract

Based on the investigation of current flood control system such as rainwater pipeline, drainage system and drainage pumping station, MIKE FLOOD coupling model is used to evaluate the waterlogging risk in Wuhu urban area. The one-dimensional pipe network model, the river network model and the two-dimensional surface flow model are coupled to simulate the urban waterlogging and analyze the waterlogging risk distribution in Wuhu urban area under the 24-hour torrential rain with a return period of 30 years. According to the two indicators of water depth and ponding time, the waterlogging risk level in urban area is determined. The waterlogging in the Chengbei area is mainly due to the poor drainage construction of rainwater pipeline network; the waterlogging in the Chengnan area and Sanshan area is due to the large area of low-lying space in these newly built sectors. Through systematic analysis of the waterlogging risk, it can be used as reference for the waterlogging drainage project in Wuhu urban area.

Keywords

Urban Waterlogging, Coupling Model, Rainwater Pipe Network, Wuhu City

芜湖市中心城区内涝风险模拟分析

岳青华, 文 铖, 杨 娟, 赵建锋

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州
Email: 1025781333@qq.com

收稿日期: 2019年10月11日; 录用日期: 2019年11月13日; 发布日期: 2019年11月20日

摘要

在调查分析芜湖市中心城区雨水管道、排涝水系和排涝泵站等现状防涝系统情况的基础上, 基于MIKE FLOOD

作者简介: 岳青华(1982-), 男, 湖北荆门人, 硕士研究生, 高工, 主要从事水利规划工作。

文章引用: 岳青华, 文铖, 杨娟, 赵建锋. 芜湖市中心城区内涝风险模拟分析[J]. 水资源研究, 2019, 8(6): 631-644.
DOI: [10.12677/jwrr.2019.86072](https://doi.org/10.12677/jwrr.2019.86072)

耦合模型评估芜湖市中心城区内涝风险。将一维管网模型、河网模型以及二维地表漫流模型进行耦合计算，分析设计重现期为30年一遇的24小时暴雨情况下的城区内涝风险分布情况。根据芜湖市的排涝分区和中心城区内涝防治标准，通过积水深度和积水时间两个指标对城区内涝风险区域进行划分，得到芜湖市中心城区的高、中、低内涝风险范围。结合现状情况分析发现芜湖市城北片内涝主要是由于雨水管网排水标准不达标；城南和三山内涝原因是城市新建区域较多，存在大面积的低洼空间。通过对芜湖市城区内涝风险进行系统性分析，可以为后续的城区内涝防治工程实施和管理提供依据。

关键词

城市内涝，耦合模型，雨水管网，芜湖市

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，随着我国城市化水平不断提升，城市原有风貌格局发生极大变化，改变了原有的城市水循环过程，导致近年来内涝灾害频发，对人民的生命财产安全造成极大破坏。

国内外为模拟内涝灾害产生的影响，提出不同的城市内涝模型。美国国家环保署于1971年提出第一个较为完善的暴雨雨水数学模型(SWMM)，该模型可以模拟雨水经过地面、管网及处理设施后到达收纳水体中水流流量及水质情况[1]。英国 Walling Ford 软件公司研发了 Info Works 水力模型，一般用于排水管网的分析研究[2]。丹麦水力研究所开发出 MIKE FLOOD 模型，该模型可用来模拟城市集水区及排水管网系统中的地表径流、管流等，能够更好地实现真实水流交换过程的模拟[3] [4]。结合国外研究成果，近年来我国对内涝模型的模拟及研究也逐步深入。岑国平于1990年提出了我国第一个系统的雨水径流计算模型(SSCM) [5]，徐向阳于1998年提出平原城市的雨洪模型[6]，天津气象科研所等单位于2000年合作开发了天津城区城市雨洪模拟系统，之后提出了推广型城市雨洪模型[7]。夏军[8]等通过对比分析国内外常用的城市雨洪模型，指出国内相较于国外模型研究的不足，并针对城市雨洪模型现存数据和机理研究不足的问题，展望其未来发展方向。

与国外相比，国内内涝模型可移植性较差，具有较大的局限性，目前在国内工程实践中主要采用 MIKE FLOOD 模型。李虎成等[9]构建了巢湖城市排水防涝系统现状模型，采用短历时和长历时设计降雨两种情况对城市内涝风险进行了分析。陈彩虹[10]等研究某城市规划新建道路工程项目现状和规划条件下的内涝情况，分析给出不同条件下积水严重区域的范围。陆野[11]以芜湖市城北片为例，提出了较适用于芜湖市城市洪水分析的概化方法，通过城市内涝模型分析城北片的城市防洪风险。

以往内涝模型的边界条件、管网和河道数据大都采用概化数据，无法精确的反映出内涝结果；同时大部分分析只是针对局部区域进行分析，缺乏针对整个大区域的系统性的内涝模型分析。本文利用 DHI 系列软件，基于各种实测数据，耦合水文数学模型、管网数学模型、一维河网模型、二维地面数学模型，较为系统的构建芜湖市城区内涝模型，进行芜湖市中心城区内涝风险分析。依据芜湖市现状内涝风险分布情况，为以后的排涝工程措施提供理论基础。

2. 区域概况和现状调查分析

芜湖市是一个山区、丘陵平原区和圩区多种地形并存地区。受地形、气候和人类活动等影响，该地区既直接受到来自上游山丘区洪水的影响，也受到中下游河道洪水的顶托影响，洪涝灾害频繁。近年来随着河道堤防

工程的建设，防洪问题基本得到了很好的解决，但城市内涝问题依然显著存在。

随着芜湖市中心城区面积加大，下垫面硬化，降雨径流系数也在增大。调蓄水面缩小，致使洪峰流量加大，现状排水能力显得不足，造成暴雨时市区时有积水。与此同时现状管网排水能力与城市规划设计标准相差甚远，城市部分排水管道年代久远，损坏淤塞严重。在城市建设中同步考虑内涝风险是十分必要的，可以通过内涝模型分析进而指导内涝防治工程的实施。

芜湖市地势低平，水系众多，排水防涝系统主要由排水管道、排涝水系和排涝泵站构成，且三者紧密关联。现状排涝分区为：城北片、城南片、三山片、沈巷片、大龙湾片(二坝片)、白茆片(如图 1 所示)。现状芜湖市建成区主要集中于江南区域，本次主要针对城北片、城南片、三山片的建成区进行分析。市区雨水排水管道一般随城市道路同步建设，大部分雨水管道设计标准为重现期 1~1.5 年，近年来新建的部分排水管道适当提高了设计标准，重现期采用 3 年。

根据已有规划，芜湖市中心城区的内涝防治设计重现期为 30 年，即排水管道、排涝水系和排涝泵站组成的排水防涝系统，应满足以下要求：设计重现期为 30 年一遇的最大 24 小时降雨，不形成内涝灾害，即路面积水深度不超过 0.15 m。

3. 模型构建

城市排涝模型将一维模型 MIKE URBAN、MIKE 11 和二维模型 MIKE 21 整合，是一个动态耦合的模型系统，模型可以同时模拟排水管网、明渠，排水河道、各种水工构筑物以及二维坡面流，可用于流域洪水、城市洪水等方面的模拟研究。其中 MIKE URBAN 是排水管网系统模块，用于雨水径流模拟和管网模拟；MIKE 11 是水动力模块，用于防洪、水资源保护及水利工程规划；MIKE21 是地表漫流模块，通过生成地形文件模拟地面雨水的流动情况。

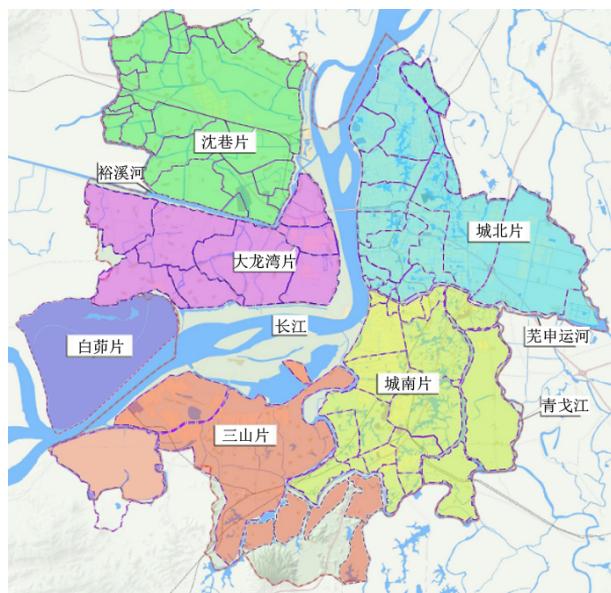


Figure 1. Drainage division area in Wuhu city
图 1. 芜湖市城区排涝分区划分示意图

3.1. 边界条件

1) 降雨数据

模型中的降雨边界条件主要为长历时 24 小时设计降雨数据。依据规范采用 30 年一遇 24 小时的设计降雨，

30 年 24 小时总降雨 276 mm, 长历时降雨雨量过程线见下图 2。

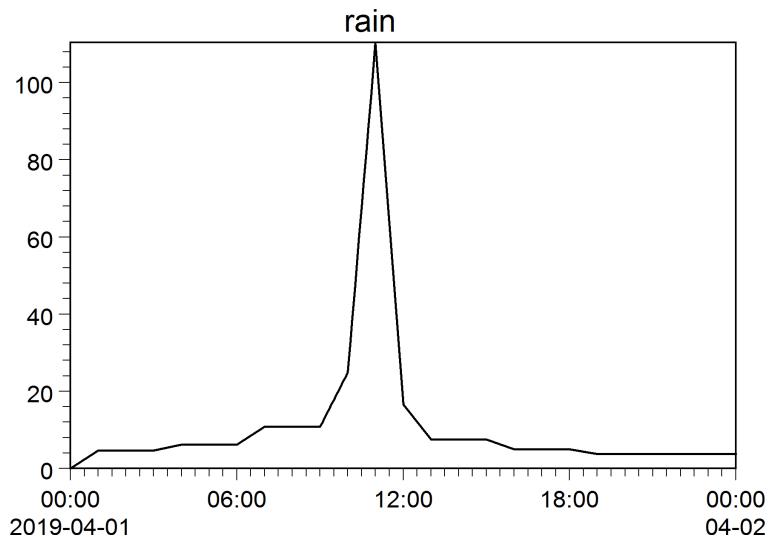


Figure 2. Long duration design rainfall pattern
图 2. 长历时设计降雨雨型

2) 下垫面数据

根据现状土地利用类型对收集到的数据进行下垫面的数据处理, 分为建设、草地、水域、林地、耕地和未建设用地, 各片区的排水分区内各下垫面的面积统计见表 1。

Table 1. Area statistics of different surface types (km^2)
表 1. 不同地表类型面积统计(km^2)

地表类型	城北片	城南片	三山片
建筑	116.49	25.52	16.23
道路	1.1	0.27	0.26
绿地	11.06	0.8	0.81
水系	7.24	0.08	0.76
裸土	108.28	7.24	22.24
其他	1.58	0.31	0.17
合计	245.75	34.22	40.47

3) 城市水文模型构建

1、汇水范围划分

根据分区和排口的信息首先划分子汇水范围如图 3 所示, 且由于模型中研究区域大部分为已建区且面积较小, 在模型中利用泰森多边形法自动为管道中每个节点分配子集水区。设置集水区水文模型参数, 设置降雨水位边界条件后, 即建立该区域管网水文模型。

2、不透水系数

参照《室外排水设计规范》, 对不同用地性质取相应径流系数。此外, 考虑长历时降雨对产流的影响, 30 年长历时 24 h 降雨条件下, 综合径流系数取 0.9。

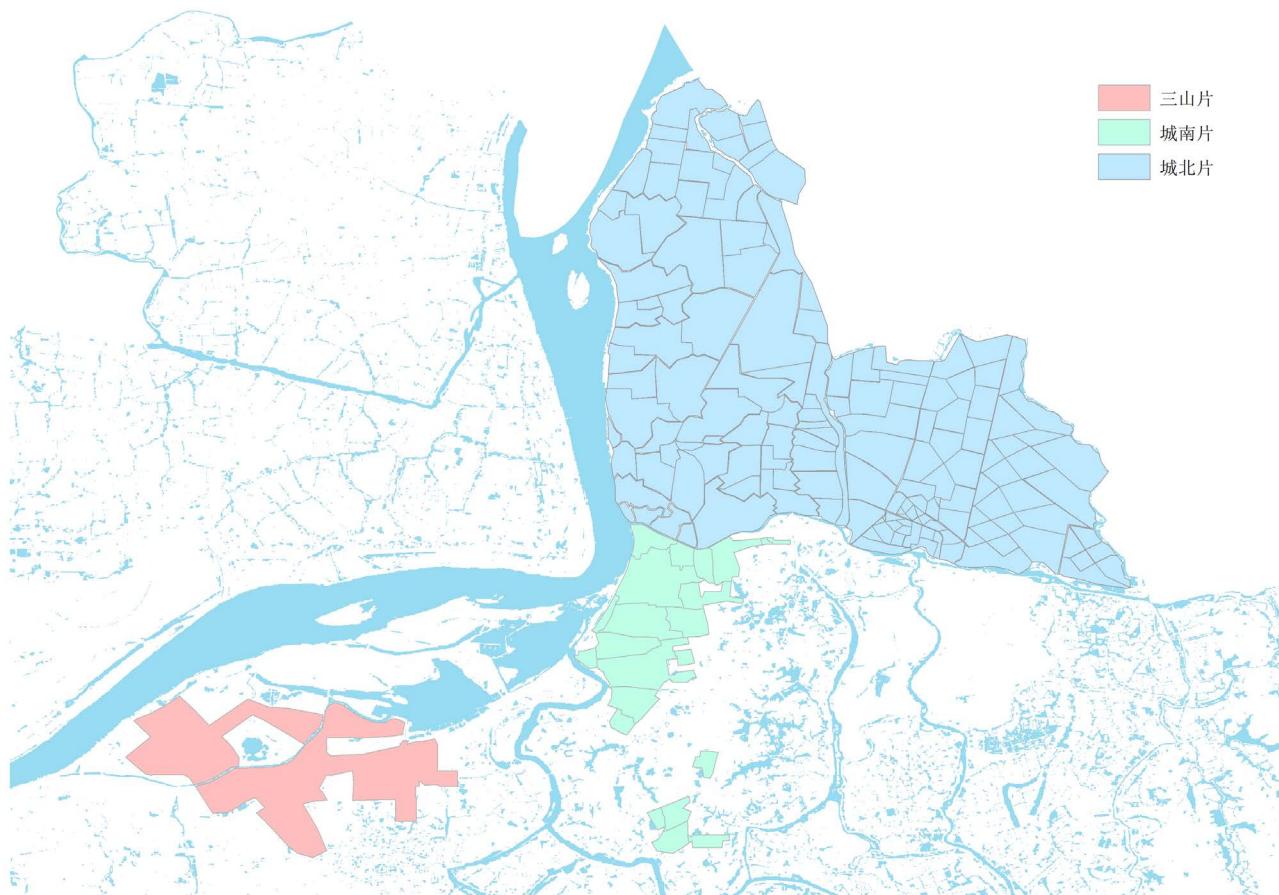


Figure 3. Sub-catchment of three areas
图 3. 三个片区的子汇水分区

3、水力学参数

地表平均流速取定默认值为 0.3 m/s, 初始损失为 0, 沿程损失系数为 1。时间/面积曲线要考虑汇水区的形状, 选择相应的时间/面积曲线。

3.2. 管网模型构建

管网水动力模型用于模拟城市集水区和排水系统的地表径流、管流、水质和泥沙传输。本文采用 MIKE URBAN CS 管流模块模拟芜湖城区范围内整个管网系统中的水动力情况。

目前收集到的资料主要来源于研究区域内 2015 年的普查 CAD 数据, 经过排查分析, 此次模型的基础数据可靠, 可以用于雨洪模型的建立。

该研究区域的排水管网除了城北区 6.7 km^2 的老城区采用合流制, 城北区其他区域、城南片区和三山片区现状均采用雨污分流的排水体制, 雨天降雨径流通过雨水管网系统进入城市内河(渠)及景观水系。城北区的 6.7 km^2 老城区管网末端通过 5 座泵站直接外排至青弋江和长江。MIKE URBAN 水文模型计算所得到的径流量作为流量边界条件用以计算管流模型。

在 MIKE URBAN 搭建的排水管网模型中, 城北片区共有管线 5002 条, 节点 5723 个, 圆管管径 DN300~2000, 方管尺寸 300G300~10700G2500, 管线总长 561.30 km; 城南片区共有管线 6360 条, 节点 6623 个, 圆管管径 DN300~2000, 方管尺寸 400G400~4000G2000, 管线总长 203.78 km; 三山片区共有管线 2835 条, 节点 2972 个, 圆管管径 DN300~2000, 方管尺寸 500G900~1800G1600, 管线总长 79.23 km。三个片区的排水系统如图 4~6。



Figure 4. Current hydrodynamic model of rainwater pipe network in Chengbei area

图 4. 城北区城市管网现状水动力模型



Figure 5. Current hydrodynamic model of rainwater pipe network in Chennan area

图 5. 城南区城市管网现状水动力模型



Figure 6. Current hydrodynamic model of rainwater pipe network in Sanshan area
图 6. 三山区城市管网现状水动力模型

3.3. 河网水动力模型构建

河网水动力模拟的基本目的是提供河道各个断面、各个时刻的水位和流量等水文要素信息，并可以模拟水库调度、闸坝调度、桥涵等对河道水文条件的影响。本文采用 MIKE 11 HD 和 SO 模型用于模拟研究区域复杂河网、模拟闸门、水泵等各类水工建筑物的运营调度。

芜湖市中心城区的主要建成区的一维河道水文水动力模型也分为城北片区、城南片区、三山片区分别进行模拟和计算。每个片区的河道分为外河(长江、青弋江等)及圩区内河道，圩内河道通过泵站与外江相连。研究区域内所有的外河被概化为一整套框架模型，并被搭建到各片区的水动力模型中，为各片区的水动力模型提供边界。

1) 河网概化

城北片区共概化河道 156 条，城南片区共概化河道 112 条，三山片区共概化河道 115 条。

2) 断面及水面率概化

现状工况河道断面采用实测断面。湖泊采用了大断面和额外库容的方法进行概化，水库采用了大断面在模型中进行了概化。

3) 埤区内泵站设置

城北片共有闸门 8 座，泵站 25 座，排涝能力共计 $490 \text{ m}^3/\text{s}$ 。城南片共有泵站 31 座，排涝能力共计 $223.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 。三山片共有闸门 4 座，泵站 39 座，排涝能力共计 $225 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.4. 城市排涝模型构建

1) 模型构建

本文研究区域的耦合模型是将一维管网模型、河道模型以及二维地表漫流模型进行耦合模拟计算。具体分为：城区管网模型与二维地表模型耦合；城区管网模型与河道模型耦合；河道模型与二维地表模型耦合。如图 7~9 所示。

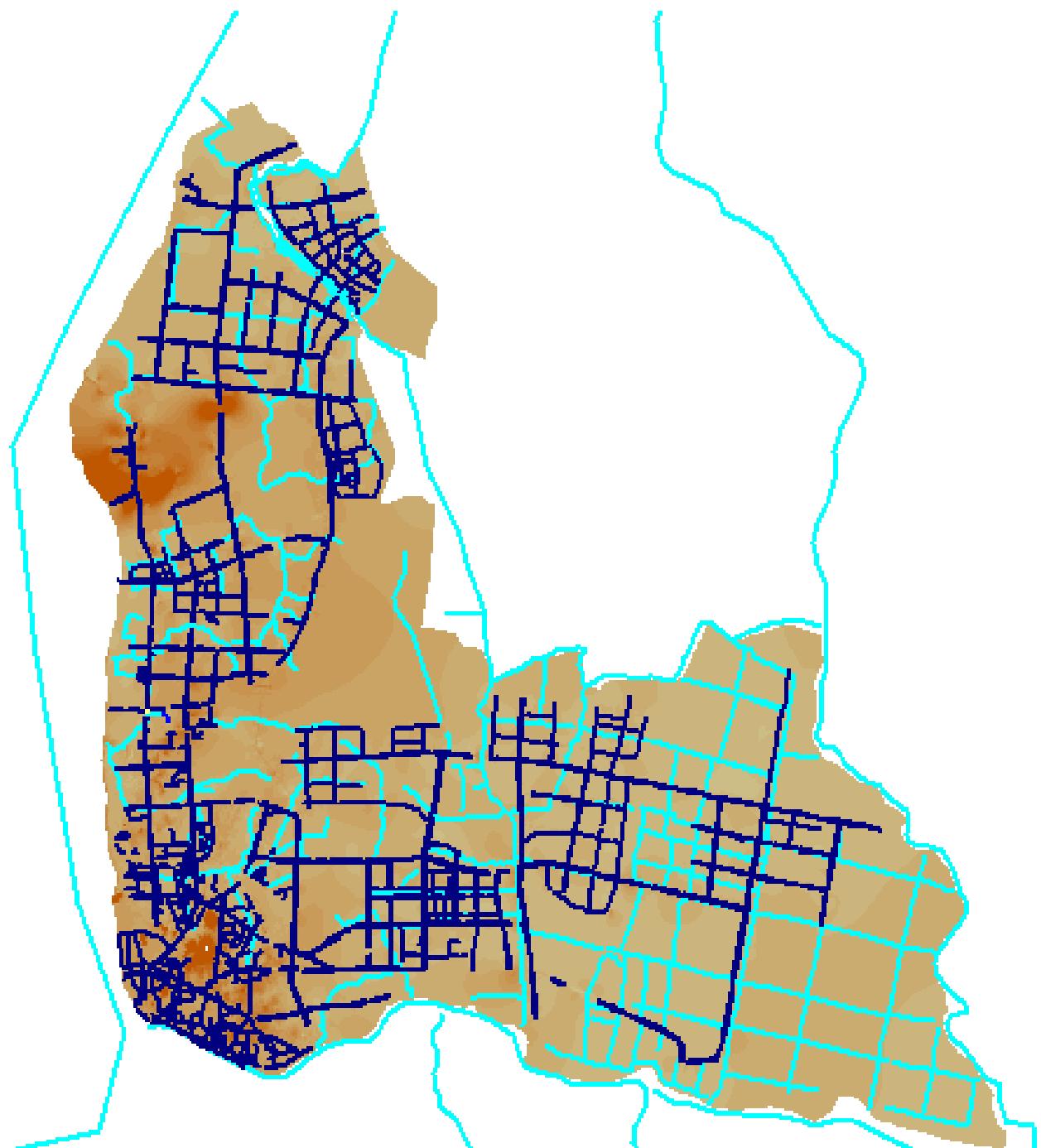


Figure 7. The coupling model of Chengbei area

图 7. 城北片耦合模型示意图

2) 模型率定及验证

耦合模型模拟 30 年一遇 24 h 降雨条件下的积水情况，并结合实际积水点资料进行模型的定性校验。将模拟得到的内涝积水结果与实测的渍水点分布进行比对，各片区的主要积水点基本与易涝点相吻和，反应出芜湖市城市内涝基本情况。

3) 模型成果



Figure 8. The coupling model of Chengnan area

图 8. 城南片耦合模型示意图

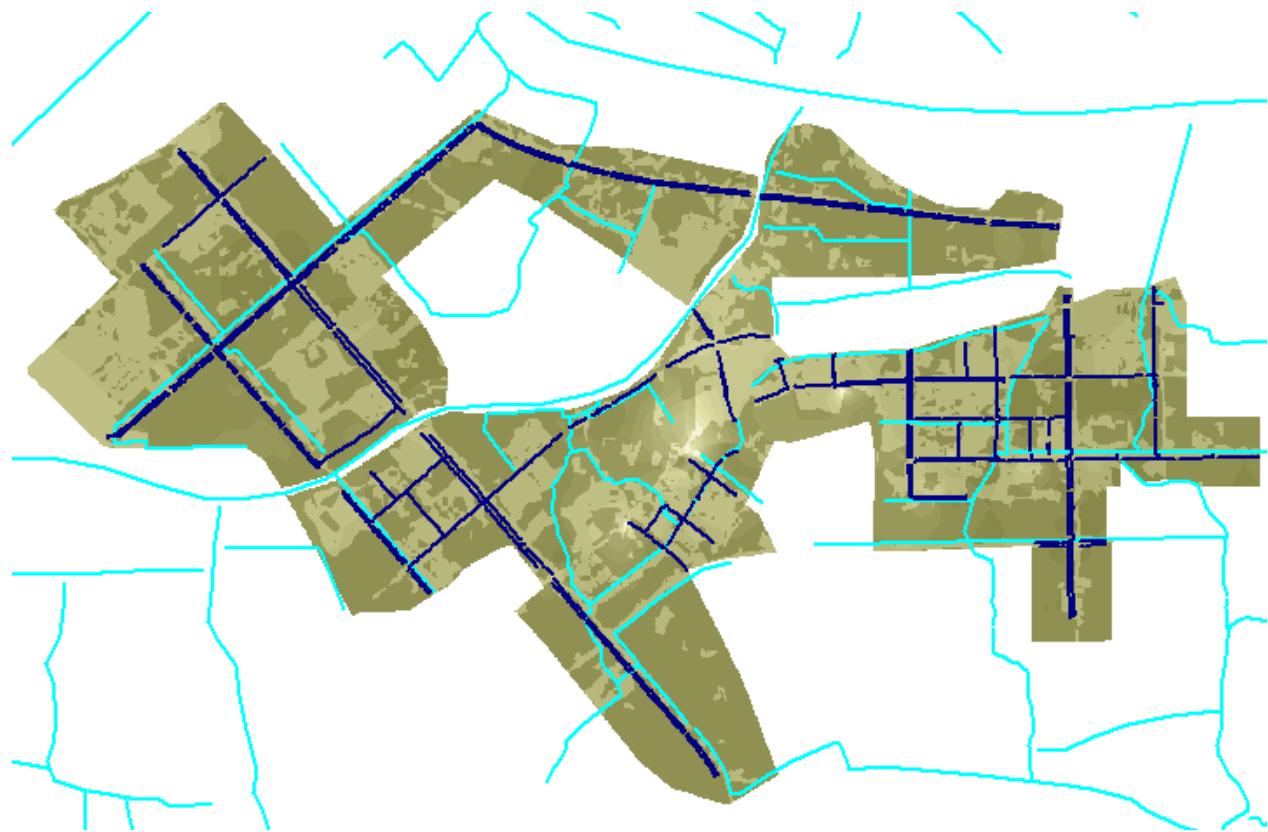


Figure 9. The coupling model of Sanshan area

图 9. 三山片耦合模型示意图

根据芜湖市的排涝规划分区和中心城区内涝防治标准,按照积水深度和积水时间将内涝风险分为三个等级,如表 2 所示:

Table 2. Waterlogging risk level

表 2. 内涝风险等级

内涝风险等级	积水深度 $h(cm)$	积水时间 $t(h)$
低风险区	$15 < h \leq 30$	>1.0
中风险区	$30 < h \leq 50$	>1.0
高风险区	$H > 50$	>1.0

通过模拟 30 年一遇 24 h 降雨条件下的积水情况,发现各片区模型积水范围较大。根据模型可以定量得到芜湖市中心城区内涝风险分布情况如表 3 所示。由于芜湖市城北片属于老城区,大部分管网标准不满足 3 年一遇,对应的各等级风险区面积最大。通过分析各片区不同等级的内涝面积跟相应片区建成区的面积的比值,可以发现城南片对应的高风险区比例最大,通过模型结果和实际地图对比发现,城南片的大片积水区域均处于道路两边的施工地或建筑附近的大片空地,市政管线雨峰期间溢流,溢流雨水根据地形流入地势低洼处且不易退去。

通过模型分析得到城区内涝风险分布情况,可以为后续的城区内涝防治工程实施和管理提供依据。各片区内涝风险点见下图 10~12。

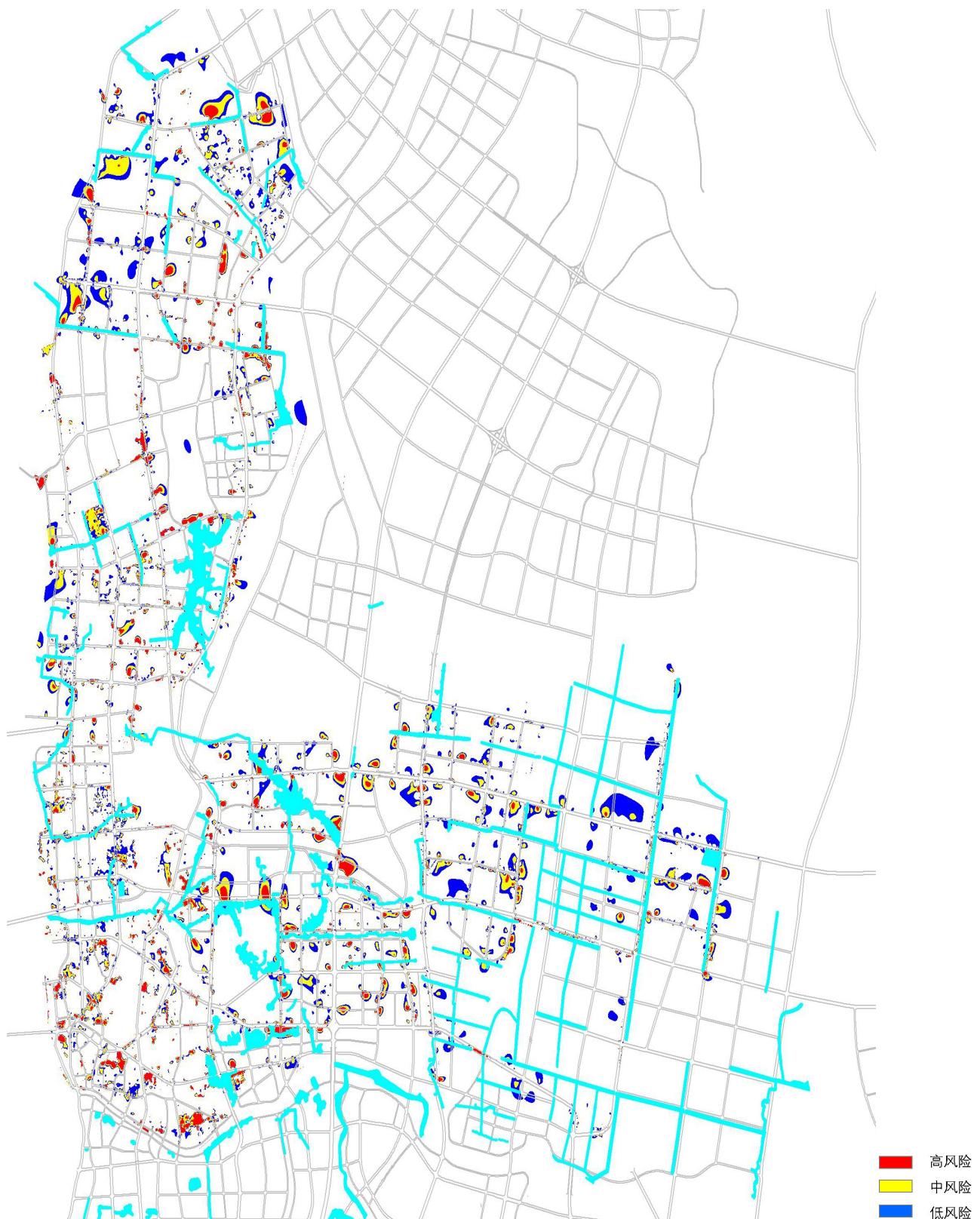


Figure 10. Waterlogging risk distribution in Chengbei area

图 10. 城北片内涝风险分布情况

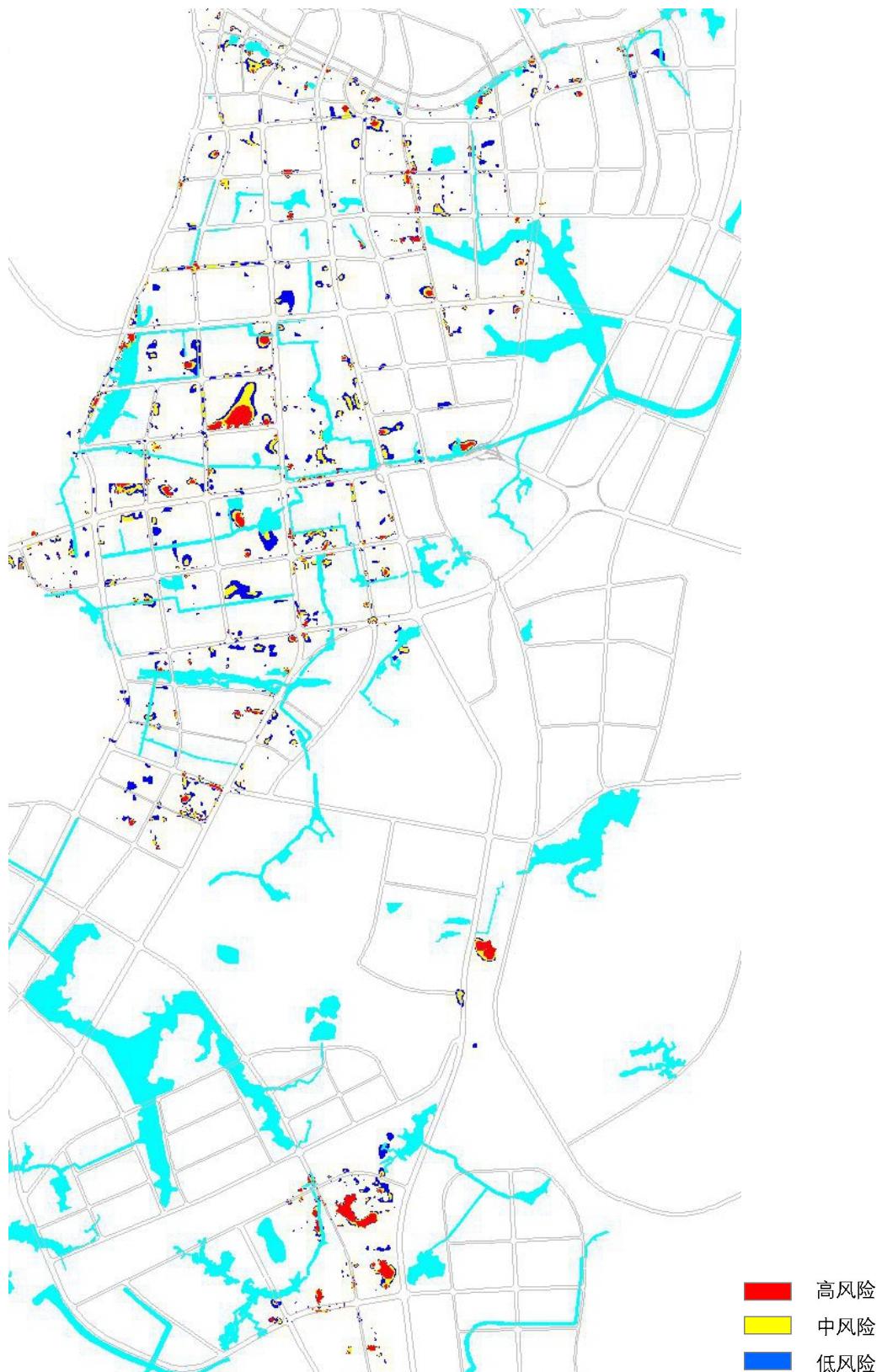


Figure 11. Waterlogging risk distribution in Chengnan area
图 11. 城南片内涝风险分布情况

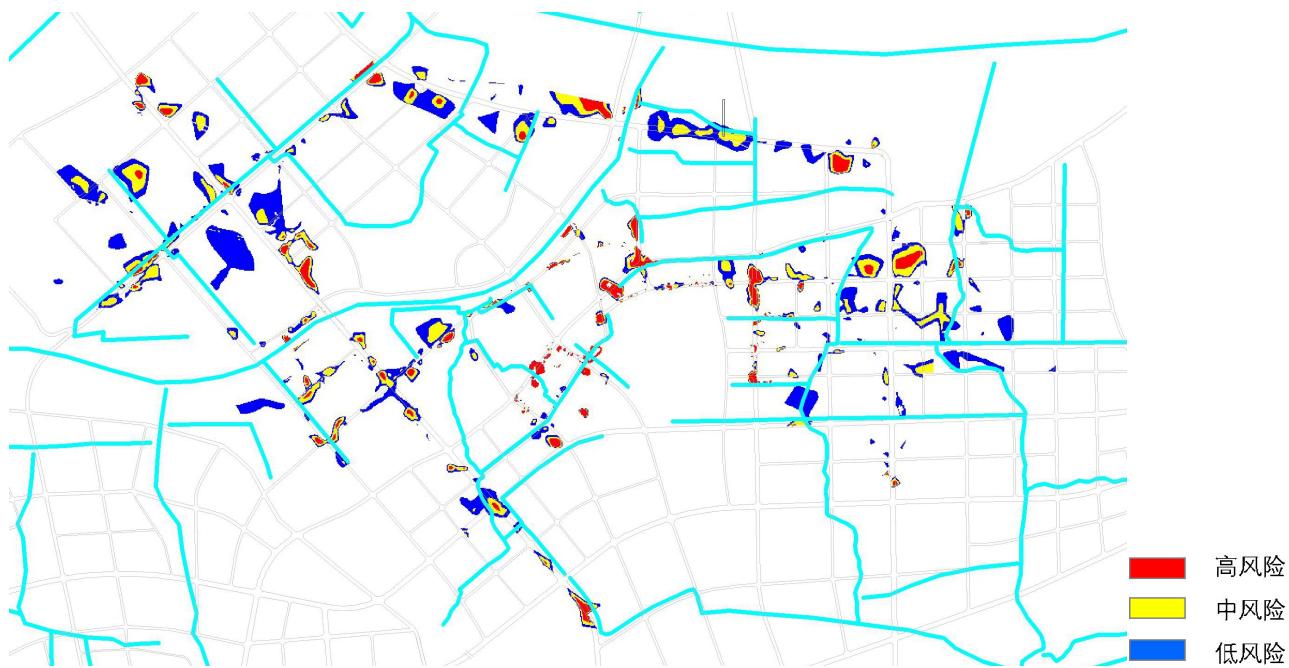


Figure 12. Waterlogging risk distribution in Sanshan area
图 12. 三山片内涝风险分布情况

Table 3. Waterlogging risk distribution in Wuhu urban area (km^2)

表 3. 芜湖市中心城区内涝风险分布情况(km^2)

片区	低风险区	中风险区	高风险区
城北	面积	10.3	5.4
	比例	4.19%	2.20%
城南	面积	1.35	0.78
	比例	3.95%	2.28%
三山	面积	3	1.26
	比例	7.41%	3.11%
合计	面积	14.65	7.44
	比例	4.57%	2.32%

4. 总结

本文基于 MIKE FLOOD, 耦合水文数学模型、管网数学模型、一维河网模型、二维地面数学模型, 分析设计重现期为 30 年一遇的 24 小时情况下的芜湖市中心城区内涝风险分布情况, 根据风险等级划分得到各片区的高、中、低风险范围。芜湖市内涝高、中、低风险区域面积分别合计为 4.53 km^2 、 7.44 km^2 、 14.65 km^2 , 对应比例为 1.41%、2.32%、4.57%。其中芜湖市城北片内涝主要是由于雨污水管网排水标准不达标; 城南和三山内涝原因是城市新建区域较多, 存在大面积的低洼空间。根据芜湖中心城区各片区的排涝情况、存在问题, 结合本次模型的计算分析, 可以为城市排涝工程提供依据。

参考文献

- [1] US EPA. Modeling of non-point source water quality in urban and non-urban areas. EPA/600/3-91/039 June 1991.

- [2] BLANC, D., KELLAGHER, R., PHAN, L., et al. FLUPOL-MOSQUITO models, simulations, critical analysis and development. *Water Science and Technology*, 1995, 32(1): 185-192. <https://doi.org/10.2166/wst.1995.0042>
- [3] DHI Water & Environment. MIKE FLOOD modelling of urban flooding a step-by-step training guide. 2012.
- [4] DHI Water & Environment. MIKE FLOOD modelling of river flooding a step-by-step training guide. 2012.
- [5] 岑国平, 詹道江, 等. 城市雨水管道计算模型[J]. 中国给水排水, 1993, 9(1): 37-40.
QIN Guoping, ZHAN Daojiang, et al. Urban rainwater pipeline calculation model. *China Water & Wastewater*, 1993, 9(1): 37-40. (in Chinese)
- [6] 徐向阳. 平原城市雨洪过程模拟[J]. 水利学报, 1998, 10(8): 34-37.
XU Xiangyang. Simulation of storm runoff process for plain urban. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 10(8): 34-37. (in Chinese)
- [7] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨涝渍仿真模拟系统[J]. 水利学报, 2000(11): 34-42.
QIU Jinwei, LI Na, CHENG Xiaotao, et al. The simulation system for heavy rainfall in Tianjin City. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000(11): 34-42. (in Chinese)
- [8] 夏军, 张印, 梁昌梅, 等. 城市雨洪模型研究综述[J]. 武汉大学学报, 2018, 51(2): 96-105.
XIA Jun, ZHANG Yin, LIANG Changmei, et al. Review on urban storm water models. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, 51(2): 96-105. (in Chinese)
- [9] 李虎成, 王天宇, 王灵华, 等. 基于 MIKEFLOOD 的典型滨湖城市排水防涝系统规划[J]. 中国农村水利水电, 2017(4): 77-80.
LI Hucheng, WANG Tianyu, WANG Linghua, et al. Typical lakeside city drainage waterlogging system planning based on MIKE FLOOD. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(4): 77-80. (in Chinese)
- [10] 陈彩虹, 刘卉芳, 杨玉生, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的道路工程内涝分析[J]. 水利规划与设计, 2019(6): 112-116.
CHEN Caihong, LIU Huifang, YANG Yusheng, et al. Waterlogging analysis of road works based on MIKE FLOOD coupling model. *Water Resources Planning and Design*, 2019(6): 112-116. (in Chinese)
- [11] 陆野. 芜湖市城市洪水风险分析计算研究[D]. 南京: 河海大学, 2017.
LU Ye. The study on the calculation and analysis of flood risk in Wuhu. Nanjing: Hehai University, 2017. (in Chinese)