

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221973

# 基于 IOWA-VAC 的地铁车站暴雨内涝脆弱性评价

陈 佳<sup>1,2</sup>, 刘敬严<sup>1,2</sup>, 邓 曦<sup>1,2</sup>

(1. 防灾科技学院土木工程学院, 河北 三河 065201; 2. 中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室, 河北 三河 065201)

**摘要:** 为科学评价地铁车站暴雨内涝脆弱性, 确定地铁车站暴雨内涝脆弱性的敏感性指标, 提高地铁车站暴雨内涝管理水平, 提出基于 IOWA-VAC 的地铁车站暴雨内涝脆弱性评价方法, 该方法基于压力—状态—响应 (PSR) 理论构建地铁车站暴雨内涝脆弱性评价指标, 利用 IOWA 算子按升序原则对指标数据重新排序, 同时引入  $\theta$  系数动态调整区间边界权值, 得到指标权重, 引入向量夹角余弦 (VAC) 检验待评价目标向量和理想目标向量一致性的贴进度, 实现了代数思维向空间几何思维的转变, 得到待评价目标等级。进而以郑州地铁 5 号线海滩寺站为例, 运用单因素敏感性分析确定地铁车站暴雨内涝脆弱性的敏感性指标, 评价了海滩寺站暴雨内涝脆弱性。结果表明, 郑州地铁 5 号线海滩寺站暴雨内涝脆弱性等级为 IV 级, 属于高度风险, 为地铁车站暴雨内涝脆弱性管理提供了可行性建议。

**关键词:** 地铁车站; 暴雨; 内涝; 脆弱性评价; 敏感性分析; IOWA; VAC

**中图分类号:** TV122<sup>+</sup>.1; TU992

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0088-04

## 1 引言

地铁作为城市交通的重要通行工具, 多数分布在地面高程以下, 相对于其他基础设施, 更易受到暴雨、洪水的侵袭。如 2021 年, 郑州市发生特大暴雨引发地铁 5 号线发生大雨倒灌, 造成多人死亡<sup>[1]</sup>; 故开展地铁车站暴雨内涝脆弱性评价, 对保障地铁运营安全具有重要意义。关于地铁车站暴雨内涝脆弱性评价鲜有研究, 主要集中在地铁系统脆弱性研究方面。其中, DI FEBBRARO A 等<sup>[2]</sup>利用 Petri 网评价地铁系统脆弱性; 宋守信等<sup>[3,4]</sup>利用多级可拓模型评价大客流对地铁运行脆弱性的影响, 发现地铁车站暴雨内涝时最易受到影响且产生的负面效应最大; 王军武等<sup>[5]</sup>提出基于投影寻踪和粒子群算法评价地铁暴雨内涝脆弱性; 闫绪娴等<sup>[6]</sup>利用贝叶斯网络和事故树模型评价地铁洪涝灾害。已有研究在构建地铁脆弱性指标体系时未能揭示指标间的反馈机制和逻辑关系且忽视了专家认知的极端性对指标权重的不利影响, 同时, 计算方法较复杂, 过程缺乏直观性, 无法确定地铁车站暴雨内涝脆弱性的敏感性指标。鉴于此, 本文提出基于 IOWA-VAC 的地铁

车站暴雨内涝脆弱性评价方法, 该方法利用 IOWA 算子计算指标权, 运用向量夹角余弦计算待评价目标向量与理想目标向量的贴进度, 得到待评价目标等级, 并引入单因素敏感性分析得出地铁车站暴雨内涝脆弱性的敏感性指标, 为地铁车站暴雨内涝脆弱性管理提供了重要参考。

## 2 指标体系的构建

压力—状态—响应 (PSR) 理论通过压力、状态、响应三个过程清晰还原指标间的逻辑关系和反馈机制, 具有很强的实用性和灵活性<sup>[7]</sup>。对地铁车站暴雨内涝脆弱性而言, 压力指标指的是突发的暴雨造成地铁车站及周边原有系统失去平衡的因素; 状态指标反映了地铁车站暴雨时的状态与挡水墙高度、排水沟排水能力系数等<sup>[6]</sup>; 响应指标指地铁车站出现暴雨内涝前后, 安全生产检查和工作人员所采取的应急措施等。在借鉴 PSR 理论的基础上, 结合文献<sup>[5,6]</sup>, 构建如表 1 所示的评价指标体系。关于地铁车站暴雨内涝脆弱性等级划分, 参考文献<sup>[5]</sup>中关于地铁车站暴雨内涝脆弱性等级划分规则和向量夹角余弦输出值特点, 将其划分 5 个等级, 见表 1。

**收稿日期:** 2022-09-21, **修回日期:** 2022-10-18

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项 (ZY20140209, ZY20220206); 国家社会科学基金项目 (19BGL243); 河北省科技厅软科学项目 (22557618D)

**作者简介:** 陈佳 (1987-), 女, 硕士、讲师, 研究方向为工程项目管理, E-mail: 997352880@qq.com

表 1 地铁车站暴雨内涝脆弱性评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of vulnerability of subway stations to rainstorm and waterlogging

一级指标	二级指标	脆弱性等级				
		极低危险Ⅰ级	低度危险Ⅱ级	中度危险Ⅲ级	高度危险Ⅳ级	极度危险Ⅴ级
		(0,0.20]	(0.20,0.40]	(0.40,0.60]	(0.60, 0.80]	(0.80,1.00)
压力指标 $A_1$	暴雨天气频率 $A_{11}$ /次	[0,2)	[2,4)	[4,5)	[5,7)	[7,26]
	24 h 最大降雨量 $A_{12}$ /mm	[0,50)	[25,50)	[50,100)	[100,200)	[200,2 000]
	暴雨历时 $A_{13}$ /h	[0,1)	[1,1.5)	[1.5,3)	[3,8)	[8,10]
	径流系数 $A_{14}$	[0.10,0.20)	[0.20,0.30)	[0.30,0.45)	[0.45,0.60)	[0.60,0.85]
	不良地质条件发育情况 $A_{15}$	无	较少	一般	较多	很多
	不良周边环境要素 $A_{16}$	无	较少	一般	较多	很多
状态指标 $A_2$	挡水墙高度 $A_{21}$ /m	[1.5,3.0]	[1.0,1.5)	[0.5,1.0)	[0.3,0.5)	[0,0.3)
	排水沟排水能力系数 $A_{22}$	[1.5,100]	[1.25,1.5)	[1,1.25)	[0.75,1)	[0,0.75)
	排水管网密度 $A_{23}$ /( $\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$ )	[3.17,10]	[2.78,3.17)	[2.39,2.78)	[2,2.39)	[0,2)
	防汛挡板高度 $A_{24}$ /m	[1.5,1.8)	[1.2,1.5)	[1.0,1.2)	[0.8,1.0)	[0.5,0.8)
	监控设备 $A_{25}$	非常完备	很完备	一般	不完备	无
	积水检测报警系统 $A_{26}$	非常灵敏	很灵敏	一般灵敏	不灵敏	失效
	出入口周围地势情况 $A_{27}$	很高	高	一般	低	较低
	安全生产检查次数 $A_{31}$ (次·月 <sup>-1</sup> )	[8,30]	[6,8)	[4,6)	[1,4)	[0,1)
响应指标 $A_3$	防汛应急预案演练次数 $A_{32}$ /(次·月 <sup>-1</sup> )	[4,12]	[3,4)	[2,3)	[1,2)	[0,1)
	专业救援人员比例 $A_{33}$ /%	[30,100]	[20,30)	[10,20)	[5,10)	[0,5)
	行车指挥调度水平 $A_{34}$	很好	好	一般	较差	差
	防汛应急预案编制 $A_{35}$	强	较强	一般	较弱	弱
	汛情资讯及时性和准确性 $A_{36}$	非常完备	很完备	一般	不完备	无
	救援物资储备情况 $A_{37}$	非常完备	很完备	一般	不完备	无

(3) 计算新决策数据的权向量  $P_i$ 。公式为:

$$P_i = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

其中  $\mu = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n s; \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{s=1}^n (s - \mu)^2}$  (2)

式中,  $\mu, \sigma$  分别为变量在位置  $s$  下的均值、标准差。

(4) 加权处理  $P_i$ 。构建绝对权重区间  $[\omega_i^L, \omega_i^U]$ , 对权值  $P_i$  加权处理:

$$\begin{cases} \omega_i^L = \sum_{i,j=1}^n P_i \theta_{ij}^L \\ \omega_i^U = \sum_{i,j=1}^n P_i \theta_{ij}^U \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\omega_i^L, \omega_i^U$  分别为  $a_i$  绝对权重区间的最小值、最大值。

(5) 计算绝对权重。公式为:

$$\omega_i = \theta \omega_i^L + (1 - \theta) \omega_i^U \quad (4)$$

式中,  $\theta, 1 - \theta$  分别为区间左右两侧权重所占组合权重的百分比。

为进一步弱化区间边界权重的偏差, 引入  $\theta$  系数调整区间边界权重, 根据以往经验, 取  $\theta = 0.5$  时效果最好。

(6) 计算相对权重  $w_i^*$ 。公式为:

$$w_i^* = \omega_i / \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (5)$$

### 3.2 向量夹角余弦

(1) 设待评目标的向量  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots,$

## 3 评价模型的构建

已有的指标赋权方法如层次分析法、专家打分法均假设专家打分合理, 忽略了不同专家的偏好导致决策数据极端值的问题。为此, 陈楠<sup>[8]</sup>提出 IOWA 算子赋权新方法, 利用“柔性”区间数代替“刚性”点值, 即弱化极端值不利影响可得到更精确的指标权重。

地铁车站暴雨内涝脆弱性评价的本质是计算待评价目标实际状态与理想状态的贴进度。向量夹角余弦运用数学几何思维比较待评价目标向量与理想目标向量之间的贴进度, 实现了代数向空间几何的转变, 计算结果更具直观性<sup>[9]</sup>。另外可根据待评价目标背景变化动态调整理想目标, 将其应用于地铁车站暴雨内涝脆弱性评价中, 两者在方法论上具有可行性和契合性。

### 3.1 IOWA 算子赋权

(1) 设地铁车站暴雨内涝脆弱性评价指标有  $n$  个, 即  $A = \{a_i\} = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ , 指标  $a_i$  模糊贡献度为区间数  $\bar{u}_{ij} = [u_{ij}^L, u_{ij}^U]$  ( $u_{ij}^L, u_{ij}^U$  分别为专家  $j$  对指标  $a_i$  的最差评价得分、最高评价得分)。

(2)  $a_i$  的初始数据  $\bar{u}_i = [\bar{u}_{i1}, \bar{u}_{i2}, \dots, \bar{u}_{in}]$ , 按从小到大的规则对初始数据重新排序, 得到新的决策数据  $\bar{b}_i = [\bar{b}_{i1}, \bar{b}_{i2}, \dots, \bar{b}_{in}]$ 。

$x_{in}$ )、理想目标向量  $\mathbf{X}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ , 则待评价目标与理想目标的夹角余弦值  $\rho_i$  为:

$$\rho_i = \cos\langle \mathbf{X}_i, \mathbf{X}^* \rangle = \frac{\sum_{i,j=1}^n x_{ij}x_j^*}{\left(\sqrt{\sum_{i,j=1}^n x_{ij}^2}\sqrt{\sum_{i,j=1}^n x_j^{*2}}\right)} \quad (6)$$

$\rho_i$  反映了待评价目标评分向量与理想目标向量的贴近度, 当  $\rho_i = 1$  表明待评价目标与理想目标最贴近, 状态最优。

(2) 为进一步确定地铁车站暴雨内涝脆弱性的敏感性指标, 将单因素敏感性分析引入向量夹角余弦中, 通过计算去掉某一指标而其他指标保持不变的情况获得待评价目标的影响程度, 得到敏感性系数  $\alpha$ , 公式为:

$$\alpha = (\rho_{i-V_j} - \rho_i) / \rho_i \quad (7)$$

式中,  $V_j$  为指标  $j$  的余弦值;  $\rho_{i-V_j}$  为除去指标  $j$  后剩余指标的余弦值。

当  $\alpha > 0$  时, 表明指标对待评价目标形成负面作用, 值越大, 负面作用越大。

(3) 考虑到地铁车站暴雨内涝脆弱性指标量纲的差异性, 将指标划分为成本型和效益型两类。得到新向量  $\mathbf{X}'_i = \{x'_{ij}\}$  按照下式做无量纲化处理:

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{\max x_i - x_{ij}}{\max x_i - \min x_i} & \text{成本型指标} \\ \frac{x_{ij} - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} & \text{效益型指标} \end{cases} \quad (8)$$

(4) 将 IOWA 算子求得的指标相对权重  $w_i^*$  与新向量  $\mathbf{X}'_i$  加权, 得到加权矩阵  $\mathbf{X}$ :

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}'_i * w_i^{*T} \quad (9)$$

(5) 确定理想目标向量  $\mathbf{X}^*$ 。

(6) 求解待评价目标评分向量与理想目标向量的夹角余弦值  $\rho_i$ 。

(7) 求解敏感性系数  $\alpha$ , 得到敏感性指标。

## 4 实例分析

2021 年 7 月 20 日郑州市遭遇极端特大暴雨, 累计降雨量 622.7 mm, 最大 1 h 降雨量 201.9 mm, 导致郑州地铁 5 号线五龙口停车场及其周边区域发生严重积水现象。下午 16:00 左右, 停车场积水冲垮防汛挡板和挡水墙, 洪水迅速灌入正线区间, 列车 04502 车次被迫停留在海滩寺站, 最终造成 14 人伤亡的重大安全事故。

### 4.1 计算指标权重

为确保专家打分结果的科学性, 向被调查对象包括但不限于设计、施工、监理和政府应急管理人員等发放共计 200 份问卷, 有效收回 180 份, 有

效收回率 90%。利用 SPSS 对有效收回的 180 份问卷结果再次处理并满足克朗巴哈信度系数  $0.79 > 0.60$ 、巴特利检验  $KMO 0.87 > 0.70$ 、巴特利球度检验  $P$  值  $Sig0.038 < 0.050$  的要求。从有效问卷中随机抽取 5 个专家打分结果作为指标重要性判断依据, 以  $A_{11} \sim A_{16}$  指标为例展示权重计算步骤, 指标得分见表 2。

表 2 二级指标决策数据

Tab. 2 Decision data of secondary indicators

二级指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
$A_{11}$	[0.3 0.5]	[0.4 0.5]	[0.4 0.5]	[0.4 0.6]	[0.6 0.7]
$A_{12}$	[0.4 0.6]	[0.3 0.5]	[0.4 0.6]	[0.7 0.9]	[0.5 0.6]
$A_{13}$	[0.2 0.4]	[0.4 0.6]	[0.5 0.6]	[0.4 0.5]	[0.7 0.8]
$A_{14}$	[0.4 0.5]	[0.4 0.6]	[0.6 0.7]	[0.5 0.7]	[0.3 0.5]
$A_{15}$	[0.5 0.7]	[0.4 0.5]	[0.3 0.4]	[0.4 0.6]	[0.7 0.9]
$A_{16}$	[0.5 0.6]	[0.5 0.7]	[0.4 0.6]	[0.4 0.5]	[0.8 0.9]

首先对不良地质发育情况指标  $A_{15}$  初始得分按升序规则重新排序, 得到新数据  $\bar{b}_{15} = ([0.3 0.5], [0.4 0.5], [0.4 0.6], [0.5 0.7], [0.7 0.9])$ 。

由式(1)、(2)得到权向量  $\mathbf{P}_{15} = (0.156, 0.419, 0.587, 0.631, 0.582)$ 。

由式(3)得  $A_{15}$  区间边界权重  $\omega_{15}^L = 0.401$ 、 $\omega_{15}^U = 0.447$ 。由式(4)并结合  $\theta$  系数得到绝对权重  $w_{15} = 0.424$ 。

同理,  $A_{11}$ 、 $A_{12}$ 、 $A_{13}$ 、 $A_{14}$ 、 $A_{16}$  指标的绝对权重分别为  $w_{11} = 0.097$ 、 $w_{12} = 0.109$ 、 $w_{13} = 0.119$ 、 $w_{14} = 0.253$ 、 $w_{16} = 0.289$ 。利用式(5)得到一级指标相对权重  $\mathbf{w}_1^* = (0.075, 0.084, 0.092, 0.196, 0.328, 0.224)$ 。

其余指标相对权重分别为  $\mathbf{w}_2^* = (0.131, 0.148, 0.175, 0.182, 0.079, 0.102, 0.193)$ 、 $\mathbf{w}_3^* = (0.156, 0.148, 0.142, 0.193, 0.178, 0.132, 0.101)$ 、 $\mathbf{w}^* = (0.345, 0.264, 0.391)$ 。

### 4.2 向量夹角余弦综合分析

#### 4.2.1 向量夹角余弦计算

利用式(8)对指标进行无量纲化处理, 得到新向量  $\mathbf{X}'_i$ 。利用式(9)加权合成新向量  $\mathbf{X}'_i$  与指标相对权重, 得到加权矩阵  $\mathbf{X} = (0.632, 0.315, 0.583, 0.618, 0.637, 0.243, 0.463, 0.685, 0.864, 0.674, 0.239, 0.365, 0.717, 0.842, 0.818, 0.375, 0.385, 0.294, 0.381, 0.939)^T$ ; 考虑到各指标得分越趋近于 1 越好, 令理想目标向量  $\mathbf{X}^* = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T$ 。

运用式(6)计算待评价目标向量与理想目标向量得夹角余弦值  $\rho = \cos \langle \mathbf{X}_1, \mathbf{X}^* \rangle = 0.689$ 。结合表 1 地铁车站暴雨内涝脆弱性等级可知, 郑州地铁 5 号线海滩寺站脆弱性等级为 IV 级, 属于

高度危险。

#### 4.2.2 敏感性分析

为进一步确定地铁车站暴雨内涝脆弱性敏感性指标,根据式(7)求得指标敏感性系数,见图 1。

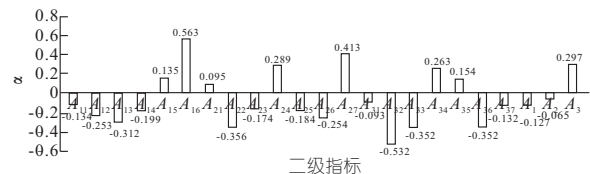


图 1 指标敏感性系数

Fig. 1 Index sensitivity coefficient

由图 1 可知,不良地质条件发育情况  $A_{15}$ 、不良周边环境要素  $A_{16}$ 、挡水墙高度  $A_{21}$ 、防汛挡板高度  $A_{24}$ 、出入口周围地势情况  $A_{27}$ 、行车指挥调度水平  $A_{34}$ 、防汛应急预案编制  $A_{35}$  7 个二级指标和响应指标  $A_3$  1 个一级指标的敏感性系数大于 0,说明这 8 个指标对地铁车站暴雨内涝脆弱性影响较大,构成敏感性指标。

#### 4.2.3 计算结果与调查报告对比分析

《河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告》将地铁 5 号线暴雨内涝原因总结为:①停车场挡水围墙高度不合格,未严格按“百年一遇”0.5 m 高度标准设计。②五龙口停车场地势低洼,附近明沟排涝功能严重受损,积水冲垮挡水板,造成雨水倒灌海滩寺车站内部。③郑州地铁集团有限公司防汛应急预案编制不完善,事发整个过程均未启动应急响应。④出现险情时,司机违规操作,形成调度能力差。将调查报告结论与单因素敏感性分析结果对比发现,两者均认为挡水墙高度、防汛挡板高度、出入口周围地势情况、行车指挥调度水平、防汛应急预案编制、应急响应滞后是造成地铁车站暴雨内涝的主要原因,存在高度契合,验证了本文方法的科学适用性。

#### 4.3 地铁车站暴雨内涝脆弱性管理建议

(1)加强地铁车站前期规划设计环节管理。在设计环节充分考虑车站所处位置地势情况,避开低洼地段,增加车站抗洪涝能力。

(2)规范施工程序。严禁为了赶工期,违规采用白图施工,做好设计交底及施工前交底工作,严格把控工程质量,尤其关注防汛挡板、挡水墙是否按规范要求施工,杜绝偷工减料、不按图纸施工等现象发生。

(3)加强行车调度沟通协作能力。对于突发险情,车站主任调员根据掌握的列车现场险情,及时果断按《城市轨道交通行车组织管理办法》中规定采取措施,快速疏散人员。

(4)细化地铁应急预案。明确各单位主体在

地铁运营防汛方面的工作职责,各单位主体根据工作职责完成本单位内部防汛专项方案。在汛情发生前期做好应急物质准备和车站周边排水沟、防汛挡板等巡检工作,确保物质准备充分、挡水、排水顺畅。

(5)各单位做好质量把控。对于发现的施工质量问题和质量缺陷,限定责任单位及时整改,做好项目竣工验收工作。

## 5 结论

a. 引入单因素敏感性分析法分析 PSR 理论构建的地铁车站暴雨内涝脆弱性评价指标,得出 8 个敏感性指标,并针对敏感性指标提出合理应对措施,以期提升地铁车站暴雨内涝管理水平。

b. 将该方法应用在郑州地铁 5 号线海滩寺站暴雨内涝脆弱性评价中,认为海滩寺站暴雨内涝脆弱性等级为 IV 级,属于高度危险。此外,单因素敏感性分析结果与事故调查原因分析高度契合,验证了本文提出方法的科学性,为地铁车站暴雨内涝脆弱性评价提供了新方法。

#### 参考文献:

- [1] 张金萍,孔令立,左其亭. 郑州市“7.20”暴雨与 10 年一遇设计暴雨条件下的积水特性对比分析[J]. 水电能源科学,2022,40(9):1-5.
- [2] DI FEBBRARO A, GIGLIO D, SACCO N. On analyzing the vulnerabilities of a railway network with Petri nets [J]. Transportation research procedia, 2017, 27:553-560.
- [3] 宋守信,肖楚阳,翟怀远,等. 基于脆弱性理论的地铁电气火灾影响因子研究[J]. 西安科技大学学报, 2016,36(5):691-696.
- [4] 郭露露,苏国锋,路堃,等. 基于复杂网络理论的北京地铁网络脆弱性评估[J]. 工业安全与环保,2017, 43(11):30-34.
- [5] 王军武,吴寒,杨庭友. 基于投影寻踪的地铁车站工程暴雨内涝脆弱性评价[J]. 中国安全科学学报, 2019,29(9):1-7.
- [6] 闫绪娴,王俊丽,范玲,等. 韧性城市视角下地铁洪涝灾害风险分析——基于 Bow-Tie—贝叶斯网络模型[J]. 灾害学,2022,37(2):36-43.
- [7] 张锐,郑华伟,刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. 生态学报,2013,33(16):5090-5100.
- [8] 陈楠. 基于 IOWA 算子的地铁车站深基坑施工安全综合评价[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(2):202-208.
- [9] 颜文. 基于改进 TOPSIS 决策方法的铁路线路方案优选研究[J]. 铁道建筑,2021,61(6):147-150,157.

(下转第 60 页)

支配排序、拥挤度及精英策略方法进行改进,改进后的算法(ABOA)的优越性显著。将 ABOA 算法应用到邯郸市水资源优化配置模型中,为各县缺水问题提供了较好的分配思路及建议。

b. ABOA 算法切换概率  $p$  设定为固定值,未考虑其变化对精度和速度的影响,有待进一步研究。

参考文献:

[1] 江津清. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. 智能城市, 2019, 5(1): 44-45.

[2] ARMAGHANI D J, PHAM B T. Meta-heuristic algorithms in civil engineering [J]. The open construction and building technology journal, 2020, 14 (Suppl-2, M1): 266-267.

[3] ELAZIZ M A, ELSHEIKH A H, OLIVA D, et al. Advanced metaheuristic techniques for mechanical design problems: review [J]. Archives of computational methods in engineering, 2022, 29 (1): 695-

716.

[4] 李琳, 吴鑫淼, 郗志红. 基于改进 NSGA-II 算法的水资源优化配置研究 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 34-37.

[5] 王钰娟, 罗健, 薛晴, 等. 基于混沌高斯扰动布谷鸟算法的水资源优化配置 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (9): 45-49.

[6] LI RUIHUAN, CHANG YINGLI, WANG ZHAOCAI. Study of optimal allocation of water resources in Dujiangyan irrigation district of China based on an improved genetic algorithm [J]. Water supply, 2021, 21(6): 2989-2999.

[7] ARORA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm: A novel approach for global optimization [J]. Soft computing, 2019, 23(3): 715-734.

[8] ZITZLER E, DEB K, THIELE L. Comparison of multi-objective evolutionary algorithms: Empirical results [J]. Evolutionary computation, 2000, 8(2): 173-195.

### Application of Ameliorative Butterfly Optimization Algorithm in Multi-objective Optimal Allocation of Water Resources in Handan City

CHANG Yi-fan<sup>a</sup>, SHA Jin-xia<sup>b</sup>, LIU Bin<sup>a,c</sup>, XU Zhi-heng<sup>a</sup>, SUN Bo-lun<sup>a</sup>

(a. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power; b. School of Earth Science and Engineering; c. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** Optimal allocation of water resources is an important method to effectively relieve the contradiction between the supply and demand of water resources in regions. The traditional butterfly optimization algorithm (BOA) has some defects, such as low search accuracy, slow convergence speed, easy to fall into local optimization and can not be directly used to solve multi-objective optimal allocation of water resources problems. It was improved by introducing the methods of fast non dominated sorting, congestion and elite strategy, and the superiority of the ameliorative butterfly optimization algorithm (ABOA) was verified by using ZTD function. Finally, the ABOA was applied to the optimal allocation model of water resources in Handan, and the scheme with the least water shortage was selected as the final scheme from the Pareto front. The Handan water resources optimal allocation in 2035 ( $p=50\%$ ) yielded a total water demand of 2.74 billion cubic meters, a total water distribution of 2.44 billion cubic meters, and the water shortage was 298 million cubic meters, and the water shortage rate was 10.9%. Domestic and ecological water demand could be fully met. However, the primary, secondary and tertiary sectors were still facing water shortages in different regions, which need to be alleviated by water conservation. The research results can provide a new reference for the solution of multi-objective optimal allocation of water resources.

**Key words:** water resources; multi-objective; optimal allocation; ameliorative butterfly optimization algorithm; Handan City

\*\*\*\*\*  
(上接第 91 页)

### Vulnerability Assessment of Heavy Rainfall and Waterlogging in Subway Stations Based on IOWA-VAC

CHEN Jia<sup>1,2</sup>, LIU Jing-yan<sup>1,2</sup>, DENG Xi<sup>1,2</sup>

(1. Civil Engineering College, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China; 2. Key Laboratory of Building Collapse Mechanism and Disaster Prevention, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** In order to scientifically evaluate vulnerability of heavy rainfall and waterlogging in subway Stations, determine the sensitivity index as well as improve the management level of the heavy rainfall and waterlogging in subway stations, an evaluation method based on IOWA-VAC was proposed. Firstly, an evaluation index system was constructed based on Pressure-State-Response (PSR) theory. Then, the index data was reordered in ascending order by using the IOWA operator, and the final weight of the new data was obtained by introducing coefficients  $\theta$  to dynamically adjust the interval boundary weights. The Vector Angle Cosine (VAC) was introduced to test the closeness of the consistency between the target score vector to be evaluated and the ideal target vector, so as to realize the transformation from algebraic thinking to spatial geometry thinking, and the target grade to be evaluated was obtained. Single factor sensitivity analysis was used to determine the sensitivity index. The practicability of the evaluation model was verified by taking the Yansi station of Zhengzhou Metro Line 5 construction projects as examples. The results show that the vulnerability level of the Yansi station of Zhengzhou Metro Line 5 is IV, with high risk. Thus, it provides feasible suggestion for vulnerability management of heavy rainfall and waterlogging in subway stations.

**Key words:** subway station; heavy rainfall; waterlogging; vulnerability assessment; sensitivity analysis; induced ordered weighted average; vector angle cosine