

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.011

西宁市多尺度城市内涝风险评价方法

田子阳^{1,2}, 褚俊英¹, 林永寿³, 周祖昊¹

- (1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100044;
2. 加州大学戴维斯分校土木与环境工程系, 加利福尼亚州 戴维斯 95616;
3. 青海西宁环境综合治理利用世行贷款项目建设办公室, 青海 西宁 810001)

摘要:针对西宁市内涝风险评价的不同尺度评价需求,提出了西宁市多尺度城市内涝风险评价方法,涵盖西宁市规划管理的宏观尺度、街区预警应急的中观尺度和损失保险评估的微观尺度。采用熵权法进行宏观尺度评价,采用水文水力模拟进行中观尺度评价,采用灾损曲线的方法进行微观尺度评价。结果表明:西宁市36个排水分区中25个位于综合中、高风险区;12个实测积水点中有75%位于综合高风险区,16.7%位于综合中风险区。

关键词:内涝风险;多尺度;熵权;灾损曲线;西宁市

中图分类号:TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0072-08

Multi-scale urban waterlogging risk assessment method in Xining City // TIAN Ziyang^{1,2}, CHU Junying¹, LIN Yongshou³, ZHOU Zuhao¹ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100044, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA Davis 95616, United States of America; 3. Construction Office of Comprehensive Treatment Project of Environmental in Xining, Qinghai using World Bank Loan, Xining 810001, China)

Abstract: According to the different scale evaluation needs of urban waterlogging risk evaluation in Xining City, a multi-scale urban waterlogging risk assessment method is proposed, which covers the macro scale of urban planning management, the meso scale of block early warning and emergency response and the micro scale of loss insurance assessment. Entropy weight method is used for macro scale assessment of urban waterlogging, hydrological and hydrodynamic simulation is used for meso scale assessment, and disaster damage curve method is used for micro scale assessment. The results show that 25 of the 36 drainage districts in Xining City are located in comprehensive high and medium risk areas. 75% of the 12 measured ponding points are located in the comprehensive high-risk areas and 16.7% in the comprehensive medium risk areas.

Key words: waterlogging risk; multi-scale; entropy weight; damage curve; Xining City

近年来,伴随着全球变暖的气候环境变化,中高纬度地区呈现降水增加的趋势,且极端降水的频次和强度不断攀升;另一方面,随着我国城市化进程加快,城市不透水面积占比增加、原有管道设计不满足实际需求等负面因素相继产生。综合作用下,大量降雨在城市地表形成积水无法及时排除,进而形成城市内涝,对人民的生命与财产安全、城市的经济发展、自然生态的稳定均构成极大威胁。因此,对易发生内涝灾害的城市进行风险

评价具有重要意义。

城市内涝风险评价方法主要包括3种:历史灾情法、指标体系法、情景模拟法。历史灾情法是基于历史灾情数理统计的内涝灾害评估方法。该方法思路清晰、计算简单,只需要有长时间序列的历史灾情数据,但也存在一些问题:①多适用于流域尺度评估,较难适用于城市尺度^[1];②存在由有限样本和数据稀少引起的偏差问题^[2];③由于基础设施建设日趋完善、海绵城市等新理念的提出与落实,若干时

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0402405);青海西宁环境综合治理利用世界银行贷款项目(2016-Z-1)

作者简介:田子阳(1997—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:zytian@ucdavis.edu

通信作者:褚俊英(1976—),女,正高级工程师,博士,主要从事节水、水资源规划与管理研究。E-mail:jchu@iwhr.com

长前的历史灾情是否对当下及未来的灾情评估具有足够高的参考性尚存疑问。夏兴生等^[3]提出基于最小距离法建立历史案例与当前灾害的相似度判断模型,对模型不断修正,以提高预测数据可信度,但依旧难以解决根本问题。指标体系法是基于指标体系进行城市内涝风险评估的方法。该方法基于“三因子论”,即认为城市内涝灾害是致灾因子、孕灾环境和承灾体的综合函数。目前指标体系法的应用多集中于城市尺度分析,受限于数据量及指标选取,无法为街道、街区等尺度的内涝对策提供精确指导。另一方面,关于指标体系法的研究多集中于权重的分配,目前国内多采用层次分析(analytical hierarchy process, AHP)法进行权重设定,但 AHP 法本身存在一定局限性,两两比较法所得出的专家意见和分析者意见结果具有较强的主观性,权重值也依赖于指标之间的联动性。因此,AHP 法逐渐与其他方法耦合,如主成分分析法^[4]、P-S-R 模型^[5]、模糊数学方法^[6]等,使得该方法不断完善以提高应用价值。近些年来为了应对不确定性,基于概率的贝叶斯方法(Bayesian model averaging, BMA)、熵权法等技术方法也得到应用,以降低评价结果的不确定性。情景模拟法能直观且高精度地反映一定概率的致灾因子导致的灾害事件的影响范围与程度,给出城市内涝灾害风险的空间分布特征,已在实践中得到广泛应用。目前学者多借助模型软件开展相关研究,如向小华等^[7]针对二维水动力模型应用于城市内涝模拟时,在大尺度区域或精细分辨率情形下运行耗时过长的的问题,通过耦合 SWMM 模型和 LISFLOOD-FP 模型构建城市内涝模型,采用 GPU 的并行计算技术加速城市二维内涝模型的运算;曾鹏等^[8]利用 IFMS 模拟成都市暴雨内涝,以得到积水深度结果;袁绍春等^[9]利用 Infoworks 模拟重庆市降雨,为老城区海绵改造提出针对性方案;栾震宇等^[10]利用 MIKE FLOOD 平台模拟娄底市新化县暴雨,对区域管网维护和改造进行了探讨。该方法利用大量的数据资料与复杂精密的计算程序,能更加适配于街区等较小尺度内涝分析,但这些特点同时也制约着其大范围推广。

综合上述方法的优缺点,梅超^[11]提出了“城市-街区-设施”多尺度评价框架,并以北京为例进行了分析;焦胜等^[12]提出了“干管-支管-场地”多尺度评价框架,并以长沙为例进行了评价。而受限于时间及空间因素影响,不同城市的集成方法往往需要进行相应调整。本研究结合西宁市有关特征,面向宏观规划、中观设计以及微观应急等现实需要,对西宁市内涝风险进行了“宏-中-微”多尺度

评价,以精确满足研究区内宏观规划、应急方案制定、内涝风险保险等不同尺度需求,以期将多尺度进行整合,得到针对西宁市的内涝风险评价综合结果。

1 研究区概况

西宁市是青海省的省会,位于青海省东部,坐落于湟水中游河谷盆地,四面环山,三川会聚,是全省政治、经济、科技、文化、交通中心。因其扼青藏高原东方之门户,自古就是西北交通要道和军事重地,素有“西海锁钥”“海藏咽喉”之称;又因其作为古“丝绸之路”南路和“唐蕃古道”的必经之地,具有源远流长的历史文化和得天独厚的自然资源。本研究范围包括西宁市城东区、城中区(含城南新区)、城西区、城北区、海湖新区和国家经济开发区,总面积 380 km²(图 1)。研究区为城市密集建成区,以居民房屋、商业用地为主,建筑密度高,总不透水地面占总面积的 66.5%,绿地率仅为 26.8%。以国家气象局西宁站 1954—2018 年的日均降水量观测数据作为基础数据,统计得到西宁站多年平均降水量为 389.7 mm,最大值为 541.2 mm(1967 年),最小值为 196.2 mm(1966 年)。

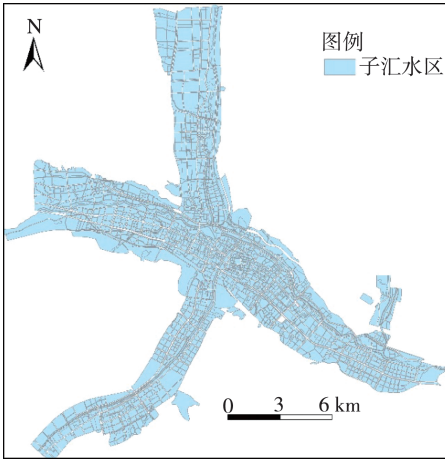


图 1 研究区域
Fig. 1 Study area

2 多尺度内涝风险评价方法

2.1 总体构架

考虑西宁市内涝灾害风险尺度效应,参考前文所述有关研究并结合西宁市区位特征,确定西宁市多尺度内涝风险评估技术总体构架。城市内涝风险评价包括宏观尺度、中观尺度和微观尺度,根据评估尺度的不同,采用不同的评价方法,并最终进行多尺度的综合。其中,宏观尺度通过指导城市宏观规划、加强城市内涝风险宣传等方式,面

向整个城区,对应城市规划中的总体规划层面;中观尺度通过局部积水点改造、局部应急方案制定等方式,面向街区单元,对应城市规划中的控制性详细规划街区层面;微观尺度通过推广内涝风险保险、满足预警信息靶向推送^[13]等方式,面向城市特定损失单元,对应具体的城市应急抢险预案制定层面。

2.2 各尺度评价方法

2.2.1 宏观尺度

宏观尺度根据灾害风险“三因子论”,采用指标体系法结合熵权法进行城市内涝风险评价。依据系统性、代表性、可操作性原则,按照致灾因子危险性、孕灾环境暴露性、承灾体脆弱性 3 个方面选取指标进行评价,具体见表 1。

由于评价指标具有不同量纲,需要对指标值进行标准化处理。正向、负向指标的标准化处理公式分别为

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \tag{1}$$

$$Y_{ij} = \frac{X_{i\max} - X_{ij}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \tag{2}$$

式中: Y_{ij} 为指标 i 在栅格 j 的标准化值; X_{ij} 为指标 i 在栅格 j 的指标值; $X_{i\max}$ 为指标 i 的最大值; $X_{i\min}$ 为指标 i 的最小值。

按照信息论基本原理,信息是系统有序程度的度量,熵是系统无序程度的度量。根据信息熵的定义,对于某项指标,可以用熵值来判断某个指标的离散程度,其信息熵值越小,指标的离散程度越大,该指标对综合评价的影响(即权重)就越大,如果某项指标数值全部相等,则该指标在综合评价中不起作用。权重计算公式为

$$w_i = \frac{1 - E_i}{n - \sum_{i=1}^n E_i} \tag{3}$$

其中 $E_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad p_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^n Y_{ij}$

式中: w_{ij} 为指标 i 在栅格 j 的权重; E_i 为指标 i 的熵值; n 为指标数,本研究中 $n=5$; m 为栅格数。

在对各指标进行标准化以及确定熵权后,利用加权求和的方法进行城市内涝风险的计算,得到各栅格单元的宏观城市内涝风险评价价值 R_j :

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} X_{ij} \tag{4}$$

R_j 为 0~1 之间数值,在等级划分方面,目前主要的方法有自然间断法、相等间隔法、分位数法、均值-标准差法以及隶属度函数法等^[2]。其中,自然间断法是美国环境系统研究所研制并应用在 ArcGIS 中的一种分级方法。该方法使相同分割等级内的数据相似值最优,不同分级间的数据差距最大,使得分级数据间的突变更加明显。该方法实用性强,已在干旱、洪涝灾害风险等级区划中广泛应用,本文采用该方法对宏观尺度城市内涝风险值进行区划,低风险区取值范围为 0~0.48,中风险区取值范围为 0.48~0.6,高风险区取值范围为 0.6~0.85。

2.2.2 中观尺度

在中观尺度评价时,利用 SWMM 模型和中国水科院自主研发的 IFMS (integrated flood modeling system) 洪水分析软件^[14-16]在研究区构建水文水力学模型。结合美国 EPA SWMM 模型应用手册与相关文献确定城市水文水动力学模型各参数的取值范围并设置初始值。将排干时间、霍顿最大下渗速率、霍顿稳定下渗速率、霍顿衰减常数、曼宁系数、糙率系数、洼蓄量作为率定参数,采用 20130823、20140627、20170726、20180630、20190830 共 5 场典型暴雨的降水量和积水深观测数据对西宁市水文水动力学模型进行参数率定,结果见表 2。

依据 SL 250—2000《水文情报预报规范》的要求,采用相对误差法作为预报误差指标,对模型精度进行评定。利用 2020 年 8 月 29 日西宁市实测暴雨与积水深观测数据进行模拟验证,共收集西宁市主城区 14 个雨量站 3 h 降水量数据。在模型中确定各雨量站位置及对应降水量数据,并将降雨站数据导入 ArcGIS 中,采用泰森多边形法对各多边形范围内的水文响应单元进行雨量分配。各雨量站实测数据见表 3。

表 1 宏观尺度城市内涝风险评价指标及其数据来源

Table 1 Macro scale urban waterlogging risk assessment index and its data sources

风险类别	评价指标	指标特性	数据来源
致灾因子危险性	排水管网密度	负向	利用 ArcGIS 对地方排水公司提供的管网数据进行空间分析
	地理高程	负向	30 m×30 m 精度西宁市高程影像 DEM 图
	地形坡度	负向	ArcGIS 利用高程值进行空间分析
孕灾环境暴露性	地表不透水率	正向	依据 2006—2020 年西宁市中心城区土地利用规划,按照不同的土地利用设定参数进行单元综合计算
承灾体脆弱性	人口密度	正向	2019 年《西宁市统计年鉴》

表 2 参数率定结果

Table 2 Parameter identification results

参数类别	参数名称	单位	参数范围	率定结果
水文响应单元	排干时间	d	2 ~ 14	7
	霍顿最大下渗速率	mm/h	25 ~ 80	50
	霍顿稳定下渗速率	mm/h	0 ~ 10	3.4
	霍顿衰减常数	h^{-1}	2 ~ 7	4
	不渗透性粗糙系数		0.001 ~ 0.2	0.01
	渗透性粗糙系数		0.001 ~ 0.35	0.01
	不渗透性洼地蓄水量	mm	0.2 ~ 10	2.4
管道参数	渗透性洼地蓄水量	mm	2 ~ 30	7
	曼宁系数		0.001 ~ 0.4	0.014
	连接节点	节点面积	m^2	>0
二维网格单元	糙率系数		>0	0.03

表 3 2020 年 8 月 29 日西宁市暴雨实测数据

Table 3 Measured data of rainstorm in Xining City in August 29th, 2020

雨量站编号	地区	雨量站位置	3 h 降水量/mm
1	城北区	大堡子镇吧浪村	19.9
2	城北区	生物园区	16.6
3	城北区	火西村	15.5
4	城北区	九家湾村	9.0
5	城北区	二十一中学	8.9
6	城中区	南西山村	27.8
7	城中区	南山	29.1
8	城中区	西宁市第五中学	14.3
9	城东区	北山美丽园	28.0
10	城东区	西宁城东第四医院	12.9
11	城西区	野生动物园	22.7
12	城西区	西宁城西气象局	19.9
13	城西区	秀水路	18.9
14	城西区	植物园	19.1

西宁市排水公司的监测数据表明,2020 年 8 月 29 日西宁市博雅路路段积水较为严重,最大积水深度达到 1.5 m。利用构建的城市水文水动力学模型进行量化模拟,结果表明:博雅路段模拟最大积水深度为 1.57 m,相对误差为 4.67%;柴达木路路段最大积水深度为 0.66 m,实测积水深度为 0.63 m,相对误差为 4.54%,相对误差均小于 20%。西宁市城区 12 个现状调查的积水点中,11 个积水点与模拟结果位置相吻合,积水点重合率约 91.7%,表明模型具有一定可靠性。采用该模型模拟 2 年一遇、5 年一遇重现期下的降雨产汇流过程,得到不同重现期下各格栅的单元积水深度,根据相关研究以及《城市内涝防治规划标准》,将城市内涝的风险分为 3 个等级:≥40 cm 为高风险,≥15 cm 且 <40 cm 为中风险,<15 cm 为低风险。

2.2.3 微观尺度

在中观尺度不同重现期积水深度的基础上,以财产损失为中心,采用水深-灾损率曲线结合经济总量进行微观尺度的城市内涝风险评价。在灾损曲线

方面,很多学者开展了大量的研究工作,如,石勇^[17]在上海市采用基于系统调查的合成法构建建筑物的水灾灾损曲线;姚思敏^[18]利用合成法对京津冀地区暴雨内涝财产损失进行统计,并与水深拟合得到灾损曲线。灾损曲线常以多项式函数形式出现,董姝娜等^[19]的研究利用三次多项式拟合,Yu 等^[20]的研究利用五次多项式拟合,随着多项式次数的提高,拟合效果越好,但其参数方程也更加复杂。水深-灾损率关系主要基于历史数据确定,本研究采用三次多项式进行模拟,其灾损率拟合方程为

$$y_{2j} = b_0 + b_1 h_{2j} + b_2 h_{2j}^2 + b_3 h_{2j}^3 \quad (5)$$

$$y_{5j} = b_0 + b_1 h_{5j} + b_2 h_{5j}^2 + b_3 h_{5j}^3 \quad (6)$$

式中: b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为系数,分别取 -0.103 1、0.630 8、0.013 47、-0.035 21; y_{2j} 、 y_{5j} 为别为 2 年一遇和 5 年一遇重现期下各格栅单元的灾损率; h_{2j} 、 h_{5j} 分别为 2 年一遇和 5 年一遇重现期下各格栅单元的模拟水深。

在经济总量方面,选取 GDP 指标,根据土地利用类型分别进行统计,得到各格栅单元的经济总量大小。利用灾损曲线的灾损率与经济总量的乘积,得到城市内涝不同积水深度对应的财产损失估计值,计算公式为

$$D_{2j} = y_{2j} F_j \quad (7)$$

$$D_{5j} = y_{5j} F_j \quad (8)$$

式中: D_{2j} 、 D_{5j} 分别为 2 年一遇和 5 年一遇重现期下各格栅单元内的财产损失值; F_j 为各格栅单元内的 GDP 值。

2.2.4 多尺度综合

在宏观、中观、微观 3 个尺度的内涝风险评价结果基础上,进行西宁市内涝风险综合分析。采用 AHP 法,建立对应的目标层、准则层和指标层,按照得到的权重对各尺度下的指标进行加权综合集成,基于排水分区进行分区统计与叠加分析,得到城市内涝综合风险的分布。基于问卷调查统计与专家经验判断,确定宏观、中观、微观 3 个尺度城市内涝风险的权重系数,评价体系见图 2,括号中为权重。

3 基础数据

西宁市雨水排水分区的划定依据如下基本原则:①遵循西宁市城市排水规划目标和排水体制;②利用西宁市有利地形、洪沟等特征及便利条件;③充分保留与利用原有城市雨水排水设施,尽量以行政区和河道等自然条件划分;④结合西宁市正在建设的海绵城市规划,根据海绵城市管控分区进行雨水分区的管理与建设。将西宁市主城区划分成

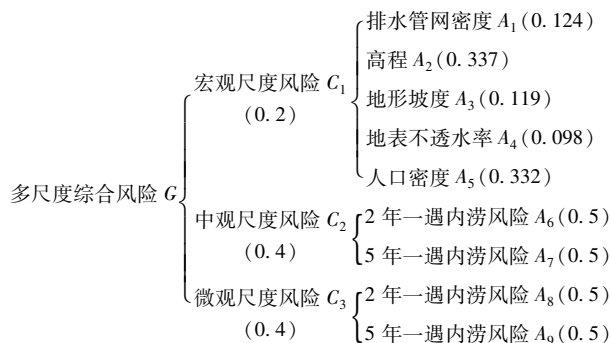


图2 西宁市内涝风险综合评价体系

Fig.2 Comprehensive assessment system of urban waterlogging risk in Xining City

36个排水分区,其中,城西10个,城北9个,城东10个,城南7个,如图3(a)所示。基于西宁市2019年主城区GIS空间分析以及其他调查与统计数据,获得地表不透水率、排水管网密度、高程、地形坡度和人口密度数据,并进行标准化处理,得到各指标标准化空间分布,如图3(b)~(f)所示。采用熵权法计算各指标权重,最终得到排水管网密度权重0.124,高程权重0.337,地形坡度权重0.119,地表不透水率权重0.098,人口密度权重0.322。

本研究采用2018年西宁市主城区GDP数据进行

分析。2018年西宁市主城区GDP值为1004.08亿元,其中城北区193.95亿元,城西区245.23亿元,城中区352.16亿元,城东区212.74亿元。在ArcGIS软件中,按照已有GDP经济分布数据及土地利用类型进行赋值与计算,得到西宁市GDP栅格分布,见图4。

4 多尺度城市内涝风险评价结果与分析

4.1 宏观尺度评价结果

图5为西宁市宏观尺度内涝风险评价结果。西宁市现状积水点12个,位于中高风险区内的现状积水点共计11个,占总数的91.7%,总体上能够反映主城区宏观尺度上城市内涝风险情况。如前文所述,西宁市四面环山,城市呈“十”字分布的特征,从宏观尺度评价结果可以看出,宏观尺度下的中高风险区以“十”字交汇处为中心向外扩散式分布。从地理特征角度分析,这是由于西宁市中心城区主要位于两山相夹的山谷中,地形坡度较缓,地理高程较低;从社会经济角度分析,虽然中心城区城市化程度高,有较为完备的排水管网系统,但同时人口密度较大,以及受城市化导致的地表不透水率增加影响。

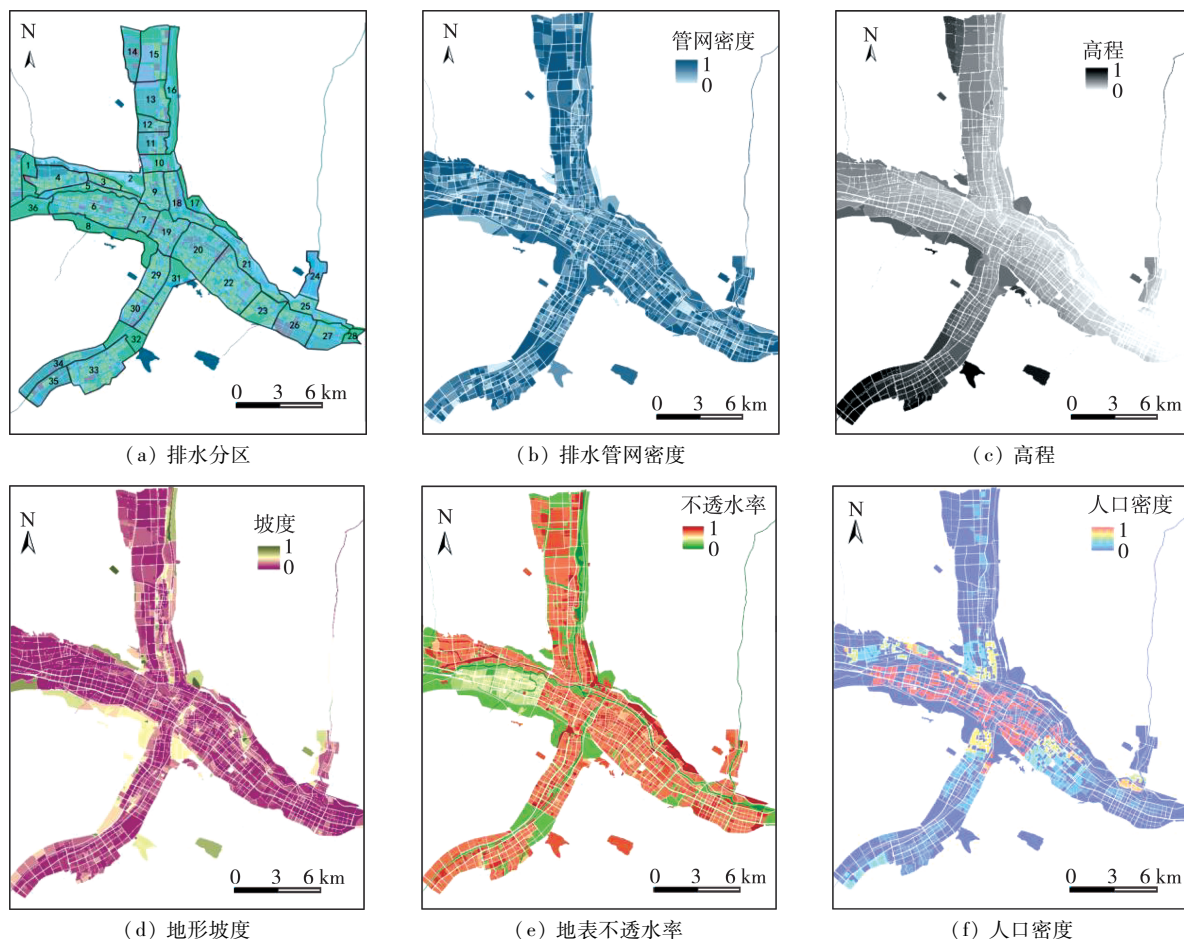


图3 西宁市排水分区及各指标标准化空间分布

Fig.3 Spatial distribution of drainage area and index standardization in Xining City

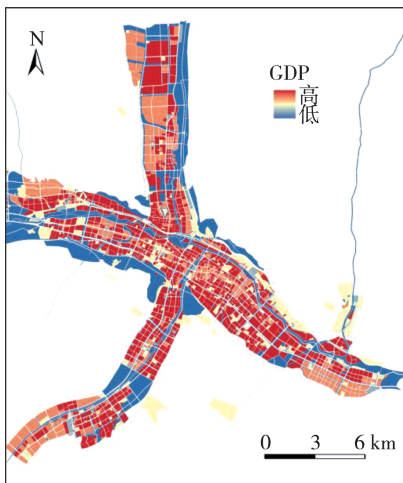


图4 西宁市 GDP 分布

Fig.4 GDP distribution of Xining City

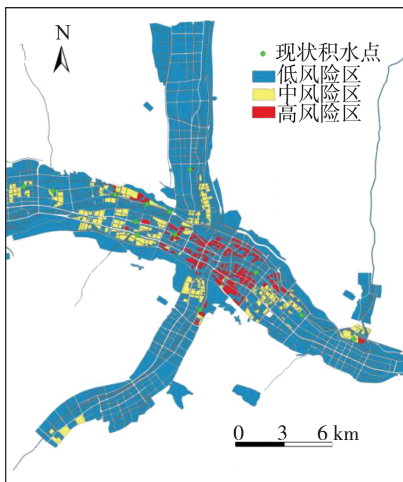
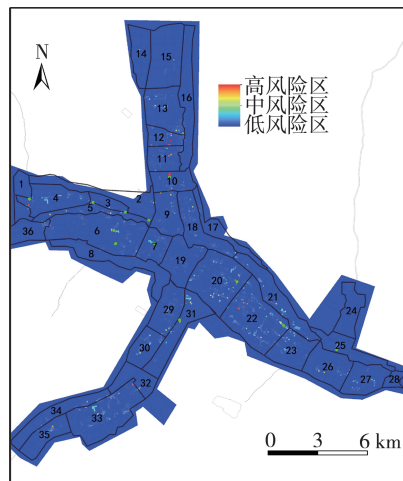


图5 宏观尺度评价结果

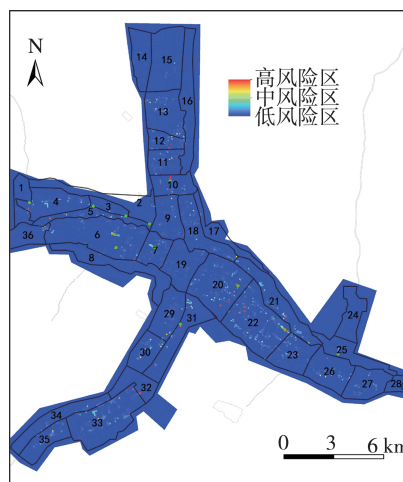
Fig.5 Results of waterlogging risk assessment
at macro scale

4.2 中观尺度评价结果

利用构建的西宁市水文水动力学模型,模拟西宁市2年一遇和5年一遇降雨历时为2h条件下的积水深度,按照相应内涝等级划分,依据积水深度将风险划分为低风险、中风险、高风险3个等级,图6为西宁市中观尺度城市内涝风险评价结果。表4为不同重现期下积水深度所占面积及比例情况,从积水深度来看,最大积水深度随着降雨重现期的增大而增大,2年一遇和5年一遇对应的最大积水深度分别为1.45 m和1.63 m。道路因集水面积小,且路面高程普遍低于周围地面,因此道路的积水深度明显大于其他用地类型。由不同重现期的积水深度分布比例可以看出,对于2年一遇降雨,积水深度大于5 cm的地区面积为92.93万 m^2 ;对于5年一遇降雨,积水深度大于5 cm的地区面积为177.86万 m^2 ,增加了91.41%。其中积水深度30~40 cm的地区



(a) 2年一遇



(b) 5年一遇

图6 中观尺度评价结果

Fig.6 Results of waterlogging risk assessment
at meso scale

面积涨幅最为明显,达到1485.14%,但各重现期下其所占比例依旧较低,在积水深度15~30 cm及大于40 cm间形成断层,积水深度大于5 cm的面积范围均持续扩大,积水深度大于40 cm面积增长幅度相对不明显,西宁市主城区积水深多分布在5~40 cm,但个别积水点需着重关注。

4.3 微观尺度评价结果

将模型输出的不同降雨重现期下的积水深度导入ArcGIS,最大积水深度涵盖范围内的各排水分区,并将其积水深度值代入公式中计算城市各排水分区内的灾损率,进而得出2年一遇和5年一遇降雨模拟下内涝积水可能造成的经济损失,得到西宁市微观尺度城市内涝风险评价结果,见图7。从该尺度结果可以看出,受中观尺度模拟结果影响,损失集中区域为积水现象较为普遍的20和22排水分区。对比不同重现期模拟下的损失结果,2年一遇模拟下,高风险区位于城市主要积水且地区GDP较

表 4 不同重现期下积水深度所占面积及比例

Table 4 Area and proportion of ponding depth under different return periods

积水深度/cm	2 年一遇模拟		5 年一遇模拟		不同重现期涨幅/%
	积水面积/万 m ²	所占比例/%	积水面积/万 m ²	所占比例/%	
>5 ~ 15	71.65	77.1	134.89	75.8	88.3
>15 ~ 30	14.56	15.7	26.62	15.0	82.8
>30 ~ 40	0.57	0.6	9.01	5.1	1485.1
≥40	6.15	6.6	7.34	4.1	19.5
合计	92.93	100	177.86	100	91.4

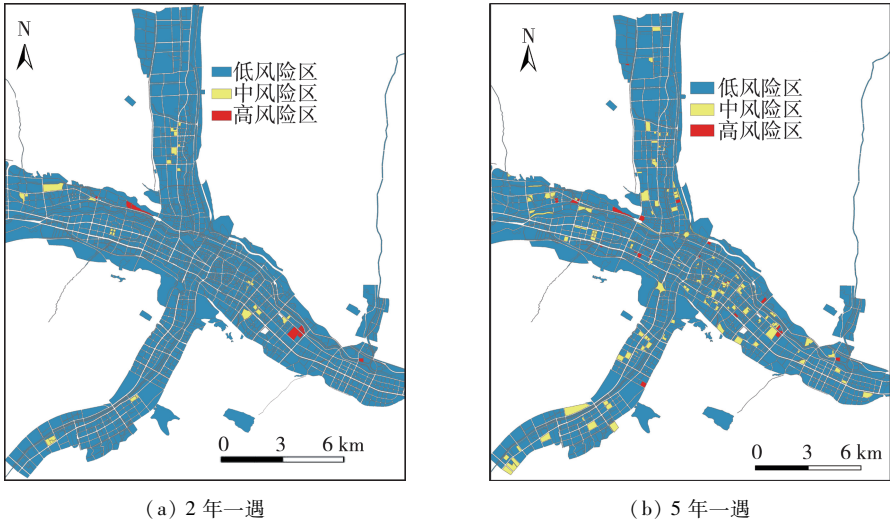


图 7 微观尺度评价结果

Fig. 7 Results of waterlogging risk assessment at micro scale

高处,但在 5 年一遇模拟下,高风险区沿城市主要河道湟水河呈散点式出现。除由于 GDP 较高导致积水深度影响效果凸显外,造成积水的本身原因也值得关注。通过回看 IFMS 排水管网数据,中心城区呈现由河道向两侧山峰的垂直河流方向的发展趋势。因此,排水系统下游为坡度较缓处的老旧管道,管道管径未随城市发展进行调整,存在部分“大管接小管”现象,造成积水和高风险区的沿河分布现象。

4.4 尺度综合

表 5 为各排水分区各尺度内涝风险综合评价结

果。宏观、中观、微观 3 个尺度加权计算,得到西宁市内涝的综合风险分布,排水分区 22、20、25、10、31、21、3、4、7 处于综合高风险地区;排水分区 18、5、12、6、35、19、23、27、11、33、9、30、13、29、26、15 处于综合中风险地区;排水分区 1、2、8、14、16、17、24、28、32、34、36 处于综合低风险地区。

5 结 论

a. 根据西宁市的特点,构建了“宏-中-微”多尺度城市内涝风险评价方法。其中,宏观尺度采用排水管网密度、高程、地形坡度、地表不透水率、人口密

表 5 各排水分区各尺度内涝风险综合评价结果

Table 5 Comprehensive assessment results of waterlogging risk of different drainage areas at different scales

风险区类型	宏观尺度	中观尺度		微观尺度		综合风险
		2 年一遇	5 年一遇	2 年一遇	5 年一遇	
高风险区	22、20、25、10、31、21、3、7、19	22、20、10、31、26	22、20、25、10、31、21、4、30	22、25、3	22、20、25、31、21、3、4、7、18	22、20、25、10、31、21、3、4、7
中风险区	4、18、5、6、35、9、29	25、21、4、7、18、5、12、23、27、13	3、7、18、5、12、23、27、11、33、9、13、26	20、10、4、12、6、35、11、33	10、5、12、6、3、5、23、27、11、33、30、26、15	18、5、12、6、35、19、23、27、11、33、9、30、13、29、26、15
低风险区	12、23、27、11、33、30、13、26、15、1、2、8、14、16、17、24、28、32、34、36	3、6、35、19、11、33、9、30、29、15、1、2、8、14、16、17、24、28、32、34、36	6、35、19、29、15、1、2、8、14、16、17、24、28、32、34、36	31、21、7、18、5、19、23、27、9、30、13、29、26、15、1、2、8、14、16、17、24、28、32、34、36	19、9、13、29、1、2、8、14、16、17、24、28、32、34、36	1、2、8、14、16、17、24、28、32、34、36

度 5 个指标,利用熵权法加权计算;中观尺度采用 SWMM 和 IFMS 模拟不同重现期下的降雨得到积水深度结果进行评价;微观尺度依据中观尺度不同重现期下的积水深度结果,采用水深-灾损曲线的量化方法进行区域损失评估。

b. 根据西宁市的多尺度城市内涝风险综合评价结果,西宁市 36 个排水分区中,排水分区 22、20、25、10、31、21、3、4、7 处于综合高风险地区;排水分区 18、5、12、6、35、19、23、27、11、33、9、30、13、29、26、15 处于综合中风险地区。

c. 得到的西宁市多尺度城市内涝风险评价结果,对西宁市未来的城市基础设施规划和建设、城市内涝风险宣传教育、城市内涝预警与应急预案制定以及城市内涝的风险管理具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 詹玮璇. 城市内涝风险评估方法探讨: 以市桥街道为例[J]. 中国水运, 2016, 16(3): 192-193. (ZHAN Weixuan. Discussion on urban waterlogging risk assessment method: take Shiqiao Street as an example [J]. China Water Transport, 2016, 16(3): 192-193. (in Chinese))

[2] 黄国如, 罗海婉, 卢鑫祥, 等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxian, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6. (in Chinese))

[3] 夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 基于历史案例的自然灾害灾情评估方法研究[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 219-225. (XIA Xingsheng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Study on evaluation method of natural disaster based on historical cases [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 219-225. (in Chinese))

[4] 陈真, 马细霞, 张晓蕾. 基于 PCA 和 AHP 的小流域山洪灾害风险评价[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 56-59. (CHEN Zhen, MA Xixia, ZHANG Xiaolei. Risk assessment of mountain torrent disaster in small watershed based on PCA and AHP [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(11): 56-59. (in Chinese))

[5] 黄曦涛, 李怀恩, 张瑜, 等. 基于 PSR 和 AHP 方法的西安市城市内涝脆弱性评价体系构建与脆弱度评估[J]. 自然灾害学报, 2019(6): 167-175. (HUANG Xitao, LI Huaien, ZHANG Yu, et al. Construction of urban waterlogging vulnerability assessment system and vulnerability assessment based on PSR & AHP method in Xi'an City [J]. Journal of Natural Disasters, 2019(6):

167-175. (in Chinese))

[6] 申海燕, 陈妍哲, 张盈. 基于层次分析-模糊综合评价法对城市内涝风险评估研究[J]. 科技资讯, 2020(2): 192-193. (SHEN Haiyan, CHEN Yanzhe, ZHANG Ying. Risk assessment of urban waterlogging based on AHP fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Science & Technology Information, 2020(2): 192-193. (in Chinese))

[7] 向小华, 陈颖悟, 吴晓玲, 等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 528-533. (in Chinese))

[8] 曾鹏, 穆杰, 喻海军, 等. 成都市中心城区暴雨内涝模拟及内涝特征分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(3): 232-239. (ZENG Peng, MU Jie, YU Haijun, et al. Simulation and characteristics analysis of rainstorm waterlogging in downtown area of Chengdu City [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(3): 232-239. (in Chinese))

[9] 袁绍春, 王怀鋆, 吕波, 等. 基于 InfoWorks-ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaiyun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks_ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 43-49. (in Chinese))

[10] 栾震宇, 金秋, 赵思远, 等. 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. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 81-88. (in Chinese))

[11] 梅超. 城市水文水动力耦合模型及其应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.

[12] 焦胜, 胡曦, 韩宗伟. 多尺度下城市内涝影响因素量化评估研究: 以长沙市内五区为例[J]. 生态经济, 2020, 36(5): 222-229. (JIAO Sheng, HU Xi, HAN Zongwei. A study on quantitative evaluation of effect factors of urban waterlogging under multiple scales: taking five internal zones in Changsha as an example [J]. Ecological Economy, 2020, 36(5): 222-229. (in Chinese))

(下转第 86 页)

- [21] 盖美,王宇飞,马国栋,等. 辽宁沿海地区用水效率与经济的耦合协调发展评价[J]. 自然资源学报,2013,28(12): 2081-2094. (GAI Mei, WANG Yufei, MA Guodong, et al. Evaluation of the coupling coordination development between water use efficiency and economy in Liaoning Coastal Economic Belt[J]. Journal of Natural Resources,2013,28(12):2081-2094. (in Chinese))
- [22] 夏杰源. 改进的突变评价法在河南省农业干旱中的应用[D]. 郑州:华北水利水电大学,2017.
- [23] 施玉群,刘亚莲,何金平. 关于突变评价法几个问题的进一步研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2003(4): 132-136. (SHI Yuqun, LIU Yalian, HE Jinping. Further study on some questions of catastrophe evaluation method[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2003(4): 132-136. (in Chinese))
- [24] 熊建新,陈端吕,彭保发,等. 洞庭湖区生态承载力系统耦合协调度时空分异[J]. 地理科学,2014,34(9): 1108-1116. (XIONG Jianxin, CHEN Duanlyu, PENG Baofa, et al. Spatio-temporal difference of coupling coordinative degree of ecological carrying capacity in the Dongting Lake Region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014,34(9):1108-1116. (in Chinese))
- [25] 盖美,翟羽茜. 中国水资源-能源-粮食支撑系统安全测度及协调发展[J]. 生态学报,2021,41(12): 4746-4756. (GAI Mei, ZHAI Yuxi. Measurement and coordinated development of water resources, energy, food and support security in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(12):4746-4756. (in Chinese))
- [26] 李成宇,张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(1): 120-128. (LI Chengyu, ZHANG Shiqiang. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(1): 120-128. (in Chinese))
- [27] 王平,王云峰. 综合权重的灰色关联分析法在河流水质评价中的应用[J]. 水资源保护,2013,29(5): 52-54. (WANG Ping, WANG Yunfeng. River water quality evaluation based on grey incidence analysis of comprehensive weight[J]. Water Resources Protection, 2013,29(5):52-54. (in Chinese))
- [28] 洪思扬,王红瑞,梁俊芬,等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算[J]. 水资源保护,2021,37(5): 102-111. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LIANG Junfen, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):102-111. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-16 编辑:施业)

(上接第 79 页)

- [13] 冯钧,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6): 479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 479-487. (in Chinese))
- [14] 喻海军,马建明,张大伟,等. IFMS Urban 软件在城市洪水风险图编制中的应用[J]. 中国防汛抗旱,2018,28(7): 13-17. (YU Haijun, MA Jianming, ZHANG Dawei, et al. Application of IFMS urban software in urban flood risk mapping[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(7): 13-17. (in Chinese))
- [15] 马建明,喻海军. 洪水分析软件 IFMS Urban 特点及应用[J]. 中国水利,2017(5): 74-75. (MA Jianming, YU Haijun. Characteristics and application of flood analysis software IFMS Urban[J]. China Water Transport, 2017(5): 74-75. (in Chinese))
- [16] 李曦亨,林铭泽,周浩澜. 降雨时间尺度对城市洪涝模拟的影响[J]. 水电能源科学, 2020,38(1): 9-12. (LI Xiting, LIN Mingze, ZHOU Haolan. Impact of rainfall temporal resolution on urban rainstorm waterlogging simulation[J]. Water Resources and Power,2020, 38(1): 9-12. (in Chinese))
- [17] 石勇. 灾害情境下城市脆弱性评估研究: 以上海市为例[D]. 上海:华东师范大学,2010.
- [18] 姚思敏. 城市暴雨灾害风险评估研究: 以京津冀地区为例[D]. 北京:清华大学,2016.
- [19] 董姝娜,姜臻鹏,张继权,等. 基于 3S 技术的村镇住宅洪灾脆弱性曲线研究[J]. 灾害学, 2012, 27(2): 34-42. (DONG Shuna, JIANG Liupeng, ZHANG Jiquan, et al. Research on flood vulnerability curves of rural dwellings based on "3S" technology[J]. Journal of Catastrophology, 2012, 27(2): 34-42. (in Chinese))
- [20] YU J J, QIN X S, LARSEN O. Joint Monte Carlo and possibilistic simulation for flood damage assessment[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013,27:725-735.

(收稿日期:2021-04-29 编辑:王芳)