

基于MIKE模型的极端降雨情景下流域城市内涝风险评估

刘嫣然^{1,2}, 郑伯雄^{1,2}, 陈丹婷^{1,2}, 刘欣悦^{1,2}, 陈芋恺^{1,2}, 霍艾迪^{1,2,3,4*}

¹旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安

²长安大学水利与环境学院, 陕西 西安

³西安市流域空间水文模拟监测与预警国际科技合作基地(长安大学), 陕西 西安

⁴自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2023年4月14日; 录用日期: 2023年5月25日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

由极端暴雨引起的城市洪涝灾害往往具有突发性强的特点, 使得城市洪涝灾害的防控极具挑战性。本文利用MIKE FLOOD洪水模拟软件来构建流域城市雨洪模型, 将一维河网模块MIKE 11与二维地表径流模块MIKE 21动态耦合, 以降雨历时4 h, 重现期为20a、50a、100a一遇的降雨过程为边界条件进行模拟, 得到不同降雨条件下研究区的淹没情况。以积水深度为评估指标, 划分了内涝风险区域等级(内涝无风险、低风险、中风险、高风险区域)。结果发现: 本耦合模型适用于城市内涝风险评估管理, 动态耦合模拟效果较好, 结果与实际发生及调查情况基本吻合; 随着新兴流域城市化不断发展, 建筑密度越来越大, 下垫面硬化率逐年提高, 雨水下渗率逐年降低, 排水管网负荷越来越大, 旧的排水管网系统很难满足现在多数新兴城市排水需求。本研究旨在为极端气候影响下的城市安全防控方案的制定, 建立快速准确的风险防控体系和防洪排涝规划、洪涝预警、抢险救灾等提供决策依据。

关键词

极端降雨条件, 流域城市, 城市内涝, 灾害防控, MIKE模型

Urban Waterlogging Risk Assessment in a Watershed under Extreme Rainfall Scenario Based on MIKE Model

Yanran Liu^{1,2}, Boxiong Zheng^{1,2}, Danting Chen^{1,2}, Xinyue Liu^{1,2}, Yukai Chen^{1,2}, Aidi Huo^{1,2,3,4*}

¹Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Xi'an Shaanxi

²School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

*通讯作者。

文章引用: 刘嫣然, 郑伯雄, 陈丹婷, 刘欣悦, 陈芋恺, 霍艾迪. 基于 MIKE 模型的极端降雨情景下流域城市内涝风险评估[J]. 自然科学, 2023, 11(3): 537-547. DOI: 10.12677/ojns.2023.113064

³Xi'an Monitoring, Modelling and Early Warning of Watershed Spatial Hydrology International Science and Technology Cooperation Base (Chang'an University), Xi'an Shaanxi

⁴Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 14th, 2023; accepted: May 25th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

Urban flood disasters caused by extreme rainstorm are often characterized by sudden intensity, which makes the prevention and control of urban flood disasters extremely challenging. This study uses MIKE FLOOD flood simulation software to construct the urban rainwater model, dynamic coupling the one-dimensional river network module MIKE 11 with the two-dimensional surface runoff module MIKE 21, and uses the MIKE FLOOD model to stimulate the inundation status in Xi-feng area separately when it encountered rainfall duration 4 h, the return periods of 20 a, 50 a, 100 a to gain inundation status under different rainfall conditions in the study area. Taking the depth of waterlogging as the evaluation index, the waterlogging risk areas were classified as waterlogging risk-free, low risk, medium risk and high risk areas. The research results show that the dynamic coupling simulation effect is good, the results are basically consistent with the actual occurrence and investigation, and the coupling model is suitable for urban waterlogging risk assessment management; with the continuous development of basin urbanization, the building density increases, the hardening rate increases, the rainwater infiltration rate decreases, the load of drainage pipe network is increasing year by year, and the old drainage pipe network system is difficult to meet the current urban drainage demands. This study aims to provide decision-making basis for the formulation of urban safety prevention and control programs under the influence of extreme climate, to establish a rapid and accurate risk prevention and control system, flood control and drainage planning, flood warning, and emergency rescue and relief.

Keywords

Extreme Conditions, Urban Waterlogging, Drainage Basin Cities, Disaster Prevention and Control, MIKE Model

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

我国地处东亚大陆，地形地势复杂，地区气候差异大，降雨分布不均，暴雨洪涝灾害突出。据《中国水旱灾害防御公报 2020》[1]显示，2020 年全国平均降水量较常年多 10%，且出现了 1998 年以来的最严重汛情，全国有 836 条河流发生超警戒水位洪水；2021 年的情况依然不容乐观，其中 7 月 17 日至 23 日河南省遭遇的历史罕见特大暴雨更是造成了重大人员伤亡和财产损失，在不到一个月的时间内，全省 150 个县(市、区) 1478.6 万人受灾，直接经济损失高达 1200.6 亿元[2]。

随着气候变化，城市面临突发极端降雨洪水事件时的脆弱性增强，极端降雨引发的洪涝灾害逐渐成为影响其公共安全、制约社会发展的重要因素。因此，如何应对和管理城市暴雨洪涝灾害风险成为当前亟待解决的问题。目前使用最为普遍、准确性得到国内外充分检验的降雨洪水模型主要是 SWMM 模型和 MIKE 模型等。SWMM 模型作为一种分布式的水文模型，在城市管网建设规划、暴雨洪水模拟等

方面应用较多。MIKE 模型模块结构完备, 功能丰富, 能更好地考虑降水、河流、管网、街道流等水文要素, 其中的 MIKE FLOOD 模块能够将任意模块之间建立联系, 因此在城市暴雨洪灾的预测领域中应用较多, 而且由于模型设置参数较少, 在对大尺度流域进行模拟时, 准确度也更高。秦雪对城市内涝管理效果评估的多个研究视角进行了归纳[3]; 胡爱萍通过开展实地勘探, 将庆阳市的水文地质资料进行了详细的收集整理[4]; 张天峰通过使用 SWMM 模型对城市地下排水管网进行模拟, 对庆阳市的城市内涝风险等级进行了分析和评估, 确定了庆阳市内涝阈值[5]; 栾震宇基于 MIKE FLOOD 平台, 将 MIKE URBAN 模型和 MIKE 21 模型进行耦合, 构建城市内涝模型, 模拟了湖南新化县主要区域的排涝情况[6]; 陈彩虹使用 MIKE FLOOD 模型, 模拟了某城市规划的在建道路工程项目在现状条件和规划条件下的内涝情况[7]; Roland Löwe 等将 MIKE FLOOD 与城市发展模型 DAnCE4Water、GDAL 库通过 Python 集成, 提供了一种新工具, 支持在各种潜在的城市发展和气候情景下对各种洪水适应方案进行系统评估[8]; Emmanuel Mignot 等回顾了基于实验室实验的 45 项城市洪水研究, 讨论了各种研究中涵盖的主流过程, 并详细介绍了记录的流动变量[9], 对于建模有一定的指导作用。除了使用 SWMM 软件和 MIKE 软件搭建模型之外, 近年来国内外的科研人员还在不断探寻其他的城市内涝灾害模拟方法。比如采用了 GIS 等高新技术的数字地形分析[10], 该分析方法的基本原理简单, 但不能具体表现出降雨径流的运动历程; InfoWorksCS 模型[11][12], 以及将水文学和水动力学相结合的方法, 如徐向阳[13]建立的平原城市暴雨洪水模型等, 这些分析方法需要把区域划分为若干个集水单位, 且只能提供部分地区的行洪过程, 存在一定的局限性。

本文通过对甘肃省庆阳市西峰区进行分析, 查找相关资料收集研究区域气候、地形地貌等资料; 利用 MIKE 11 建立降雨径流模型和水动力学模型, 利用 MIKE 21 建立二维漫流模型, 并将一维和二维模型通过 MIKE FLOOD 耦合, 构建研究区的城市洪涝灾害雨洪模型, 并进行模拟; 对不同降雨条件下流域城市的淹没情况、水灾害的发生情况进行分析, 对模型进行验证并划分雨洪灾害风险级别; 最后将极端降雨代入模型得出该情况下流域城市淹没情况, 结合城市人口分布及地理条件, 建立快速精准的风险防控体系, 为洪涝灾害预警、防洪排涝规划、抢险救灾方案等提供决策理论依据。

2. 研究区域概况

研究区位于北纬 35.724°, 东经 107.638°, 东靠子午岭, 西倚六盘山, 北靠羊圈山, 中南段低缓, 其余三面隆起, 全境呈簸箕状, 被称为“陇东盆地”。从地形地势以及径流方面分析, 此处排水比较顺畅, 不易产生大面积的积水, 但同时因为地形高低起伏, 局部地区低洼, 容易发生积水内涝[14][15][16][17]。该地区气候属于大陆性季风气候, 冬季寒冷而降水较少, 夏季燥热而降水集中。该地全年平均降水量在 408.9 mm 至 602.0 mm 之间, 且降水多集中在 7、8、9 三个月, 其降水量约占年总降雨量的 55%到 60%左右, 且经常以大雨、暴雨的形式出现, 容易发生城市内涝灾害。

3. 研究方法

3.1. 模型构建

MIKE 11 模型以求解圣维南方程组作为模型应用的基础, 主要包括水动力模块、对流扩散模块等。模型可以根据不同研究区的地形特征、水流条件等环境因素进行模拟。搭建一维河网模型, 需要制作河网文件、断面文件、边界条件文件以及参数文件四个运行文件, 制作完成后将其导入模拟文件模块, 设置好模拟时间范围及计算时间步长后即可进行河流水动力模拟。

根据收集到的流量资料, 本次模型验证选取主河道上的南塬村断面和西庄村断面, 对比验证实际水位与模拟计算所得水位, 结果显示模型模拟结果与实际水位相差在 -0.30~0.30 m 范围内, 误差较小, 模型拟合情况较好, 表明该模型能较好的反映出实际的河流情况。模拟水位与实际水位对比情况见表 1。

Table 1. The comparison of actual and simulated water level
表 1. 实际水位与模拟水位对比

断面名称	实际水位 m	模拟水位 m	差值 m
南堰村断面	4.36	4.08	0.28
西庄村断面	3.61	3.77	-0.16

MIKE 21 模型的基本运行方法为：按照地形及地物特点，把所研究的区域分割为数量庞大的网格，并以这些网格为基本单元，通过求解流体运动的基本方程来进行数值运算，就能够求得洪水在各时间点的流向、速度和淹没水深[18]。在本设计中，构建 MIKE 21 地表漫流模型首先需要建立 MIKE 21 地形文件，其次构建 MIKE 21 模型文件，最后输出配置结果文件，对模型运行结果数据的输出过程进行设置，如储存文件名称，储存的时间步长等。在所有的参数设置完成以后，进行仿真模拟运算。

MIKE FLOOD 能够将 MIKE 11 等一维模型、MIKE 21 二维模型联系在一起，建立动态耦合仿真分析的模拟系统，模型能够同时对明渠河道、排水管网、各类的水工建筑物或市政排水系统等附属建筑及二维的坡面流进行模拟。MIKE FLOOD 模块灵活性非常强，可以将不同模型进行耦合计算。不同的建模需求需要设置不同的连接方式。本次洪水模拟的主要目的是得到极端条件下的洪水漫溢资料，故选择用侧向连接的方式将 MIKE 11 一维河网模型和 MIKE 21 二维地表漫流模型耦合计算。

在本设计中需将 MIKE 11 的全部河网与 MIKE 21 的单元格建立耦合关系，使模型可以自动模拟出境内全部的洪水内涝情况的演进过程。耦合情况见图 1。

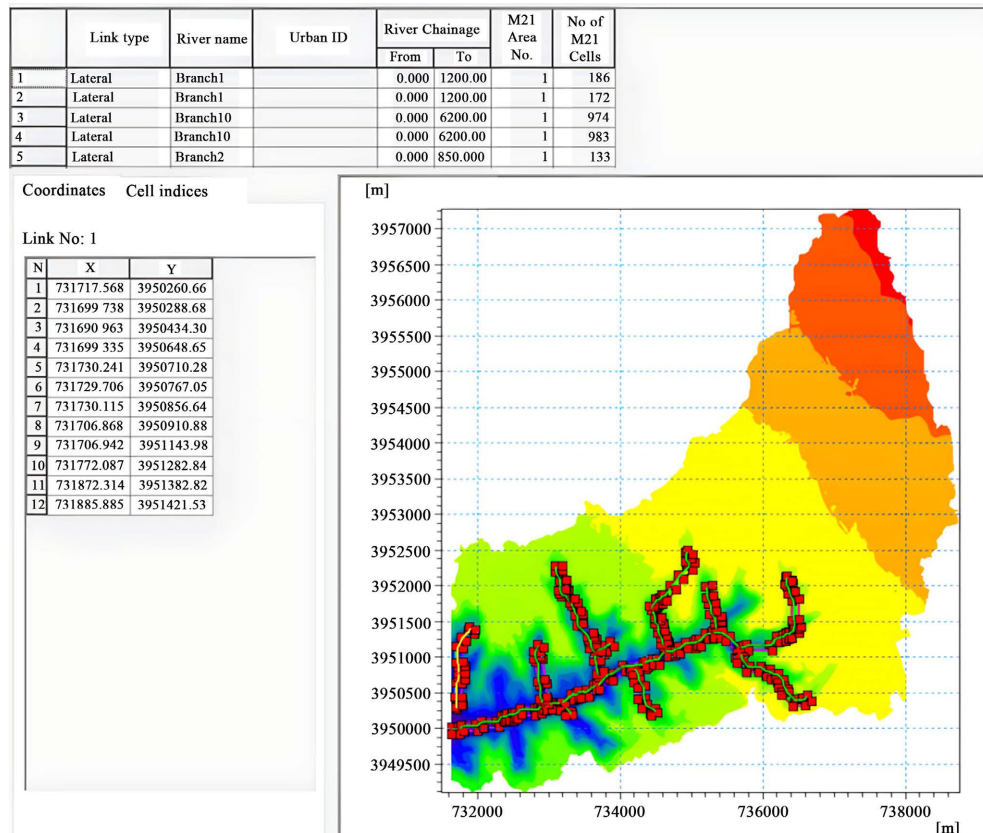


Figure 1. MIKE 11 with the MIKE 21 coupling in Fig
图 1. MIKE 11 与 MIKE 21 耦合图

3.2. 情景设计

在综合考虑了研究区域的现有基础资料和实际情况后, 拟应用情景模拟法对研究区城市内涝风险进行分析, 基于较为成熟的 MIKE 模型, 针对不同设计频率的暴雨强度下研究区域发生的内涝情形, 采用基于积水深度的方法与积水分析、管道排水能力进行研究区城市内涝风险的模拟分析。

根据 2015 年研究区气象局按照《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》编制的暴雨强度公式。暴雨强度为耿贝尔型, 强度公式为[19]:

$$q = \frac{1035.6 [1 + 1.061 \times \lg(p)]}{(t + 7.881)^{0.7329}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, t 为降雨历时, p 为暴雨重现期。

降雨在时空上分布不均匀, 而由于城市极端降雨洪涝灾害风险模拟的汇水区域相对于整个研究区域面积较小, 降雨空间上的不均匀性影响微乎其微。芝加哥雨型法是一种根据暴雨强度公式和计算雨峰位置系数的典型降雨过程设计方法, 在解决降雨的时间不均性问题, 芝加哥雨型法是一种公认较为成熟的方法[20] [21]。因此本文选用芝加哥雨型法对研究区的暴雨进行雨型设计。

芝加哥雨型法是在暴雨强度公式的基础上通过引入雨峰位置系数 r 来描述暴雨峰值发生的时间, 将降雨历时分为峰前和峰后两部分时间序列, 查资料得当地综合雨峰系数为 0.38。峰前公式与峰后公式如下:

峰前公式[21]:

$$i(t_1) = \frac{A \left[\frac{(1-n)t_1}{r} + b \right]}{\left(\frac{t_1}{r} + b \right)^{n+1}} \quad (2)$$

峰后公式[21]:

$$i(t_2) = \frac{A \left[\frac{(1-n)t_2}{1-r} + b \right]}{\left(\frac{t_2}{1-r} + b \right)^{n+1}} \quad (3)$$

式中: $i(t_1)$ 为峰前的降雨瞬时强度, t_1 为此时对应的时刻; $i(t_2)$ 为峰后的降雨强度, t_2 为此时对应的时刻; A 为雨力参数, 即重现期为 1a 时的 1 min 设计降雨量(mm); n 为暴雨衰减指数, 与重现期有关; b 为降雨历时修正参数, 即对暴雨强度公式两边求对数后能使曲线画成直线所加的一个时间常数(min); r 为雨峰位置系数。

暴雨重现期的设计与研究区域的气候条件及地理环境有着紧密的联系[22] [23], 结合多方面因素考虑, 选择 $P=20$ 、 $P=50$ 、 $P=100$ 三种不同设计频率下的降雨类型作为模型模拟的暴雨数据, 且三种重现期的设计暴雨均选用四小时降雨过程。设计降雨过程见图 2。

根据我国住建部在 2017 年发布的《城市内涝防治规划标准》中针对城市内涝灾害风险的等级评估划分, 结合西峰区城市不同区域敏感程度和重要程度的实际条件, 采用积水深度为单一指标分别对一般降雨条件、极端降雨条件下的城市内涝风险级别进行划分。

对于一般的降雨情景, 将积水深度设置 3 个阈值: 分别为 0.1 m、0.2 m、0.4 m。当局部地区的积水深度低于 0.1 m 时, 该区域的内涝被认定为一般积水, 划分为无风险地区; 积水深度在 0.1 m 到 0.2 m 之

间时,会影响城市的交通,划分为低风险地区;区域积水深度在 0.2 m 到 0.4 m 之间,将严重影响市民生活和城市交通,划分为中风险地区;而积水深度高于 0.4 m 时,城市交通以及居民的生命和财产安全、基础设施等都会受到严重威胁,划分为高风险地区。

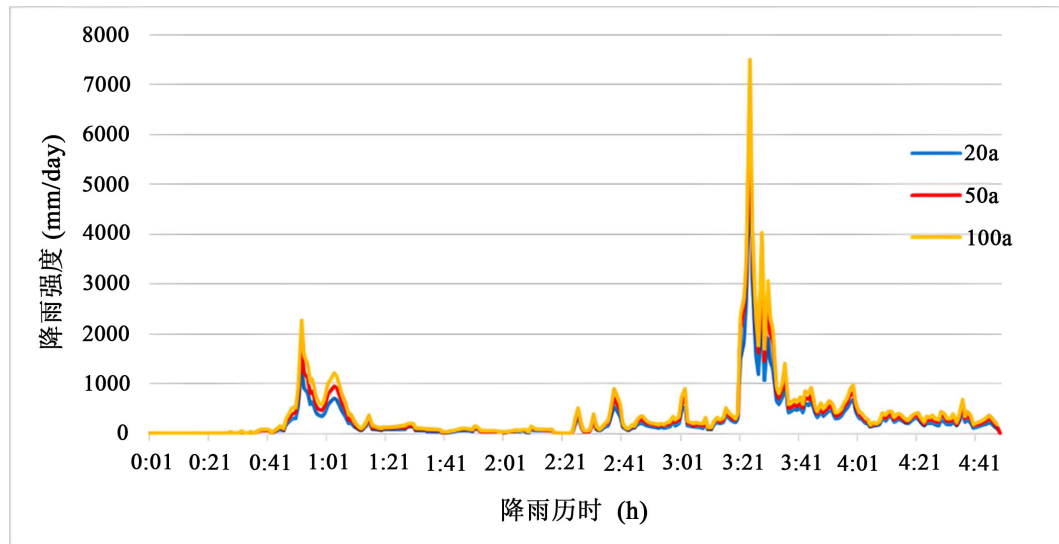


Figure 2. Rainfall processes with different recurrence periods

图 2. 不同重现期的降雨过程

对于极端的降雨情景,同样设置三个积水深度阈值对内涝风险等级进行划分:分别为 0.1 m、0.3 m、0.5 m。应用积水深度为内涝灾害风险级别的详细划分标准见表 2、表 3。

Table 2. Table of waterlogging disaster risk classification under general rainfall conditions

表 2. 一般降雨情况下内涝灾害风险等级划分表

内涝风险等级	无风险区	低风险区	中风险区	高风险区
积水深度(h/m)	$H \leq 0.1$	$0.1 < h \leq 0.2$	$0.2 < h \leq 0.4$	$0.4 < h$

Table 3. Classification table of the risk levels of waterlogging disasters under extreme rainfall conditions

表 3. 极端降雨情况下内涝灾害风险级别划分表

内涝风险等级	无风险区	低风险区	中风险区	高风险区
积水深度(h/m)	$H \leq 0.1$	$0.1 < h \leq 0.3$	$0.3 < h \leq 0.5$	$0.5 < h$

4. 结果与分析

4.1. 重现期 20a 设计暴雨情况

模型代入设计重现期为 20a 的特大暴雨情况,模拟结果见图 3。

模拟受灾情况见表 4。

4.2. 重现期 50a 设计暴雨情况

模型代入设计重现期为 50a 的特大暴雨情况,模拟结果见图 4。

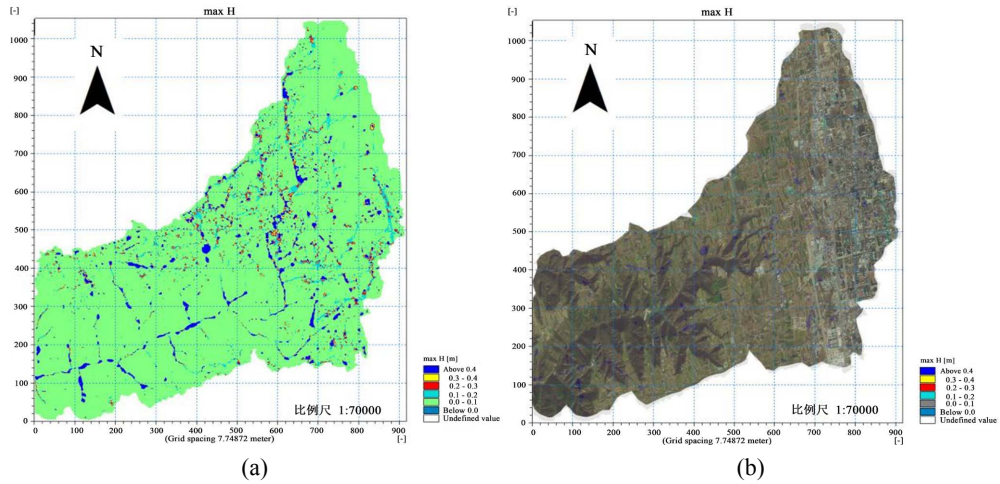


Figure 3. Effect diagram of the maximum submerged water depth in a rainstorm with the return period of 20a ((a) simulated flooding result map; (b) overlay of simulation results on remote sensing images)
图 3. 20a 一遇暴雨情况最大淹没水深效果图((a) 模拟淹没结果图; (b) 模拟结果叠加遥感影像图)

Table 4. 20a Statistical table of major risk areas of single rainstorm waterlogging
表 4. 20a 一遇暴雨内涝主要风险区域统计表

内涝风险等级	低风险区	中风险区	高风险区
主要风险区域	长庆大道瑞涛修理厂 庆化大道中通快运 南大街与合水巷交接点 人民医院西 庆化大道西门大厦南 244 国道车途汽修 锦绣花园	城北大道林苑小区西 恒美城市花园 董志塬大道 马莲河大道 长庆大道庆州西路口	长庆大道智慧树幼儿园 北街实验小学 寨子巷平民大药房 北大街鸿元丽都西 庆阳一中 大明宫嘉鑫国际建材家居城 长庆大道九龙春酒业 金鹏家园 超微骨科医院

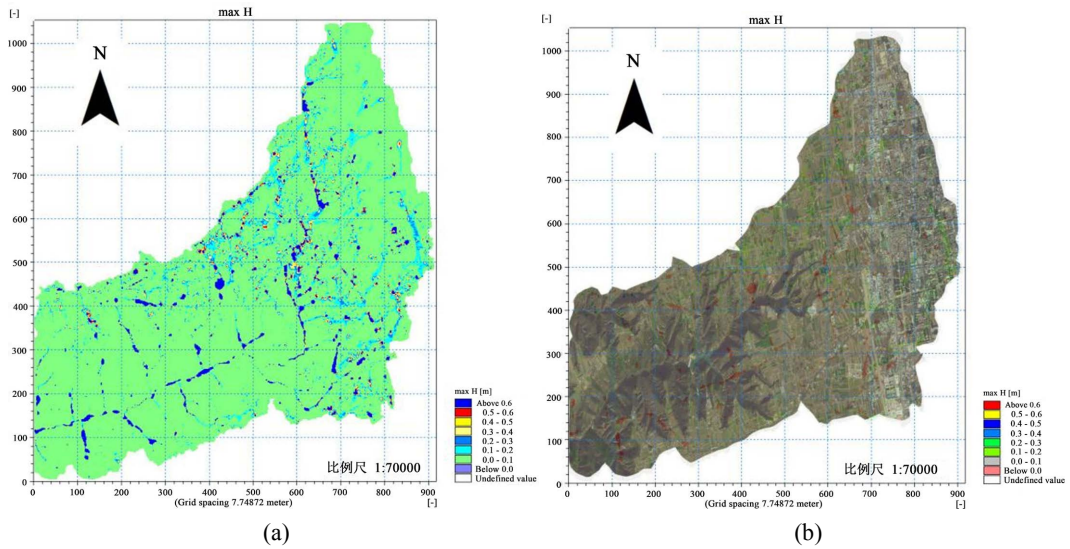


Figure 4. Effect diagram of the maximum submerged water depth in a rainstorm with the return period of 50a ((a) simulated flooding result map; (b) overlay of simulation results on remote sensing images)
图 4. 50a 一遇暴雨情况最大淹没水深效果图((a) 模拟淹没结果图; (b) 模拟结果叠加遥感影像图)

模拟受灾情况见表 5:

Table 5. 50a Statistical table of major risk areas of waterlogging in a rainstorm
表 5. 50a 一遇暴雨内涝主要风险区域统计表

内涝风险等级	低风险区	中风险区	高风险区
主要风险区域	长庆大道瑞涛修理厂 智慧树幼儿园 城北大道林苑小区西 北大街庆阳二中段 南大街与合水巷交接点 人民医院西 恒美城市花园 蓝天幼儿园 董志塬大道 庆化大道锦绣花园段 超微骨科医院 科教新村	北大街鸿元丽都西 马莲河大道 金鹏家园 长庆大道庆州西路口	北街实验小学 寨子巷平民大药房 庆阳一中 大明宫嘉鑫国际建材家居城 长庆大道九龙春酒业 大清真寺 百花祥苑

4.3. 重现期 100a 设计暴雨情况

模型代入设计重现期为 100a 的特大暴雨情况，模拟结果见图 5。

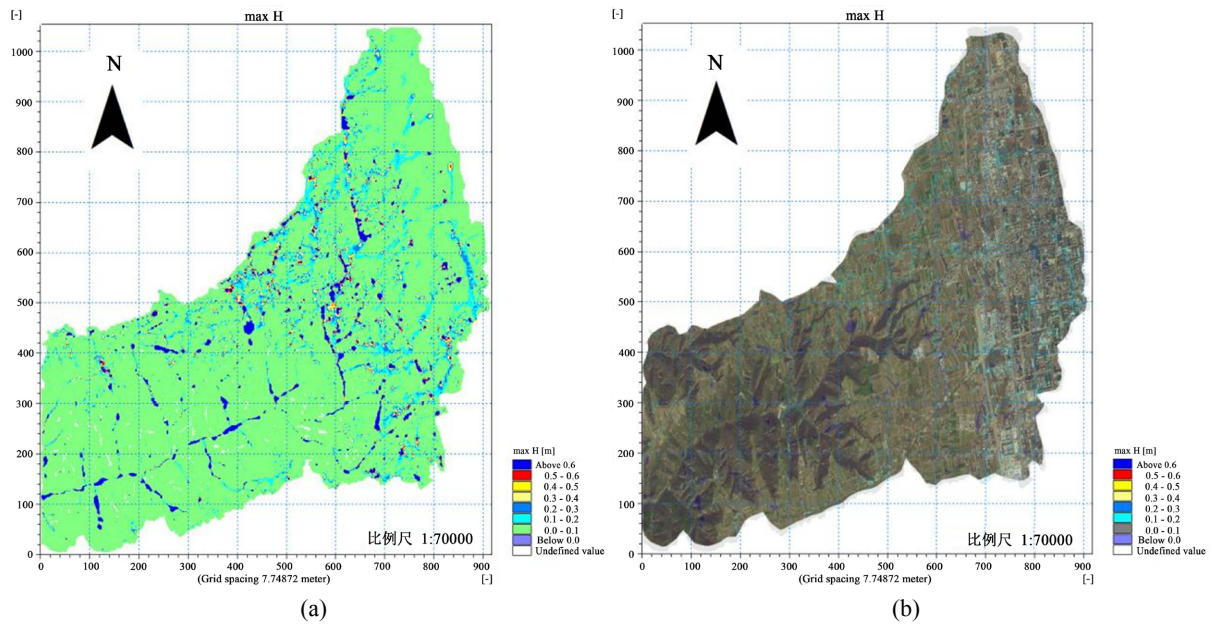


Figure 5. Effect diagram of the maximum submerged water depth in a rainstorm with the return period of 100a ((a) simulated flooding result map; (b) overlay of simulation results on remote sensing images)

图 5. 100a 一遇暴雨情况最大淹没水深效果图((a) 模拟淹没结果图; (b) 模拟结果叠加遥感影像图)

模拟受灾情况见表 6。

本次研究以降雨历时 4 h，重现期为 20a、50a、100a 一遇的降雨过程为边界条件进行模拟，得到研究区不同降雨条件下的淹没情况。通过模拟上述条件下的地面淹没水深，可以清晰地体现区域内的最大

Table 6. 100a Statistical table of major risk areas of waterlogging in a rainstorm
表 6. 100a 一遇暴雨内涝主要风险区域统计表

内涝风险等级	低风险区	中风险区	高风险区
主要风险区域	长庆大道瑞涛修理厂 智慧树幼儿园 北大街庆阳二中段 南大街与合水巷交接点 人民医院西 恒美城市花园 董志塬大道 庆化大道锦绣花园段	北大街鸿元丽都西 马莲河大道 长庆大道庆州西路口 城北大道林苑小区西 科教新村 超微骨科医院 蓝天幼儿园	北街实验小学 寨子巷平民大药房 庆阳一中 大明宫嘉鑫国际建材家居城 长庆大道九龙春酒业 大清真寺 百花祥苑 金鹏家园

淹没水深变化(见图 3~5)。结合重现期条件和淹没空间分布情况,随着重现期不断增大,研究区域在暴雨条件下的地面淹没水深也不断增大。在设计的不同重现期条件下的降雨场景中,研究发现在不同情况下都会有地面淹没情况发生,但是淹没区域空间分布不同。随着降雨量的不断增大,淹没区域也不断扩大,所以面对降水越集中的暴雨天气,及时做好防洪减灾工作显得尤为重要。在降雨历时较小的条件下仍会出现城市内涝的现象,这反映了随着城市路面硬化率不断提高,原有的排水管网系统已经无法满足现有的排水需求,应及时排查完善内涝排水设施。

易涝点是内涝积水的敏感点,也是城市排水防涝工作的重点研究对象。城市的易涝点通常位于城市低洼地区,也有一些地势较高区域由于排水不畅导致积水形成易涝点。结合模拟结果显示,本次研究区域内共有 7 处易涝点,分别为北街实验小学易涝点、寨子巷平民大药房易涝点、庆阳一中易涝点、大明宫嘉鑫国际建材家居城易涝点、长庆大道九龙春酒业易涝点、西峰大清真寺易涝点及百花祥苑易涝点。在庆阳一中处易涝点选取特征点进行观测,其水深变化过程如图 3~5 所示。庆阳一中处易涝点均存在一定程度上的积水,且当 100 年一遇降雨来临的时候,积水深度最大。

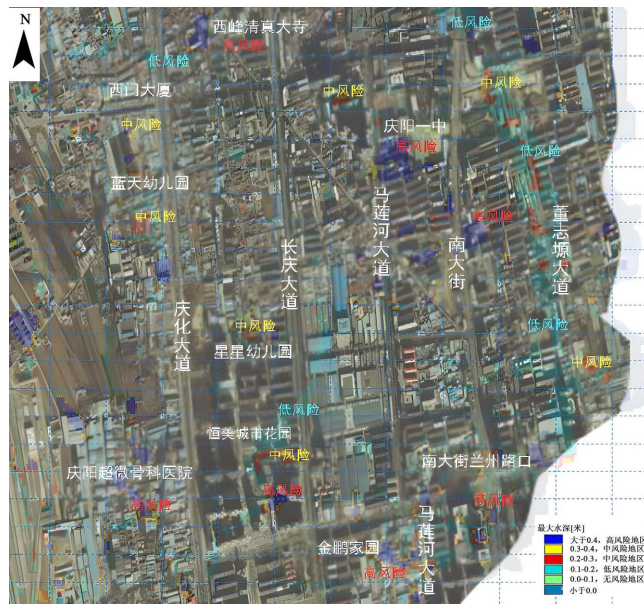


Figure 6. 20 a disaster diagram of the main urban area in the case of a designed rainstorm

图 6. 20 a 一遇设计暴雨情况下主城区受灾示意图

本研究以模型模拟得到的 20a 一遇一般暴雨情况下的研究区细部受灾情况图(见图 6)为主要设计依据,为提高研究区应对内涝灾害能力,同时降低热岛效应的影响,提升当地的宜居度,进行如下设计建议:

1) 提高城市排水设计标准

当今要减轻内涝灾情,应根据降雨量、人口分布及城市经济情况和社会情况,适当地提高当地地下排水管网的设计标准、增大排水管道的设计尺寸和排水管网铺设密度,完善城市防洪排涝体系。模型显示主要的洪涝灾害风险区域集中在南部城区,要解决洪涝灾害问题,就得提高南部城区的排水设计标准,重点扩大长庆大道、庆化大道、马莲河大道、董志塬大道和南大街的排水管道管径,其中要以马莲河大道、董志塬大道、南大街兰州路口、庆化大道蓝天幼儿园段为重点设计对象,提高这几处的管网排水能力能够大大缓解南部主城区的泄洪排涝能力。

2) 加强雨水调蓄设施建设

提高对降雨洪水的调蓄能力,降低易涝区土地的不透水率,可以选择设置绿色屋顶、下凹式城市绿地、植草沟、调节储水池等综合性雨水调蓄措施,不但能提高西峰区防洪抗涝能力,还可以美化城市,缓解热岛效应[24] [25] [26]。经过对模型模拟结果的分析,建议锦绣花园、恒美城市花园、林苑小区和金鹏家园采用绿色屋顶方案;在董志塬大道、马莲河大道、南大街兰州路口附近设置调节蓄水池;将主干道,尤其是董志塬大道、马莲河大道和南大街附近的绿化带优先改进成下凹式绿地,其他地区可根据预算以及城市发展方案在后期分阶段完成改造。

3) 降低城区硬化率

在对人行道、广场、停车场进行地面铺设时,可以尽量采用多孔隙、透气性和透水性良好的混凝土材料,这样不但可以较大程度的提高雨水的渗透速率,降低地表径流量,同时也增大了对地下水的补给,促进地下水循环,能大大改善西峰区的自然环境。

5. 结论

1) 基于 MIKE FLOOD 平台,将一维模型 MIKE 11 和二维模型 MIKE 21 耦合,建立流域城市排涝数学模型。选取流域城市的部分区域,运用城市内涝模型,对城市内涝情景进行模拟分析。研究结果显示,模拟效果较好,结果与实际发生及调查情况基本吻合,耦合模型适用于流域城市内涝风险评估管理。

2) 随着流域城市化不断发展,建筑密度越来越大,下垫面硬化率逐年提高,雨水下渗率逐年降低,排水管网负荷越来越大,旧的排水管网系统很难满足现在新兴城市排水需求。

3) 在设计排涝工程总体布局时,应对城市地形、下垫面、排水管网、河流水文资料、气象等资料进行收集,构建数学模型,对城市排水系统排水能力和内涝风险进行评估。应对城市首先进行内涝风险等级划分,依据不同风险区域的排水系统情况,按照因地制宜、分区治理、统筹兼顾、蓄排结合、防洪安全的原则,制定城市内涝保障方案和工程体系,采取“渗、滞、蓄、排、管”措施,把河湖水系规划、治涝工程建设、排水管网建设和雨水利用、洪水削减结合起来。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(项目编号: X202210710549); 国家自然科学基金(42261144749)。

参考文献

- [1] 中国水旱灾害防御公报编写组. 《中国水旱灾害防御公报 2020》概要[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(11): 26-32.
- [2] 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告公布[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(2): 5.
- [3] 秦雪, 徐海顺. 城市雨洪管理效益评估研究综述[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(4): 10-23.
- [4] 胡爱萍, 杨阳, 贾工作, 杜婷, 张建香. 庆阳市西峰区水文地质调查研究[J]. 中国建材科技, 2018, 27(1):

- 78-80+84.
- [5] 张天峰, 姜惠峰, 张红芬, 吴爱敏, 张红妮, 焦美玲, 张雪姣. 庆阳市城市内涝预报预警指标研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(13): 77-83.
- [6] 栾震宇, 金秋, 赵思远, 蒋姣, 卢翔. 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.
- [7] 陈彩虹, 刘卉芳, 杨玉生, 赵建民. 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.
- [8] Löwe, R., Urich, C., Domingo, N.S., Mark, O., Deletic, A. and Arnbjerg-Nielsen, K. (2017) Assessment of Urban Pluvial Flood Risk and Efficiency of Adaptation Options Through Simulations—A New Generation of Urban Planning Tools. *Journal of Hydrology*, **550**, 355-367. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.009>
- [9] Mignot, E., Li, X. and Dewals, B. (2019) Experimental Modelling of Urban Flooding: A Review. *Journal of Hydrology*, **568**, 334-342. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.001>
- [10] 向素玉, 陈军. 基于 GIS 城市洪水淹没模拟分析[J]. 地球科学, 1995, 20(5): 575-580.
- [11] 刘志生, 李晶, 崔凯, 等. 基于 ArcGIS 与 Infoworks 的城市排水系统模拟研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(21): 144-147.
- [12] 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.
- [13] 徐向阳. 平原城市雨洪过程模拟[J]. 水利学报, 1998, 29(8): 34-38.
- [14] 冯辉. 基于 MIKE 的上栗县主城区洪水模拟与风险分析[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2021. <https://doi.org/10.27232/d.cnki.gnchu.2021.002975>
- [15] 张旭. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的西咸新区沣西新城内涝模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2021. <https://doi.org/10.27398/d.cnki.gxalu.2021.001138>
- [16] 霍艾迪, 张骏, 卢玉东, 成玉祥, 姚以亮. 地质灾害易发性评价单元划分方法——以陕西省黄陵县为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(2): 523-528+535. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.2011.02.031>
- [17] 霍艾迪, 张广军, 武苏里, 刘志丽. 国内外荒漠化动态监测与评价研究进展与存在问题[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 206-211.
- [18] 李明. 基于 MIKE 的极端降雨条件下城市洪水模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2015.
- [19] 许启慧, 于长文, 张金龙, 杜康云, 杨铭. 基于芝加哥算法的河北省四城市短历时暴雨极值特点分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(3): 288-292.
- [20] 李俊, 吴珊, 赵昕, 尹文超, 张少钦, 李茂林, 李建业. 雨型选择对 LID 措施效果影响的分析探讨[J]. 给水排水, 2018, 54(5): 21-27.
- [21] 戴有学, 王振华, 戴临栋, 曹巧莲, 王通. 芝加哥雨型法在短历时暴雨雨型设计中的应用[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 1061-1069.
- [22] 王安琪, 瞿宁玲, 陈元芳, 李琪. 上海市杨浦区设计面暴雨量与设计暴雨雨型研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 1-4.
- [23] 叶姗姗, 叶兴成, 王以超, 朱程亮, 刘俊. 基于 Copula 函数的设计暴雨雨型研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 63-68.
- [24] Huo, A., Wang, X., Lyu, Y., Cheng, Y., Zheng, C. and Song, J. (2019) Simulation Research on the Reinjection Temperature Fields of Deep Geothermal Wells Based on Real-Scale Experiment. *Energy Exploration & Exploitation*, **37**, 646-662. <https://doi.org/10.1177/0144598718807556>
- [25] Cheng, Y., Huo, A., Zhao, Z. and Peng, J. (2021) Analysis of Loess Fracture on Slope Stability Based on Centrifugal Model Tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **80**, 3647-3657. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02135-3>
- [26] Huo, A., Peng, J., Cheng, Y., Zheng, X. and Wen, Y. (2019) Temporal Characteristics of the Rainfall Induced Landslides in the Chinese Loess Plateau (China). In: Kallel, A., et al., Eds., *Recent Advances in Geo-Environmental Engineering, Geomechanics and Geotechnics, and Geohazards*. CAJG 2018. *Advances in Science, Technology & Innovation*, Springer, Cham, 425-427. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01665-4_98