

基于多源数据的郑州市内涝风险评估

郭东良^{1,4}, 常震^{1,4}, 尹卫红⁴, 贾浩², 李君豪³, 潘晓宁²

(1.河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司,河南 郑州 450044;2.华北水利水电大学 测绘与地理信息学院,河南 郑州 450046;
3.华北水利水电大学 环境与市政工程学院,河南 郑州 450046;4.河南省水质保障与水环境修复工程技术研究中心,河南 郑州 450044)

摘要: 城市内涝风险评估是防控与管理城市内涝灾害、减少灾害损失的有效手段。基于内涝风险评估框架“H(危险性)-E(暴露性)-V(脆弱性)”,选取了 12 个评估指标,包括遥感数据、POI 数据与传统的社会经济与人口数据等多源数据。结合层次分析法(AHP)和地理信息系统(GIS)空间分析方法,构建了基于多源数据的城市内涝风险评估模型。结果表明:郑州市中心城区内涝风险整体上呈现出从中心区域的高风险逐渐向四周降低的趋势。高风险和次高风险区主要分布在郑州市主城区中心区域、中原区中部和金水区东部。次低风险和低风险区主要分布在惠济区北部和二七区西南部的山区。

关键词: 多源数据;城市内涝;层次分析法;GIS;风险评估

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0151-07

0 引言

由于极端天气频繁、城市发展迅速、排水系统落后,城市发生内涝的频率较高。在当前社会背景下,城市防灾基础设施建设与社会发展速度不相适应,导致内涝的社会危害性明显增大^[1-2]。加强暴雨内涝灾害防御能力已成为保障中国城市可持续发展的重要课题。识别城市中的易涝区域,是开展灾害预警,降低灾害损失、提升抗灾救灾能力的重要途径^[3-4]。鉴于内涝灾害防治的范围广、难度大、不确定性复杂,内涝灾害的风险评估也成为国际城市水文学和科学危害研究的中心问题。内涝风险评估在内涝管理中的作用变得越来越重要,可为防汛提供参考,对减少洪水造成的损失具有重要意义。

评估城市内涝灾害风险的方法有多种,如基于历史灾害数据的内涝风险评估^[5-6]、基于指标体系的内涝风险评估^[7-8]、基于 GIS(Geographic Information System)与遥感影像的评估法^[9]和基于水文水动力模型的情景模拟^[10]。历史灾害数据统计方法是基于历

史洪水事件的统计数据来评估和预测风险,这种方法依赖大量的历史数据和记录,适用于内涝数据记录丰富的地区;基于水文水动力模型的情景模拟是通过建立水文和水力模型进行耦合分析法,得到的计算结果虽然精度较高,然而建立水文模型往往需要高分辨率的数据如 DEM(Digital Elevation Model)及排水管网等,构建计算模型的过程十分复杂;基于指标体系建立评价模型的方法被众多学者首用于城市内涝灾害的风险评估中^[11]。随着信息技术的不断发展,如今有众多平台可运用于收集关于城市洪水的多源数据,多源数据在暴雨内涝灾害中得到了广泛应用^[12-13]。

本文基于多源数据,采用指标体系法结合层次分析法(AHP, Analytic Hierarchy Process)的内涝风险评估模型,构建了城市内涝的风险评估体系。利用 GIS 平台对风险图进行可视化,以快速获取内涝灾害范围和风险等级。研究结果可为郑州市中心城区政府管理部门的防汛管理、灾害评估和减灾措施提供科学依据。

1 研究区概况

郑州市位于华北平原南部、黄河下游,东经 112°42'~114°14',北纬 34°16'~34°58'。全市面积约 1 054 km²,中心城区人口约 500 万。郑州市地势西南高东北低,从西南至东北呈阶梯状下降,本文研究区域图如图 1 所示。郑州市的气候属北温带大陆性季风

收稿日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42007423);河南省住房和城乡建设科技计划项目(HNJS-2022-K33);河南规划总院科技研发项目(HNGH-KY-2022-0018)

作者简介: 郭东良(1978—),男,硕士,高级工程师,主要从事城乡给排水工程设计以及城市洪涝灾害成因研究工作。

通信作者: 贾浩(1997—),男,硕士,主要从事城市洪涝风险评估与调控。电子信箱: 201601625@stu.ncwu.edu.cn

气候,受季风气候和复杂地形特征的影响,降水时空分布不均,夏季降水占比较大,在空间上呈南北递减趋势,降雨量年变化明显。郑州市中心城区是内涝灾害潜在的高风险区,也是防洪最密集的城区。根据《郑州市城市防洪规划》^[4]与地形、流域的划分,郑州市中心城区共分为枯河、索须河、贾鲁河、魏河、东风渠、金水河、熊耳河、七里河、潮河等九个排水分区(见图1)。

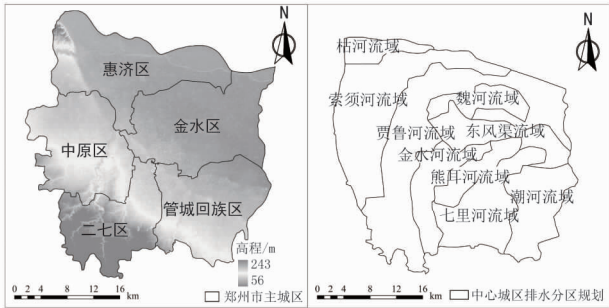


图1 本文研究区域与排水分区规划图

2 研究方法

2.1 城市内涝风险评估模型

城市内涝风险评估的目的是分析当前或未来的内涝风险信息,识别高风险区域。本研究采用“危险性-暴露性-脆弱性(H-E-V, Hazard-Exposure-Vulnerability)”风险评估框架^[15],共选取了12个指标以构建郑州市内涝灾害风险评估指标体系^[16-17],如图2所示。内涝风险度为危险性、暴露性、脆弱性三者的乘积。

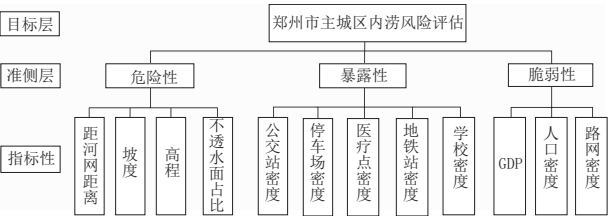


图2 郑州市内涝灾害风险指标体系

2.1.1 危险性

危险性代表自然灾害产生的条件。评估危险性是内涝风险分析的第一步,用于识别内涝发生的空间位置及强度,包括积水信息、下垫面类型和地面高程等指标等。本文选取坡度、距河网距离、不透水面占比、高程四个因素作为评估指标,具体数据来源如下。

高程(DEM):高程用于反映研究区的地形起伏情况,数据来源于地理空间数据云,空间分辨率为12.5 m。

坡度:坡度是反映地形变化程度的指标,利用ArcGIS的坡度分析工具对DEM高程数据进行处理

得到。

距河网距离:距河网距离指研究区内各网格距河网的距离,由GIS的距离分析工具从河流分布中获得。

不透水面占比(ISR, Impervious Surface Ratio):不透水面占比指研究区内各网格的不透水面面积占网格面积的比例,不透水面数据利用欧洲航天局的Sentinel-2卫星影像绘制而成。

2.1.2 暴露性

暴露性指受内涝危险性影响到的风险要素,具体指受影响的人、建筑、财产、经济活动与其他人类活动,是连接危险性与脆弱性的桥梁。对暴露性的表达及量化是衡量城市内涝灾害影响程度、社会经济损失及灾害风险评估的重要手段。本文选取郑州市公交站点密度、地铁站点密度、医疗点密度、学校点密度与停车场密度作为暴露性因子。公交站点密度、地铁站点密度、学校点密度与停车场密度利用ArcGIS中的密度分析工具计算得到,数据来源于2020年百度地图的POI(Point of Interest)数据。

2.1.3 脆弱性

脆弱性一般是指承灾体在城市内涝灾害下的损坏程度,本文选取人口密度、GDP(Gross Domestic Product)和路网密度作为脆弱性评估指标,各数据的获取来源如下。

人口密度:反映内涝灾害对研究区人员的生命威胁,人口密度数据来源于WorldPop,精度为100 m,并结合郑州市2020年人口普查数据进行修正。

GDP:用于反映城市工商业的密集程度,数据来源于国家地球系统科学数据中心发布的“中国公里网格GDP数据集”,精度为1 km。

城市路网数据:来源于OpenStreetMap平台^[18],时间为2020年。

2.2 层次分析法

层次分析法(AHP)是一种多标准决策分析方法^[7],最初由美国数学家和运筹学家Saaty于20世纪70年代提出。AHP用于帮助决策者在面临多个复杂的选择或决策问题时,通过将问题层次化,以逐级比较和权衡不同因素,找出最佳的决策方案。其优势在于可以处理包含多个层次的复杂决策问题,同时能考虑不同因素之间的相对重要性。AHP一般包括以下3个步骤。

(1)建立层次结构模型。将决策问题分解成一个层次结构,包括目标层、准则层和指标层。目标层表

示最终的决策目标, 准则层包含影响决策的不同因素, 指标层为评价各准则层程度大小的特征因子。

(2)构建判断矩阵, 以判断每个指标的重要性。在每个层次内, 决策者需对不同元素之间的两两比较进行定量评估, 以确定它们之间的相对重要性。这些比较通常以 1 到 9 的比例尺进行, 其中 1 表示相等, 9 表示极端重要。相对重要性对照表如表 1 所示。

(3)判断矩阵的一致性检验。当判断矩阵的阶数 $n>3$ 时, 很可能会出现矩阵计算结果的非一致性, 因此需要进行一致性检验, 计算判断矩阵 A 矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其所对应的最大特征向量 W 。首先按公式 1 计算一致性指标 CI ; 然后查找对应的平均随机一致性指标 RI , 如表 2 所示; 最后按公式 2 计算一致性比例 CR , 如果 $CR<0.1$, 则可认为判断矩阵的一致性可以接受, 否则需要对判断矩阵进行修正, 使其满足 $CR<0.1$ 。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(1)

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(2)

式中: CI 为一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵 A 矩阵的最大特征值; n 为矩阵阶数; CR 为一致性比例。

表 1 相对重要性对照表

重要性量化值	含义(因素 i 与因素 j)
1	因素 i 与因素 j 同等重要
3	因素 i 与因素 j 稍微重要
5	因素 i 与因素 j 明显重要
7	因素 i 与因素 j 强烈重要
9	因素 i 与因素 j 极端重要
2, 4, 6, 8	表示两相邻判断的中间值

表 2 一致性检验判断指标

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

3 计算结果与分析

3.1 指标计算结果

在郑州市内涝风险评估中, 基于“H-E-V”风险评估框架, 选取 12 个评估指标: 坡度、距河网距离、不透水面占比、高程、公交站点密度、地铁站点密度、医疗点密度、学校点密度与停车场密度、人口密度、GDP 和路网密度。利用 ArcGIS 空间分析工具生成 12 个分辨率为 100 m 的栅格数据图层, 并将指标属

性值范围归一化在 0~1 之间, 指标计算结果如图 3 所示。在 12 个评估指标中, 正向效应指标为距河网距离、不透水面占比、公交站点密度、地铁站点密度、医疗点密度、学校点密度、停车场密度、人口密度、GDP 和路网密度; 负向效应指标为坡度、高程、医疗点密度。这一计算结果说明: 当遭遇极端降雨时, 河道往往会发生溢流, 因此距离河道越近的区域, 内涝风险越高; 城市不透水面占比较大的区域, 积水难以下渗, 地表径流增大, 更容易形成内涝; 人口密度反映内涝灾害对城市人员生命健康的威胁; GDP 可以反映城市工商业的密集程度, GDP 越高的地区, 遭受内涝灾害时所造成的经济损失越严重; 距离公交站、地铁站、学校和停车场等城市 POI 点越近的地区, 其发生内涝灾害时造成经济损失越大, 风险越高; 城市遭遇强降雨会导致路面大面积被淹没甚至造成塌方, 从而导致交通瘫痪, 影响居民正常出行, 内涝风险增大; 城市医疗点密度反映城市应急响应的能力; 在城市高程越低、坡度越平缓的区域, 易形成积水, 更易造成内涝灾害。

3.2 基于层次分析法计算指标权重结果

依据层次分析结构, 构造各层次的判断矩阵, 共需要构建四个判断矩阵, 分别为准则层判断矩阵和三个指标层判断矩阵(包含危险性判断矩阵、暴露性判断矩阵和脆弱性判断矩阵)。综合考虑专家意见和参考相关文献中各指标之间的比较标度并赋值到各判断矩阵中, 使各指标权重均经过一致性检验, 即 $CR<0.1$ 。准则层的各指标权重分别为危险性(0.46)、暴露性(0.23)、脆弱性(0.31), 如表 3 所示。计算出各层次判断矩阵的单层权重后, 还需要计算指标层因子的总权重值, 总权重为各准则层权重与相应指标层权重的乘积。

3.3 内涝风险评估结果

经层次分析法得出各指标权重, 利用 ArcGIS 栅格计算工具绘制出郑州市中心城区危险性、暴露性、脆弱性和综合内涝风险分布图, 如图 4 至图 7 所示。

从危险性分布(见图 4)来看, 整体上呈现从中心区域高危地区逐渐向四周递减的趋势, 中部、东北部地区的危险性高于西南部。危险性较高的区域与城市不透水面的分布相近, 这些区域的下垫面多被建筑覆盖, 增大了内涝危险系数; 郑州市中心城区不透水面在近年来处于高速扩张状态, 且在北部与东部扩张速度较快。低危险区域主要分布在二七区西南部, 这与郑州市西南高、东北低的地形相关。郑州市

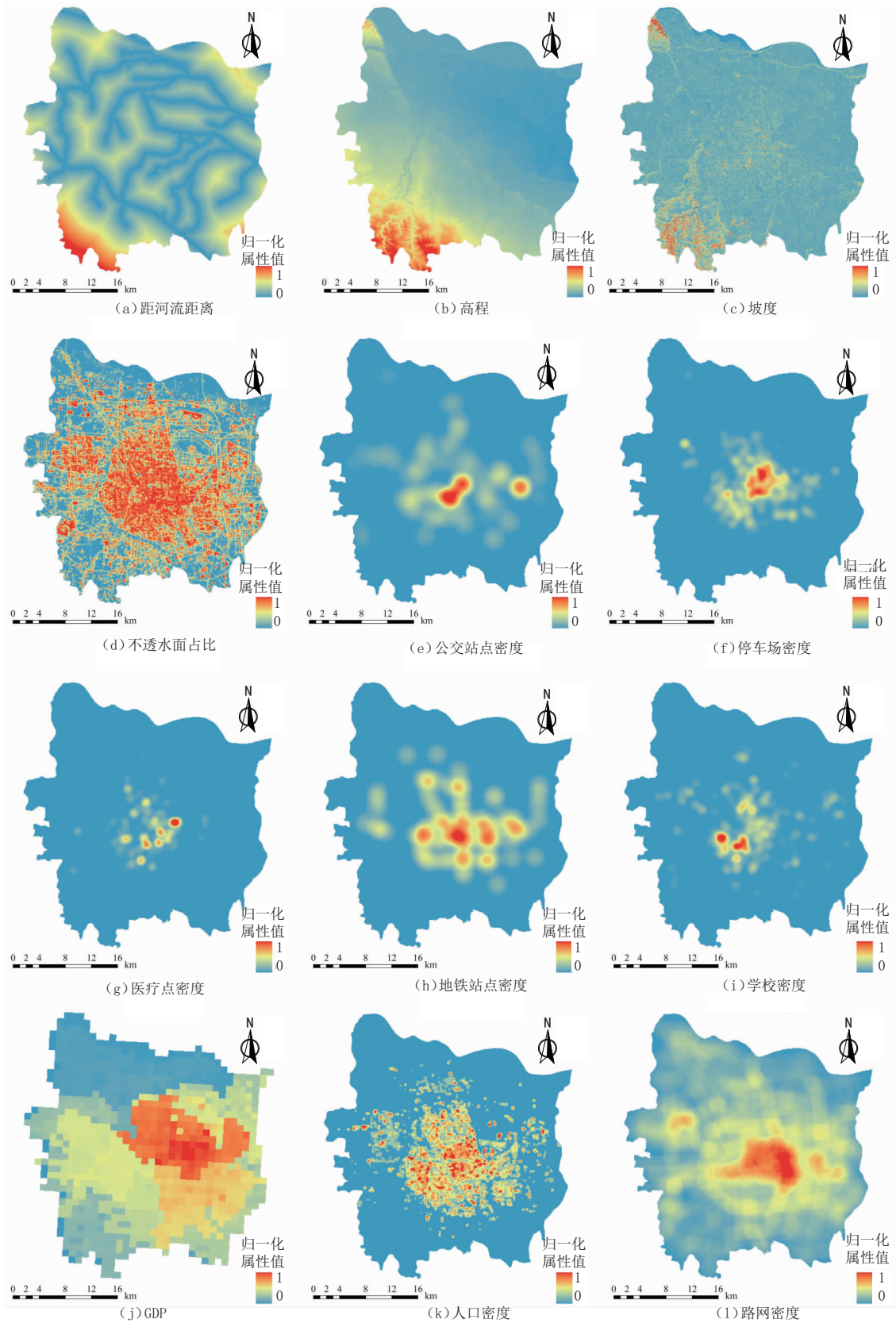


图3 郑州市中心城区内涝风险评估指标空间分布图

的地势呈阶梯式下降,西部、南部多为中低山,中部和东部多为平原,地势起伏较小,不利于积水排出,危险性较高。

暴露性风险(见图5)从整体上看,靠近郑州市中

心区域的内涝风险的暴露程度较高。高暴露性风险区域大部分分布在金水区南部及金水区管城区二七区和中原区交界处,该区域是城市中商业交通较为发达的区域,因此内涝暴露性风险较大。低暴露风险

表 3 基于层次分析法的指标权重

目标层	准则层		指标层		AHP 层次分析法
	指标	权重	指标	权重	总权重 (准则层×指标层)
城市内涝灾害风险评估	危险性	0.46	距河网距离	0.065	0.030
			坡度	0.114	0.052
			高程	0.318	0.146
			不透水面占比	0.503	0.231
	暴露性	0.23	公交站点密度	0.116	0.027
			停车场密度	0.100	0.023
			医疗点密度	0.361	0.083
			地铁站点密度	0.174	0.041
			学校密度	0.249	0.057
	脆弱性	0.31	GDP	0.122	0.038
			人口密度	0.558	0.173
			路网密度	0.320	0.099

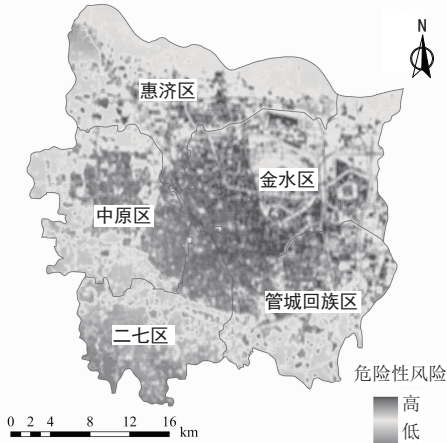


图 4 郑州市中心城区内涝危险性分布图

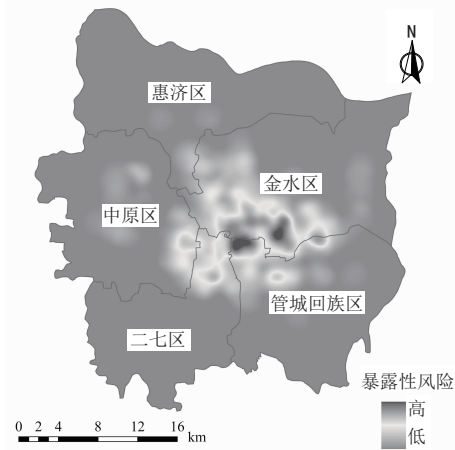


图 5 郑州市中心城区内涝暴露性分布图

区域主要分布在 POI 点密度较低的中心城区外围区域。

从城市脆弱性分布情况(见图 6)来看,脆弱性与城市发达程度相关性较高,高脆弱区域主要分布在中心城区的中心区域即金水区西部及金水区管城区中原区与二七区的交界处。中心城区中心区域人口

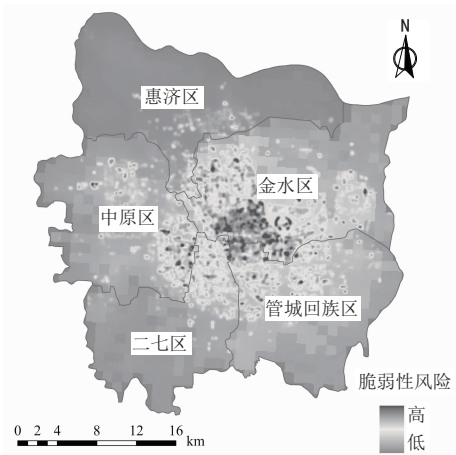


图 6 郑州市中心城区内涝脆弱性分布图

密度较大,道路网络密集,地均 GDP 较高,是城市较为发达区域,加大了城市内涝的风险。低脆弱性区域主要分布在惠济区北部、二七区西南部等发展程度较低的地区。

郑州市中心城区内涝灾害综合风险评估结果如图 7 所示,综合“H-E-V”内涝风险评估框架,根据 AHP 求出的权重,将所有内涝因子导入评估模型中,在 ArcGIS 中利用自然断点法绘制了郑州市的内涝风险空间分布图,并划分 5 个风险区划等级,各等级的面积占比如图 8 所示。各城区内涝风险等级面积统计结果如图 9 所示。

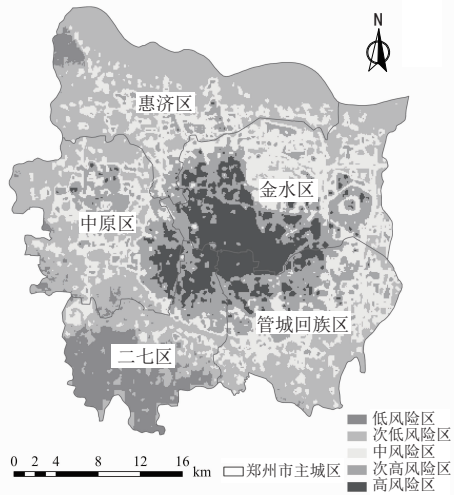


图 7 郑州市中心城区内涝灾害风险分布图

分析郑州市中心城区内涝风险评估结果发现,郑州市内涝风险整体上呈现从高风险的中心区域逐渐向四周降低的趋势。在郑州市中心城区中高风险区域占比为 10%,主要分布在金水区西南部、二七区北部、中原区东部和管城区北部区域,高风险区尤以在金水区的分布面积最大,为 58.72 km²,其次是管城区(19.62 km²)、二七区(11.99 km²)、中原区(10.44 km²),惠济区最低,为 0.36 km²;次高风险区

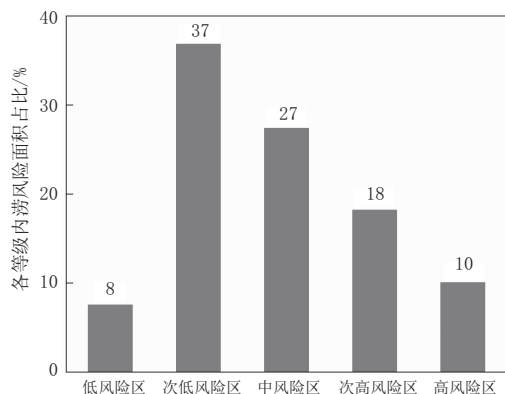


图8 郑州市中心城区各等级内涝风险面积占比统计

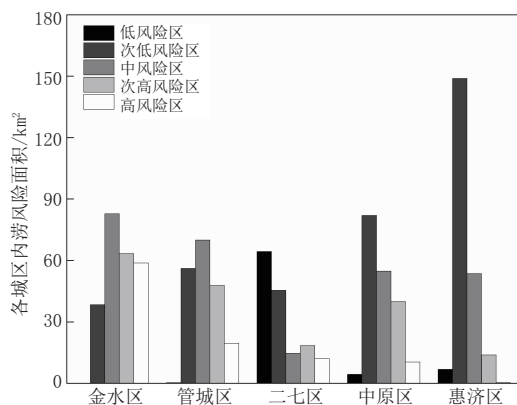


图9 各城区内涝风险等级面积统计

域占比18%,高于高风险区面积,主要分布在高风险区域外围及中原区中部区域,次高风险区在金水区分布面积最大,为63.34 km²,其次是管城区(47.75 km²)、中原区(39.9 km²)、二七区(18.5 km²),惠济区最低,为13.85 km²;中风险区面积占比27%,主要分布在次高风险区外围,中风险区在金水区分布面积最大,为82.83 km²,在二七区分布最少,为14.65 km²;次低风险区在各等级风险面积中占比最大,为37%,主要分布在惠济区和中心城区周边地区,在惠济区面积最大,为148.86 km²,其次是中原区(82.01 km²)、管城区(56.17 km²)、二七区(45.46 km²),在金水区分布最小,为38.36 km²;低风险区面积最小,仅占比8%,主要分布在二七区西南部,该区域多为山地,海拔较高,距离河网较远,人口密度和不透水面占比均较小。

郑州市各排水分区的内涝风险等级面积统计结果如图10所示。高风险区主要分布在中心城区流域,在熊耳河流域(27.02 km²)分布面积最大,其次是东风渠流域(26.70 km²)和金水河流域(25.32 km²),在枯河、索须河等流域分布面积较小;次高风险区主要分布在贾鲁河流域(38.74 km²),其次是七里河流域(31.51 km²)和东风渠流域(29.64 km²),在枯河流域分布最小;中风险区域在贾鲁河流域(94.45 km²)

分布面积最大,在熊耳河流域(2.82 km²)分布面积最小;次低和低风险区域主要分布在贾鲁河流域和索须河流域,在其他流域分布较少。

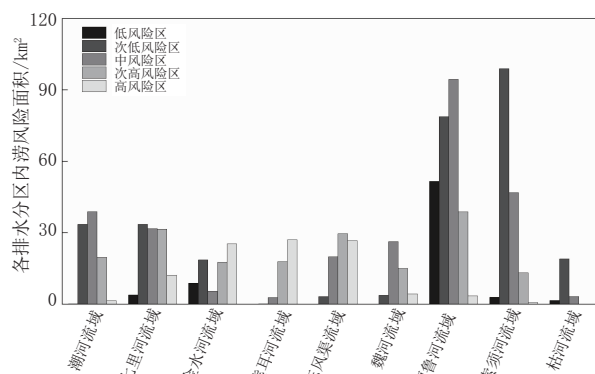


图10 郑州市各排水分区内涝风险等级面积统计

4 结 语

本文基于“H-E-V”内涝风险评估框架,结合AHP层次分析法和GIS空间分析方法,利用多源数据构建了多指标内涝灾害风险评估模型,综合考虑了12个指标,计算权重并对指标进行归一化处理,最后利用GIS绘制了风险等级区划图,对郑州市中心城区内涝灾害进行了风险评估。结果表明:

(1)郑州市中心城区内涝风险整体上呈现从高风险的中心区域逐渐向四周降低的趋势,在中心城区高风险区域占比为10%,次高风险区域占比18%,中风险区面积占比27%,次低风险区在各等级风险面积中占比最大为37%,低风险区面积最小仅占比8%;

(2)高风险区和次高风险区在金水区的分布面积最大,主要分布在中心城区的中心区域及中原区中部和金水区东部,次低风险区主要分布在惠济区和中心城区周边地区,低风险区面积最小,主要分布在二七区西南部的山地区域;

(3)通过评估郑州市中心城区的内涝风险,可为城市内涝风险管理,灾害预警和减少灾害损失提供科学建议。

参考文献:

- [1] 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):1-6,17.
- [2] WU Z,XUE W,XU H,et al.Urban Flood Risk Assessment in Zhengzhou, China,Based on a D-Number-Improved Analytic Hierarchy Process and a Self-Organizing Map Algorithm [J].Remote Sensing,2022,14(19):4777.
- [3] 张冬冬,严登华,王义成,等.城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J].灾害学,2014,29(1):144-149.
- [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] 何珮婷,刘丹媛,卢思言,等.基于最大熵模型的深圳市内涝影响因素分析及内涝风险评估[J].地理科学进展,2022,41(10):1868-1881.
- [6] 方建,李梦婕,王静爱,等.全球暴雨洪水灾害风险评估与制图[J].自然灾害学报,2015,24(1):1-8.
- [7] 王德运,冀承泽,张露丹,等.城市洪涝风险的多方法组合评与应用[J].灾害学,2023,39(1):96-103.
- [8] 王浅宁,周之仪,吴剑,等.融合社会信息的城市暴雨内涝风险评估[J].水力发电学报,2023,42(7):84-95.
- [9] 段光耀,赵文吉,宫辉力.基于遥感数据的区域洪涝风险评估改进模型[J].自然灾害学报,2012,21(4):57-61.
- [10] 周延,余敦先,夏军,等.基于水文水动力模型的 LID 措施对城市内涝风险的影响研究[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(11):1090-1101.
- [11] 冯博,朱建国,余磊.城市内涝风险评估及风险管理对策研究[J].中国农村水利水电,2023(6):101-106.
- [12] 仇文岗,王云浩,胡庆芳,等.超大城市洪涝灾害成因综合解析——以重庆市为例[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),1-10(2023-08-11)[2023-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20230810.1328.002.html>.
- [13] 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,2019,28(6):167-175.
- [14] 郑州市水利局. 河南省人民政府批复《郑州市城市防洪规划(2021-2025)》[EB/OL]. (2024-02-27) [2024-06-01]. <https://zzsl.zhengzhou.gov.cn/swjb/8320648.jhtml>.
- [15] 张会,李铖,程炯,等.基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J].地理科学进展,2019,38(2):175-190.
- [16] 张金萍,陈蔚,方宏远,等.郑州市新、老城区暴雨内涝灾害风险指标重要性分析[J].水电能源科学,2023,41(6):59-63.
- [17] 赵佳慧,许红师,王田野,等.基于改进熵权-TOPSIS-灰色关联方法的洪涝风险评估[J].水利水电技术(中英文),2022,53(10):58-73.
- [18] Open StreetMap. Open StreetMap(2020)[EB/OL]. (2021-04-01) [2024-02-01]. <https://www.openstreetmap.org>.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com