

胡少华, 张永为, 盛学波, 等. 基于组合赋权-云模型的码头施工安全风险评价[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2273-2283.

HU S H, ZHANG Y W, SHENG X B, et al. Safety risk assessment of wharf construction based on combined weighting and cloud model [J]. Journal of Safety and Environment, 26(6): 2273-2283.

基于组合赋权-云模型的码头施工安全风险评价*

胡少华, 张永为, 盛学波, 毛晓莹

(武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 武汉 430070)

摘要: 码头施工由于交叉作业多、临水作业多、施工环境恶劣等导致事故隐患层出不穷, 且传统评价方法依赖专家经验, 评估结果的主观性较强, 因此优化风险评价模型对降低施工安全风险至关重要。基于系统理论过程分析法 (Systems Theoretic Process Analysis, STPA) 和后果逆向扩散法 (Consequence Reverse Diffusion Method, CRDM) 法, 构建适用于码头施工安全风险评价的指标体系; 运用序关系分析法 (Order Relationship Analysis Method, G1) 与改进 CRITIC 法 (Improved Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, ICRITIC) 分别确定主客观权重; 采用博弈论进行组合赋权, 避免单一赋权方法的片面性; 引入云模型理论将定性指标进行定量化表征, 构建基于组合赋权-云模型的码头施工安全风险评价模型, 并将该模型应用于 Z 码头施工实例。结果显示: 该码头施工综合风险为“一般风险”, 其中桩基工程施工、安全意识、水文条件、安全管理制度建设是影响该码头施工安全的 4 个主要基础指标, 云数字特征期望值分别为 44.80、63.20、46.10、42.20, 评价结果与现场调研的实际情况相符, 验证了方法的可靠性。

关键词: 安全工程; 码头施工; 风险评价; 组合赋权; 云模型

中图分类号: X947 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6094(2026)06-2273-11

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1085

0 引言

码头施工作为港口建设的重要环节, 由于作业环境通常临近水体, 存在风浪、水位、流速等自然因素干扰, 同时施工内容涵盖水下结构、高空作业、大型吊装等复杂工艺流程, 施工过程中交叉作业繁多, 导致其安全风险突出且事故后果严重^[1]。因此, 开展码头施工安全风险评价显得尤为重要。尽管目前已有多种安全评价方法应用于码头施工安全风险分析, 但这些传统方法普遍存在主观性强、评价维度单一及结果应用有限等问题。优化码头施工安全风险评价模型, 对保障人员安全、避免财产损失、提高码头施工安全管理能力具有重要现实意义。

对码头施工进行风险因素识别是开展安全风险评价的基础, 多数学者将人的行为归结为事故的主要致因, 其中 Fabiano 等^[2]用统计方法对码头事故进行分析, 并认为作业人员经验不足是事故发生的主导因素。Lu 等^[3]认为高管人员对码头作业的安全性有较大影响。Ding 等^[4]认为码头事故发生的

主要原因是沟通不明和人为失误。Paul 等^[5]将码头安全事故的引发因素分为偶然、环境和行为因素, 其中行为因素是导致事故的关键。近年来, 码头施工安全风险评价模型的研究也取得了一定成果。2012 年, 张治敏^[6]采用层次分析法和模糊综合评价法构建了模糊综合评价模型, 首次实现了对沿海沉箱码头工程特性风险因素的评价。2013 年, He 等^[7]第一次融合层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 与证据理论法 (Dempster-Shafer, D-S), 并应用于某码头工程施工实例, 为码头施工采用组合方法进行风险评估奠定了基础。Stavrou 等^[8]提出运用模糊推理法 (Fuzzy Inference, FI) 评价港口安全水平, 并通过模糊推理系统 (Fuzzy Inference System, FIS) 得出风险排名。Abdelfattah 等^[9]利用港口安全风险评价 (Port Safety Risk Assessment, PSRA) 法、风险评估与管理工具法 (Risk Assessment and Management Tool Approach, RAMT) 对港口风险进行评价, 结果显示 PSRA 法结果更为合理。2024 年, Wang 等^[10]通过引入建筑信息模型 (Building

* 收稿日期: 2025-06-24

作者简介: 胡少华, 副教授, 博士, 从事工程安全与应急管理、安全监测与信息化、灾害防治理论与技术研究, sh_kxin@whu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42271026)

Information Modeling, BIM) 与模糊综合评价法 (Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)、AHP 法建立了高桩码头施工安全风险评价可视化模型, 并分析高桩码头施工安全风险等级最高的子工艺是钢管桩沉桩施工, 但其模型构建与分析依赖专业软件支持, 应用门槛相对较高, 适用性受限。2017 年, 张俊博等^[11]将熵权和集对分析理论加以组合建立了熵权-集对分析 (Entropy Weight-Set Pair Analysis, EW-SPA) 模型, 对道仁矶海事码头展开了风险评价, 并发现该海事码头安全等级介于安全与一般安全之间, 偏向于安全, 但该模型仅设置了 3 个风险等级, 忽略了较小风险因素的影响, 评价结果的精确性有待进一步提高。周柏霖^[12]采用贝叶斯网络模型 (Bayesian Network Model, BNM), 判断出影响高桩码头施工安全风险的关键影响因素。江帆^[13]采用 AHP 法和 FCE 法对日照港原油码头进行了风险评价。严国全等^[14]通过 AHP 法对水运工程进行建模分析, 并得出影响水运工程风险的相关因素的判断矩阵。张浩^[15]在高桩码头的风险评价方法上进行了创新尝试, 将 AHP 法和 FCE 法相结合, 从而得出风险等级评定。

目前, 关于码头施工安全风险评价的研究仍相对有限, 已有成果虽然在风险识别与评价方法方面取得了一定进展, 但大多数研究仍停留于定性分析或半定量分析阶段, 缺乏系统性强、可操作性强的量化分析框架, 难以全面反映施工过程中的不确定性与多源信息特征, 且采用的单一赋权方法在基于专家评估时, 通常受限于专家的个人经验和知识水平, 容易导致权重分配的主观性。为此, 本文在前人研究的基础上, 结合 Z 码头施工实际情况, 提出一套集风险辨识、指标筛选、组合赋权与评价模型于一体的综合评价方法, 并基于系统理论过程分析 (Systems Theoretic Process Analysis, STPA) 法初步辨识码头施工安全风险因素, 利用后果逆向扩散法 (Consequence Reverse Diffusion Method, CRDM) 对风险因素进行筛选梳理, 构建适用于码头施工安全风险评价指标体系; 采用序关系分析法 (Order Relationship Analysis Method, G1) 与改进标准间相关性法 (Improved Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, ICRITIC) 分别确定指标的主客观权重, 并基于博弈论计算最优组合权重, 以避免单一赋权方法的主观片面性; 依托云模型将具有不确定性的指标信息进行定量化表征, 构建基于组合赋权-云模型的码头施工安全风险评价模型, 并利用正、逆向云发

生器分别生成标准云图与各级指标评价云图, 准确评估码头施工安全风险, 以期直观地展现各级指标的风险评价结果。

1 评价指标体系构建

本文通过互联网收集国内外近 5 a 码头施工发生的 87 起典型事故案例, 参考赵宇等^[16]总结的施工过程中常见的安全事故, 针对 Z 码头施工交叉作业多、临水作业多、桩基工程多、环境条件恶劣等实际情况, 确定码头施工主要事故类型为坍塌、高处坠落、机械伤害、触电、火灾、淹溺、起重伤害 7 类。此外, 利用 STPA 法^[17]根据事故类型确定系统级事故和危害, 建立系统控制反馈结构, 研究控制反馈结构中可能的不安全控制行为, 对致因进行分析, 识别系统中可能存在的风险因素, 并将风险因素按照施工工艺、人为因素、环境条件和管理水平 4 个维度进行分类。采用后果逆向扩散法^[18]对评价指标进行筛选和整理, 从码头施工失事形式出发, 利用“逆向思维、反向扩散、寻根溯源”的逻辑思考过程构建 3 个层次、19 项基础指标的码头施工安全风险评价指标体系, 见图 1。

2 码头施工安全风险评价模型构建

2.1 基于 G1-改进 CRITIC 的组合赋权

针对传统方法在评价时未考虑指标数据多样化和权重分配不合理的问题, 采用博弈论^[19]进行组合赋权以避免单一赋权方法可能带来的偏差。相较于其他主观赋权方法, G1 法适用于评价指标较多且具有随机性、模糊性的决策分析过程, 无需构建指标的判断矩阵和一致性检验, 计算简单快速, 准确性高, 具有更强的操作性和实用性^[20]。采用标准差系数对 CRITIC 法进行改进, 消除指标间量纲和数量级等影响, 对相对系数取绝对值, 消除正负号影响, 该方法在码头施工安全风险评价实际应用中具有较好的实用性^[21]。因此, 本文结合 G1 法和改进 CRITIC 法分别计算主客观权重, 采用博弈论进行线性优化, 实现指标的科学组合赋权, 克服传统方法的局限性。

2.1.1 基于 G1 法的主客观权重确定

G1 法通过邀请多名行业内专家, 对各评价指标重要性程度进行评判和排序, 并根据专家排序结果对相邻指标之间的重要程度进行比较赋值。本文最终根据式 (1) 计算各指标的主客观权重^[20]。

$$\begin{cases} W_{1j} = (1 + \sum_{j=2}^n \prod_{k=j}^n r_k)^{-1} & j = n, n-1, \dots, 3, 2 \\ W_{1j-1} = r_j W_{1j} \end{cases} \quad (1)$$

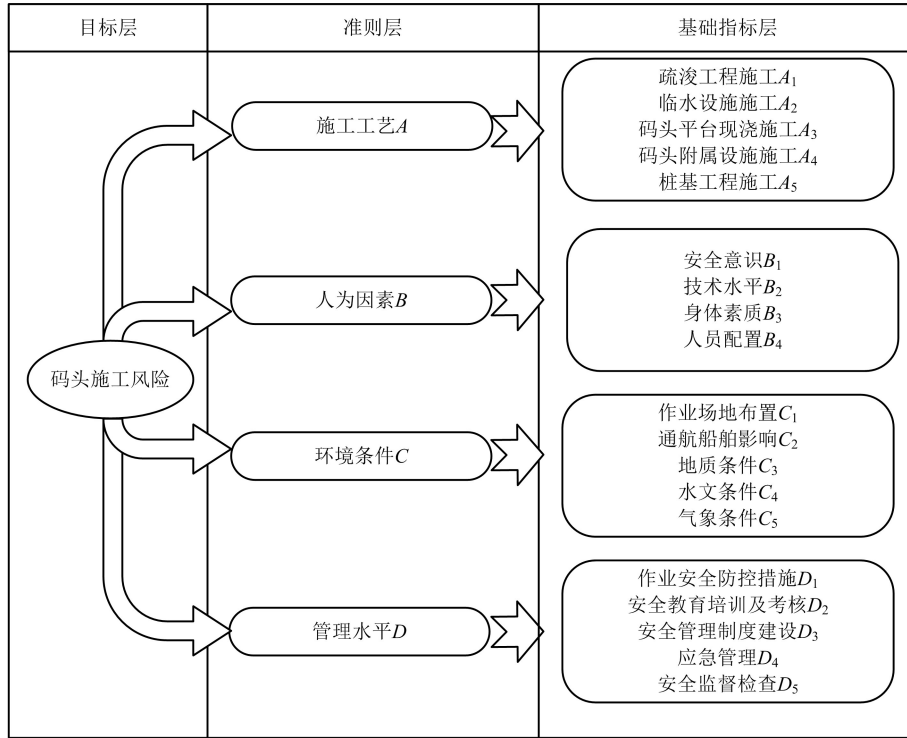


图1 码头施工安全风险评价指标体系

Fig.1 Risk assessment index system for wharf construction

式中 $W_{1,j-1}$ 、 $W_{1,j}$ 分别表示第 $j-1$ 个、第 j 个评价指标的主观权重; r_j 表示第 $j-1$ 个指标与第 j 个指标的相对重要程度。

2.1.2 基于改进 CRITIC 法的客观权重确定

由于不同评价指标之间的量纲以及数量级可能存在较大差异,直接使用标准差进行对比存在缺陷。同时,冲突性与相关系数的绝对值相关,与其正负无关,因此,采用标准差系数对 CRITIC 法进行改进,改进 CRITIC 法计算客观赋权的具体步骤如下^[21]。

(1)数据标准化处理。

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & (\text{正向指标}) \\ \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} & (\text{负向指标}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 x'_{ij} 为第 i 个评价对象在第 j 个指标上经过标准化处理的取值; x_{ij} 为第 i 个评价对象在第 j 个指标上的取值; $x_{\max}$ 为第 j 个指标的最大值; $x_{\min}$ 为第 j 个指标的最小值。

(2)信息量计算。

$$C_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} \sum_{k=1}^n (1 - |r_{kj}|) \quad (3)$$

式中 C_j 为第 j 个指标的信息量; σ_j 、 $\bar{x}_j$ 分别为第 j 项指标的标准差和平均值; r_{kj} 为第 k 项指标与第 j 项

指标之间的相关系数。

(3)确定评价指标权重。

$$W_{2,j} = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (4)$$

式中 $W_{2,j}$ 为第 j 个指标的客观权重。

2.1.3 基于博弈论的组合权重确定

将 G1 法确定的主观权重 W_1 和改进 CRITIC 法确定的客观权重 W_2 作为博弈的两个参与方,通过寻求达到平衡的最优综合权重 W^* 来进行博弈,既避免了主观权重法主观性强,指标赋权存在较大局限性,又避免了客观权重法客观性太强,忽略指标间的相关性。其计算过程如下^[19]。

首先,求得最优组合系数,使 W^* 分别与 W_1 和 W_2 离差总和最小。

$$\begin{cases} W^* = \alpha_1 W_1 + \alpha_2 W_2 \\ \min(\|W^* - W_1\|_2 + \|W^* - W_2\|_2) = \\ \min(\|\alpha_1^* W_1 + \alpha_2^* W_2 - W_1\|_2 + \\ \|\alpha_1^* W_1 + \alpha_2^* W_2 - W_2\|_2) \end{cases} \quad (5)$$

式中 W_1 、 W_2 分别为主、客观权重; α^* 表示最优组合系数, $\alpha_1^* + \alpha_2^* = 1$, $\alpha_1^*, \alpha_2^* \geq 0$ 。

基于矩阵微分运算规则,经推导可得式(5)的

最优一阶导数条件,计算公式为

$$\begin{cases} \alpha_1 W_1 (W_1)^T + \alpha_2 W_1 (W_2)^T = W_1 (W_1)^T \\ \alpha_1 W_2 (W_1)^T + \alpha_2 W_2 (W_2)^T = W_2 (W_2)^T \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)和(6)计算得出 α_1, α_2 , 然后将结果进行归一化处理得到 α_1^*, α_2^* 。各指标最优综合权重计算为

$$W_j^* = \alpha_1^* W_{1,j} + \alpha_2^* W_{2,j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中 W_j^* 为第 j 个指标的组合权重。

2.2 基于云模型的风险评价模型构建

云模型^[22]是建立在模糊数学和概率论理论基础上的概念,云模型的核心思想是将不确定性、模糊性与概率分布相结合,通过不同的云特征参数来描述模糊信息的分布特性,适用于处理复杂系统中的信息和决策问题。码头施工安全受多因素的综合作用,因此引入云模型建立码头施工安全风险评价模型,以提高评价结果的准确性。具体评价流程如下。

(1) 构建标准云。

结合《港口工程施工安全风险评价指南(沿海码头、护岸及防波堤分册)》划分的4个风险等级^[23],参考各建设企业与码头施工安全风险评价经验,为了全方位涵盖风险因素,将码头施工安全风险等级进一步划分为五级,见表1。利用式(8)计算各等级的标准云数字特征 (E_x, E_n, H_e) , 并借助正向云发生器算法生成码头施工安全风险标准评价云图。

$$\begin{cases} \overline{E_x} = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \\ \overline{E_n} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{6} \\ \overline{H_e} = 0.3 \end{cases} \quad (8)$$

式中 $V_{\max}$ 为评价等级区间的评分上限; $V_{\min}$ 为评价等级区间的评分下限。

(2) 确定云数字特征及评价云图。

邀请专家对各指标进行打分,将打分数据整理,输入逆向云发生器,得到相应的云数字特征 (E_x, E_n, H_e) , 计算公式为

$$\begin{cases} E_{x,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \\ E_{n,j} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{ij} - E_{x,j}| \\ H_{e,j} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - E_{x,j})^2 - E_{n,j}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $E_{x,j}, E_{n,j}, H_{e,j}$ 分别为第 j 个指标的期望、熵、超熵; n 为专家数量; x_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个指标的评分。

综合云数字特征在下层指标云数字特征的基础上计算求得,其计算公式为

$$\begin{cases} E_x = \frac{\sum_{j=1}^m E_{x,j} Q_j}{\sum_{j=1}^m Q_j} \\ E_n = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{Q_j^2 E_{n,j}}{\sum_{j=1}^m Q_j^2}}{\sum_{j=1}^m Q_j^2} \\ H_e = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{Q_j^2 H_{e,j}}{\sum_{j=1}^m Q_j^2}}{\sum_{j=1}^m Q_j^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中 E_x, E_n, H_e 分别为综合云指标的期望、熵、超熵; Q_j 为第 j 个指标的权重; m 为指标数量。

依据基础指标层云数字特征,通过式(9)和(10)计算得出相应评价指标云和综合评价云的数字特征。将各级评价指标云的数字特征及云滴数 N 利用正向云发生器产生相应云滴,生成各级指标的评价云图。比较各评价云图与标准云图的相对位置,即可判定各级评价指标以及码头工程施工综合风险评价的风险等级。

表1 标准云的数字特征

Table 1 Digital characteristics of the standard cloud

风险等级	风险值	(E_x, E_n, H_e)	风险描述
较低风险	[0, 20]	(10, 3.33, 0.3)	人员受伤率低,事故后果能够接受
一般风险	(20, 40]	(30, 3.33, 0.3)	容易对施工现场造成轻微损失,及时采取预防措施能制止风险
中等风险	(40, 60]	(50, 3.33, 0.3)	在特定条件下,风险后果可能可以承受,因此需要采取防范措施来管理风险
较高风险	(60, 80]	(70, 3.33, 0.3)	风险后果可能相当严重,可能导致工程受到广泛破坏和人员受重伤,后期需加强风险评价并及时采取安全措施
高度风险	(80, 100]	(90, 3.33, 0.3)	风险情况极为严重,造成不良社会影响,需立刻整改

3 实例分析

3.1 评价对象

以某市 Z 码头施工进行实例分析,该工程位于袁河与赣江交汇处下游,建设岸线长为 1 490 m,建设规模为 15 个 1 000 t 级泊位及其配套工程,整个港区陆域面积约为 778 000 m²。项目施工涉及多工程领域的综合管理,作业队伍数量多,人员流动性大,现场交叉作业多,技术管理与现场施工协调任务重;码头平台与引桥基础均采用钻孔灌注桩,且钻孔灌注桩数量多,累计 1 467 根,工期紧、任务重;现浇结构工程量大,包括钢筋、模板及混凝土工程,存在物体打击、坍塌、淹溺等风险;施工范围大,外部环境相对复杂,外部协调任务重;起重作业多,吊装施工安全风险大;赣江每年 4—6 月为施工河段洪水期,洪水期施工作业安全风险大,连续性作业难度大。

3.2 评价指标权重分析

根据第 1 节建立的评价指标体系,邀请 10 位专家对评价指标进行重要性排序,运用 G1 法确定各指标重要性的排序关系,根据式(1)计算各指标的主观权重。为确保评价结果的合理性与准确性,运用改进 CRITIC 法计算评价指标的客观权重,各指标初始数据见表 2。采用博弈论组合赋权得到最终权重,具体计算结果见表 3。

根据权重计算结果,可以看到主客观权重存在较大差异,采用博弈论组合赋权方法避免了单一方法的局限性。从组合权重可知,“桩基工程施工 A₅(0.110)”“码头平台现浇施工 A₃(0.093)”“码头附属设施施工 A₄(0.072)”“安全意识 B₁(0.094)”“人员配置 B₄(0.077)”“技术水平 B₂(0.070)”为权重较高的关键指标,集中反映了施工工艺与人员因素在码头施工安全风险中的核心影响。针对施工工艺,应严格执行桩基设计要求,进行详细的施工方案审查;对桩基施工过程中的关键节点进行实时监控,及时调整施工方案以应对可能出现的问题;对于码头平台的现浇施工,需严格控制混凝土的配比和浇筑过程中的温度、湿度等环境因素,确保混凝土质量达到设计标准;加强模板、钢筋和混凝土的质量检查,确保施工工艺符合设计要求。针对人员因素,应开展定期的安全意识培训,确保所有人员了解并熟悉工作环境的潜在危险,掌握基础的安全防范措施;将安全教育培训与考核挂钩,确保培训的实际效果,设立安全奖励机制,激励员工积极参与安全管理和安全隐患排查;根据施工的实际需要,合理配置施工人员,确保各项工作任务能够得到充分的人员支持,避免由人力不足导致的安全隐患;对于关键工序或危险作业环节,必须配置经验丰富且经过专门培训的技术人员,避免不熟悉作业流程的人员盲目操作;

表 2 评价指标初始数据
Table 2 Initial data of evaluation indicators

专家	施 工 工 艺 A	疏 浚 工 程 施 工 A ₁	临 水 设 施 施 工 A ₂	码 头 平 台 现 浇 施 工 A ₃	码 头 附 属 设 施 施 工 A ₄	桩 基 工 程 施 工 A ₅	人 为 因 素 B	安 全 意 识 B ₁	技 术 水 平 B ₂	身 体 素 质 B ₃	人 员 配 置 B ₄	环 境 条 件 C	作 业 场 地 布 置 C ₁	通 航 船 舶 影 响 C ₂	地 质 条 件 C ₃	水 文 条 件 C ₄	气 象 条 件 C ₅	作 业 安 全 防 控 措 施 D ₁	管 理 因 素 D	安 全 教 育 培 训 及 考 核 D ₂	安 全 管 理 制 度 建 设 D ₃	应 急 管 理 D ₄	安 全 监 督 检 查 D ₅
专家 Z01	22	15	14	24	16	21	25	23	28	15		16	24	21	14	20	16	16	15		20	23	
专家 Z02	19	17	16	26	14	21	23	24	29	16		19	26	21	16	20	18	18	17		22	22	
专家 Z03	20	16	15	25	15	20	22	22	27	17		18	25	20	20	25	16	20	16		21	23	
专家 Z04	24	14	15	25	15	23	24	25	27	17		18	25	23	16	23	20	22	14		20	21	
专家 Z05	24	14	16	23	16	20	25	23	26	18		17	23	20	17	20	15	19	14		21	20	
专家 Z06	23	16	14	24	15	20	21	21	28	16		16	24	20	18	20	16	18	16		23	24	
专家 Z07	25	16	14	26	14	21	22	21	29	14		18	26	21	16	18	17	20	16		21	22	
专家 Z08	21	18	16	25	16	22	23	22	28	15		17	25	22	15	20	14	19	18		20	24	
专家 Z09	22	17	15	24	15	20	22	20	25	16		16	24	20	14	22	18	18	17		22	21	
专家 Z10	20	17	14	26	14	21	23	21	26	17		18	26	21	16	23	16	18	17		21	23	
原始数据	76 人											6 次/a						24 次/a					

表3 评价指标权重计算结果
Table 3 Calculation results of evaluation index weights

一级评价指标	一级评价指 标主观权重	一级评价指 标客观权重	一级评价指 标组合权重	二级评价指标	二级评价指 标主观权重	二级评价指 标客观权重	二级评价指 标组合权重
施工工艺 A	0.364	0.359	0.361	疏浚工程施工 A_1	0.030	0.051	0.041
				临水设施施工 A_2	0.045	0.047	0.046
				码头平台现浇施工 A_3	0.115	0.072	0.093
				码头附属设施施工 A_4	0.075	0.069	0.072
				桩基工程施工 A_5	0.099	0.121	0.110
人为因素 B	0.268	0.305	0.287	安全意识 B_1	0.108	0.080	0.094
				技术水平 B_2	0.049	0.089	0.070
				身体素质 B_3	0.034	0.059	0.047
				人员配置 B_4	0.077	0.077	0.077
环境条件 C	0.168	0.143	0.156	作业场地布置 C_1	0.049	0.033	0.041
				通航船舶影响 C_2	0.024	0.022	0.023
				地质条件 C_3	0.015	0.027	0.021
				水文条件 C_4	0.050	0.036	0.043
				气象条件 C_5	0.030	0.025	0.027
管理水平 D	0.200	0.193	0.196	作业安全防护措施 D_1	0.064	0.048	0.056
				安全教育培训及考核 D_2	0.047	0.066	0.057
				安全管理制度建设 D_3	0.044	0.047	0.046
				应急管理 D_4	0.028	0.020	0.024
				安全监督检查 D_5	0.017	0.011	0.014

加强技术团队的建设,配备经验丰富的技术人员,定期组织技术交流与培训,提高团队的专业技术水平和应急处理能力。

3.3 基于云模型的风险评价分析

(1) 二级指标评价结果分析。

邀请10名专家对码头施工安全风险评价指标进行打分,采用逆向云发生器计算打分结果,根据式(9)计算各二级评价指标的云数字特征,具体结果见表4。

将云数字特征输入正向云发生器,设置云滴数 $N=4\ 000$,从而输出二级评价指标的评价云图,见图2。

分析图2可得各二级指标的评价结果。从“人为因素 B”来看,“安全意识 B_1 ”趋于较高风险,表明该码头施工人员安全意识比较薄弱,应加强安全培训,并强化安全检查和监督。从“施工工艺 A”“环境条件 C”“管理水平 D”来看,“桩基工程施工 A_5 ”“水

文条件 C_4 ”“安全管理制度建设 D_3 ”趋于中等风险,表明该码头桩基工程施工工艺复杂,桩基数量多、单桩深度大,且受地质条件影响,导致施工过程中面临成孔困难、垂直度控制不稳定、桩底清孔不彻底等风险,增加了施工质量和安全管理的难度。水文条件以汛期洪水威胁为主,季节性水位波动大,对工程连续性与安全性构成挑战。施工安全管理制度方面还不够完善,存在执行不力的情况,应强化沟通协作、完善制度、明确责任。

(2) 一级指标评价结果分析。

一级评价指标云根据各二级评价指标组合权重和云数字特征计算得出,由式(9)可以计算二级评价指标所属一级指标评价云数字特征,计算结果见表5。

各一级指标评价云图见图3。

由图3一级指标评价云图可知,“施工工艺 A”“环境条件 C”和“管理水平 D”指标趋向于“一般风

表 4 专家评分及二级指标云数字特征

Table 4 Expert scores and cloud digital characteristics of secondary indicators

专家	疏浚 工程 施工	临水 设施 施工	码头平 台现浇 施工	码头附 属设施 施工	桩基 工程 施工	安全 意识 B_1	技术 水平 B_2	身体 素质 B_3	人员 配置 B_4	作业 场地 布置 C_1	通航 船舶 影响 C_2	地质 条件 C_3	水文 条件 C_4	气象 条件 C_5	作业安 全防控 措施 D_1	安全教 育培训 及考核 D_2	安全管 理制度 建设 D_3	应急 管理 D_4	安全 监督 检查 D_5
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5															
专家 Z01	15	14	30	20	44	62	28	15	43	34	21	14	40	16	18	23	40	32	16
专家 Z02	17	16	29	21	46	60	29	16	44	36	21	16	40	18	16	24	42	33	18
专家 Z03	16	15	30	18	46	61	27	17	42	35	20	20	45	16	17	23	43	34	17
专家 Z04	14	15	28	18	45	63	27	17	45	35	23	16	43	20	17	26	40	34	17
专家 Z05	14	16	27	20	44	60	26	18	43	33	20	17	40	15	15	21	44	31	16
专家 Z06	16	14	31	17	46	69	28	16	41	34	20	18	40	16	16	20	43	30	18
专家 Z07	16	14	29	19	45	68	29	14	41	36	21	16	48	17	18	24	44	33	20
专家 Z08	18	16	31	19	45	68	28	15	42	35	22	15	40	14	16	23	40	34	15
专家 Z09	17	15	28	21	44	60	25	16	40	34	20	14	42	18	17	24	41	31	16
专家 Z10	17	14	30	17	43	61	26	17	41	36	21	16	43	16	16	25	42	33	18
E_x	11.5	16.0	29.3	19.0	44.8	63.2	27.3	16.1	41.9	34.8	20.9	16.2	46.1	16.6	16.6	23.3	42.2	32.5	17.1
E_n	1.13	1.25	1.37	1.50	1.05	3.86	1.37	1.15	1.55	1.05	0.90	1.20	2.66	1.65	1.00	1.63	1.65	1.50	1.40
H_e	0.36	0.46	0.38	0.28	0.34	0.15	0.26	0.32	0.28	0.20	0.42	0.49	0.48	0.44	0.29	0.32	0.33	0.25	0.36

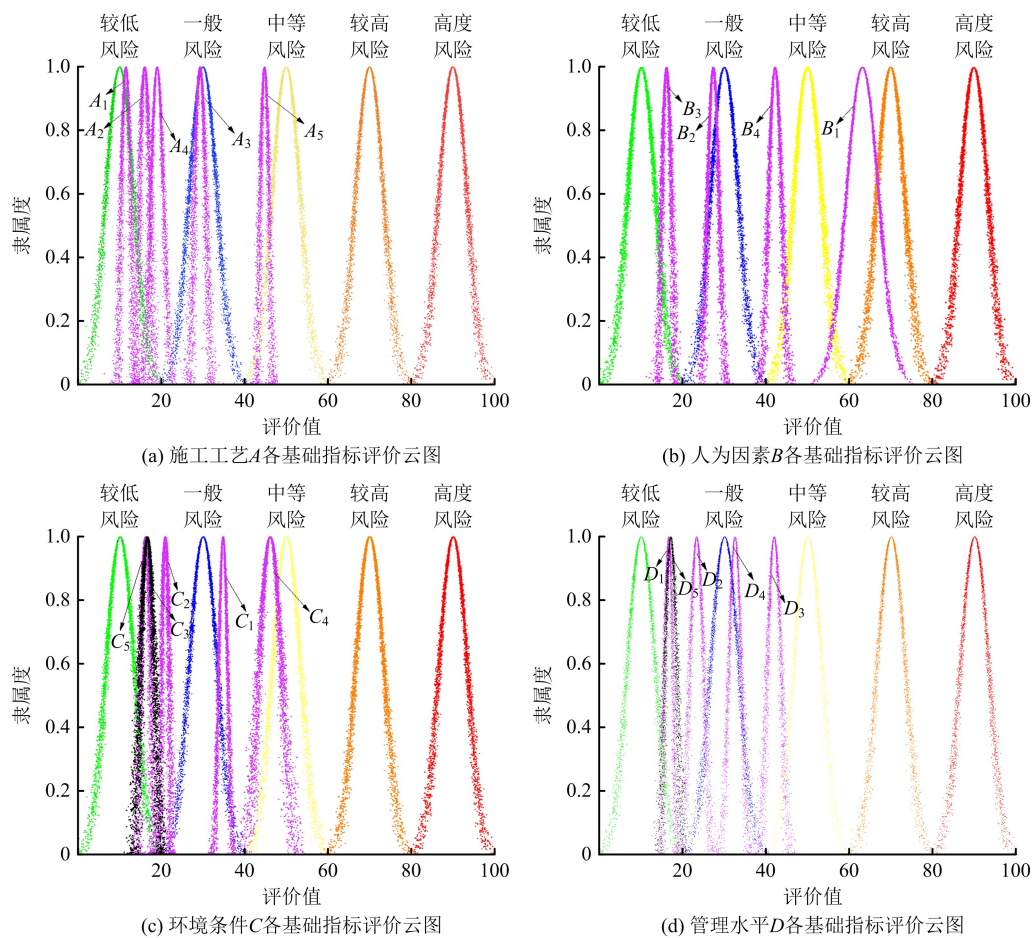


图 2 二级指标评价云图

Fig. 2 Cloud map of secondary index evaluation

险”;“人为因素 B ”指标云趋向于“中等风险”,表明人员安全意识和技术水平等存在短板,是当前码头施工中难以控制的不确定因素,因此加强人因管理是风险控制的关键。

(3) 综合风险评价结果分析。

表 5 一级指标云数字特征
Table 5 Cloud digital characteristics of first-level indicators

评价指标	云数字特征		
	期望 E_x	熵 E_n	超熵 H_e
施工工艺 A	28.67	0.61	0.06
人为因素 B	38.08	1.12	0.14
环境条件 C	28.19	1.19	0.11
管理水平 D	26.42	0.78	0.15

码头施工综合风险评价云是一级指标的综合云,通过式(10)计算得出综合风险评价云的数字特征为 $C = (28.67, 0.62, 0.06)$,生成综合风险评价云图见图 4。

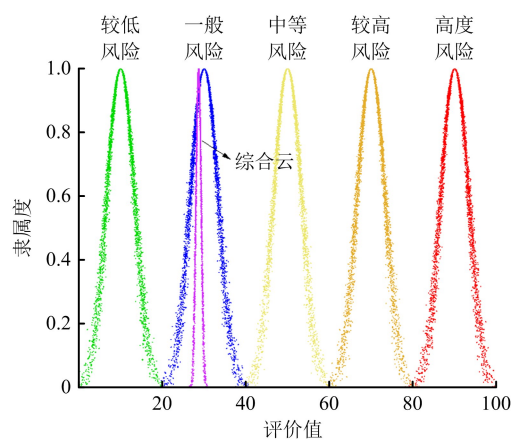


图 4 Z 港码头工程施工综合风险评价云图

Fig. 4 Cloud map of the comprehensive risk assessment for the construction of the Z Port Wharf Project

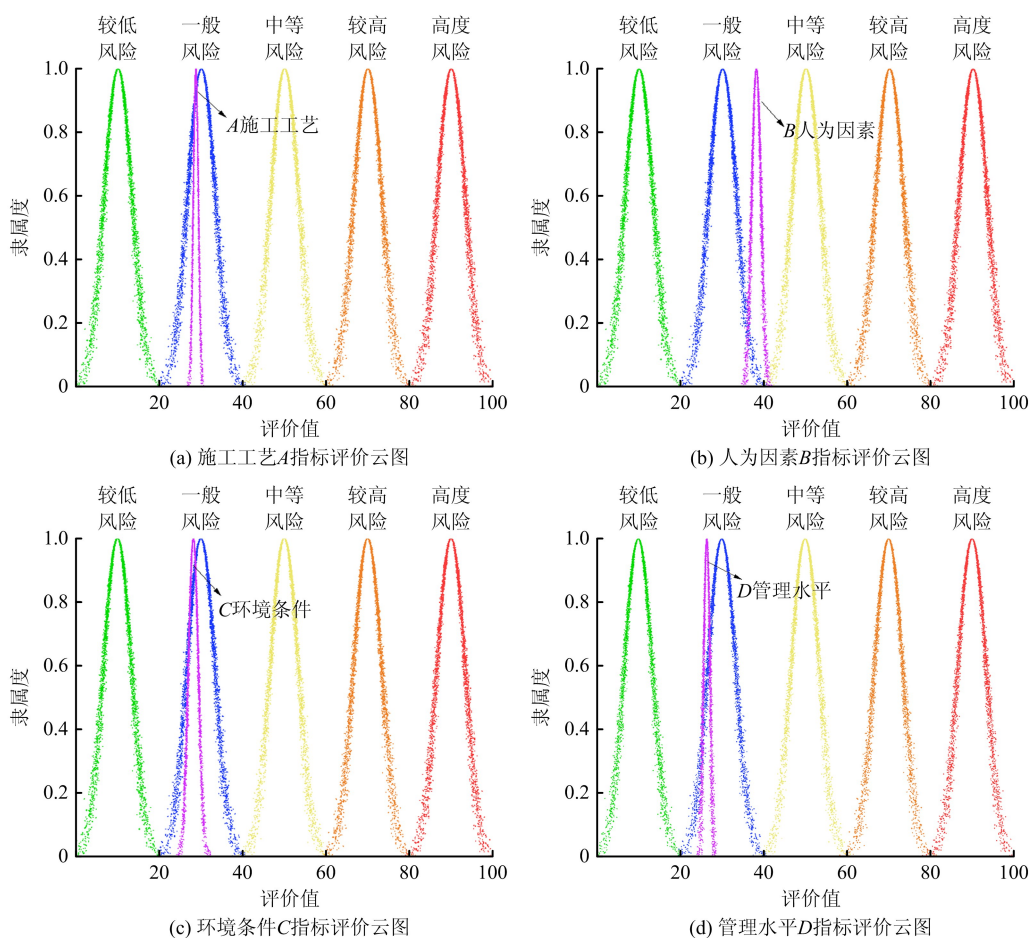


图 3 一级指标评价云图

Fig. 3 Cloud map of the first-level indicator evaluation

由图 4 可知,根据综合评价云图的云滴主要分布区域可判断该码头施工项目的整体安全风险等级为“一般风险”,结合二级指标和基础指标的分析结果,发现该码头施工过程中虽然尚未出现严重安全事件,但部分主要影响因素仍存在一定的不确定性和潜在危险,可能在违章作业、不利外部环境、管理疏漏等情况下引发事故,建设单位应以安全风险评价结果为指导进一步加强对现场施工的全过程管理,全面降低码头施工安全风险。

4 结 论

本文以码头施工安全风险为研究对象,开展了码头施工过程中的安全风险评价指标体系构建、评价指标组合赋权、风险评价模型构建及安全评价工作,主要结论如下。

(1) 针对码头施工的特点,基于 STPA 全面辨识码头施工过程中可能存在的风险因素,利用后果逆向扩散法对风险因子进行筛选整理,构建了 3 个层次、19 个基础指标层的码头施工安全风险评价指标体系,避免了评价指标之间信息冗余等问题。

(2) 为了避免单一赋权方法的片面性,通过 G1 法与改进 CRITIC 法分别确定评价指标的主客观权重,并采用博弈论计算指标组合权重,使评价更全面客观。

(3) 利用云模型将定性指标进行定量化表征,构建组合赋权-云模型的码头施工安全风险评价模型,并将其应用于 Z 码头施工安全风险评价。结果显示:该码头处于“一般风险”,其中基础指标层的桩基工程施工、安全意识、水文条件、安全管理制度建设是码头施工安全主要影响因素,云数字特征期望值分别为:44.80、63.20、46.10、42.20,在安全管控工作中应重点关注。

本文构建了组合赋权-云模型的码头工程施工安全风险评价模型,并将其应用于 Z 码头施工安全风险量化评估,评价结果与第三方评价机构出具的风险评估报告基本一致,表明此方法能准确评估码头施工安全风险等级和主要影响因素。对比其他评估模型,该模型不仅能对码头工程施工安全风险进行准确的定量化评估,而且利用组合赋权的方法避免了单一赋权方法的片面性,进一步提高了评估结

果的准确性,能为后续安全管理措施的制定提供更为可靠、更细致的依据。但不同类型的码头施工工艺可能有所差异,在实际应用中可能需要修改指标体系中“施工工艺 A”指标层下的基础指标,以适应不同规模和类型的码头施工安全风险评估。

参考文献 (References):

- [1] 赵伊格. H 港高桩码头项目施工安全风险管理研究 [D]. 天津: 天津财经大学, 2021.
ZHAO Y G. Research on construction safety risk management of H port high piled wharf project [D]. Tianjin: Tianjin University of Finance and Economics, 2021.
- [2] FABIANO B, REVERBERI A. Port safety and the container revolution: a statistical study on human factor and occupational accidents over the long period [J]. Safety Science, 2010, 48(8): 980–990.
- [3] LU C, YANG C. Safety leadership and safety behavior in container terminal operations [J]. Safety Science, 2010, 48(2): 123–134.
- [4] DING J F, TENG W J. Fuzzy risk assessment on safety operations for exclusive container terminals at Kaohsiung port in Taiwan [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2013, 227(2): 208–220.
- [5] PAUL P S, MAITI J. The role of behavioral factors on safety management in underground mines [J]. Safety Science, 2007, 45(4): 449–471.
- [6] 张治敏. 沿海沉箱码头施工安全风险评估及安全控制研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
ZHANG Z M. Research of coastal caisson wharf construction safety & safety control [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [7] HE Y, JIAO L Z, JIANG C F. Wharf risk assessment based on AHP & D-S evidence theory [J]. Advanced Materials Research, 2013, 2592(779/780): 769–773.
- [8] STAVROU D, VENTIKOS N P, YANG Z L. Benchmarking container port security risks by applying a FIS methodology [J]. International Journal of Shipping and Transport Logistics, 2018, 10(4): 377–405.
- [9] ABDELFAH M, ELSANYEH M E, ABDELKADER S. A proposed port security risk assessment approach with application to a hypothetical port [J]. Australian Journal

- of Maritime & Ocean Affairs, 2022, 14(1): 21–38.
- [10] WANG Z, YUAN Y. Construction safety risk assessment of high-pile wharf: a case study in China [J]. Buildings, 2024, 14(5): 1189.
- [11] 张俊博, 刘明俊, 李晓磊, 等. 基于 EW-SPA 模型的海事码头安全评价[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(5): 1673–1676.
- ZHANG J B, LIU M J, LI X L, et al. On the safety status-in-situ evaluation for the maritime terminal based on the EW-SPA model [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(5): 1673–1676.
- [12] 周柏霖. 多影响因素下沿海高桩码头施工安全风险评价研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- ZHOU B L. Research on safety risk assessment of coastal high-pile wharf construction under multi influence factors [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [13] 江帆. 日照港 30 万吨级原油码头建设项目(二期)施工风险管理[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- JIANG F. Risk management of the construction project of 300 000-ton crude oil terminal of Rizhao Port [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [14] 严国全, 陈宏伟. 层次分析法在水运工程施工监理风险分析评价中的研究应用[J]. 技术与市场, 2017, 24(12): 230–235.
- YAN G Q, CHEN H W. Study on application of AHP in risk analysis and evaluation of construction supervision in port and waterway engineering [J]. Technology and Market, 2017, 24(12): 230–235.
- [15] 张浩. 基于高桩码头上部结构风险评价算法对比分析[J]. 港工技术, 2016, 53(12): 10–15.
- ZHANG H. Comparison and analysis on algorithms used in risk assessment for piled-berth superstructures [J]. Port Engineering Technology, 2016, 53(12): 10–15.
- [16] 赵宇, 夏扬, 苏志军. 安全生产重大危险源分析和现代化安全体系架构[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(增刊2): 897–901.
- ZHAO Y, XIA Y, SU Z J. Safety production of major hazard source analysis and modern safety system architecture [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(Suppl. 2): 897–901.
- [17] 黄杰利, 甘旭升, 魏潇龙, 等. 基于 STPA 方法的航空事故网络关键节点分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 1993–2002.
- HUANG J L, GAN X S, WEI X L, et al. Analysis of key nodes in aviation accident network based on STPA method[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(4): 1993–2002.
- [18] 冯峰, 倪广恒, 何宏谋. 基于逆向扩散和分层赋权的黄河堤防工程安全评价[J]. 水利学报, 2014, 45(9): 1048–1056.
- FENG F, NI G H, HE H M. Research on safety evaluation of Yellow River embankment based on consequence-reverse-diffusion and layered-weight method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9): 1048–1056.
- [19] 姜安民, 张道兵, 王飞飞, 等. 地下转露天开采下伏空区稳定性风险预测模型研究[J/OL]. 安全与环境学报: 1–16 [2025–06–20]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094>. 2024. 2017.
- JIANG A M, ZHANG D B, WANG F F, et al. Research on stability risk prediction model for underlying goaf in underground to open-pit transition [J/OL]. Journal of Safety and Environment: 1–16 [2025–06–20]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094>. 2024. 2017.
- [20] ZHANG X. A comprehensive evaluation of vehicle intelligent barrier avoidance function under special roads based on G1-CRITIC [J]. Sustainability, 2023 (15): 12093.
- [21] ZHOU S, YANG P. Risk management in distributed wind energy implementing analytic hierarchy process [J]. Renewable Energy, 2020, 150: 616–623.
- [22] 于景飞, 刘俊俊. 组合赋权-云模型的变电站检修风险评价[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(9): 3315–3324.
- YU J F, LIU J J. Risk assessment of substation maintenance based on combined weighting-cloud model [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(9): 3315–3324.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 港口工程施工安全风险评价指南(沿海码头、护岸及防波堤分册): 交安监发[2017]140号[S]. 北京: 交通运输部, 2017.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guidelines for safety risk assessment of port engineering construction (volume for coastal terminals, revetments, and breakwaters): Jiao An Jian Fa [2017] No. 140 [S]. Beijing: Ministry of Transport, 2017.

Safety risk assessment of wharf construction based on combined weighting and cloud model

HU Shaohua, ZHANG Yongwei, SHENG Xuebo, MAO Xiaoxuan

(School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To optimize the safety risk assessment model for wharf construction, accident causation was analyzed based on major accident types using the System Theoretic Process Analysis (STPA) method. The Consequence Reverse Diffusion Method (CRDM) was then used to screen and structure key risk factors. Based on this, a safety risk assessment index system for wharf construction was established, consisting of three hierarchical levels: four first-level indicators—construction technology, human factors, environmental conditions, and management level—and nineteen basic indicators, such as dredging works and waterside facility construction. The G1 order relation analysis method and the Improved Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (ICRITIC) method were applied to determine subjective and objective weights, respectively. Game theory was introduced to integrate these weights, thereby overcoming the limitations of using a single weighting method. To improve assessment accuracy, a Cloud Model was incorporated to transform qualitative indicators into quantitative descriptions and to determine the corresponding risk levels. Using these methods, a wharf construction safety risk assessment model that integrates combined weighting and the cloud model was developed and applied in a case study of Z Wharf construction. The results show that the comprehensive risk cloud digital characteristics of the project are (28.67, 0.62, 0.06), which corresponds to a “general risk” level. Among the first-level indicators, human factors present the highest risk, with cloud digital characteristics of (38.08, 1.12, 0.14), approaching a “moderate risk” level, highlighting that human factor management is crucial for effective risk control. At the basic indicator level, pile foundation construction, safety awareness, hydrological conditions, and safety management system development show relatively high expectation values of 44.80, 63.20, 46.10, and 42.20, respectively, indicating that these factors are the primary contributors to safety risk in wharf construction and should be prioritized in future safety management efforts. The assessment results align well with those reported by a third-party safety assessment agency, confirming the accuracy and applicability of the proposed method and providing a reliable reference for quantitative safety risk assessments in wharf construction.

Key words: safety engineering; wharf construction; risk assessment; combined weighting; cloud model