

基于 Copula 函数的郑州市暴雨与内涝风险关系研究

张金萍^{1,2}, 杨沂荣¹, 王 尧¹, 张 熙¹

(1. 郑州大学水利与交通学院; 2. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院)

摘要:针对短历时强降雨引发城市内涝的问题,基于多源数据与 SWMM 模拟,构建了考虑降雨特征、下垫面属性、社会经济属性、管网运行属性的郑州市中心城区内涝风险评估指标体系,并引入 Copula 函数建立了降水量、降雨强度与内涝风险的二维联合分布模型。结果表明:降水量、降雨强度、不透水率、平均坡度、人口密度是影响郑州市中心城区内涝风险的重要因素,管网排水能力不足会加剧内涝风险;155 场短历时降雨事件中,中风险与高风险事件占比分别为 53.5% 和 22.6%,研究区排水系统对中等及以上强度降雨的承载能力有待提升;降水量与内涝风险的同步遭遇概率达 87.2%,降雨强度与内涝风险的同步遭遇概率为 59%,降水量和降雨强度均是内涝风险的重要影响因素。

关键词:城市暴雨;内涝风险;SWMM;Copula 函数;郑州市

Study on relationship between rainstorm and waterlogging risk in Zhengzhou City based on Copula function// Zhang Jinping^{1,2}, Yang Yirong¹, Wang Yao¹, Zhang Xi¹ (1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University; 2. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University)

Abstract: In response to the problem of urban waterlogging caused by short-term heavy rainfall, a risk assessment index system for waterlogging in the central urban area of Zhengzhou was constructed based on multi-source data and SWMM simulation, considering rainfall characteristics, underlying surface attributes, socio-economic attributes, and pipeline operation attributes. Two-dimensional joint distribution models of precipitation, rainfall intensity, and waterlogging risk were established by introducing the Copula function. The results indicate that precipitation, rainfall intensity, impermeability rate, average slope, and population density are important factors affecting the risk of waterlogging in the central urban area of Zhengzhou. Insufficient drainage capacity of the pipeline network will exacerbate the risk of waterlogging. Among 155 short duration rainfall events, the proportion of medium risk and high-risk events was 53.5% and 22.6%, respectively, indicating that the drainage system in the study area needs to improve its carrying capacity for moderate and above intensity rainfall. The calculation results of the Copula joint distribution model show that the synchronous encounter probability between precipitation and waterlogging risk is 87.2%, and the synchronous encounter probability between rainfall intensity and waterlogging risk is 59%, indicating that both precipitation and rainfall intensity are important influencing factors of waterlogging risk.

Key words: urban rainstorm; waterlogging risk; SWMM; Copula function; Zhengzhou City

近年来,随着气候变化的加剧和区域城市化进程的加速,短历时强降雨引发的城市内涝问题日益突出^[1-4]。郑州市作为我国中部核心城市,其中心城区人口密集、建筑密度高,排水压力巨大。夏季常发生短历时强降雨事件,极易引发城市内涝,不仅严重威胁了人们的生命财产安全,也对城市基础设施的正常运行带来了巨大的挑战^[5-7]。因此,科学评估城市内涝风险并揭示其与降雨特征的关联机制对防洪排涝、提升城市韧性具有重要意义。

目前,国内外学者在城市内涝风险评估领域已

取得巨大进展。传统研究主要采用基于区域属性的风险评价方法和数值模拟方法^[8-12],前者通常从孕灾环境的角度出发,关注地表特定下垫面条件等静态因素对内涝风险的影响,但排水管网的运行特性往往重视不够,而由此造成的排水系统排泄能力不足是诱发城市内涝的重要因素之一^[13],需在城市内涝风险评价中纳入排水系统的动态运行特性;后者对高精度监测数据依赖性较强,获取成本较高,在数据匮乏的区域难以有效推广应用^[14]。此外,暴雨特征(如降水量、降雨强度等)与城市内涝风险之间的

关联机制仍缺乏系统性研究^[15]。现有研究表明,降水量是决定城市内涝发生概率的关键因素之一,但降水量与内涝风险的关系并非简单的线性关系,而是受多种环境和社会因素的调控^[16-18]。不同城市或区域在相同降水量下因排水基础设施、地形坡度、土地利用类型及管网负荷状况的不同,可能会导致不同的内涝风险;降雨强度在内涝形成过程中也具有重要作用,高强度短历时降雨往往导致短时间内地表径流剧增,超过排水系统的承载能力,从而引发严重积水^[19]。综合来看,当前内涝风险评估的研究仍然面临降雨特征与内涝风险研究模糊的问题,因此需要进一步加深降雨特征与内涝风险的研究,以构建更精准的内涝风险评估体系。

基于上述背景,本文以郑州市中心城区为研究区,结合降雨特征、下垫面属性、社会经济属性、管网运行属性构建城市内涝风险评估体系,揭示暴雨特征与内涝风险的关联机制,并采用熵权法计算各指标权重,通过引入 Copula 函数建立降水量、降雨强度与内涝风险的联合分布模型,从而揭示降雨与内涝风险之间的相依关系。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文研究区位于郑州市中心城区,是河南省委省政府办公地所在区域,位于 30°51'N~34°57'N、113°40'E~113°46'E。研究区面积为 77.5 km²,人口为 94 万人,约占郑州市总人口的 7.5%,地势西高东低,属于半干旱、半湿润性季风气候,夏季多发生暴雨,年均气温 14.8℃,年均降水量 586.1 mm。研究区内主要有金水河、东风渠、魏河、熊儿河 4 条河流,部分排水管道汇集于河流,有良好的城市行洪能力。研究区内设有 15 个街道办事处对暴雨洪涝等行政事务进行管理。

1.2 数据来源

本文所需的基础数据包括降雨数据、地下管网数据、高程数据、土地利用数据、社会经济数据等多源信息,数据来源见表 1。采用 155 场短历时降雨

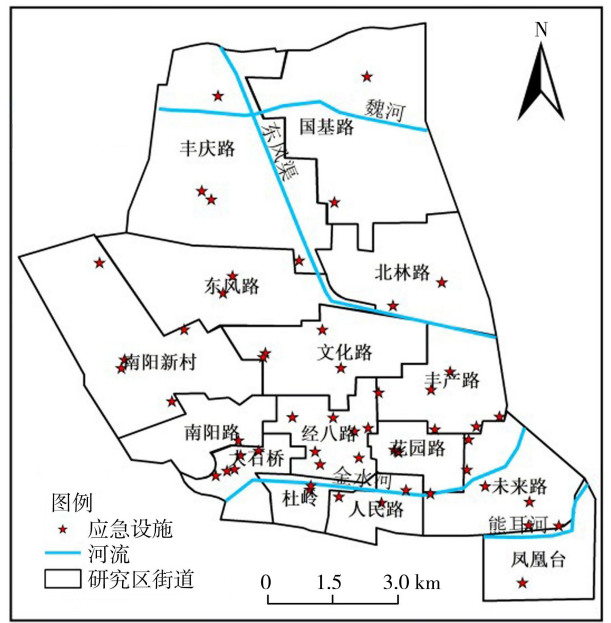


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

进行研究,雨峰系数为 0.4,全部为单峰降雨。其中包括 30 min 内降雨 35 场,平均降水量 20 mm,最大降水量 29 mm;1 h 降雨 79 场,平均降水量 26 mm,最大降水量 42 mm;1.5 h 降雨 38 场,平均降水量 33 mm,最大降水量 45 mm;2 h 降雨 3 场,平均降水量 50 mm,最大降水量 71 mm。

2 研究方法

2.1 暴雨内涝模型

SWMM 是由美国环保署开发的一款动态降雨径流模拟工具,其不仅可以对城市内水量或水质的单一事件进行长期连续模拟,还可以应用于城市内涝风险数值模拟^[20]。SWMM 主要由地表产汇流计算模块、管网汇流模块和地表积水模块组成。其中,地表产流可根据透水、有洼不透水、无洼不透水 3 类子汇水区面积分别计算,汇流过程可近似处理为非线性水库,管网汇流的流量演算采用动态波的计算方法进行模拟计算,其数学表达式为:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

数据名称	具体数据说明	来源
降雨数据	逐 10 min 降雨站点数据(2018—2023 年)	郑州市气象局
高程数据	精度为 12.5 m 的 DEM 数据(2023 年)	中科图新(http://www.tuxingis.com)
管网数据	基础空间数据、管线属性数据等	《郑州市排水工程管网图》
土地利用数据	ESA 分辨率为 10 m 的土地利用数据,包括林地、草地、耕地、建筑用地	欧空局(https://viewer.esa-worldcover.org)
社会经济数据	应急设施数量、人口等	《郑州市统计年鉴(2023 年)》

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gn^2 \frac{Q|Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

式中: A 为过水断面面积; Q 为流量; t 为时间; x 为空间变量; Z 为水位; R 为水力半径; n 为糙率; g 为重力加速度。

SWMM 的管网概化与子汇水区划分是模型构建中的核心步骤。管网概化主要是在保留主干管道、关键节点及重要控制设施的基础上对次要支线、局部复杂管段进行合理简化与合并, 由于研究区排水管网为雨污分流制系统, 部分雨水井连通河道, 且研究区河道多为景观硬化河道, 因此将河道概化为明渠或方形水槽的排水管道并对次要排水支管进行合并或删除^[21-22]; 子汇水区划分则根据地形特征、土地利用类型及管网布局等, 应用泰森多边形将研究区分解为多个汇水单元, 并设置每个汇水单元的水文参数, 如面积、不透水率、坡度等。通过概化, 得到 160 个子汇水区、215 个雨水节点、261 条排水管道, 如图 2 所示。

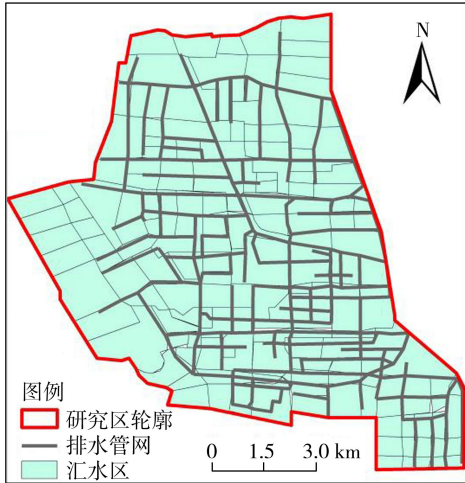


图 2 研究区管网概化及子汇水区划分结果

Fig. 2 Piping network generalization and sub-watershed division results in study area

SWMM 的参数分为确定性参数和不确定性参数。其中, 确定性参数(如管长、管径等)根据实际情况设置, 不确定性参数(如曼宁系数等)根据《雨水管理模型 SWMM 用户手册》中给出的范围作为参考, 多次模拟后选择最佳数值。

选择降雨重现期分别为 1、2、5 a 的 3 场典型实测降雨对 SWMM 进行验证, 雨型均为芝加哥雨型, 雨峰系数均为 0.45, 降水量分别为 37、47、61 mm, 降雨历时均为 95 min。应用地表径流量连续性误差、流量演算连续性误差和综合径流系数法指标对模拟结果进行验证, 结果表明 3 场降雨的地表径流连续性误差分别为 -0.08%、-0.06%、-0.02%, 流量演算连续性误差分别为 -0.09%、0.03%、-0.71%, 综合

径流系数分别为 0.633、0.687、0.652。SWMM 用户手册规定, 当模型连续性误差不超过 2% 时, 可初步判定模型较合理; 同时, 郑州市中心城区综合径流系数约为 0.65^[21], 与计算结果相近。此外, 通过网络数据爬取得到研究区易积水点, 如图 3 所示, 与模型模拟得到的易涝点基本相符, 可见所构建的 SWMM 合理可行。

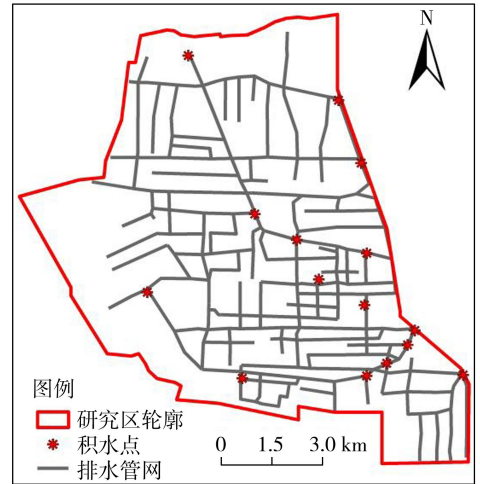


图 3 研究区易积水点

Fig. 3 Flood-prone areas in study area

2.2 城市内涝风险评估指标体系

2.2.1 评估指标选取

综合考虑降雨特征、下垫面属性、社会经济属性和管网运行属性, 选取 14 个内涝风险评价指标。降雨特征指标包括 2 个指标: 降水量、降雨强度; 下垫面属性指标包括 3 个指标: 区域平均坡度、高程、不透水率, 这些指标主要影响研究区降雨产汇流特征; 社会经济属性包括 3 个指标: 排水管网密度、人口密度、应急设施数量(区域内派出所、医院、消防站总数), 其中排水管网密度决定了汇水区的排水能力, 人口密度体现了区域的抗灾能力, 应急设施数量则体现了区域的防灾救灾能力; 管网运行属性指的是暴雨内涝发生时排水系统的节点溢流和管道运行状态, 包括 6 个指标, 其中节点溢流量、节点积水时长、节点最大积水深反映管网汇结点处的节点风险, 表示排水系统在降雨下的承载能力, 管道超载时长、管道最大流量、管道最大流速反映管道排水能力的强弱, 表示管网排水潜力与运行负荷状况下的管道风险。

2.2.2 风险值计算与风险等级划分

以 15 个街道为评价单元, 以 155 场降雨事件为评价情景, 构建考虑降雨特征、地形条件、下垫面属性、社会经济属性及排水系统运行状态等 14 个指标的综合风险评估模型。采用熵权法^[23-25]确定指标权重, 并通过加权求和方法计算街道尺度及区域尺度的内涝风险值。具体步骤为:

a. 针对单场降雨事件,构建 15 个街道、14 个指标的原始数据矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{m \times n}$, x_{ij} 为街道 i 的指标 j 的原始值, $m=15, n=14$ 。

b. 指标标准化。为消除量纲影响,利用最小-最大归一化方法对原始数据进行标准化,将 \mathbf{X} 映射至 $[0, 1]$ 区间上的 $\mathbf{Z}=(z_{ij})_{m \times n}$ 。

c. 计算指标信息熵:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

其中

$$P_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^m z_{ij}$$

式中: e_j 为指标 j 的信息熵; P_{ij} 为街道 i 的指标 j 在全部街道指标 j 的占比。

d. 计算指标权重:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (4)$$

式中: w_j 为指标 j 的权重。

e. 计算单场降雨事件下街道内涝风险值:

$$R_i = \sum_{j=1}^n w_j z_{ij} \quad (5)$$

式中: R_i 为单场降雨街道 i 的内涝风险值。

f. 计算街道平均内涝风险值。为降低单场降雨随机波动对评价结果的影响,对 155 场降雨情景下各街道风险值取平均,得到街道平均风险值:

$$\bar{R}_i = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^{155} R_{ik} \quad (6)$$

式中: \bar{R}_i 为街道 i 在 155 场降雨事件下的平均内涝风险值; R_{ik} 为第 k 场降雨街道 i 的内涝风险值。

g. 计算研究区内涝风险值:

$$R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{R}_i \quad (7)$$

式中: R 为研究区内涝风险值。

根据内涝风险值划分研究区的内涝风险等级, R 为 <0.33 、 $0.33 \sim 0.67$ 、 >0.67 分别对应低风险、中风险、高风险 3 个等级集合,记为 S_R 、 M_R 、 L_R 。

2.3 Copula 联合分布模型

Copula 函数是一种描述多维随机变量之间相依关系的函数,广泛应用于气象学、金融风险管理、工程不确定性分析等领域^[26-27]。对于连续的多变量函数,单变量的边缘分布函数和多变量的相关性结构可以分离,可利用 Copula 函数描述变量间的相关性结构^[28]。为了进一步揭示降雨特征与城市内涝风险之间的关系,本文引入 Copula 函数建立降水量、降雨强度与内涝风险值之间的联合分布模型,用以量化暴雨特征与内涝风险的遭遇规律,从统计学

角度揭示城市暴雨与区域内涝风险的关系。

设 $H(x_1, x_2, \dots, x_k)$ 是一个 k 元函数, $F_1(x_1)$ 、 $F_2(x_2)$ 、 \dots 、 $F_k(x_k)$ 为变量 x_1, x_2, \dots, x_k 的边缘分布函数^[29],那么存在一个 k 维 Copula 函数使得:

$$H(x_1, x_2, \dots, x_k) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_k(x_k)] \quad (8)$$

式中: $C(\cdot)$ 为 Copula 函数。如果 $F_1(x_1)$ 、 $F_2(x_2)$ 、 \dots 、 $F_k(x_k)$ 是连续的,则 $C(\cdot)$ 可以唯一确定,当 $k=2$ 时, $C(\cdot)$ 为二维 Copula 函数。

本文在边缘分布函数优选中,考虑广义极值分布、韦伯分布、正态分布 3 种分布函数类型。采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验确定边缘分布函数的合理性^[30]。在 Copula 函数优选中,主要考虑 Archimedean 型、椭圆型 Copula 函数。在水文气象研究领域,Archimedean 型中 Clayton Copula、Frank Copula、Gumbel Copula、Gaussian Copula 应用最为广泛^[31-34],因此本文主要考虑以上 4 种二维 Copula 函数。采用 AIC 信息准则法对 Copula 函数进行优选。

3 结果与分析

3.1 研究区内涝风险等级

基于熵权法计算得到研究区内涝风险评估指标权重,由大到小依次为:降水量(13.8)、不透水率(12.4)、降雨强度(10.9)、平均坡度(10.8)、人口密度(10.6)、应急设施数(9.1)、高程(7.7)、排水管网密度(7.3)、节点积水时长(6.9)、节点最大积水深(5.6)、管道超载时长(5.3)、节点溢流量(4.5)、管道最大流量(3.7)、管道最大流速(3.4)。可见,降水量、降雨强度、平均坡度、不透水率、人口密度为研究区内涝风险评估的关键因素。其中,降水量和降雨强度是城市内涝风险的核心因素,坡度和不透水率对降雨产汇流特征的影响是决定下垫面属性内涝风险的重要因素,因此加强海绵城市建设以优化产汇流特性显得尤为重要。此外,作为内涝主要承灾体的人口密度也是城市内涝风险评估中不可忽视的因素。

基于研究区 155 场历史降雨事件进行内涝风险评估,结果显示低、中、高风险等级的事件占比分别为 23.9% (37 场)、53.5% (83 场) 和 22.6% (35 场),其中,中高风险事件累计占比达 76.1%,揭示了研究区内涝事件以中高风险为主,存在较高的内涝风险。中高风险事件的高占比反映出研究区城市排水系统的承载能力不足,揭示了排水基础设施建设相对薄弱的问题;高风险事件的较高占比进一步表明,在极端降雨条件下,内涝可能对城市运行和居民安全造成严重威胁。因此,研究区应定期开展排水设施的维护工作,防止因管网淤堵等问题引发

内涝风险上升。

3.2 Copula 函数优选

采用广义极值分布、韦伯分布、正态分布分别对降水量(P)、降雨强度(I)、内涝风险(R)进行边缘分布拟合,K-S 检验结果表明,广义极值分布通过检验,韦伯分布和正态分布未通过检验。因此,降水量、降雨强度、内涝风险的边缘分布函数均选取广义极值分布。根据 AIC 信息准则,分别对降水量-内涝风险、降雨强度-内涝风险的二维 Copula 联合分布函数进行优选,最终均选取 Archimedean 型中的 Frank Copula 函数,表达式为:

$$C(u, w) = -\frac{1}{7.4339} \ln \{ 1 + [(e^{-7.4339u} - 1) \cdot (e^{-7.4339w} - 1)] / (e^{-7.4339} - 1) \} \quad (9)$$

$$C(v, w) = -\frac{1}{21.536} \ln \{ 1 + [(e^{-21.536v} - 1) \cdot (e^{-21.536w} - 1)] / (e^{-21.536} - 1) \} \quad (10)$$

式中: u 为降水量的边缘分布函数; v 为降雨强度的边缘分布函数; w 为内涝风险的边缘分布函数。

3.3 城市暴雨特征与内涝风险组合遭遇概率

3.3.1 降水量和降雨强度数据分类

图 4 为研究区降水量和降雨强度的数据统计分布。根据统计结果,降水量和降雨强度的数据可依据四分位数进行分类:降水量和降雨强度数据属于小于第 25 百分位数的数据集的情况记为 S_p 和 S_1 ,降水量和降雨强度属于大于第 75 百分位数的数据集的情况记为 L_p 和 L_1 ,降水量和降雨强度数据属于第 25~第 75 百分位数的数据集的情况记为 M_p 和 M_1 。

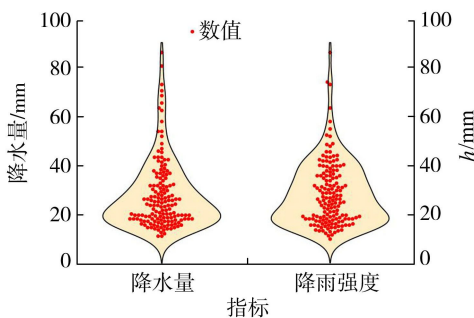


图 4 研究区降水量和降雨强度的数据统计分布

Fig. 4 Statistical distribution of precipitation and rainfall intensity in study area

表 2 降水量-内涝风险、降雨强度-内涝风险的不同遭遇情况下的联合遭遇概率

Table 2 Joint encounter probability of precipitation-waterlogging risk and rainfall intensity-waterlogging risk under different encounter scenarios

组合	同步遭遇概率/%			异步遭遇概率/%					
	L-L	M-M	S-S	L-M	L-S	M-S	M-L	S-L	S-M
$P-R$	21.8	43.6	21.8	3.2	0	3.2	3.2	0	3.2
$I-R$	14.4	30.4	14.4	9.8	0.8	9.8	9.8	0.8	9.8

3.3.2 联合遭遇风险分析

基于优选的二元 Frank Copula 函数得到降水量-内涝风险($P-R$)、降雨强度-内涝风险($I-R$)的概率密度函数、分布函数和联合分布等值线,如图 5、图 6 所示。由降水量-内涝风险、降雨强度-内涝风险的概率密度函数可以看出,二元 Frank Copula 函数呈“C”字形,具有对称的尾部结构,对变量分布的变化比较敏感,能捕捉到两个变量之间的相关关系。分布函数和联合分布等值线表明了变量在不同值下的分布情况。

利用已构建的 Copula 联合分布模型对降水量-内涝风险、降雨强度-内涝风险的不同遭遇情况进行分析,计算其联合遭遇概率,结果如表 2 所示(表中 L-L 表示降水量或降雨强度的数据均属于大于第 75 百分位数的数据集且内涝风险等级为高风险的情况,以此类推)。由表 2 可见,降水量与内涝风险的同步概率较高,为 87.2%,其中, M_p-M_R (43.6%) 占主导地位, L_p-L_R 和 S_p-S_R 的同步概率均为 21.8%,表明 M_p 与内涝风险之间的同步性更强,降水量对内涝风险的直接影响较大;降雨强度与内涝风险的同步遭遇概率为 59.2%,其中 M_1-M_R 占主导地位, L_1-L_R 和 S_1-S_R 的同步概率均为 14.4%,说明在短历时降雨中降雨强度也是影响内涝风险的因素之一。在异步遭遇概率中,降水量-内涝风险、降雨强度-内涝风险在不同遭遇情况下的联合遭遇概率均较小,其中降水量-内涝风险序列不存在大降水量造成小内涝风险及小降水量造成大内涝风险的情况。

3.3.3 条件遭遇风险分析

表 3 为不同等级内涝风险下降水量和降雨强度的条件遭遇概率。由表 3 可见,当降水量较大时,高风险内涝事件的发生概率高达 81.9%,而中等风险事件的概率相对较低,仅为 18.1%。值得注意的是,在大降水量条件下,不会出现低风险内涝事件,这表明大降水量事件对高风险内涝的诱发作用较为明显。此外,当降水量超过 38.5 mm (大降水量阈值)时,应引起高度警惕,以防范潜在的严重内涝损失。对于中等降水量,尽管其主要导致中低风险内涝事件,但仍可能诱发高风险情况,因此需要特别关注此类降水事件的演变趋势。相比之下,在降水量

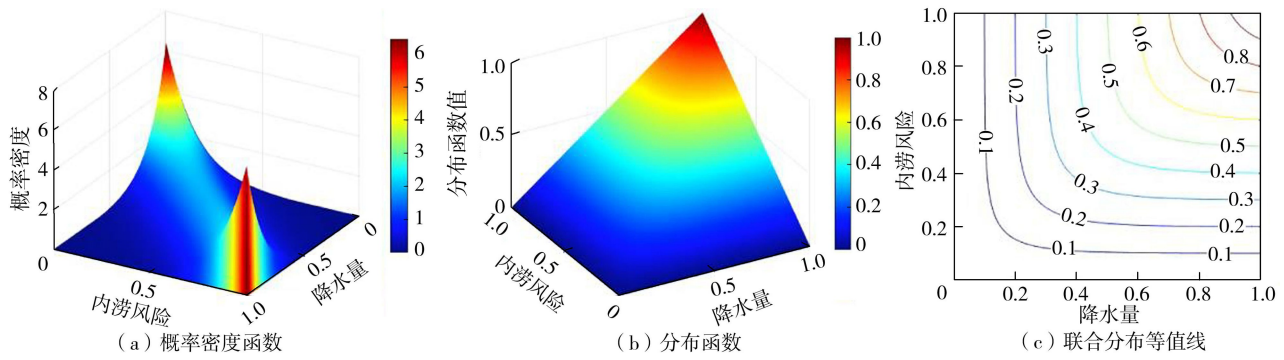


图 5 降水量-内涝风险的概率密度函数、分布函数及联合分布等值线

Fig. 5 Probability density function, distribution function, and contour lines of joint distribution for precipitation-waterlogging risk

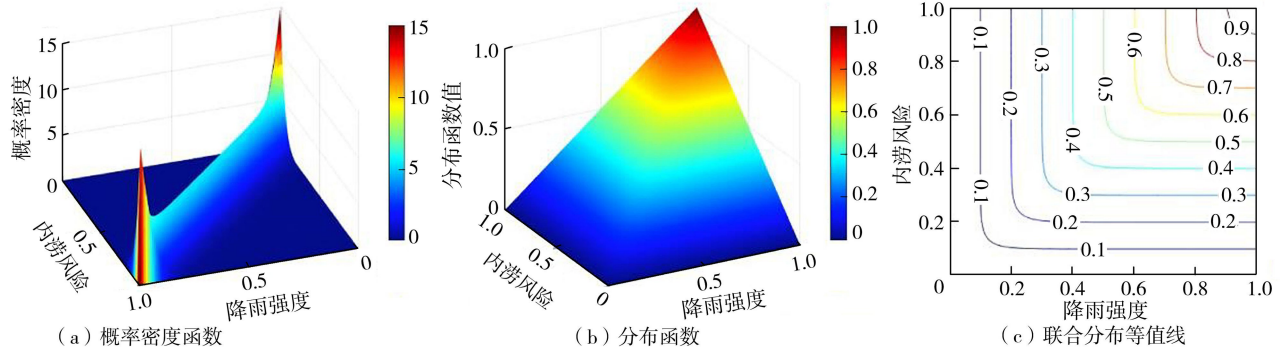


图 6 降雨强度-内涝风险概率密度函数、分布函数及联合分布等值线

Fig. 6 Probability density function, distribution function, and contour lines of joint distribution for rainfall intensity-waterlogging risk

表 3 不同等级内涝风险下降水量和降雨强度的条件遭遇概率

Table 3 Probability of encountering conditions for precipitation and rainfall intensity under different levels of waterlogging risk

风险等级	条件遭遇概率/%					
	L_p	M_p	S_p	L_i	M_i	S_i
高风险	81.9	6.4	0	52.3	19.6	3.2
中风险	18.1	87.2	12.8	20.4	60.8	39.2
低风险	0	6.4	87.2	27.3	19.6	57.6

较低的情况下,高风险内涝事件不会发生,但仍可能引发中等风险的内涝事件。

由表 3 可见,尽管强降雨事件具有 52.3% 的概率引发高风险内涝,但中低风险事件的发生概率亦接近 50%,表明不同降雨强度条件下的内涝风险存在较大的不确定性。对于中等降雨强度,最可能导致的是中风险内涝事件,而高风险和低风险的发生概率相近,各占约 20%。在低降雨强度条件下,中风险内涝事件的发生概率约为 40%,且仍有 3.2% 的可能性引发高风险内涝事件。可见,降雨强度虽在内涝风险形成过程中具有重要作用,但并不能单独决定内涝风险等级。因此,在开展内涝风险评估时,应综合考虑降雨特征、地表和地下排水系统能力

以及社会经济等因素,以提高预测的准确性和防灾减灾的科学性。

4 结论

a. 基于多源数据与 SWMM 模拟,构建了考虑降雨特征、下垫面属性、社会经济属性及管网运行属性的郑州市中心城区内涝风险评估指标体系,评估结果表明降水量、降雨强度、平均坡度、不透水率、人口密度是造成内涝风险的主要因素,管网排水能力是内涝形成的重要因素之一。

b. 对研究区 155 场降雨事件进行内涝风险评估,发现中风险内涝事件占比最高,为 53.5%,高风险事件占比达 22.6%,表明研究区城市排水系统在应对中等及以上强度降雨时承载能力不足,需要提升区域排水能力,以降低内涝隐患。

c. 引入 Copula 函数分别建立降水量、降雨强度与内涝风险的二维联合分布模型,计算结果表明降水量与内涝风险的同步性较强,同步遭遇概率为 87.2%,其中,中等降水量与中等内涝风险遭遇占主导地位(概率为 43.6%)。大降水量显著增加高风险内涝事件的发生概率。降雨强度虽为内涝风险影响因素之一,但不同降雨强度下内涝风险存在较大

不确定性,无法单独决定内涝风险等级。

参考文献:

- [1] 黄远东,杨志强,许冲. 灾害造成的人类损失(2000—2019)[J]. 中国应急管理,2023(8):46-51. (Huang Yuandong, Yang Zhiqiang, Xu Chong. The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019) [J]. China Emergency Management, 2023(8):46-51. (in Chinese))
- [2] 宋晓猛,徐楠涛,张建云,等. 中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J]. 水科学进展,2024,35(3):357-373. (Song Xiaomeng, Xu Nantao, Zhang Jianyun, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3):357-373. (in Chinese))
- [3] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29, 38. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4):23-29, 38. (in Chinese))
- [4] Beltramone G, Alaniz E, Ferral A E, et al. Risk mapping of urban areas prone to flash floods in mountain basins using the analytic hierarchy process and geographical information systems [C]//2017 XVII Workshop on Information Processing and Control. Mar del Plata: IEEE, 2017.
- [5] 张金萍,张朝阳,左其亨. 郑州“7·20”极端降雨的城市内涝模拟及风险评估[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(2):1-7. (Zhang Jinping, Zhang Zhaoyang, Zuo Qiting. Urban waterlogging simulation and risk assessment of “7·20” extreme rainfall in Zhengzhou [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(2):1-7. (in Chinese))
- [6] 刘家宏,裴羽佳,梅超,等. 郑州“7·20”特大暴雨内涝成因及灾害防控[J]. 郑州大学学报(工学版),2023,44(2):38-45. (Liu Jiahong, Pei Yujia, Mei Chao, et al. Waterlogging cause and disaster prevention and control of “7·20” torrential rain in Zhengzhou [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2):38-45. (in Chinese))
- [7] 王东,李小娃. 黄河流域城市群生态韧性时空差异及障碍因子识别[J]. 水利经济,2025,43(6):81-89. (Wang Dong, Li Xiaowa. Spatio-temporal differences in ecological resilience of urban agglomerations in the Yellow River Basin and the identification of obstacle factors [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(6):81-89. (in Chinese))
- [8] 尤凤春,郭丽霞,史印山,等. 北京强降雨与道路积水统计分析及应用[J]. 气象,2013,39(8):1050-1056. (You Fengchun, Guo Lixia, Shi Yinshan, et al. Correlation analysis and application of heavy rainfall and road waterlogging in Beijing [J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(8):1050-1056. (in Chinese))
- [9] Acosta-Coll M, Ballester-Merelo F, Martínez-Peiró M. Early warning system for detection of urban pluvial flooding hazard levels in an ungauged basin [J]. Natural Hazards, 2018, 92(2):1237-1265.
- [10] 李小宁,郑世威,胡庆芳,等. 基于城市排水过程的内涝高效模拟方法[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2024,60(4):509-518. (Li Xiaoning, Zheng Shiwei, Hu Qingfang, et al. Simulation of high efficiency urban flood inundation in the drainage process [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60(4):509-518. (in Chinese))
- [11] Qi Honghai, Altinakar M S. Simulation-based decision support system for flood damage assessment under uncertainty using remote sensing and census block information [J]. Natural Hazards, 2011, 59(2):1125-1143.
- [12] Song Tianxu, Liu Jiahong, Mei Chao, et al. Coupling effect analysis of dam break flood spread and building collapse based on numerical simulation [J]. Science China Technological Sciences, 2024, 67(11):3571-3584.
- [13] 林美霞. 基于海绵城市建设的厦门城市暴雨内涝灾害风险研究[D]. 西安:西安科技大学,2017.
- [14] 王心舒,江思珉,郑茂辉,等. 城市高密度区域排水系统优化方案模拟评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):49-56. (Wang Xinshu, Jiang Simin, Zheng Maohui, et al. Simulation evaluation of drainage system optimization schemes in urban high-density areas [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6):49-56. (in Chinese))
- [15] 胡义明,罗序义,梁忠民,等. 基于藤 Copula 多维联合分布的 CMIP5 多模式降雨综合方法研究[J]. 中国农村水利水电,2021(4):10-15. (Hu Yiming, Luo Xuyi, Liang Zhongmin, et al. Research on CMIP5 multi-model precipitation synthesis method based on vine Copula multivariate joint probability distribution [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(4):10-15. (in Chinese))
- [16] 许瀚卿,谭金凯,李梦雅,等. 基于 Copula 函数的沿海城市雨潮复合灾害风险研究[J]. 自然灾害学报,2022,31(1):40-48. (Xu Hanqing, Tan Jinkai, Li Mengya, et al. Compound flood risk of rainfall and storm surge in coastal cities as assessed by Copula formal [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(1):40-48. (in Chinese))
- [17] 许月萍,童杨斌,富强,等. 几种 Copulas 模拟不同历时降雨量的影响分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2009,43(6):1107-1111. (Xu Yueping, Tong Yangbin, Fu

- Qiang, et al. Impact analysis for rainfall depthsimulation of different durations through several Copulas[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(6): 1107-1111. (in Chinese))
- [18] 黄宁. 降雨事件联合概率分析及其在城市内涝风险评估中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [19] 陈倩云, 余弘婧, 高学睿, 等. 当前我国城市内涝问题归因分析与应对策略[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 55-63. (Chen Qianyun, Yu Hongjing, Gao Xuerui, et al. Attribution analysis and coping strategies of current urban waterlogging problem in China[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 55-63. (in Chinese))
- [20] Feng Qingyu, Chaubey I, Her Y G, et al. Hydrologic and water quality impacts and biomass production potential on marginal land[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 72: 230-238.
- [21] 孟庆礼, 杨利伟, 孙征, 等. 一种基于 SWMM 模型模拟河道水质参数计算方法: CN202011425048. 9[P]. 2022-03-25.
- [22] 臧文斌, 刘妍, 张红萍, 等. 城市暴雨洪涝全过程模拟及其在洪涝风险评估中的应用[J]. 水资源保护, 2026, 42(1): 103-111. (Zang Wenbin, Liu Yan, Zhang Hongping, et al. Whole process simulation of urban rainstorm and flood and its application in flood risk assessment[J]. Water Resources Protection, 2026, 42(1): 103-111. (in Chinese))
- [23] 张金萍, 张浩锐, 方宏远. 基于 SWMM 和 SCS 法的城市内涝模拟及雨水管网系统评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(1): 110-121. (Zhang Jinping, Zhang Haorui, Fang Hongyuan. Urban waterlogging simulation and rainwater pipe network system evaluation based on SWMM and SCS method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 110-121. (in Chinese))
- [24] 尹萌萌, 刘梦婷, 朱伟, 等. 城市内涝灾害韧性评估及影响因子分析: 以福州市为例[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(10): 61-66. (Yin Mengmeng, Liu Mengting, Zhu Wei, et al. Resilience assessment and influencing factors analysis of urban waterlogging disaster: a case study of Fuzhou City[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(10): 61-66. (in Chinese))
- [25] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [26] Zhang L, Singh V P. Bivariate flood frequency analysis using the copula method[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(2): 150-164.
- [27] Wang Wenzhuo, Dong Zengchuan, Zhang Tianyan, et al. Mixed D-vine copula-based conditional quantile model for stochastic monthly streamflow simulation[J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(1): 13-20.
- [28] Suresh A, Pekkatt S. Importance of copula-based bivariate rainfall intensity-duration-frequency curves for an urbanized catchment incorporating climate change[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2023, 28(7): 05023012.
- [29] Sklar A. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges[J]. Publications de l'Institut Statistique de l'Université de Paris, 1959, 8: 229-231.
- [30] Shahzad H, Myers B, Hewa G, et al. Evaluating the performance of a hydrological model to represent curbside distributed infiltration wells in a residential catchment[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2021, 26(8): 04021027.
- [31] 毕然, 孙颖娜. 基于 Copula 函数的永翠河流域降雨径流特征分析[J]. 黑龙江大学学报, 2023, 14(3): 90-96. (Bi Ran, Sun Yingna. Analysis of rainfall-runoff characteristics in Yongcui River Basin based on Copula function[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2023, 14(3): 90-96. (in Chinese))
- [32] 左斌斌, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 基于 Copula 函数的北京市设计降雨研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2): 77-88. (Zuo Binbin, Xu Zongxue, Ye Chenlei, et al. Study on design rainfalls in Beijing based on Copula functions[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(2): 77-88. (in Chinese))
- [33] 徐鹏程, 王栋. 信息熵在水文水资源科学中的研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 71-78. (Xu Pengcheng, Wang Dong. Research progress of information entropy in hydrology and water resources science[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(4): 71-78. (in Chinese))
- [34] 任立良, 万仪欣, 袁山水, 等. 基于网格聚合理论和 Copula 函数的流域极端降水三维识别及时空动态演变研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 151-159. (Ren Liliang, Wan Yixin, Yuan Shanshui, et al. Three-dimensional identification and spatiotemporal dynamic evolution study of extreme precipitation in river basins based on grid aggregation theory and Copula function[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 151-159. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-08-20 编辑: 王芳)