

基于 ANP-PP-SPA 的区域洪灾风险评价模型研究

李宛谕¹, 黄显峰¹, 金国裕², 方国华¹, 石志康¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 昆山市水务集团有限公司, 江苏 昆山 215300)

摘要:针对现有洪灾风险评价模型的缺陷与不足,从致灾因子、孕灾因子、承灾因子和减灾因子 4 个方面,通过对 14 项评价指标的分析与计算,构建洪灾风险评价体系。洪灾风险评价体系以网络层次分析法(ANP)求解主观权重,投影寻踪法(PP)求解客观权重,主客观综合权重与集对分析理论(SPA)耦合,构建基于 ANP-PP-SPA 的洪灾风险评价模型。以广东省英德市为例,验证洪灾风险评价模型的适用性。计算结果表明,英德市 2016 年的洪灾风险属于中等级别,符合英德市 2016 年的实际情况。洪灾风险评价模型不仅综合考虑了评价指标间的相互关系,还较好地体现了洪灾风险的模糊性和随机性,能够为区域洪灾风险决策和洪水管理提供科学依据。

关键词:网络层次分析法;投影寻踪法;集对分析法;洪灾风险;广东省

中图分类号:TV87 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-9511(2020)04-0045-06

在全球气候变暖的背景下,区域年际降水变率不稳定,洪灾发生的频率逐年增加,对人类社会的影响和生态环境的破坏力越来越大,严重影响了区域的可持续发展。分析与评价区域洪灾风险是预防洪灾的重要基础工作,也是决策者制定各项防灾减灾措施和相关法律法规的重要参考依据^[1-2]。根据区域的特点,建立科学合理的区域洪灾风险评价模型,对相关部门采取应对措施降低洪灾损失具有实际意义。洪灾是由多种因素互相作用的结果,因此区域洪灾风险评价是一项涉及多目标的综合评价。

国内外学者对洪灾风险评价开展了许多相关的研究。Hinkel 等^[3]研究了海平面上升对沿海地区造成的洪水风险。Arnell 等^[4]对在气候变化条件下的全球河流洪水风险进行了评估。Elshorbagy 等^[5]对洪水淹没范围进行研究,并提出制作洪水风险图的方法。钟桂辉等^[6]基于 Web 技术、GIS 技术和数据库技术,研发了嵌套水动力模型的动态洪水风险图管理系统。徐镇凯等^[7]基于层次分析法和灰色聚类法对鄱阳湖流域的洪水风险进行了综合评估。王兆礼等^[8]将熵值理论运用到洪灾风险评价中,以东江流域为例进行了研究。苑希民等^[9]基于模糊层

次分析法对京津冀地区的洪灾风险进行了研究。李晋辉等^[10]构建了山洪灾害风险评价指标体系并运用突变理论进行求解。石晓静等^[11]基于云模型的方法对安康市洪水灾害风险进行了评价。

通过相关文献可以发现,以往的研究一般采用单一的方法求解权重,或是没有考虑评价指标间的相互作用。一方面,单一的主观权重受决策者主观影响较大,单一的客观权重则完全依靠客观数据计算,结果可能与实际情况存在差异;另一方面,洪灾风险是一个由多因素互相作用的复杂系统,应对评价指标间的相互关系进行分析。基于此,本文将主客观综合权重应用到洪灾风险评价模型中,采用网络层次分析法(analytic network process, ANP)计算主观权重,投影寻踪法^[12](projection pursuit, PP)计算客观权重。考虑到洪灾风险模糊性和复杂性的特点,在传统集对分析(set pair analysis, SPA)评价模型的基础上,用主客观综合权重耦合集对分析法对区域洪灾风险进行评价。以广东省英德市为例,运用所构建的 ANP-PP-SPA 方法分析计算其洪灾风险的大小,并与实际调查情况相对比,为当地的灾情管理部门制定灾害预警工作提供参考。

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划(SJKY19_0501);中央高校基本科研业务费专项(学生项目)(2019B70414);中央高校基本科研业务费专项(2019B11014)

作者简介:李宛谕(1994—),女,硕士研究生,主要从事水资源规划与洪水风险管理研究。E-mail:liwanyu33@163.com

通信作者:黄显峰(1980—),男,副教授,博士,主要从事水资源规划与水库调度研究。E-mail:hxhuang2015@163.com

1 洪灾风险评价指标体系与评价标准

1.1 评价指标体系建立

根据灾害论,灾害是致灾因子、孕灾环境、承灾体三者相互作用的结果^[13],同时,考虑到可以通过一系列防洪减灾措施降低洪灾的危险性,选取能够反映防洪减灾能力的指标作为减灾因子,从致灾因子、孕灾因子、承灾因子和减灾因子4个方面建立洪灾风险评价指标体系。在已有研究的基础上,遵循客观性、系统性、代表性的原则,并充分考虑评价指标值的可获取性,构建洪灾风险评价指标体系,共包含14个二级风险指标,见图1,指标选取依据见表1。

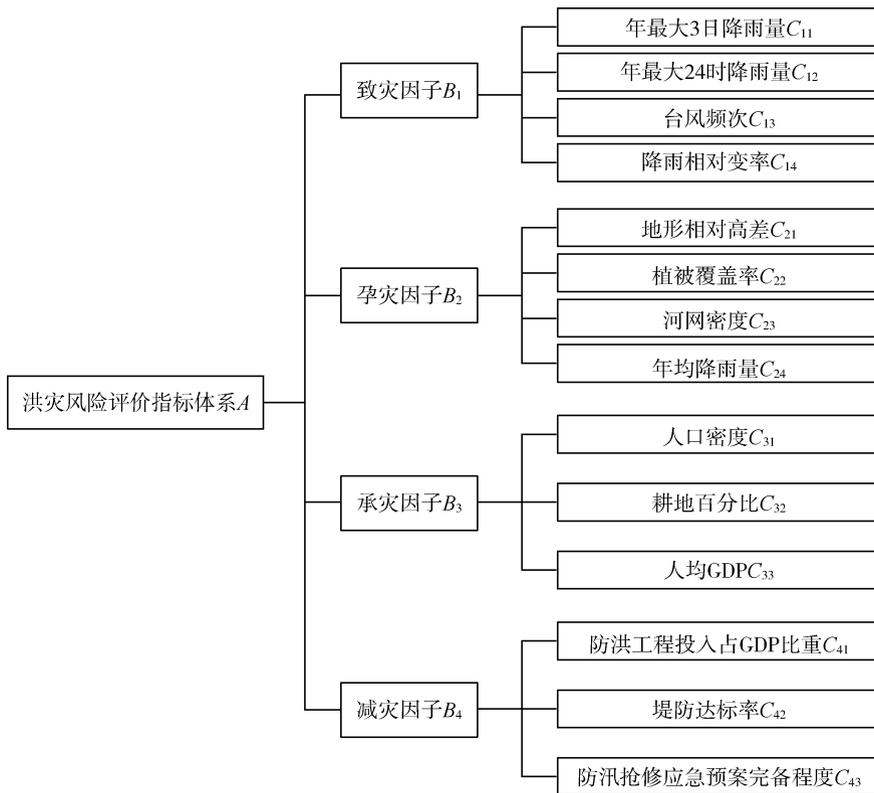


图1 区域洪灾风险评价指标体系

表1 区域洪灾风险指标选取依据

| 一级风险指标 | 二级风险指标 | 类型 | 指标选取依据 |
|----------------|---------------------------------------|----|-----------------------------------|
| B ₁ | C ₁₁ (mm) | 逆向 | 降雨是洪水形成的直接因素,最大3d降雨量很大程度上决定了洪量的多少 |
| | C ₁₂ (mm) | 逆向 | 对降雨强度的分级有重要意义,对洪水的形成具有代表性 |
| | C ₁₃ (次/a) | 逆向 | 沿海地区受台风影响较大,台风频次可以反映洪灾发生的自然规律 |
| | C ₁₄ (%) | 逆向 | 能反映实际降雨量与多年平均降雨量的关系 |
| B ₂ | C ₂₁ (m) | 逆向 | 地形的空间差异对洪水的形成与分布有重要影响 |
| | C ₂₂ (%) | 正向 | 能反映区域抵抗洪灾风险的能力 |
| | C ₂₃ (km/km ²) | 逆向 | 区域河网水系越发达,受到洪水威胁的可能性越大 |
| | C ₂₄ (mm) | 逆向 | 能反映研究区降雨量的平均水平 |
| B ₃ | C ₃₁ (人/km ²) | 逆向 | 通过单位面积内常住人口数量反映区域承灾体的数目 |
| | C ₃₂ (%) | 逆向 | 耕地安全是粮食安全的重要保障和基础 |
| | C ₃₃ (万元) | 逆向 | 通过单位面积内的国内生产总值反映区域经济状况 |
| B ₄ | C ₄₁ (%) | 正向 | 能反映防洪排涝设施的建设情况 |
| | C ₄₂ (%) | 正向 | 堤防达标率越高,河道防洪能力越强 |
| | C ₄₃ (分) | 正向 | 应急预案能有效减轻洪灾造成的影响,反映对洪灾应急处理能力 |

1.2 评价等级与评价标准

根据洪灾风险评价的特点,将评价标准划分为5级:低、较低、中等、较高、高,分别用I、II、III、IV、V表示。综合考虑各项指标的平均值和上下限值,结合沿海地区自然环境、社会经济环境的特点,建立五级评价标准,见表2。

2 区域洪灾风险评价模型

洪灾风险具有模糊性、随机性和不确定性等属性,SPA法对处理具有该属性的问题具有独特的优势。但在传统的SPA评价模型中,指标权重常采用层次分析法求解,为了使评价结果更加科学合理,引

表2 区域洪灾风险指标评价标准

| 评价标准 | C_{11}/mm | C_{12}/mm | $C_{13}/(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$ | $C_{14}/\%$ | C_{21}/m | $C_{22}/\%$ | $C_{23}/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$ |
|------|--------------------|--------------------|---|-------------|-------------------|-------------|---|
| I | [0,200) | [0,80) | [0,2) | [0,5) | [0,400) | [85,100) | [0,0.3) |
| II | [200,300) | [80,110) | [2,4) | [5,10) | [400,1000) | [75,85) | [0.3,0.7) |
| III | [300,400) | [110,140) | [4,6) | [10,20) | [1000,1700) | [50,75) | [0.7,2) |
| IV | [400,500) | [140,170) | [6,8) | [20,40) | [1700,2500) | [30,50) | [2,5) |
| V | ≥ 500 | ≥ 170 | ≥ 8 | ≥ 40 | ≥ 2500 | [0,30) | ≥ 5 |

| 评价标准 | C_{24}/mm | $C_{31}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$ | $C_{32}/\%$ | $C_{33}/\text{万元}$ | $C_{41}/\%$ | $C_{42}/\%$ | $C_{43}/\text{分}$ |
|------|--------------------|--|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------------|
| I | [0,600) | [0,50) | [10,25) | [0,0.8] | [0.5,1) | [85,100) | [90,100) |
| II | [600,900) | [50,150) | [25,35) | [0.8,1.5] | [0.25,0.5) | [70,85) | [70,90) |
| III | [900,1200) | [150,250) | [35,45) | [1.5,2.5] | [0.1,0.25) | [55,70) | [50,70) |
| IV | [1200,1500) | [250,500) | [45,55) | [2.5,3.5] | [0.05,0.1) | [30,55) | [30,50) |
| V | ≥ 1500 | ≥ 500 | [55,100) | ≥ 3.5 | [0,0.05) | [0,30) | [0,30) |

入 ANP 法和 PP 法对其进行改进,构建基于 ANP-PP-SPA 的洪灾风险评价模型。

2.1 ANP-PP 综合赋权法

2.1.1 ANP 法

对于洪灾风险评价指标体系而言,致灾因子、孕灾因子、承灾因子和减灾因子 4 个方面互相影响、互相制约。为了考虑各评价指标之间的相互关系,采用 ANP 法求解主观权重。1996 年, Saaty^[14] 在层次分析法的基础上提出了网络层次分析法。ANP 法是一种求解主观权重的方法,在计算指标权重时,由于 ANP 法采用了网络层次结构,不仅考虑了不同指标因素之间的相互关系,还考虑了不同层之间的反馈作用。ANP 基本网络结构见图 2。

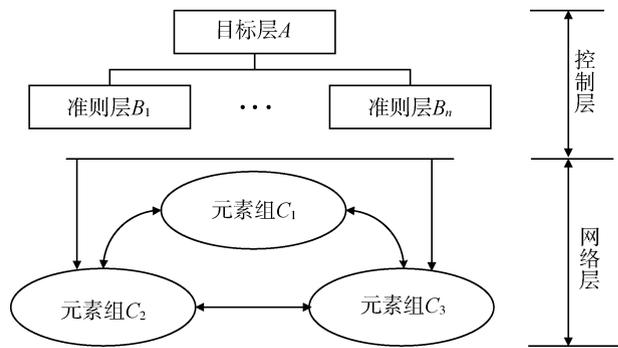


图2 ANP 网络结构

基于 ANP 的主观权重求解步骤如下^[15]:

a. 对风险因素之间的相互关系进行分析,建立风险网络结构。

b. 采用 1~9 标度法构造网络层各个风险因素的比较判断矩阵,将其进行归一化处理 and 一致性检验,若通过一致性检验,则构造初始超矩阵 W_0 :

$$W_0 = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{N1} & \cdots & w_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

c. 对控制层的洪灾风险指标进行两两比较,可以构造得到加权矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{N1} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

所以加权超矩阵 W_1 的表达式为

$$W_1 = \begin{bmatrix} a_{11}w_{11} & \cdots & a_{1N}w_{11} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{N1}w_{N1} & \cdots & a_{NN}w_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

d. 计算极限超矩阵:

$$B = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W^k \quad (4)$$

如果该极限值收敛且唯一,那么该过程得到的为极限矩阵 W^∞ ,其列向量即为对应准则层下网络层各指标的最终权重。

2.1.2 PP 法

PP 法是一种处理高维数据的统计方法,其基本思想是通过将高维数据投影到低维子空间上,求出能反映原数据特征的投影。用投影指标函数反映评价指标特征结构的可能性,选取归一化处理后的投影向量作为权重向量。PP 法是一种客观赋权的方法,计算步骤如下^[16]。

a. 采用离差标准化法归一化处理评价指标,设 x_{ij} ($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$) 为第 i 年的第 j 个洪灾风险评价指标值,其中 m 为样本数, n 为指标数。

b. 构造投影指标函数,得到指标的投影值 Z_i :

$$Z_i = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \quad \mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n) \quad (5)$$

式中: \mathbf{a} 为单位长度向量。

投影指标函数 $Q(\mathbf{a})$ 的表达式为

$$Q(\mathbf{a}) = S_z d_z \quad (6)$$

式中: S_z 为 Z_i 的标准差; d_z 为 Z_i 的局部密度。

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (z_i - \bar{z})^2}{m-1}} \quad (7)$$

$$d_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (R - r_{ij}) f(R - r_{ij}) \quad (8)$$

式中: \bar{Z} 为系统 Z_i 的均值; R 为局部密度窗口半径, 通常 $R=0.1S_z$; r_{ij} 为距离, $r_{ij} = |Z_i - Z_j|$; $f(R - r_{ij})$ 为单位阶跃函数, 当 $(R - r_{ij}) \geq 0$ 时取 1, 反之取 0。

c. 优化投影函数, 构造适应度函数, 采用加速遗传算法求解:

$$\max Q(\mathbf{a}) = S_z d_z \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n a_j^2 = 1 \quad (10)$$

2.1.3 综合权重

由 ANP 法计算得到的主客观权重向量为 w_{1i} , PP 法计算得到的客观权重向量为 w_{2i} , 综合考虑主客观权重影响, 得到综合权重为 w_i :

$$w_i = 0.5w_{1i} + 0.5w_{2i} \quad (11)$$

2.2 SPA 评价模型

SPA 评价模型是赵克勤教授^[17]提出的解决不确定性的理论方法, 该方法可以处理随机性、模糊性、不完整性等因素构成的不确定性系统, 使问题分析更贴近实际, 适用性强。用联系度来反映集对中两个集合的确定、不确定关系, 其表达式为^[18]:

$$u = d + bl + cJ \quad (12)$$

其中

$$d + b + c = 1$$

式中: d 为同一度; b 为差异度; c 为对立度, d 、 b 、 c 均为非负值; l 为差异度系数, 取值范围是 $[-1, 1]$, 当 l 为 -1 和 1 时, 表示 b 是确定性的, l 越接近 0, 则 b 的不确定性越强; J 为对立度系数, 取值 -1 。

集对分析评价模型的具体计算步骤如下^[19]:

a. 构建洪灾风险评价指标体系, 并确定评价标准。

b. 计算评价样本 j 与评价等级 k 的联系度 u_{jk} 。评价样本与评价标准作为两个集合, 构成一个集对, 当其处于相同等级中时, $u_{jk} = 1$; 当其处于相邻等级中时, u_{jk} 取值在区间 $(-1, 1)$ 变化; 当其处于相隔等级中时, $u_{jk} = -1$ 。当洪灾风险评价等级为 5 级时, 若评价指标 x_j 随着评价等级的增大而增大, 则 u_{jk} 具体计算公式为

$$u_{j1} = \begin{cases} 1 & x_j \leq s_{1j} \\ 1 - 2 \frac{x_j - s_{1j}}{s_{2j} - s_{1j}} & s_{1j} < x_j \leq s_{2j} \\ -1 & x_j > s_{2j} \end{cases} \quad (13)$$

$$u_{j2} = \begin{cases} 1 - 2 \frac{s_{1j} - x_j}{s_{1j} - s_{0j}} & x_j \leq s_{1j} \\ 1 & s_{1j} < x_j \leq s_{2j} \\ 1 - 2 \frac{x_j - s_{2j}}{s_{3j} - s_{2j}} & s_{2j} < x_j \leq s_{3j} \\ -1 & x_j > s_{3j} \end{cases} \quad (14)$$

$$u_{j3} = \begin{cases} -1 & x_j \leq s_{1j} \\ 1 - 2 \frac{s_{2j} - x_j}{s_{2j} - s_{1j}} & s_{1j} < x_j \leq s_{2j} \\ 1 & s_{2j} < x_j \leq s_{3j} \\ 1 - 2 \frac{x_j - s_{3j}}{s_{4j} - s_{3j}} & s_{3j} < x_j \leq s_{4j} \end{cases} \quad (15)$$

$$u_{j4} = \begin{cases} -1 & x_j > s_{4j} \\ -1 & x_j \leq s_{2j} \\ 1 - 2 \frac{s_{3j} - x_j}{s_{3j} - s_{2j}} & s_{2j} < x_j \leq s_{3j} \\ 1 & s_{3j} < x_j \leq s_{4j} \end{cases} \quad (16)$$

$$u_{j5} = \begin{cases} 1 - 2 \frac{x_j - s_{4j}}{s_{5j} - s_{4j}} & s_{4j} < x_j \leq s_{5j} \\ -1 & x_j \leq s_{3j} \\ 1 - 2 \frac{s_{4j} - x_j}{s_{4j} - s_{3j}} & s_{3j} < x_j \leq s_{4j} \\ 1 & s_{4j} < x_j \leq s_{5j} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $s_{1j} \sim s_{2j}$ 分别是 1 ~ 5 级评价标准的限值; s_{0j} 为 1 级评价标准的另一端点值。

c. 计算样本与评价等级 k 之间的综合联系度 u_k :

$$u_k = \sum_{j=1}^m A_j u_{jk} \quad (18)$$

式中: A_j 为各指标的权重, 采用 ANP-PP 综合赋权法求解。

d. 计算样本隶属于评价等级 k 的相对隶属度 v_k :

$$v_k = \frac{1}{2}(1 + u_k) \quad (19)$$

e. 计算样本隶属于评价等级 k 的隶属度 M_k :

$$M_k = v_k / \sum_{k=1}^K v_k \quad (20)$$

f. 确定评价等级, 采用置信度准则评判法^[20]得到洪灾风险评价等级:

$$h = \min_{k^*} \left\{ k^* \mid \sum_{k=1}^{k^*} M_k > \lambda \right\} \quad (21)$$

式中: λ 为置信度, 取值范围为 $[0.5, 0.7]$, 值越大则评价结果越保守, 本文取 λ 为 0.6。

2.3 洪灾风险评价模型求解步骤

基于 ANP-PP-SPA 的区域洪灾风险评价模型的求解步骤为 5 步。

步骤 1: 根据洪灾风险的特点, 构建区域洪灾风险评价指标体系并确定评价标准;

步骤 2: 确定待研究区洪灾风险评价指标值;

步骤 3: 采用 ANP 法求解主观权重, PP 法求解客观权重, 最后求得主客观综合权重;

步骤 4: 基于 SPA 法求出区域洪灾风险隶属度;
步骤 5: 确定研究区的洪灾风险评价结果。

3 实例研究

英德市位于南岭山脉东南部, 广东省中北部, 北江中游, 地处五岭山地南缘, 是一个周围山地环绕、向南倾斜的盆地。全市总面积 5 671 km², 境内集雨面积 100 km² 以上的河流有 19 条, 其中较大河流有北江、翁江、连江。降水量自东向西渐增, 年均降水量 1 906. 2 mm, 降水主要集中在 4 ~ 9 月, 占全年降水量的 80% 左右。英德市发生洪灾的可能性较大, 有必要对其洪灾风险进行研究。

3.1 指标体系

根据英德市的基本情况, 对其 2016 年的洪灾风险进行研究。指标数据来源于《中国气象灾害年鉴》《广东农村统计年鉴》《英德市统计年鉴》, 广东省水文局、广东省气象局、中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 市防洪规划等。其中, 河网密度是通过对研究区的数字高程模型进行分析, 借助 Arcgis 水文分析工具求解得到。通过统计分析, 各评价指标数据见表 3。

表 3 英德市洪灾风险评价指标值

| 一级风险指标 | 二级风险指标 | 指标值 |
|---------------------|--|----------|
| 致灾因子 B ₁ | 年最大 3 d 降雨量 C ₁₁ (mm) | 173. 7 |
| | 年最大 24 h 降雨量 C ₁₂ (mm) | 119. 7 |
| | 台风频次 C ₁₃ (次/a) | 5 |
| | 降雨相对变率 C ₁₄ (%) | 30. 41 |
| 孕灾因子 B ₂ | 地形相对高差 C ₂₁ (m) | 1 580 |
| | 植被覆盖率 C ₂₂ (%) | 69. 1 |
| | 河网密度 C ₂₃ (km/km ²) | 0. 388 4 |
| | 年均降雨量 C ₂₄ (mm) | 1 906. 2 |
| 承灾因子 B ₃ | 人口密度 C ₃₁ (人/km ²) | 205 |
| | 耕地百分比 C ₃₂ (%) | 16. 25 |
| | 人均 GDP C ₃₃ (万元) | 2. 607 2 |
| 减灾因子 B ₄ | 防洪工程投入占 GDP 比重 C ₄₁ (%) | 0. 17 |
| | 堤防达标率 C ₄₂ (%) | 75. 33 |
| | 防汛抢险应急预案完备程度 C ₄₃ (分) | 92 |

3.2 基于 ANP-PP 综合赋权法的权重计算

ANP 模型计算量大, 过程复杂, 采用 Super Decision 软件计算求解。①对洪灾风险评价指标间的关联情况进行分析, 设计好调查问卷, 并邀请 5 位相关领域的专家填写; ②利用 Super Decision 软件将专家对评价指标的重要性判别结果进行分析计算, 得出各指标的主观权重, 结果见表 4。其中, 权重较高的 4 个风险指标为: 年最大 3 d 降雨量、台风频次、防洪工程投入占 GDP 比重、防汛抢险应急预案完备程度。

按照 PP 模型的计算步骤, 用 Matlab 软件编程计算得到客观权重, 结果见表 4。其中, 权重较高的 4 个风险指标为: 防洪工程投入占 GDP 比重、地形相对高差、河网密度、台风频次。

根据式 (21), 得到综合权重, 结果见表 4。其中, 权重较高的 4 个风险指标依次为: 防洪工程投入占 GDP 比重、台风频次、年最大 3 d 降雨量、人口密度。权重计算的结果表明, 综合权重充分考虑了主观和客观两种因素的影响。

表 4 洪灾风险评价权重计算结果

| 一级风险指标 | 二级风险指标 | ANP | PP | 综合权重 |
|----------------|-----------------|----------|----------|----------|
| B ₁ | C ₁₁ | 0. 144 5 | 0. 052 7 | 0. 098 6 |
| | C ₁₂ | 0. 086 2 | 0. 034 8 | 0. 060 5 |
| | C ₁₃ | 0. 130 2 | 0. 090 9 | 0. 110 6 |
| | C ₁₄ | 0. 078 9 | 0. 065 1 | 0. 072 0 |
| B ₂ | C ₂₁ | 0. 002 9 | 0. 112 3 | 0. 057 6 |
| | C ₂₂ | 0. 004 5 | 0. 048 5 | 0. 026 5 |
| | C ₂₃ | 0. 028 5 | 0. 095 3 | 0. 061 9 |
| | C ₂₄ | 0. 037 8 | 0. 085 5 | 0. 061 7 |
| B ₃ | C ₃₁ | 0. 089 4 | 0. 076 6 | 0. 083 0 |
| | C ₃₂ | 0. 053 1 | 0. 085 8 | 0. 069 4 |
| | C ₃₃ | 0. 048 3 | 0. 040 8 | 0. 044 5 |
| B ₄ | C ₄₁ | 0. 119 5 | 0. 125 9 | 0. 122 7 |
| | C ₄₂ | 0. 074 7 | 0. 047 6 | 0. 061 1 |
| | C ₄₃ | 0. 101 7 | 0. 038 1 | 0. 069 9 |

3.3 SPA 评价模型计算结果

根据表 3, 可计算出每个风险评价指标的联系度, 见表 5, 模型评价结果见表 6。根据式 (21), 英德市 2016 年洪灾风险等级是 III, 风险中等, 应采取相应的洪灾风险管理措施来提高英德市的防洪能力。评价模型得到的结果与英德市洪水灾害风险现状一致, 证明了模型的可行性。

表 5 英德市洪灾风险评价指标联系度

| 风险指标 | 联系度 | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | I | II | III | IV | V |
| C ₁₁ | 1. 000 0 | 0. 737 0 | -1. 000 0 | -1. 000 0 | -1. 000 0 |
| C ₁₂ | -1. 000 0 | 0. 353 3 | 1. 000 0 | -0. 353 3 | -1. 000 0 |
| C ₁₃ | -1. 000 0 | 0. 000 0 | 1. 000 0 | 0. 000 0 | -1. 000 0 |
| C ₁₄ | -1. 000 0 | -1. 000 0 | -0. 041 0 | 1. 000 0 | 0. 041 0 |
| C ₂₁ | -1. 000 0 | -0. 657 1 | 1. 000 0 | 0. 657 1 | -1. 000 0 |
| C ₂₂ | -1. 000 0 | 0. 528 0 | 1. 000 0 | -0. 528 0 | -1. 000 0 |
| C ₂₃ | 0. 558 0 | 1. 000 0 | -0. 558 0 | -1. 000 0 | -1. 000 0 |
| C ₂₄ | -1. 000 0 | -1. 000 0 | -1. 000 0 | 0. 187 6 | 1. 000 0 |
| C ₃₁ | -1. 000 0 | -0. 100 0 | 1. 000 0 | 0. 100 0 | -1. 000 0 |
| C ₃₂ | 1. 000 0 | -0. 166 7 | -1. 000 0 | -1. 000 0 | -1. 000 0 |
| C ₃₃ | -1. 000 0 | -1. 000 0 | 0. 785 6 | 1. 000 0 | -0. 785 6 |
| C ₄₁ | -1. 000 0 | -0. 066 7 | 1. 000 0 | 0. 066 7 | -1. 000 0 |
| C ₄₂ | -0. 289 3 | 1. 000 0 | 0. 289 3 | -1. 000 0 | -1. 000 0 |
| C ₄₃ | 1. 000 0 | 0. 600 0 | -1. 000 0 | -1. 000 0 | -1. 000 0 |

表6 英德市洪灾风险评价结果

| 评价等级 | 综合关联度 μ_k | 相对隶属度 v_k | 隶属度 M_k |
|------|---------------|-------------|-----------|
| I | -0.3843 | 0.3078 | 0.1614 |
| II | 0.0289 | 0.5144 | 0.2697 |
| III | 0.1764 | 0.5882 | 0.3084 |
| IV | -0.2139 | 0.3931 | 0.2060 |
| V | -0.7921 | 0.1039 | 0.0545 |

4 结论和建议

4.1 结论

本文建立了一套客观合理的洪灾风险评价模型。评价指标体系的构建在传统灾害论的基础上,增加了减灾因子,使得评价指标体系更加全面。在求解指标权重时,ANP法考虑了指标之间的相互作用,PP法反映了指标值的固有属性,综合权重较好地融合了主客观性。用ANP-PP耦合SPA评价模型来确定风险等级,有效地描述了风险的模糊性和随机性。实例研究的结果验证了评价方法的可行性,为英德市防洪减灾和洪水管理工作提供了参考依据。

4.2 风险管理措施

人们无法控制降水量等自然因素,但是可以采取防洪措施来应对洪灾,最大限度地将洪灾损失控制在承受范围内。洪灾风险管理工作可以从工程措施和非工程措施两方面来进行,主要有以下几点:

a. 通过加大对防洪设施投资力度,提高堤防、水库、蓄滞洪区等工程的防洪能力,以提高城市防洪标准。

b. 加快智慧水利建设,提高对雨情、水情和台风的监控能力,加强灾害预警。

c. 提高相关部门的洪灾应急管理水平,在大洪水来临时能有条不紊地开展救援工作。

d. 加强对洪灾风险宣传的力度,以提高居民防灾减灾意识。

参考文献:

[1] 李博,甘恬静. 基于 ArcGIS 与 GAP 分析的长株潭城市群水安全格局构建[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 80-88.

[2] 许怡,吴永祥,王高旭,等. 伦敦城市洪水风险管理的启示[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4): 13-18.

[3] HINKEL J, LINCKE D, VAFEIDIS A T, et al. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(9): 3292-3297.

[4] ARNELL N W, GOSLING S N. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale[J]. Climatic Change, 2016, 134(3): 387-401.

[5] ELSHORBAGY A, BHARATH R, LAKHANPAL A, et al. Topography-and nightlight-based national flood risk assessment in Canada[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(4): 2219-2232.

[6] 钟桂辉,刘曙光,张泉鸣,等. 阳澄淀泖区动态洪水风险图的编制及其管理系统的开发[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 62-68.

[7] 徐镇凯,黄海鹏,魏博文,等. 基于系统多层次灰色模型的洪灾风险综合评价方法:以鄱阳湖流域为例[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 20-23.

[8] 王兆礼,赖成光,陈晓宏. 基于熵权的洪灾风险空间模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 35-40.

[9] 苑希民,桑林浩,沈福新,等. 基于模糊层次分析法的京津冀洪灾风险评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(10): 37-45.

[10] 李晋辉,黄金池,何晓燕,等. 基于突变理论的山洪灾害风险评价指标体系构建与应用[J]. 水利水电技术, 2015, 46(12): 129-132.

[11] 石晓静,查小春,刘嘉慧,等. 基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评价[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 29-34.

[12] 黄显峰,贾永乐,方国华. 基于投影寻踪法的城市水生态文明评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 117-122.

[13] 王劲峰. 中国自然灾害影响评价方法研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.

[14] SAATY T L. Decision making with dependence and feedback[M]. Pittsburgh: RWS Publication, 1996.

[15] 江新,李琦,沈力,等. 基于 ANP-灰色模糊的水电工程项目群风险预警研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(6): 146-152.

[16] 刘冀,王本德. 基于组合权重的模糊可变模型及在防洪风险评价中应用[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(2): 272-275.

[17] 赵克勤,宣爱理. 集对论:一种新的不确定性理论与应用[J]. 系统工程, 1996(1): 18-23.

[18] 赵吴静,吴开亚,金菊良. 防洪工程安全评价集对分析:可变模糊集模型[J]. 水电能源科学, 2007(2): 5-7.

[19] 黄显峰,李宛谕,方国华,等. 基于 SPA 和云理论的水资源承载能力评价研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 9-15.

[20] 刘展志,黄显峰,方国华,等. 基于改进云模型的堤坝除险加固效益后评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 223-231.

(收稿日期:2019-09-05 编辑:胡新宇)