

水利水运工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

开封市7.20特大暴雨城市内涝风险评估

冯峰, 喻谦花, 罗福生, 霍继超, 冯跃华, 靳晓颖, 刘翠

Urban waterlogging risk assessment of 7.20 heavy rainfall in Kaifeng City

FENG Feng, YU Qianhua, LUO Fusheng, HUO Jichao, FENG Yuehua, JIN Xiaoying, LIU Cui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210824002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于AHP-集对分析的矿井水资源利用风险评估

Risk assessment of mine water resource utilization based on analytic hierarchy process and set pair analysis
水利水运工程学报. 2021(3): 126 <https://doi.org/10.12170/0201120002>

城市道路横截沟泄流效率试验研究

Experimental study on the hydraulic efficiency of continuous transverse grates
水利水运工程学报. 2021(5): 92 <https://doi.org/10.12170/20201201003>

城市洪涝灾情评估与风险管理初探

Urban flood disaster assessment and risk management
水利水运工程学报. 2019(6): 139 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.016>

石家庄市暴雨内涝精细化水动力模型应用

Application and research of fine model for Shijiazhuang rainstorm waterlogging
水利水运工程学报. 2017(3): 41 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.006>

基于降雨情景模拟的城市社区尺度暴雨内涝研究

Study on rainstorm waterlogging on urban community scale based on rainstorm scenario simulation
水利水运工程学报. 2021(1): 26 <https://doi.org/10.12170/20200914001>

水库灾变链链式风险评估

Risk assessment on reservoir disaster chain
水利水运工程学报. 2019(2): 79 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.011>



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20210824002

冯峰, 喻谦花, 罗福生, 等. 开封市 7.20 特大暴雨城市内涝风险评估 [J]. 水利水运工程学报, 2022(4): 11-21. (FENG Feng, YU Qianhua, LUO Fusheng, et al. Urban waterlogging risk assessment of 7.20 heavy rainfall in Kaifeng City[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(4): 11-21. (in Chinese))

开封市 7.20 特大暴雨城市内涝风险评估

冯峰^{1,2}, 喻谦花³, 罗福生⁴, 霍继超³, 冯跃华⁴, 靳晓颖^{1,2}, 刘翠^{1,2}

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004; 2. 河南省黄河中下游水资源节约集约利用工程技术研究中心, 河南 开封 475004; 3. 开封市气象局, 河南 开封 475004; 4. 河南省豫东水利工程管理局, 河南 开封 475004)

摘要: 河南 7.20 特大暴雨由于降雨强度大、历时长、洪灾多发引起了广泛关注, 特大暴雨导致郑州、开封等城市出现严重内涝。针对城市内涝风险评估问题, 对开封市 12 个自动内涝监测站点数据进行筛选和分析, 构建了由短期风险、长期风险 2 个维度 9 个影响因子组成的半结构多层次多目标指标体系, 在输入层采用信息熵权向量, 在准则层对短期风险、长期风险 2 个子系统采用熵值权向量、对等权向量、决策偏好权向量 3 种赋权方法, 构成改进风险模糊评价模型。对 12 个站点的内涝风险进行 5 个级别(极高、较高、中等、较低、极低)的评估。结果显示: 在短期风险评估中, 5 号站点为极高风险, 10 号站点为中等风险; 在长期风险评估中, 6 号站点为较高风险, 8 号站点为极低风险; 在目标层的最终评价中, 3 种方法均显示 5 号、2 号站点风险极高, 7 号、8 号站点风险较低。经过与开封市内涝实际情况对比, 认为评价体系和改进模型具有较强的适用性, 针对城市内涝风险能够给出短期风险、长期风险、综合风险精准的评估结果, 为城市进行排水管网完善、内涝积水点防治等提供可靠的数据支持, 为应对暴雨引发的内涝问题制定应急减灾预案和应对措施提供依据。

关键词: 特大暴雨; 城市内涝; 风险评估; 河南开封市

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)04-0011-11

2021年7月20日, 河南省遭遇极端强降雨。7月18日8时至20日15时30分, 河南郑州荥阳、巩义7个雨量站降雨量超600 mm, 重现期均大于500年一遇, 最大点雨量718.5 mm^[1]。极端强降雨引起河南多地出现严重城市内涝, 防汛形势十分严峻^[2]。城市内涝不仅威胁城市居民生命财产和出行安全, 也造成了巨大经济损失^[3-4]。近年来聚焦于城市内涝的研究取得了较大进展, 主要集中在内涝引发的灾害、形成的原因、治理的措施等方面^[5-9]。对于城市内涝风险评估研究, 陈嘉雷等以珠海市为例, 构建了基于InfroWorks ICM的城市雨洪模型, 结合层次分析法和熵权法量化脆弱性, 对3种设计暴雨情景下的研究区内涝风险进行评估^[10]。这种利用雨洪模型模拟演进对城市内涝风险进行评估和划分的方法, 为本研究风险评价指标遴选和确定提供了思路。陆敏博等以苏州市相城区为例, 采用Mike模型建立排水防涝系统耦合模型, 同时考虑平原河网地区城市排水防涝特征, 评估多种情景下的雨水系统排水能力和内涝风险^[11]。苏州市相城区与本研究区域开封同为平原河网地区, 为评估7.20特大暴雨风险评估模型构建提供了可借鉴的思路。王俊佳等采用层次分析法将研究区域划分为高风险内涝区、中风险内涝区和低风险内涝区^[12]。杨帆等从内涝成因的角度出发, 以佛山市为典型研究区域, 定量评估了佛山市城区多种雨潮组合下遭遇概率及其变化趋势^[13]。

以上研究在内涝风险评估方面取得了一定的成果, 但大部分使用数据模拟、模型计算, 对城市某区域的内涝风险进行场地演进模拟, 评估结果缺少实际强降雨过程的检验, 可能存在着风险评估不准确等问

收稿日期: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51809110); 2021年河南省科技攻关项目(212102311147); 2019年河南省水利科技攻关计划项目(GG201939); 开封市重点(重大)科技计划项目(192D012)

作者简介: 冯峰(1978—), 女, 河南驻马店人, 教授, 博士, 主要从事水资源高效利用、海绵城市关键技术等研究。

E-mail: fengfeng@yrciti.edu.cn

题^[14]。对于由极端强降雨引发的城市内涝,缺乏真实内涝数据和实际案例的风险综合评价方面的研究。因此在开封市 7.20 特大暴雨降水过程、内涝监测数据的基础上,基于城市特点开展针对性的风险评估研究,通过分析风险来源遴选代表性指标,采用分层、多种赋权方法来规避人为因素带来的误差,构建改进的风险模糊评价模型,能够充分利用指标数据携带的信息,有效处理不同的决策偏好,使内涝风险评估结果更加精准实用。

1 研究区域与资料

开封市位于黄河下游,河南省中东部,东经 $113^{\circ}51'51''\sim 115^{\circ}15'42''$,北纬 $34^{\circ}11'43''\sim 35^{\circ}11'43''$,总面积 $6\,444\text{ km}^2$,城区面积 546 km^2 。开封市属暖温带大陆性季风气候区,年均气温为 $14.52\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 627.5 mm ,降水多集中在夏季 7、8 月份。根据历年遇到暴雨时易形成多个内涝积水点的范围,选择开封市中心城区为研究区域。由于研究区域内的内涝已严重影响城市的防洪安全和居民出行,开展 7.20 特大暴雨内涝风险研究就显得非常迫切和必要。

1.1 7.20 特大暴雨降水过程

根据开封气象站监测数据,7月20日0时至22日8时7个气象站降水过程如图1所示。最大降水强度出现在7月20日22时,A站达到 103.4 mm/h ;最大3h累计降水量出现在A站为 157.0 mm ,最大24h累计降水量出现在G站为 276.2 mm ,最大48h累计降水量出现在A站为 354.7 mm ,该值已达到开封多年平均降水量 627.5 mm 的 56.5% 。7个站点56h的平均累计降水量为 345.1 mm ,各站点累计降水量相差较小,说明本次特大暴雨在研究区域范围内的降水量和降水过程差别不大。

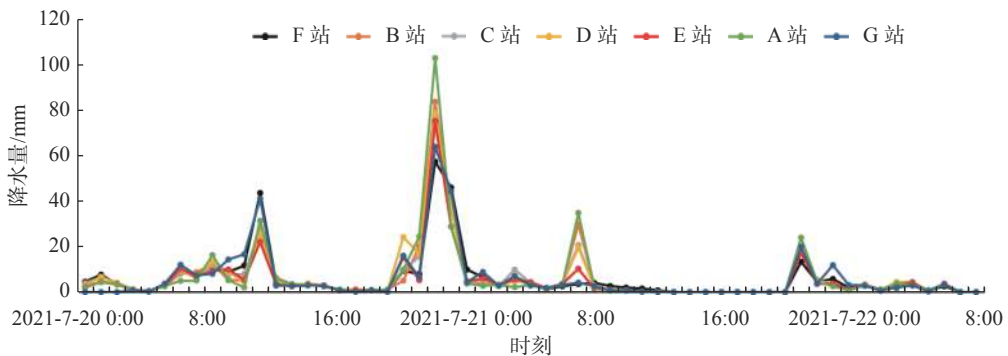


图1 开封市 7.20 特大暴雨降水过程(56 h)

Fig. 1 Precipitation process of 7.20 heavy rainstorm in Kaifeng City (56 hours)

1.2 开封市内涝监测站点及数据来源

研究区域以开封古城墙为中心,北至复兴大道,南至滨河路,东至劳动路,西至金明大道。根据研究区域内易发生内涝积水的位置,选择了市内 12 个内涝自动监测站点为研究对象,研究区域位置、监测站点的地理位置如图 2 所示,各站点的地理位置、编号与气象站之间的对应关系及经纬度见表 1。2021 年的 7.20 暴雨内涝数据来源于自动监测站每 2 min 生成的监测数据。

根据 2021 年 7.20 暴雨内涝监测站点数据,12 个站点中最大积水深度发生在 5 号站点(达 104 cm),最小积水深度发生在 10 号站点(为 6 cm)。最大平均积水深度也是 5 号站点,达 60.44 cm ,最小的平均积水深度发生在 7 号站点为 3.10 cm 。积水持续时间最长的为 2、3 和 6 号站点,都达到 41.50 h ;积水持续时间最短的为 8 号站点,积水时长为 5 h 。最大积水深度出现时间:7 号站点最早,为 2021 年 7 月 20 日的 22 时 06 分,8 号站点出现时间最晚,为 2021 年 7 月 21 日 9 时 14 分,比 7 号站点晚了 $11\text{ h }8\text{ min}$ 。

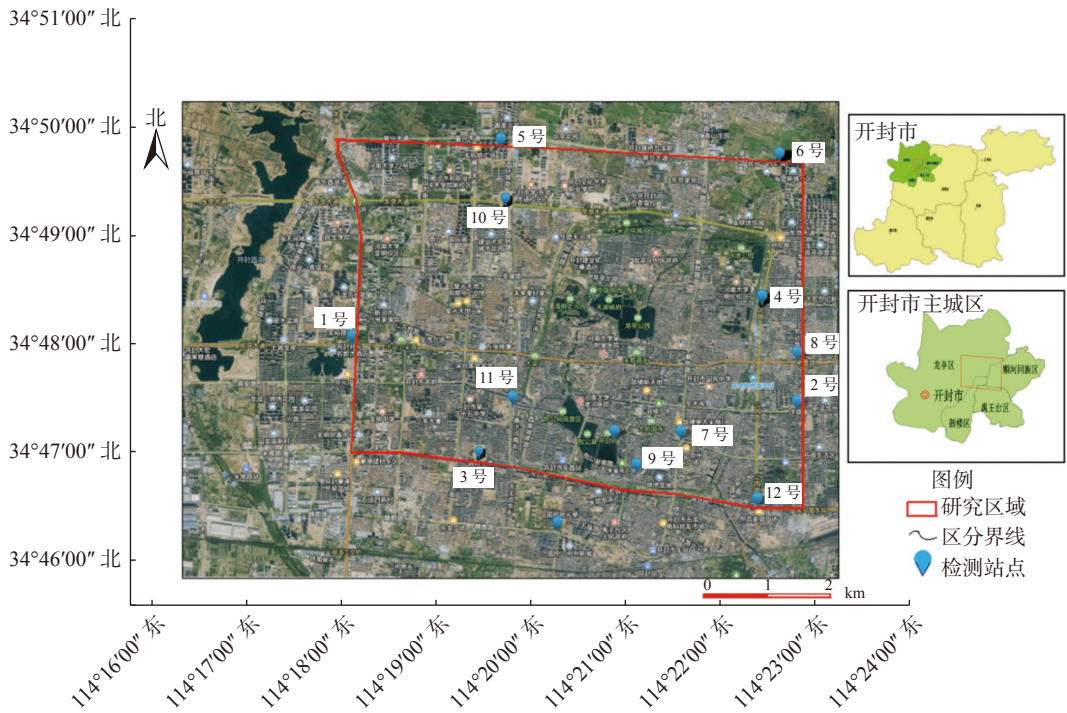


图 2 研究区域内涝积水监测站点分布

Fig. 2 Distribution of urban waterlogging monitoring points in research area

表 1 开封市积水内涝自动监测站点位置

Tab. 1 Location of automatic monitoring points of waterlogging in Kaifeng City

| 编号 | 地理位置 | 经度/° | 纬度/° | 对应气象站 | 备注 |
|----|--------------|------------|-------------|-------|--------|
| 1 | 市国家气象站 | 34.803 150 | 114.295 080 | A站 | 老城区城墙外 |
| 2 | 汴京路与劳动路交叉口 | 34.793 738 | 114.373 899 | G站 | 老城区城墙外 |
| 3 | 大庆路与滨河路交叉口 | 34.785 541 | 114.324 634 | G站 | 老城区城墙外 |
| 4 | 东环路与苹果园中路口 | 34.809 161 | 114.368 118 | F站 | 老城区城墙外 |
| 5 | 复兴大道西段 | 34.832 763 | 114.320 652 | B站 | 老城区城墙外 |
| 6 | 复兴大道与东环北路交叉口 | 34.828 897 | 114.371 634 | F站 | 老城区城墙外 |
| 7 | 解放路与自由路交叉口 | 34.789 262 | 114.353 777 | G站 | 老城区城墙内 |
| 8 | 劳动路与新曹路交叉口 | 34.801 004 | 114.374 269 | G站 | 老城区城墙外 |
| 9 | 市第三职业高中大门对面 | 34.784 870 | 114.346 056 | E站 | 老城区城墙内 |
| 10 | 东京大道与西环北路交叉口 | 34.821 567 | 114.323 614 | C站 | 老城区城墙外 |
| 11 | 西环城路与向阳路交叉口 | 34.795 028 | 114.324 342 | D站 | 老城区城墙外 |
| 12 | 滨河路公园路交叉口 | 34.779 660 | 114.367 694 | G站 | 老城区城墙外 |

2 城市内涝风险评估

2.1 内涝风险评估结构

城市内涝风险评估是在已有内涝数据基础上, 更准确地识别出短期风险、长期风险、综合风险, 为后期

的区域内涝积水防治、应急预案制定、排涝措施规划、后续风险规避等提供科学依据。城市内涝风险评估由短期风险、长期风险两个维度的因素构成,两个因素下遴选若干影响因子,影响因子由代表性指标表示。城市内涝风险评估体系共分3层:第1层是风险评估目标层;第2层是由短期风险因素、长期风险因素构成的准则层;第3层是由若干个代表性指标构成的指标层。在第2层2个子系统中,短期风险因素侧重于内涝在较短时间内对道路通行安全、人员涉水安全、淹没深度及范围等方面产生的不利影响,选择了积水深度、积水出现时间、积水面积等瞬时性指标;长期风险因素侧重于内涝存续在较长时间内对道路、建筑物等设施的基础浸泡、排涝困难等方面的不利影响,遴选了积水持续时间、不同积水深度持续时间等过程性指标。

根据开封市7.20特大暴雨的降水过程,12个站点数据统计时段为7月20日0时至22日8时共56h,如表2所示。第1个指标 x_{n1} 是指在7.20特大暴雨降水的56h中,根据监测站点间隔2min积水数据中出现的最大积水深度。第2个指标 x_{n2} 是指在7.20特大暴雨降水的56h过程中,积水累计时长内的积水深度平均值。第3个指标 x_{n3} 最大积水深度出现时间,是以12个站点中最大积水深度出现时间滞后于对应气象站降水峰值出现的时间,以分钟(min)计算。如图1所示7个气象站降水峰值出现时间均为7月20日22点。第4个指标 x_{n4} 积水面积,由于监测点安装的设备及位置并不能监测到此项数据,由内涝点的实际积水面积情况表述为定性指标。第6~9个指标为不同积水深度的累计时长,考虑到涉水及通行的安全影响,积水深度在10cm以下未列入。

表2 7.20特大暴雨开封市内涝风险评估指标数据
Tab. 2 Waterlogging risk assessment index data of 7.20 heavy rainstorm in Kaifeng City

| 风险因素 | 指标 | 代码 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------|-----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 短期风险(4) | 最大积水深度/cm | x_{n1} | 75 | 83 | 76 | 51 | 104 | 90 | 18 | 56 | 37 | 6 | 38 | 68 |
| | 平均积水深度/cm | x_{n2} | 16.25 | 55.54 | 34.98 | 24.81 | 60.44 | 44.59 | 3.10 | 46.80 | 14.25 | 4.01 | 11.05 | 15.61 |
| | 最大积水深度出现时间/min | x_{n3} | 30 | 76 | 210 | 90 | 60 | 86 | 6 | 674 | 278 | 202 | 44 | 44 |
| | 积水面积 | x_{n4} | 中等 | 较大 | 较大 | 中等 | 最大 | 较大 | 较小 | 中等 | 最小 | 中等 | 中等 | 较大 |
| 长期风险(5) | 积水累计时间/h | x_{a1} | 38.0 | 41.5 | 41.5 | 39.0 | 35.5 | 41.5 | 10.0 | 5.0 | 37.5 | 40.5 | 40.0 | 19.0 |
| | 积水深度10~25 cm累计时长/min | x_{a2} | 236 | 0 | 156 | 1 030 | 80 | 450 | 78 | 0 | 294 | 0 | 368 | 86 |
| | 积水深度26~50 cm累计时长/min | x_{a3} | 436 | 718 | 546 | 954 | 266 | 532 | 0 | 242 | 682 | 0 | 506 | 324 |
| | 积水深度51~80 cm累计时长/min | x_{a4} | 238 | 1 692 | 940 | 48 | 402 | 746 | 0 | 110 | 0 | 0 | 0 | 58 |
| | 积水深度81~120 cm累计时长/min | x_{a5} | 0 | 60 | 0 | 0 | 880 | 348 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

2.2 风险模糊评估模型

根据前期研究成果,对多目标多层次评估问题采用改进的模糊评价模型比较适合^[15-16]。模糊评价模型常用的指标、系统权重确定方法为二元比较模糊标度法,将指标或子系统两两对比主观判断后,利用查模糊标度与相对隶属度关系表的方法确定。这种权重确定方法适用于指标数量、评价方案较少的情况,并对主观判断的专业性和准确性要求较高。根据城市内涝风险评估的特点对模型权重确定方法进行改进,在指标层、准则层权重确定时采用分层赋权法,以减少人为因素或其他误差对评价结果的影响^[15]。对于指标层,以短期风险因素、长期风险因素2个子系统的指标作为输入数据,由式(1)利用模糊评价计算,得到该层的12个站点的相对优属度向量并作为输出数据。

$$\begin{cases} \mathbf{u}'_n = (x_{nij})_{l \times k} & (i = 1, 2, \dots, l; j = 1, 2, \dots, k) \\ \mathbf{u}'_a = (x_{aij})_{l \times k} & (i = 1, 2, \dots, l; j = 1, 2, \dots, k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{u}'_n 为短期风险子系统的相对优属度向量; \mathbf{u}'_a 为长期风险子系统的相对优属度向量; x_n 为短期风险因子系统的指标; x_a 为长期风险因子系统的指标; l 为参与风险评价的站点数; k 为子系统的指标数。

对于第2层,最低层的输出结果也是该层的输入数据,由式(2)构成该层输入数据。

$$\mathbf{u}' = \begin{cases} u'_{n1}, u'_{n2}, \dots, u'_{nl} \\ u'_{a1}, u'_{a2}, \dots, u'_{al} \end{cases} \quad (2)$$

从输出结果到输入数据的变化由式(3)完成,令

$$u'_{ij} = r_{ij} \quad (3)$$

式中: u'_{ij} 为相对优属度矩阵中的第 i 行第 j 列的数值; r_{ij} 为第 i 行第 j 列的相对优属度向量。

依此从最低层(目标层)向最高层(目标层)逐层进行计算,由于目标层只有一个系统,可直接输出得到系统结果,即方案相对优属度向量^[17],如式(4)所示。

$$\mathbf{u} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_h) \quad (4)$$

式中: \mathbf{u} 为目标层系统的相对优属度向量; \mathbf{u}_1 为对应于等级1的相对优属度向量; h 为评价等级级别数,包括极高、较高、中等、较低、极低等5级。

风险评估过程如下:

(1)由7.20特大暴雨开封市内涝风险评估指标的原始数据,构建 l 个站点 k 个指标的判断矩阵 \mathbf{X} 如下:

$$\mathbf{X} = (x_{ij})_{l \times k} \quad (i = 1, 2, \dots, l; j = 1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

(2)评价指标有定量、定性指标2种,判断矩阵 \mathbf{X} 由定量指标值和定性指标的相对优属度组合构成。定性指标 I_4 的相对优属度值按二元比较模糊决策分析法^[18]通过查表法确定。

(3)归一化处理指标判断矩阵,得到归一化判断矩阵 \mathbf{B} 。根据指标是正向或逆向的不同类型,正向指标用式(6)计算,逆向指标用式(7)计算。

$$b_{ij} = (x_{ij} - \min_j x_{ij}) / (\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}), \quad \forall j \quad (6)$$

$$b_{ij} = (\max_j x_{ij} - x_{ij}) / (\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}), \quad \forall j \quad (7)$$

式中: b_{ij} 为归一化判断矩阵中第 i 行第 j 列的元素; x_{ij} 为第 i 行第 j 列的指标值; i 为矩阵行数,亦为指标数; j 为矩阵列数,亦为评价站点数。

(4)由分层赋权法确定系统第1层各指标、第2层各子系统的权向量。第1层采用数学赋权法,通过计算各指标的熵值确定各指标的权向量,熵值权向量主要是依据各指标所携带的数据信息,有效地避免了人为主观因素的影响^[19]。指标的熵值用式(8)计算,指标熵值权向量用式(9)确定^[20]。为了能够模拟各种情况,确保内涝风险评估更符合实际,第2层子系统权向量采用3种方法进行赋权,分别为熵值权向量、对等权向量和决策偏好权向量。

$$\begin{cases} H_i = -\frac{1}{\ln n} \left[\sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \right] \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \\ f_{ij} = (1 + b_{ij}) / \sum_{j=1}^n (1 + b_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: H_i 为指标 i 的熵值; f_{ij} 为熵值计算的参数。

$$\omega_i = (1 - H_i) / m - \sum_{i=1}^n H_i, \quad \text{且满足} \quad \sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \quad (9)$$

式中: ω_i 为第 i 个指标的熵值权向量。

(5)计算第 1 层各子系统相对优属度向量,利用连续模糊优选原理的式(10)计算。

$$u_{hj} = \begin{cases} 0, & h < a_j \text{ 或 } h > b_j \\ (d_{hj}^2 \cdot z_j)^{-1}, & a_j \leq h \leq b_j, d_{hj} \neq 0 \\ 1, & d_{hj} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: u_{hj} 为第 j 个方案对应级别 h 的相对优属度向量; i 为矩阵第 i 行,共 m 行,与指标数相同; j 为矩阵第 j 列,共 n 列,与评价站点数相同; h 为评价等级级别数, $h = a_j, a_{j+1}, \dots, b_j$; d_{hj} 、 z_j 为计算参数, $d_{hj}^2 =$

$$\sum_{i=1}^m [\omega_i(b_{ij} - s_h)]^2, z_j = \sum_{k=a_j}^{b_j} (d_{kj}^2)^{-1} = \sum_{k=a_j}^{b_j} (d_{hj}^2)^{-1}, s_h \text{ 为等级 } h \text{ 对应的标准值向量。}$$

(6)计算准则层短期风险、长期风险 2 个子系统的相对优属度向量,重复(3)~(5)步骤。

(7)得出最高层风险评估目标层的输出相对优属度向量,用式(11)计算各站点的级别特征值。

$$H = h \cdot u_{hj} \quad (11)$$

式中: H 为第 j 个站点的级别特征值。

3 开封市内涝风险评估

短期风险因素下有 1 个定性指标,即积水面积 x_{n4} ,根据语气算子和相对隶属度的关系表^[18],可确定该指标的相对优属度矩阵如下:

$$x_4 = [0.739 \quad 0.429 \quad 0.429 \quad 0.739 \quad 0.212 \quad 0.429 \quad 0.818 \quad 0.739 \quad 0.905 \quad 0.739 \quad 0.739 \quad 0.429] \quad (12)$$

根据城市内涝风险评估的目标,以及由暴雨引发的内涝和积水产生的不利影响和风险越低越好的原则,将 9 个指标进行分类^[21-22]。 x_{n3} 计算的最大积水深度出现时间滞后于对应气象站降水峰值出现的时间,出现的越晚内涝风险越小,因此该指标为正向越大越优型指标;其余 8 个指标为逆向越小越优型指标。第 1 层(输入层)2 个子系统下各指标权值的计算,令定性指标的相对优属度为其构成特征值矩阵 X 的数据值,与定量指标组合,利用式(6)、(7)计算各子系统指导的归一化判断矩阵 B 。利用式(8)、(9)计算第 1 层(输入层)2 个子系统各指标的权值(表 3)。

表 3 短期风险、长期风险子系统的熵值和权值

Tab. 3 Entropy value and weight vector of short-term and long-term risk subsystem

| 指标 | x_{n1} | x_{n2} | x_{n3} | x_{n4} | x_{a1} | x_{a2} | x_{a3} | x_{a4} | x_{a5} |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 熵值 | 0.992 | 0.990 | 0.992 | 0.993 | 0.986 | 0.995 | 0.993 | 0.994 | 0.995 |
| 权值 | 0.234 | 0.293 | 0.254 | 0.219 | 0.371 | 0.139 | 0.184 | 0.163 | 0.143 |

构建第 2 层各子系统的方案相对优属度矩阵 R ,计算归一化判断矩阵 B 。对短期风险因素、长期风险因素 2 个子系统设置不同的权重模拟各种决策情况,有效规避因权重设置不合理导致的评价结果偏差问题。子系统权向量采用第 1 种方法熵值权向量($w=(0.381, 0.619)$)、第 2 种方法对等权向量($w=(0.500, 0.500)$)和第 3 种方法决策偏好权向量($w=(0.600, 0.400)$)。第 3 种决策偏好权向量,模拟的是决策者更看重短期风险的影响,代表了偏保守的决策意愿。分别利用式(10)、(11)进行计算,结果如表 4 所示。

$$X_2 = \begin{bmatrix} 0.623 & 0.841 & 0.770 & 0.624 & 0.974 & 0.803 & 0.490 & 0.554 & 0.437 & 0.414 & 0.600 & 0.658 \\ 0.671 & 0.747 & 0.721 & 0.728 & 0.700 & 0.761 & 0.169 & 0.118 & 0.678 & 0.631 & 0.671 & 0.427 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0.627 & 0.238 & 0.365 & 0.625 & 0.000 & 0.305 & 0.864 & 0.750 & 0.958 & 1.000 & 0.667 & 0.564 \\ 0.140 & 0.023 & 0.063 & 0.052 & 0.096 & 0.000 & 0.920 & 1.000 & 0.129 & 0.202 & 0.141 & 0.520 \end{bmatrix} \quad (14)$$

表 4 开封市内涝风险评估 12 个站点的级别特征值

Tab. 4 Level characteristic values of 12 stations for waterlogging risk assessment in Kaifeng City

| 子系统权向量 | 级别特征值 | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 熵值权向量 $w=(0.381, 0.619)$ | 3.759 | 4.595 | 4.215 | 3.851 | 4.810 | 4.465 | 1.591 | 1.598 | 3.386 | 3.248 | 3.712 | 3.011 |
| 对等权向量 $w=(0.500, 0.500)$ | 3.443 | 4.332 | 3.976 | 3.514 | 4.844 | 4.164 | 1.708 | 1.879 | 2.954 | 2.830 | 3.440 | 2.998 |
| 决策偏好权向量 $w=(0.600, 0.400)$ | 3.166 | 4.151 | 3.872 | 3.233 | 4.870 | 3.993 | 1.794 | 2.031 | 2.607 | 2.490 | 3.200 | 2.991 |

4 结果分析

将表 4 中级别特征值进行转换, 级别特征值 H 整数位代表的是级数, 对应 1~5 级的标准值为(0, 0.3, 0.6, 0.8, 1.0), 通过内插计算转换为 0~1 之间的风险综合评价结果, 如表 5 所示。根据在第 2 层对 2 个子系统采取的 3 种计算方法, 得出开封市 12 个站点的内涝综合风险评估值, 为了更直观判断风险等级, 将风险设为 V 级(I 级极低、II 级较低、III 级中等、IV 级较高、V 级极高), 对应综合评估值的范围为 0~0.14, 0.15~0.39, 0.40~0.59, 0.60~0.84, 0.85~1.00, 3 种方法对应的评价级别见表 5。

表 5 开封市内涝风险评估 12 个站点综合评价结果

Tab. 5 Comprehensive evaluation results of waterlogging risk assessment of 12 stations in Kaifeng City

| 评价方法 | 综合风险评估值及级别 | | | | | | | | | | | |
|----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 熵值权向量法 | 0.752 | 0.919 | 0.843 | 0.770 | 0.962 | 0.893 | 0.177 | 0.179 | 0.677 | 0.650 | 0.742 | 0.602 |
| 评价级别 | IV 较高 | V 极高 | IV 较高 | IV 较高 | V 极高 | IV 较高 | II 较低 | II 较低 | IV 较高 | IV 较高 | IV 较高 | IV 较高 |
| 对等权向量法 | 0.689 | 0.866 | 0.795 | 0.703 | 0.969 | 0.833 | 0.212 | 0.264 | 0.586 | 0.549 | 0.688 | 0.599 |
| 评价级别 | IV 较高 | V 极高 | IV 较高 | IV 较高 | V 极高 | IV 较高 | II 较低 | II 较低 | III 中等 | III 中等 | IV 较高 | III 中等 |
| 决策偏好权向量法 | 0.633 | 0.830 | 0.774 | 0.647 | 0.974 | 0.799 | 0.238 | 0.309 | 0.482 | 0.447 | 0.640 | 0.597 |
| 评价级别 | IV 较高 | IV 较高 | IV 较高 | IV 较高 | V 极高 | IV 较高 | II 较低 | II 较低 | III 中等 | III 中等 | IV 较高 | III 中等 |

在内涝短期风险评估中, 根据第 2 层评价结果可知: 5 号站点评估值最大, 风险等级为极高; 10 号站点的评估值最小, 风险等级为中等。在长期风险评估中, 6 号站点评估值最大, 风险等级为较高; 8 号站点的评估值最小, 风险等级为极低。输出层 3 种方法的评估值对比如图 3 所示。12 个站点的评估值中, 有 9 个站点的第 3 种决策偏好权向量法评价结果均是 3 种方法中最低的, 且无极高风险等级, 这说明决策偏好偏保守。12 个站点中 3 种赋权方法均显示: 5 号站点评估值最大, 风险等级为极高; 7 号站点评估值最小, 风险等级为较低。综合风险评价等级为极高的是 5 号、2 号站点, 较低的是 7 号、8 号站点。

计算所得的开封市 7.20 特大暴雨 12 个站点 56 h 的内涝过程, 经与 12 个站点的内涝风险评价结果对比, 符合内涝实际发生过程, 5 号、2 号 2 个站点过程曲线均在图 4 中显示峰值最大、覆盖时间最长。综合风险评价等级为较低的是 7 号、8 号站点, 也符合

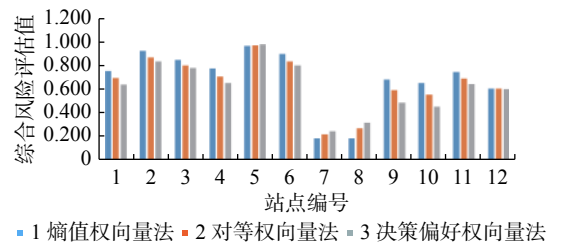


图 3 开封市城市内涝风险 3 种方法评价对比

Fig. 3 Comparison of urban waterlogging risk evaluation by three methods in Kaifeng City

内涝实际发生过程, 2 个站点过程曲线均显示积水深度小且覆盖时间短。5 号点位于开封市复兴大道西段, 由于此处的排水管网较小、地势低洼等原因, 在历次降雨中极易发生内涝, 积水深度大且历时长。6 号站点位于复兴大道与东环北路交叉口, 积水持续时间较长, 内涝风险也较高, 评价结果与实际内涝过程完全吻合。复兴大道为开封市北面重要的交通要道, 是进出连霍高速公路的必经之路, 内涝积水将严重影响道路交通和居民出行。此次 7.20 特大暴雨更是充分暴露了 5 号、6 号站点内涝风险的情况, 因此后期需要加强复兴大道排水管网改造力度, 布设排水泵站时应优先考虑。7 号站点位于开封市第三职业高中门口, 在降雨过程中虽然有积水, 但历时短积水较浅, 因此综合风险较低。位于老城区城墙内的 7 号、9 号站点风险等级为较低和中等, 也得益于老城区内水系众多, 河湖连通, 排水系统较发达。

与对应的 7 个气象站降水过程对比, A 站的小时降水量、3 h 累计降水量、48 h 累计降水量均为 7 个站点中最大的, 但对应的内涝积水风险为较高。这是因为开封的西部城区是新区, 排水管网及泵站相对较完善, 降低了内涝积水的风险。最大 24 h 累计降水量出现在 G 站, 但 G 站覆盖的内涝站点中 7、8 号的风险评估均为较低。结合城区 DEM 图可见: 在地势南高北低的影响下, 开封南区、东区内涝积水风险得到了有效缓冲, 开封老城区内排水效果较明显。B、F 站的 48 h 累计降水量为 7 个站点中较小的, 但对应的 5、6 号内涝站点却是风险极高和较高。DEM 图也显示: 开封北区地势低洼, 排水体系较差, 容易形成小雨大涝险情。这应该引起重视。

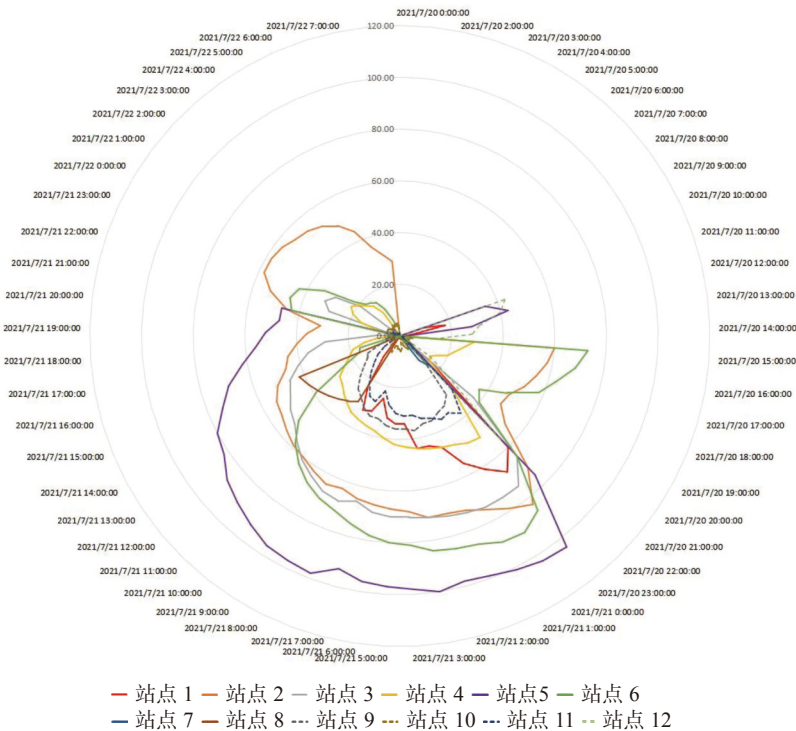


图 4 开封市 7.20 特大暴雨 12 个站点内涝过程(56 h)(单位: mm)

Fig. 4 Waterlogging process at 12 stations of 7.20 heavy rain in Kaifeng City (56 hours) (unit: mm)

5 结 语

在河南 7.20 特大暴雨的真实背景下, 针对城市内涝风险评估问题开展研究。根据城市内涝监测数据, 构建了由短期风险、长期风险 2 个维度, 9 个指标构成的 3 层评价体系。在模糊评价的基础上对模型分层赋权进行了改进, 采用输入层、准则层不同的赋权方法。对 2 个子系统设置不同的权重模拟各种决策情况,

采用了第 1 种方法熵值权向量($w=(0.381, 0.619)$)、第 2 种方法对等权向量($w=(0.500, 0.500)$)和第 3 种方法决策偏好权向量($w=(0.600, 0.400)$)赋权方法,有效规避因权重设置不合理导致的评价结果偏差较大,确保评价结果的合理性。以开封市 7.20 特大暴雨为研究实例,选择了 12 个内涝站点进行风险评估,评价结果与实际相符。3 种不同赋权方法下评价结果仍保持一致,这证实了评价结构和模型具有较强的适用性。

通过 7.20 特大暴雨 12 个站点的风险评估结果,可知中等以上风险的站点占比达到了 83.3%,说明开封市需提高洪涝排泄能力和城市应急管理水平。内涝风险评估结果也为开封市排水管网改造、排涝泵站的选址、海绵城市建设等提供有益的数据支持,还可根据第 2 层评价结果具体分析短期风险和长期风险的变化过程,找到弱项和短板,从而为城市防涝应急预案制定和抢险提供方向和思路。

参 考 文 献:

- [1] 澎湃新闻. 特大暴雨! 河南32座大中型水库超限[EB/OL]. (2021-07-20)[2021-08-22]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13664935. (Surging news. Torrential rain! Over limit of 32 large and medium-sized reservoirs in Henan[EB/OL]. (2021-07-20)[2021-08-22]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13664935. (in Chinese))
- [2] 新浪新闻. 郑州特大暴雨造成直接经济损失532亿元[EB/OL]. (2021-08-02)[2021-08-22]. <https://news.sina.cn/kx/2021-08-02/detail-ikqcfnc0496637.d.html>. (Sina News. The torrential rain in Zhengzhou caused a direct economic loss of 53.2 billion yuan[EB/OL]. (2021-08-02)[2021-08-22]. <https://news.sina.cn/kx/2021-08-02/detail-ikqcfnc0496637.d.html>. (in Chinese))
- [3] 河南省人民政府. 河南省人民政府关于实施四水同治加快推进新时代水利现代化的意见[EB/OL]. (2018-09-24)[2021-08-22]. <https://www.henan.gov.cn/2018/11-15/722253.html>. (The People's Government of Henan Province. Opinions of the People's Government of Henan Province on implementing the same governance of four rivers and accelerating the modernization of water conservancy in the new era[EB/OL]. (2018-09-24)[2021-08-22]. <https://www.henan.gov.cn/2018/11-15/722253.html>. (in Chinese))
- [4] 孔锋. 透视变化环境下的中国城市暴雨内涝灾害: 形势、原因与政策建议[J]. 水利水电技术, 2019, 50(10): 42-52. (KONG Feng. Perspective on urban rainstorm waterlogging disaster in China under changing environment: situation, causation and policy suggestion[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(10): 42-52. (in Chinese))
- [5] 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [6] SCHELFAUT K, PANNEMANS B, VAN DER CRAATS I, et al. Bringing flood resilience into practice: the FREEMAN project[J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(7): 825-833.
- [7] SLANEY S. 海绵城市基础设施: 雨洪管理手册[M]. 潘潇潇, 译. 桂林: 广西师范大学出版社, 2017: 56-68. (SLANEY S. Stormwater management for sustainable urban environments[M]. PAN Xiaoxiao, trans. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2017: 56-68. (in Chinese))
- [8] 张灵, 陈晓宏, 千怀遂. 北江下游防洪保护区恢复力诊断[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1129-1134. (ZHANG Ling, CHEN Xiaohong, QIAN Huaisui. Diagnosis of resilience to flood hazard in lower reaches of the Beijiang River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1129-1134. (in Chinese))
- [9] LIU D D, CHEN X H, NAKATO T. Resilience assessment of water resources system[J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(13): 3743-3755.
- [10] 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. (CHEN Jialei, CHEN Wenjie, HUANG Guoru. Urban waterlogging risk assessment based on scenario simulation and multi-source data[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(6): 55-59. (in Chinese))
- [11] 陆敏博, 王欢, 魏清福, 等. 平原河网城市雨水系统排水能力及内涝风险评估浅析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 66-68, 73. (LU Minbo, WANG Huan, WEI Qingfu, et al. Assessment of drainage capacity of urban rainwater system and waterlogging risk in plain river network area[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8): 66-68, 73. (in Chinese))

- [12] 王俊佳, 王川涛, 曾胜. 基于情景模拟的城市排水能力及内涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2020, 36(17): 115-120. (WANG Junjia, WANG Chuantao, ZENG Sheng. Assessment of urban drainage capacity and waterlogging risk based on scenario simulation[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(17): 115-120. (in Chinese))
- [13] 杨帆, 许亮, 韩晶. 佛山市短历时强降雨与潮位组合的内涝风险分析[J]. 人民珠江, 2020, 41(4): 15-20. (YANG Fan, XU Liang, HAN Jing. Risk analysis of waterlogging under combination of short-duration heavy rainfall and tidal level in Foshan city[J]. Pearl River, 2020, 41(4): 15-20. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 冯峰, 靳晓颖, 谢秋皓. 区域水资源可持续发展能力的模糊可变评价[J]. 人民黄河, 2017, 39(3): 45-50, 54. (FENG Feng, JIN Xiaoying, XIE Qiuhaohao. Research on water resources carrying capacity based on nature-society binary pattern and fuzzy variable method[J]. Yellow River, 2017, 39(3): 45-50, 54. (in Chinese))
- [16] 冯峰, 靳晓颖, 刘翠, 等. 基于相对差异函数的海绵城市弹性评价[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 53-61. (FENG Feng, JIN Xiaoying, LIU Cui, et al. Resilience evaluation of sponge city based on relative difference function[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(1): 53-61. (in Chinese))
- [17] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005: 156-168. (CHEN Shouyu. Theories and methods of variable fuzzy sets in water resources and flood control system[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005: 156-168. (in Chinese))
- [18] 陈守煜. 水资源系统可变集评价原理与方法[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 134-142. (CHEN Shouyu. Variable sets assessment theory and method of water resource system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 134-142. (in Chinese))
- [19] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1061. (ZHANG Xianqi, LIANG Chuan. Application of fuzzy matter-element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1057-1061. (in Chinese))
- [20] 吴云星, 谷艳昌, 王士军, 等. 基于信息熵-变权模糊模型的土石坝震损评估[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 38-45. (WU Yunxing, GU Yanchang, WANG Shijun, et al. Assessment of seismic damage for earth-rockfill dam based on information entropy-variable weight fuzzy model[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 38-45. (in Chinese))
- [21] 俞孔坚. 海绵城市: 理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 81-87. (YU Kongjian. Sponge city: theory and practice[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016: 81-87. (in Chinese))
- [22] DUFYNT N. The importance of connected communities to flood resilience[C] // 8th Victorian Flood Conference. Melbourne: The Berkeley Electronic Press, 2013.

Urban waterlogging risk assessment of 7.20 heavy rainfall in Kaifeng City

FENG Feng^{1,2}, YU Qianhua³, LUO Fusheng⁴, HUO Jichao³, FENG Yuehua⁴, JIN Xiaoying^{1,2}, LIU Cui^{1,2}

(1. *Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China*; 2. *Henan Engineering Technology Center for Water Resources Conservation and Utilization in the Middle and Lower Reaches of the Yellow River, Kaifeng 475004, China*; 3. *Kaifeng Meteorological Bureau, Kaifeng 475004, China*; 4. *Eastern Henan Water Conservancy Administration Bureau, Kaifeng 475004, China*)

Abstract: On July 20, 2021, the heavy rain in Henan Province attracted wide attention due to its heavy rainfall intensity, long duration and frequent floods. The heavy rain caused serious waterlogging in Zhengzhou, Kaifeng and other cities. Aiming at the problem of urban waterlogging risk assessment, the data of 12 automatic monitoring stations were screened, and a semi-structural index system consisting of two dimensions of short-term risk and long-term risk and nine influencing factors was constructed. In the input layer, information entropy weight vector was adopted, and in the criterion layer, three weighting methods were adopted: entropy weight vector, equal weight vector and decision preference weight vector, which constitute the improved risk fuzzy evaluation model. Waterlogging risk was assessed at five levels (very high, high, medium, low, and very low) for 12 sites. The results show that: in the short-term risk assessment, site 5 means very high risk, and site 10 is medium risk. In the long-term risk assessment, site 6 is high risk, and site 8 is very low risk. In the final evaluation of the target layer, the three methods all show that the risk of No. 5 and No. 2 sites is very high, and the risk of No. 7 and No. 8 sites is low. Compared with the actual situation of waterlogging in Kaifeng City, the evaluation system and improved model are considered to have strong applicability. Accurate evaluation results of short-term risk, long-term risk and comprehensive risk can be provided for urban waterlogging risk, providing reliable data support for urban drainage pipe network improvement and waterlogging prevention and control. It provides a basis for making emergency disaster reduction plan and countermeasures to deal with waterlogging caused by rainstorm.

Key words: heavy rain; urban waterlogging; risk assessment; Kaifeng City of Henan Province