

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.05.021

主客观组合权重-TOPSIS-k-means++法内涝风险评估

郭鑫宇¹, 杨敬畏¹, 厉智成¹, 王洋¹, 程树辉¹, 李继选²

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 2. 舞川环境科技<上海>有限公司, 上海 201821)

摘要: 内涝风险较高是多数城镇面临的问题。以某感潮城镇片区为例,基于InfoWorks ICM建立的雨水管网-河段一二维耦合模型计算结果,利用地理信息系统(GIS)的栅格分析和邻域分析技术对孕灾环境危险性和易损性指标进行量化,最后运用GIS空间连接功能进行图层叠加。采用耦合熵权法和层次分析法计算各指标的组合权重,积水深度、积水流速、与幼儿园的距离、与医院的距离、GDP密度和人口密度的权重分别为0.365、0.177、0.084、0.088、0.084、0.202。构建基于主客观组合权重-TOPSIS-k-means++的内涝风险评估模型,并与主客观组合权重-加权评分-k-means++方法对比,验证了该方法的有效性。研究表明,综合考虑危险性和易损性指标,运用k-means++方法对风险等级进行聚类分析可为片区雨水管渠设计和内涝点整治提供综合性科学依据。

关键词: 内涝风险评估; TOPSIS; 熵权法; 层次分析法; k-means++

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)05-0130-07

Waterlogging Risk Assessment Based on Subjective and Objective Combination Weight-TOPSIS-k-means++

GUO Xin-yu¹, YANG Jing-wei¹, LI Zhi-cheng¹, WANG Yang¹, CHENG Shu-hui¹,
LI Ji-xuan²

(1. Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 2. Wuchuan Environmental Technology <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 201821, China)

Abstract: Most towns are facing high risk of waterlogging in China. The risk and vulnerability indicators of a risk-potential environment in a tidal town area were quantified by using grid analysis and neighborhood analysis of geographic information system (GIS), and the layers were overlaid by using GIS spatial connection function based on the calculation results of one-dimensional and two-dimensional coupling model of storm sewer system-river established by InfoWorks ICM. The combination weights of each index were calculated by coupling entropy weight method and analytic hierarchy process, and the weights of waterlogging depth, waterlogging velocity, distance to kindergarten, distance to hospital, GDP density and population density were 0.365, 0.177, 0.084, 0.088, 0.084 and 0.202, respectively. A waterlogging risk assessment model based on subjective and objective combination weight-TOPSIS-k-means++ was constructed, and its calculation results were compared with those of subjective and objective combination weight-weighted score-k-means++ method, which verified the effectiveness of the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802407)

通信作者: 郭鑫宇 E-mail: 778282305@qq.com

research method. The application of k-means++ method to cluster the risk level based on comprehensive consideration of risk and vulnerability indicators provides a comprehensive scientific basis for the design of rainwater pipelines and the remediation of waterlogging points in the area.

Key words: waterlogging risk assessment; TOPSIS; entropy weight method; analytic hierarchy process; k-means++

随着我国城镇化进程的加快,内涝灾害愈发严重,因此构建合适的内涝风险评估方法势在必行,这样才能针对内涝形成的水力学机理和受灾对象的特征制定整治方案。国内外学者建立了系统的内涝风险评估方法体系,包括基于历史灾情的数理统计方法^[1],建立评价体系的指标分析法^[2](如层次分析法、模糊综合评价法、主成分分析法等)、地理信息系统(GIS)遥感法^[3]和情景模拟法^[4-5]等。其中,统计方法对基础数据体量要求巨大;指标分析法可以宏观反映洪涝风险情况,GIS遥感法可提取灾害发生时的孕灾环境和承载体信息后运用GIS进行图层叠加^[6],但这两种方法单独使用时对微观淹没方面表达精度不够;情景分析法可以将微观的内涝水力学信息进行直观反映,但忽视了孕灾环境和承灾体之间的联系^[7]。因此需将几种评估方法联合使用并进行优化升级^[8]。

1 材料与方法

1.1 研究区域

选取珠江流域某感潮片区为研究对象,该区域集水面积为4.45 km²,多年平均降雨量为1 670 mm。该区域干流将周围9条支流连通,干流河道长度为4.1 km、宽度为5~30 m。河道支渠长度约为7 km、宽度为5~20 m;雨水管线长度为34.9 km,管径为DN100~1 200。排涝标准为50年一遇24 h不成灾。

1.2 研究方法

本研究将情景分析法、GIS遥感法和指标分析法联合在一起。情景分析法为分析内涝形成的水力学机理,首先需通过水文水动力模型对研究区域进行计算评估。在目前应用的水文水动力模型中,InfoWorks的产汇流、CS管网^[9]和RS河道模型耦合方便且计算稳定性高^[10]。因此,本研究基于InfoWorks的RS和CS模块建立雨水管网-河段一二维耦合模型来计算水力学危险性指标分布;利用GIS遥感法提取孕灾环境危险性指标和易损性指标并进行叠加;分别引入熵权法和层次分析法作为TOPSIS指标

分析评价方法中各指标的主客观权重;最后,运用k-means++聚类方法对评价结果进行风险等级划分,从而形成一套内涝风险评估新思路。

本研究将内涝风险评估工作拆解为目标层、准则层和指标层^[11]。目标层为内涝风险评估结果,准则层包括危险性指标和易损性指标,如图1所示。首先由InfoWorks水力学计算模型划分区域二维网格。其中,积水深度和积水流速由基于InfoWorks的雨水管网-河段一二维耦合模型模拟计算,坡度指标应用GIS栅格分析量化,与幼儿园和医院的距离指标应用GIS邻域分析技术量化。最后,应用GIS的空间连接功能叠加6个指标到同一shp图层。

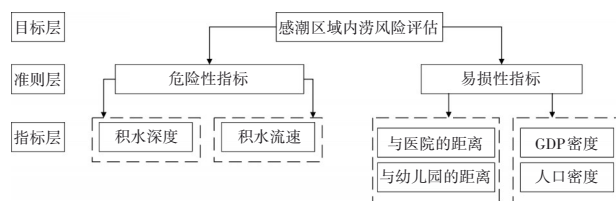


图1 感潮片区内涝风险评估指标体系

Fig.1 Waterlogging risk assessment indicators system in tidal region

运用TOPSIS评价方法对二维网格内涝风险进行评价。TOPSIS最初是一种要求评价对象同时离最优解距离最近并且离最劣解距离最远的优选方法^[12]。但是,此基本方法的缺陷为各指标的权重是平均分配的。而熵权法是一种客观赋权方法,指标的变异程度越小,其对应的权重也就越低。比如,整个片区积水深度都是相同的数值,对区分内涝高风险区和低风险区没有帮助,则这个指标权重就比较低。所以本研究将熵权法引入到TOPSIS的赋权过程中。但是,纯粹按照变异性分配权重又会忽视指标本身实际的重要程度,因此将层次分析法的主观权重引入到赋权过程中进行引导。改进后的TOPSIS评价理论模型具体如下:

① 构建 m 行 n 列的评价矩阵, x_{mn} 为各指标正向化后的具体数值, m 为片区二维网格数, n 为评价

指标数。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

② 标准化矩阵。由于各指标的数据量纲不同,所以需要进行标准化处理。

$$z_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} \quad (2)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{m1} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

③ 计算第 j 个指标中第 i 个网格所占比重 p_{ij} 。

$$p_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^m z_{ij} \quad (4)$$

④ 计算第 j 个指标的熵 e_j 。

$$e_j = 1 + \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (5)$$

⑤ 计算第 j 个指标的权重 v_j 。

$$v_j = e_j / \sum_{j=1}^n e_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

⑥ 计算层次分析法和熵权法的组合权重,主观权重 c_j 的计算方法见文献[13],将主观权重和客观权重视为同等重要,加权平均得到组合权重 w_j 。

$$w_j = (v_j + c_j) / 2 \quad (7)$$

⑦ 计算第 i 个网格得分与最安全值、最危险值的距离 D_i^+ 和 D_i^- 。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

式中: $z_j^+ = \max(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj})$,为第 j 个指标的最安全值; $z_j^- = \min(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj})$,为第 j 个指标的最危险值。

⑧ 计算第 i 个网格的安全度指标 S_i 。

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (10)$$

在利用上述理论对片区二维网格进行内涝风险评价后,利用如下聚类方法对风险等级进行划分。为弥补传统k-means算法^[14]对初值敏感和孤立点数据敏感的缺点,最终使用k-means++算法将安全度指标分为五级:高风险、较高风险、中风险、较低风险、低风险^[15]。具体步骤如图2所示。

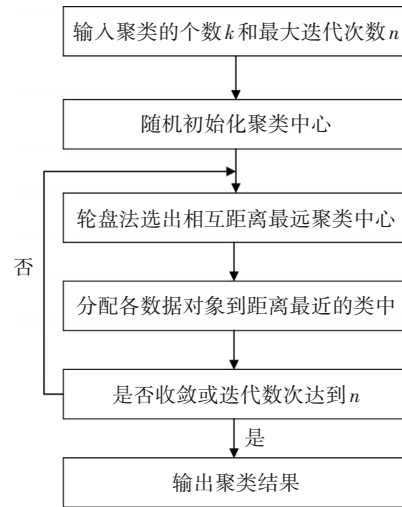


图2 k-means++算法步骤

Fig.2 Steps of k-means++ algorithm

2 结果与分析

2.1 内涝水力模型

2.1.1 模型构建

如图3所示,在本研究中,一维管网模型包括2 666个检查井、2 813条管渠;一维河段模型包括1条4.1 km的主干排涝河道,河道上设置102个Break节点作为管道排水口;对流域应用泰森多边形法划分为2 666个子汇水区;二维淹没模块包括72 767个网格,网格尺寸为25~100 m²,利用网格化区间将道路高程下降0.15 m。对片区河道施加日常运行水位5.2 m的初始条件;施加降雨事件和下游排涝泵处的外江潮位边界。泵闸调度规程为:上游闸门全部关闭,当内河水位高于外江水位时开启下游闸门泄水,当外江水位高于内河水位且内河水位高于5.2 m时开启拟建的21 m³/s泵站排涝,在内河水位低于4 m时停泵。

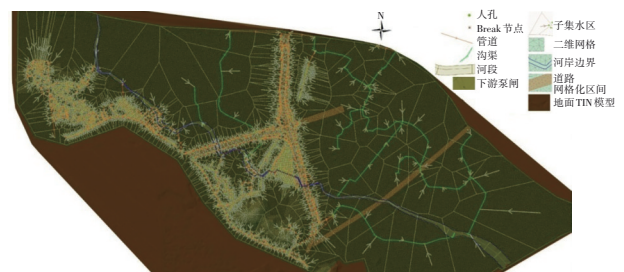


图3 感潮区域雨水管网-河段一二维耦合模型

Fig.3 One-dimensional and two-dimensional coupling model of storm sewer system-river in tidal region

本研究基于InfoWorks构建感潮区域雨水管网-河段一二维耦合模型。管网和河段通过排水口耦

合,管网水流通通过排口排入河道,河段水位顶托水流通过排水口倒灌回管网。河段模拟模块和二维淹没模块通过河岸边界侧向连接进行耦合,河道中的水漫过河岸线与地面发生水量交互。各模块耦合模型如图3所示。

2.1.2 模型验证

采用如图4所示的某实际降雨和潮位过程的边界条件,基于实际内涝点数据对模型进行率定与验证。模拟得到的最大积水深度分布与易涝点分布如图5所示。率定点1的实际和模拟积水深度分别为58、65 cm,率定点2的实际和模拟积水深度分别为66、57 cm,模拟的积水深度与实际积水深度的相对误差均在15%以内,符合《洪水风险图编制导则》(SL 483—2017)的规定,证明此模型具有较强的可靠性,可用于后续风险评估。

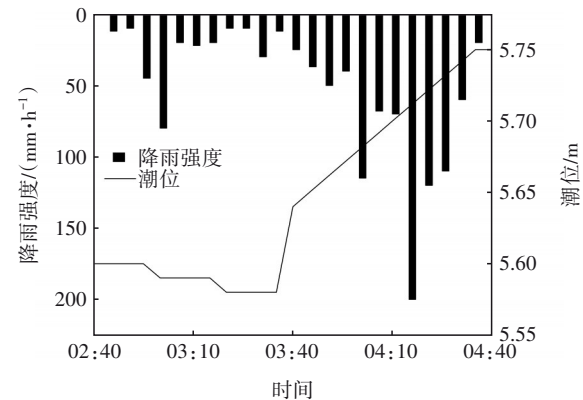


图4 率定工况的降雨和潮位边界条件
Fig.4 Boundary conditions of rainfall and tidal level of the calibration condition

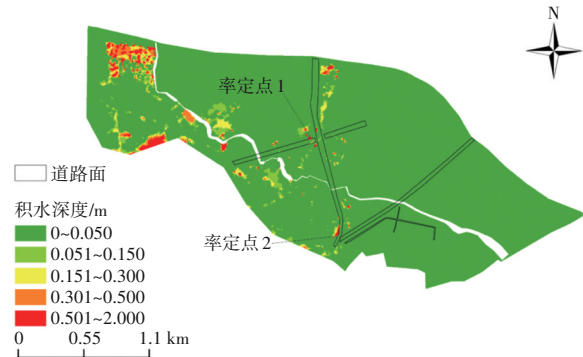


图5 率定工况的最大积水深度分布
Fig.5 Maximum waterlogging depth distribution of the calibration condition

2.1.3 危险性指标计算

将50年一遇降雨和潮位过程作为片区内涝计

算边界条件,如图6所示。由雨水管网-河段二维耦合模型模拟得到的积水深度和积水流速如图7所示。

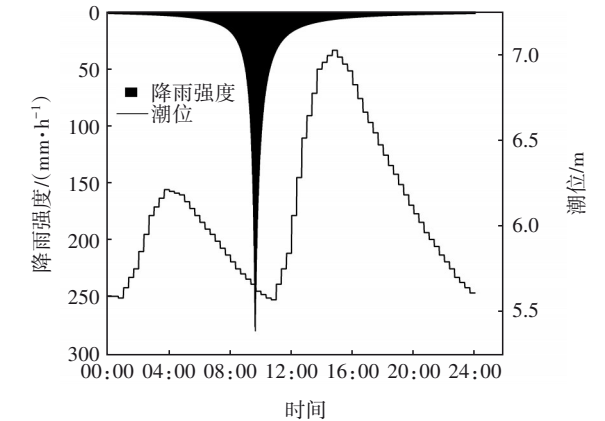


图6 降雨和潮位边界条件
Fig.6 Rainfall and tide level boundary conditions

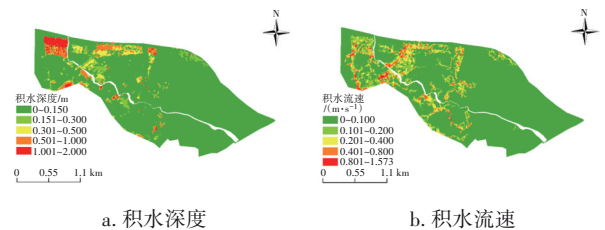


图7 危险性指标计算结果
Fig.7 Calculation results of risk indicators

2.2 易损性指标计算结果

按照指标构建体系,利用GIS邻域分析技术获得与幼儿园的距离及与医院的距离两图层,如图8(a)和(b)所示。片区GDP密度和人口密度如图8(c)和(d)所示。

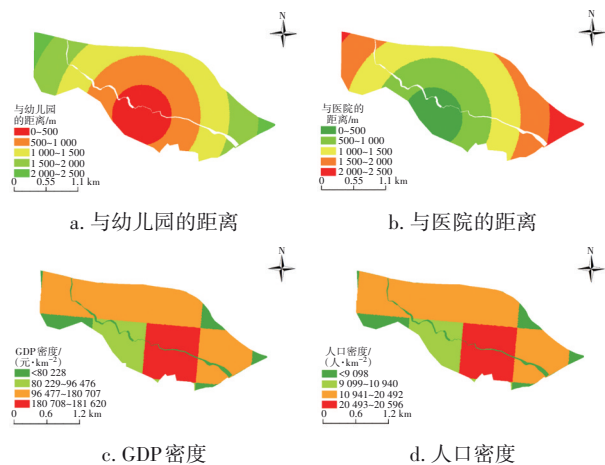


图8 易损性指标计算结果
Fig.8 Calculation results of vulnerability indicators

2.3 权重计算结果

熵权法是由数据本身性质客观决定的,数据变化程度越大,则其权重越大。例如,本研究区域的积水流速的差异性较小,所以其权重仅为0.2%,应在此处加上更强的人为向导。而主观层次分析法则弱化了GDP密度及与医院的距离的权重,需要用

熵权法进行校正。因此,采用层次分析法和熵权法进行组合赋权。层次分析法中6个指标的判断矩阵见表1,该判断矩阵的最大特征值为6.1803,随机一致性指标(RI)通过查表取1.26,一致性指标(CI)为0.0361,一致性比例(CR)为0.0286,一致性检验通过。表2为3种赋权方法的6个指标权重值。

表1 层次分析法判断矩阵

Tab.1 AHP judgment matrix

项目	人口密度	积水深度	与医院的距离	积水流速	GDP密度	与幼儿园的距离
人口密度	1.00	0.50	8.00	2.00	7.00	5.00
积水深度	2.00	1.00	9.00	4.00	8.00	6.00
与医院的距离	0.13	0.11	1.00	0.13	0.50	0.25
积水流速	0.50	0.25	8.00	1.00	4.00	2.00
GDP密度	0.14	0.13	2.00	0.25	1.00	0.50
与幼儿园的距离	0.20	0.17	4.00	0.50	2.00	1.00

表2 指标权重结果

Tab.2 Results of indicator weights

项目	人口密度	积水深度	与医院的距离	积水流速	GDP密度	与幼儿园的距离
熵权法客观权重	0.229	0.204	0.147	0.002	0.225	0.192
层次分析法主观权重	0.274	0.426	0.028	0.152	0.043	0.077
组合赋权	0.252	0.315	0.088	0.077	0.134	0.134

2.4 研究区域的内涝风险评估结果

2.4.1 计算结果的合理性分析

主客观组合权重-TOPSIS-k-means++计算得到的研究区域内涝风险空间分布如图9所示。

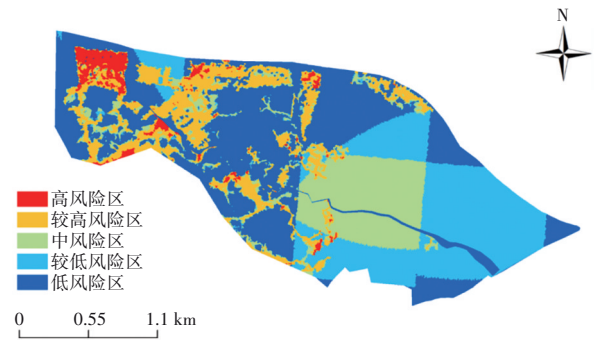


图9 主客观组合权重-TOPSIS-k-means++方法的内涝风险评估结果

Fig.9 Results of waterlogging risk assessment based on subjective and objective combination weights-TOPSIS-k-means++ method

从图9可以看出,河道下游积水深度较小地区的风险最低。结合图7和图8,河道下游人口密度较大、GDP密度较高,但是积水流速较小、积水不深,都属于较低风险区。中风险区大部分虽然离幼儿

园较近,但是积水深度和流速较低,与现实情况吻合。较高风险区基本由积水深度较高且离医院较远区域组成。高风险区为积水深度较大、流速较高且人口密度和GDP密度偏高区域。本评价体系综合考虑了危险性和易损性等内涝指标的主客观权重,可对片区内涝风险进行综合评价。

进一步分析结果的合理性,绘制如图10所示的各指标归一化平均值雷达图。

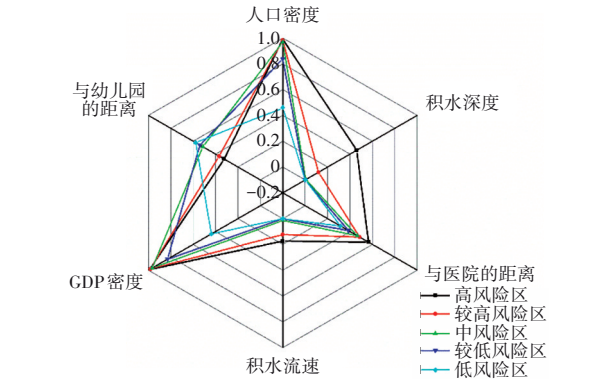


图10 主客观组合权重-TOPSIS-k-means++方法评价结果的各项指标归一化平均值

Fig.10 Normalized average value of each indicator in evaluation results of subjective and objective combination weight-TOPSIS-k-means++ method

从图10可以看出,高风险区的积水深度较大、离医院较远,这两个指标相对其他风险等级的区分度较高;积水流速、与幼儿园的距离这两个指标的区分度相对较低;GDP密度和人口密度这两个指标只有在低风险区的区分度较高。但是高风险区离医院最远、离幼儿园最近、积水深度最高,也符合客观认识规律。因此,可以证明本研究得到的风险聚类结果和实际是相符的。

2.4.2 不同方法对比分析

为验证主客观权重-TOPSIS-k-means++方法的有效性,将其与主客观权重-加权评分-k-means++方法的评价结果进行对比分析。对比方法为应用主客观权重法对正向化、标准化的6个指标进行评价,之后运用k-means++方法对各区域进行风险聚类。图11为主客观权重-加权评分-k-means++方法绘制的感潮区域内涝风险云图,在直接加权评分方法的引导下,没有TOPSIS方法充分利用原始数据信息精确反映各片区之间指标差距的优势,中部大部分地区被模糊地评价为中低风险区,表明主客观权重-加权评分-k-means++方法存在缺陷。

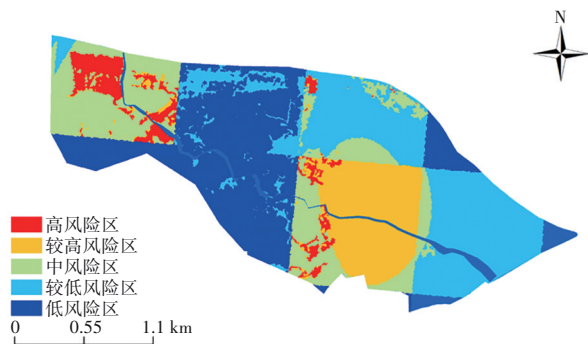


图11 主客观组合权重-加权评分-k-means++方法的内涝风险评估结果

Fig.11 Results of waterlogging risk assessment based on subjective and objective combination weights-weighted score-k-means++ method

另外对改进前方法的归一化平均值进行分析,雷达图如图12所示。由于采用直接加权评分方法对各个片区的风险进行评价,失去了TOPSIS方法根据相对各指标距离最优值贴近程度进行精准排序的优势。体现在雷达图中则为积水深度和积水流速这两个指标在除高风险区之外各风险等级下的平均值没有区分度。另外,人口密度、GDP密度的中高风险区均值差异也不明显。这种计算结果主要由直接加权评分方法没有精确计量各区域的指

标距最优值的贴近程度导致的,说明主客观组合权重-TOPSIS-k-means++方法更优。

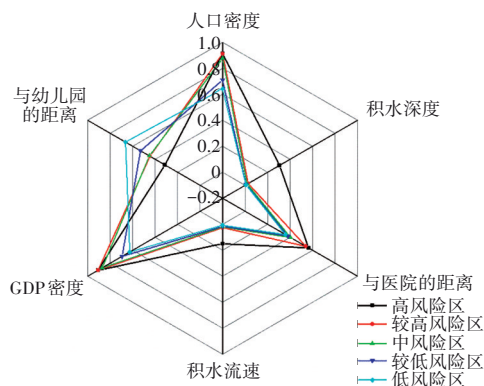


图12 主客观组合权重-加权评分-k-means++方法评价结果的各指标归一化平均值

Fig.12 Normalized average value of each indicator in evaluation results of subjective and objective combination weight-weighted score-k-means++ method

3 结论

① 利用InfoWorks软件雨水管网-河段一二维耦合模型可在同一平台耦合的优势,可模拟河水顶托排口出水的情景。将结果输出到GIS软件中,便于后期各图层指标的叠加。

② 熵权法为纯粹客观权重,加入层次分析法的主观权重引导,将各指标主客观权重组合,可更为客观地运用TOPSIS方法对内涝风险进行评价。

③ 综合考虑危险性指标和易损性指标,得到的k-means++风险等级划分结果可更有针对性地指导工程措施建设,以降低片区内涝风险。

参考文献:

- [1] YU F, CHEN Z, REN X, *et al.* Analysis of historical floods on the Yangtze River, China: characteristics and explanations [J]. *Geomorphology*, 2009, 113 (3/4): 210-216.
- [2] LAI C G, SHAO Q X, CHEN X H, *et al.* Flood risk zoning using a rule mining based on ant colony algorithm [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 268-280.
- [3] HUANG D P, LIU C, FANG H J, *et al.* Assessment of waterlogging risk in Lixiahe region of Jiangsu Province based on AVHRR and MODIS image [J]. *Chinese Geographical Science*, 2008, 18(2): 178-183.
- [4] SHI Y, SHI C, XU S Y, *et al.* Exposure assessment of rainstorm waterlogging on old-style residences in

- Shanghai based on scenario simulation [J]. *Natural Hazards*, 2009, 53(2): 259-272.
- [5] 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).
- [6] 赵玉杰, 王昊, 刘子龙, 等. 基于组合赋权的多情景内涝灾害风险评估[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(5): 1-12.
- ZHAO Yujie, WANG Hao, LIU Zilong, *et al.* Multi-scenario waterlogging disaster risk assessment based on combination weighting [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(5): 1-12 (in Chinese).
- [7] XU H S, MA C, LIAN J J, *et al.* Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 975-986.
- [8] 蔡甜, 王佳. 排水模型和GIS模糊综合评价在内涝风险评估中的应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(11): 117-124.
- CAI Tian, WANG Jia. Application of drainage model and GIS fuzzy comprehensive evaluation in waterlogging risk assessment[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(11): 117-124 (in Chinese).
- [9] 王诗婧. 基于降雨情景模拟的排水系统内涝风险评估与分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(11): 112-116.
- WANG Shijing. Waterlogging risk assessment and analysis of urban drainage system based on rainfall scenario simulation [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(11): 112-116 (in Chinese).
- [10] 马旭. 基于InfoWorks ICM模型的典型城市内涝模拟及海绵减控效果研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- MA Xu. Typical Urban Waterlogging Simulation and Sponge Reduction Control Effect Research Based on InfoWorks ICM Model[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [11] YANG W, XU K, LIAN J, *et al.* Multiple flood vulnerability assessment approach based on fuzzy comprehensive evaluation method and coordinated development degree model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 213: 440-450.
- [12] 赵佳慧, 许红师, 王田野, 等. 基于改进熵权-TOPSIS-灰色关联方法的城市洪涝风险评估[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(10): 58-73.
- ZHAO Jiahui, XU Hongshi, WANG Tianye, *et al.* Improved entropy weight-TOPSIS-grey correlation method based urban flood-waterlogging risk assessment [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(10): 58-73 (in Chinese).
- [13] 邓雪, 李家铭, 曾浩健. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100.
- DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93-100 (in Chinese).
- [14] YAN D Y, XU K, MA C, *et al.* Classifying western north pacific tropical cyclones by physical index system [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2018, 24(2): 142-151.
- [15] 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 Xinxiang, *et al.* Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(6): 1-6 (in Chinese).

作者简介: 郭鑫宇(1992-), 男, 北京人, 博士, 工程师, 主要研究方向为排水系统布置。

E-mail: 778282305@qq.com

收稿日期: 2022-08-31

修回日期: 2022-11-12

(编辑: 刘贵春)