

## 基于二维云模型的深基坑施工风险评价方法

黄震<sup>1,2</sup>, 曹琛<sup>1</sup>, 张薇<sup>1</sup>, 马少坤<sup>1,2</sup>

(1. 广西大学 土木工程与建筑学院, 广西 南宁 530004;

2. 广西大学 防灾与结构安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 为兼顾深基坑施工风险评估中涉及的模糊和随机不确定性, 提出了基于二维云模型和 $3E_n$ 规则的深基坑施工风险评价方法. 首先, 辨识了深基坑施工风险源, 建立了多因素施工风险评价指标体系; 其次, 根据工程情况采用德尔菲法初步判定评价指标重要性, 采用层次分析法和熵权法确定评价指标的主客观权重, 获得综合权重; 然后, 根据风险评价准则和正向云发生器生成二维标准云和综合云; 最后, 利用云模型的 $3E_n$ 规则和综合云云滴分布概率, 快速判断风险等级的隶属度. 运用提出的风险评价方法预测了南宁市某深基坑工程施工风险等级, 与传统模糊综合风险评价方法对比, 该评价方法具有可靠性.

**关键词:** 基坑工程; 风险评价; 云模型; 不确定性分析; 指标体系

中图分类号: TU 43 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)10-1504-09

## Risk Assessment Method of Deep Foundation Pit Construction Based on Two-Dimensional Cloud Model

HUANG Zhen<sup>1,2</sup>, CAO Chen<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, MA Shao-kun<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China. Corresponding author: ZHANG Wei, E-mail: zw971126la\_lune@163.com)

**Abstract:** In order to take into account the fuzzy and random uncertainty involved in risk assessment of deep foundation pit construction, a risk assessment method for deep foundation pit construction based on two-dimensional cloud model and  $3E_n$  rule is proposed. Firstly, the risk sources of deep foundation pit construction are identified, and the construction risk assessment index system composed of risk factors is established. Secondly, based on the engineering situation, the Delphi method is used to preliminary determine. Furthermore, the subjective and objective weights of the assessment indexes are determined by the analytic hierarchy process and entropy weight method, and the comprehensive weights are obtained. Then, the two-dimensional standard cloud and synthesized cloud are generated according to the risk assessment criteria and the forward cloud generator. Finally, the  $3E_n$  rule of the cloud model and the distribution probability of synthesized cloud droplets are used to judge the risk level membership. The proposed risk assessment method is applied to predict the construction risk level of a deep foundation pit project in Nanning city. Compared with the traditional fuzzy comprehensive risk assessment method, the reliability of the assessment method is verified.

**Key words:** foundation pit engineering; risk assessment; cloud model; uncertainty analysis; index system

深基坑工程是复杂的系统工程, 施工中极易发生风险事故<sup>[1]</sup>. 深基坑工程的风险评价工作是预测风险等级的必要环节, 是降低风险事故发生

概率的重要基础. 然而, 风险不可避免地与不确定性联系在一起, 这种不确定性包含了风险评价中涉及的模糊不确定性和随机不确定性, 增加了

深基坑施工风险准确预测难度<sup>[2]</sup>.因此,深基坑工程施工风险评估的不确定性是亟待突破的难点问题.

风险不确定性的定量表征和处理仍是当前风险分析领域的研究焦点<sup>[3]</sup>.近年来,为了分析不确定性对深基坑施工风险评价结果的影响,众多学者基于模糊、概率、贝叶斯网络等理论提出了系列有价值的评价方法,如模糊综合评价法<sup>[2]</sup>、证据理论风险分析方法<sup>[4]</sup>、风险耦合评价方法<sup>[5]</sup>、模糊熵-云理论评价方法<sup>[6]</sup>、改进风险矩阵分析方法<sup>[7]</sup>、逐步权重评估比率分析-综合风险评估法<sup>[8]</sup>、基于C-OWA操作的模糊综合评价方法<sup>[9]</sup>、基于风险分解结构矩阵-粒子群优化的动态风险评估方法<sup>[10]</sup>等.这些评价模型多属于传统风险评估模型或基于传统模型进行改进,虽然解决了风险评估中遇到的风险辨识、指标权重确定、模糊不确定性以及风险隶属度等问题,但仍需要从以下方面进一步完善:①现有大多数评价方法的评价过程和结果是不可视的,且计算步骤繁琐,分析流程复杂,增大了风险分析人员的实施难度;②对于风险的模糊和随机不确定性考虑不够全面,如模糊数学中的隶属度函数仅能反映评价系统的模糊性,却无法兼顾系统的随机性,降低了风险评估结果的准确性.

鉴于此,针对深基坑工程施工风险提出了基于二维云模型的风险评价方法.该评价方法综合考虑了风险的模糊和随机不确定性问题,为准确评价深基坑工程施工风险提供了新的解决方法.

## 1 二维云模型

### 1.1 二维云模型数字特征

云理论中引入了期望( $E_x$ ),熵( $E_n$ ),超熵( $H$ ) 3个数字特征,分别表示云滴在论域空间分布的期望、定性概念的不确定性和熵的不确定性(即云的厚度).数字特征将概念的模糊性和随机性有机结合,反映了定性概念的定量特点<sup>[11]</sup>.本研究采用风险发生可能性 $P_K$ ,风险损失 $C$ 二维度中的6个数字特征( $E_{x_1}, E_{x_2}, E_{n_1}, E_{n_2}, H_1, H_2$ )实现深基坑施工风险评价的量化分析.

设 $U\{X_1, X_2\}$ 是一个定量的二维论域, $T(E_{x_1}, E_{x_2}, E_{n_1}, E_{n_2}, H_1, H_2)$ 为与 $U$ 相联系的定性概念.若定量值 $(x_1, x_2)$ ( $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2$ )对于定性概念 $T$ 的隶属度 $\mu_T(x_1, x_2)$ ( $\mu_T(x_1, x_2) \in [0, 1]$ )是一个具有稳定

倾向的随机数, $(x_1, x_2)$ 服从二维正态分布 $(x_1, x_2) \sim (E_{x_1}, E_{x_2}, E_{n_1}^2, E_{n_2}^2)$ ,其中 $(E_{n_1}, E_{n_2}) \sim (E_{n_1}, E_{n_2}, H_1^2, H_2^2)$ ,则隶属度在论域上的分布称为隶属云,也称二维正态云,简称二维云. $(x_1, x_2)$ 为二维云云滴.隶属度计算见式(1):

$$\mu_T(x_1, x_2) = e^{-\left[ \frac{(x_1 - E_{x_1})^2}{2E_{n_1}^2} + \frac{(x_2 - E_{x_2})^2}{2E_{n_2}^2} \right]} \quad (1)$$

### 1.2 云发生器

二维云模型由正向云发生器和逆向云发生器组成.二维标准云2个方向的数字特征( $E_{x_1}, E_{x_2}$ ), ( $E_{n_1}, E_{n_2}$ ), ( $H_1, H_2$ )计算表达式为

$$E_{x_1} = \frac{(x_{1\max} + x_{1\min})}{2}, E_{x_2} = \frac{(x_{2\max} + x_{2\min})}{2} \quad (2)$$

$$E_{n_1} = \frac{(x_{1\max} - x_{1\min})}{6}, E_{n_2} = \frac{(x_{2\max} - x_{2\min})}{6} \quad (3)$$

$$H_1 = H_2 = i = 0.01 \quad (4)$$

式中: $x_{\max}, x_{\min}$ 为定性概念论域的界限值; $i$ 为反映评语模糊域度的常数,选取不同数字作为 $i$ 值,云的厚度会随之变化,本文标准云中 $i$ 取0.01<sup>[12]</sup>.

正向云发生器可以将由二维标准云的数值特征表征的定性概念转换为定量数据,生成二维云.

图1为服从标准正态分布的二维云模型,由2 000个样本组成.可能性和损失分别对应 $x_1$ 和 $x_2$ .

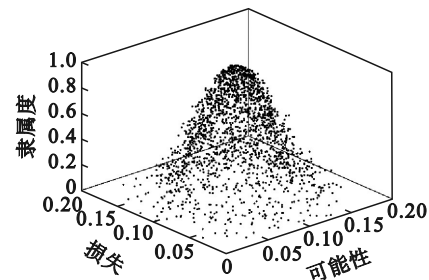


图1 服从标准正态分布的二维云模型

Fig. 1 Two-dimensional cloud model obeying standard normal distribution

逆向云发生器可以实现定量数据到定性概念的转换.对于 $m$ 组服从二维正态云分布的定量数据,通过逆向云发生器可以生成第 $g$ 组数据的特征值( $E_{x_{1g}}, E_{x_{2g}}$ ), ( $E_{n_{1g}}, E_{n_{2g}}$ ), ( $H_{1g}, H_{2g}$ ).逆向云发生器算法如下:

步骤1 利用已知云滴数据,通过式(5)、式(6)计算某组数据的样本均值 $\bar{X}$ 和样本方差 $S$ .

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_1 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{1j} \\ \bar{X}_2 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{2j} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} S_1^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{f=1}^n (x_{1f} - \bar{X}_1)^2, \\ S_2^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{f=1}^n (x_{2f} - \bar{X}_2)^2. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

步骤2 根据步骤1求出的均值和方差进一步计算评价云的期望、熵和超熵.

$$\left. \begin{aligned} E_{x_{1g}} &= \bar{X}_1, \\ E_{x_{2g}} &= \bar{X}_2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{n_{1g}} &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{f=1}^n |x_{1f} - E_{x_{1g}}|, \\ E_{n_{2g}} &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{f=1}^n |x_{2f} - E_{x_{2g}}|. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{1g} &= \sqrt{S_1^2 - E_{n_{1g}}^2}, \\ H_{2g} &= \sqrt{S_2^2 - E_{n_{2g}}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $f$ 表示每组数据中的第 $f$ 个数( $f \in 1 \sim n$ ); $g$ 表示第 $g$ 组数( $g \in 1 \sim m$ ); $n$ 表示每组数据的个数.

基于逆向云发生器计算出的各风险指标评价云的数字特征,结合各指标的权重,可以计算综合云的数字特征(式(10)~式(12)),将各定性指标的语言值综合成为一个更广义的概念语言值,以反映深基坑施工风险等级.

$$E_{x_1} = \frac{\sum_{g=1}^m E_{x_{1g}} E_{n_{1g}} w_{1g}}{\sum_{g=1}^m E_{n_{1g}} w_{1g}}, E_{x_2} = \frac{\sum_{g=1}^m E_{x_{2g}} E_{n_{2g}} w_{2g}}{\sum_{g=1}^m E_{n_{2g}} w_{2g}}; \quad (10)$$

$$E_{n_1} = \sum_{g=1}^m E_{n_{1g}} w_{1g}, E_{n_2} = \sum_{g=1}^m E_{n_{2g}} w_{2g}; \quad (11)$$

$$H_1 = \frac{\sum_{g=1}^m H_{1g} E_{n_{1g}} w_{1g}}{\sum_{g=1}^m E_{n_{1g}} w_{1g}}, H_2 = \frac{\sum_{g=1}^m H_{2g} E_{n_{2g}} w_{2g}}{\sum_{g=1}^m E_{n_{2g}} w_{2g}}. \quad (12)$$

式中: $m$ 为评价指标的个数; $w$ 为评价指标的权重; $w_g$ 为归一化后第 $g$ 个指标的最终权重.

## 2 深基坑施工风险综合评价方法

本研究提出的深基坑风险评价方法主要包括以下4个步骤:①基于风险辨识结果建立层次清晰的风险评价指标体系;②邀请 $q$ 位专家( $Q_1 \sim Q_q$ )对 $m$ 组数据( $M_1 \sim M_m$ )进行评价,综合考虑风险评价指标体系中每层元素的主客观权重,并分析子准则层风险因素对准则层风险造成的损失及可能性;③基于二维云模型的概念生成代表

风险评价准则的二维标准云和代表实际工程案例的二维综合云,并分析两者的关系;④依据标准云-综合云的平面位置关系判断深基坑风险等级隶属度.深基坑风险评价流程如图2所示.

### 2.1 风险评价指标体系

风险辨识是实现风险综合评价的前提条件,准确全面的风险辨识可以提高风险评价的准确性.基于风险辨识结果建立层次分明的评价指标体系能使评价过程更清晰,评价方案更有条理.本研究通过对比验证文献综述<sup>[4-5,8-10]</sup>中的风险辨识结果,收集深基坑风险事故案例资料,比较城市地下空间风险管理规范<sup>[13-14]</sup>,以及岩土工程专家风险访谈等方式对深基坑工程进行风险辨识,得到了合理的深基坑施工风险因素辨识结果如图3所示.

### 2.2 风险准则、评价数据及权重确定

#### 2.2.1 风险评价准则的量化

风险的定义是发生损失的可能性,风险的不确定性具体表现为损失发生与否及损失程度大小的不确定性.本研究提出的评价方法考虑了 $C$ 和 $P_K$ 对深基坑施工风险的影响,并以 $P_K, C$ 为评价维度构建二维云模型以判断施工风险等级.该方法合理利用二维云模型的特点实现了风险的定量表征.表1和表2分别表示 $P_K$ 和 $C$ 的等级标准<sup>[14]</sup>,为研究所需的数据提供了统一的量度.

表3表示综合考虑了 $P_K$ 和 $C$ 的深基坑施工风险评价准则<sup>[14]</sup>.本方法根据表3选取 $P_K, C$ ,隶属度 $\mu_T$ 为坐标轴,按照表3进行网格划分,建立了三维直角坐标系.利用二维云模型快速实现定性-定量不确定性转换的特点,通过正向云发生器将式(2)~式(4)计算所得的特征值转换为云滴,并绘制云图,该云图称为风险评价准则标准云,如图4所示.云图实现了风险评价准则(风险等级)的量化及可视化.

#### 2.2.2 评价数据的获取

在深基坑项目中,虽然部分风险影响因素可以根据勘察和设计情况客观量化,但仍存在定性因素,其量化需要依赖有经验的专家评价.研究采用德尔菲法,邀请来自项目设计单位、高校及施工单位等多名经验丰富的专家(从事岩土工程研究)对指标的 $P_K$ 和 $C$ 进行重要性评分(分值越高,重要性越低,风险等级越低,越安全),获取二维云模型所需要的评价数据.

#### 2.2.3 指标权重的确定

鉴于深基坑施工风险影响因素同时具备定性和定量特点,为提高所获指标权重的准确性,

考虑了各评价指标的定性和定量权重.首先采用德尔菲法邀请相关专家对评价指标在实际工程中发生的可能性和损失进行两两重要性判断,通过层次分析法确定指标主观权重  $w_z$ ;然后参照项目勘察资料,结合专家评价结果,通过熵权法确定指标客观权重  $w_k$ ;最后利用式(13)综合主观权重  $w_z$ 和客观权重  $w_k$ ,并利用式(14)归一化计

算指标最终权重.

$$w_{hg} = w_{zg} \times w_{kg}, \quad (13)$$

$$w_g = \frac{w_{zg} \times w_{kg}}{\sum_{g=1}^m w_{zg} \times w_{kg}}. \quad (14)$$

式中:  $w_{zg}, w_{kg}, w_{hg}$  表示第  $g(g \in 1 \sim m)$  个指标的主观、客观和综合权重.

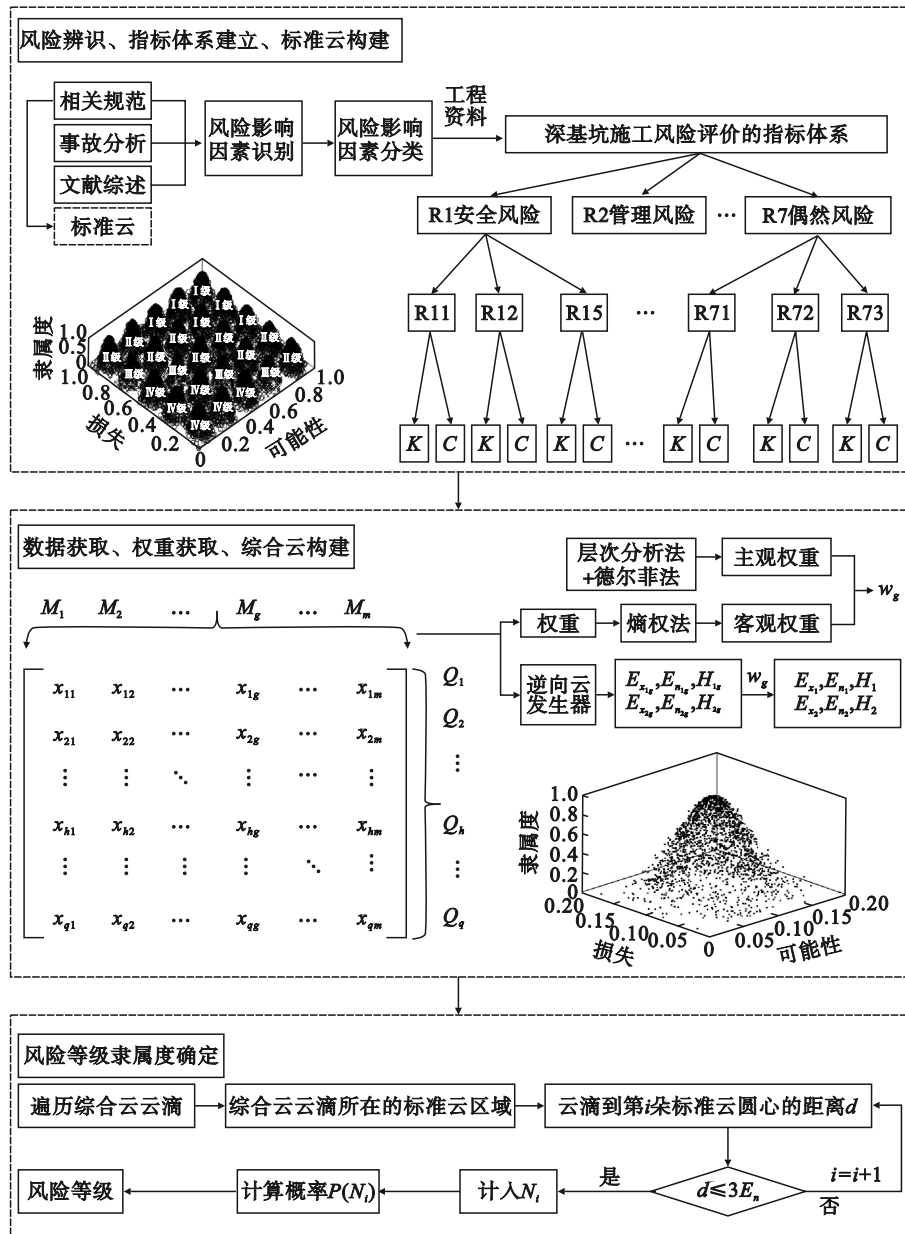


图 2 深基坑施工风险评价流程

Fig. 2 Risk assessment process of deep foundation pit construction

### 2.3 评价云的建立

针对影响深基坑施工风险的复杂风险影响因素,基于二维云模型的概念,生成了能反映各风险影响因素模糊和随机不确定性的二维评价云模型.具体如下:利用二维云模型的逆向云发生器(式(5)~式(9)),结合专家对各指标重要性

的评价结果计算评价云特征值.该特征值可以反映各指标对某深基坑工程风险的影响程度.

### 2.4 综合云的建立

综合云的本质是为提升概念将多个( $\geq 2$ 个)同类型语言值综合为一个更广义的概念语言值.

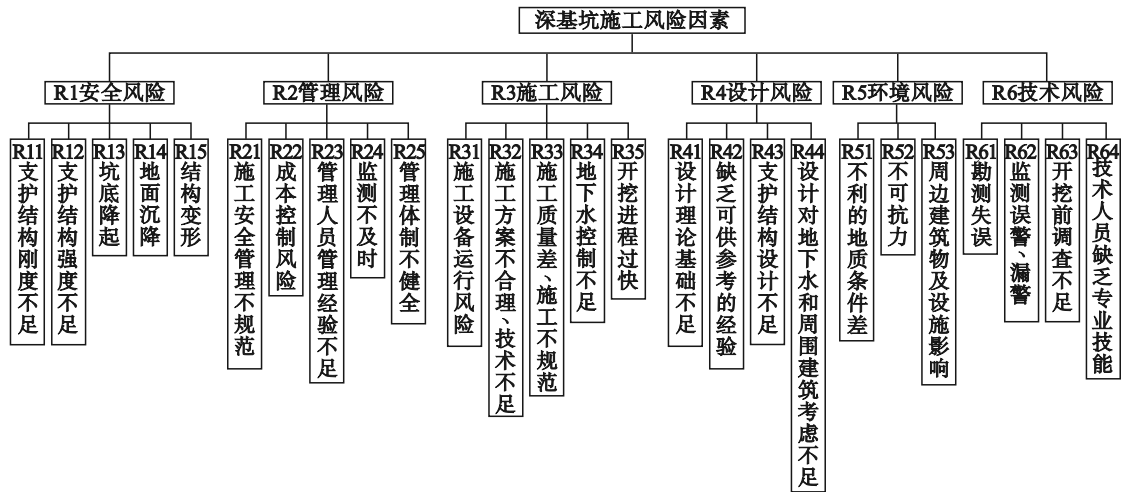


图 3 深基坑施工风险因素

Fig. 3 Risk factors of deep foundation pit construction

表 1 工程风险可能性的分级标准

Table 1 Classification standard for engineering risk possibility

可能性等级	事故描述	区间概率	分值区间
A	不可能	$P_k < 0.01\%$	(0.8,1]
B	很少发生	$0.01\% \leq P_k < 0.1\%$	(0.6,0.8]
C	偶尔发生	$0.1\% \leq P_k < 1\%$	(0.4,0.6]
D	可能发生	$1\% \leq P_k < 10\%$	(0.2,0.4]
E	频繁	$P_k \geq 10\%$	[0,0.2]

表 2 工程风险损失的分级标准

Table 2 Classification standard for engineering risk loss

损失等级	描述	分值区间
1	可忽略的	(0.8,1]
2	需考虑的	(0.6,0.8]
3	严重的	(0.4,0.6]
4	非常严重的	(0.2,0.4]
5	灾难性的	[0,0.2]

表 3 风险评价准则

Table 3 Risk assessment criteria

可能性等级	损失等级	A	B	C	D	E
		可忽略的	需考虑的	严重的	非常严重的	灾难性的
A	1	I 级	I 级	I 级	II 级	II 级
B	2	I 级	I 级	II 级	II 级	III 级
C	3	I 级	II 级	II 级	III 级	IV 级
D	4	II 级	II 级	III 级	IV 级	IV 级
E	5	II 级	III 级	IV 级	IV 级	IV 级

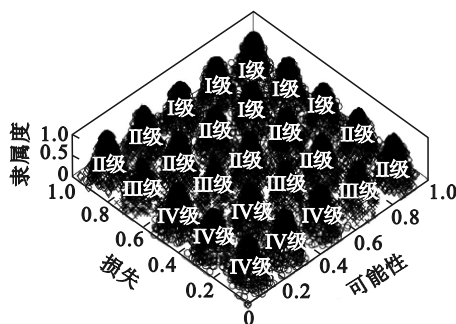


图 4 风险评价准则标准云

Fig. 4 Standard cloud of risk assessment criteria

2.5 综合云隶属度的确定

准确高效地判断风险等级隶属度,可以为深基坑施工提供合适的风险处理措施.本方法提出了一种新的风险等级隶属度确定方法.先基于

$3E_n$ 规则划分综合云在标准云中的分布区域,再分析综合云与标准云平面位置关系,计算综合云云滴在各标准云中发生的概率,直观快速地判断施工风险等级.在正态云模型的论域  $U$  中,  $3E_n$  范围内的云滴对定性概念的贡献率为

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} E_n} \int_{E_x - 3E_n}^{E_x + 3E_n} C_T(x) dx = 99.74\% \quad (15)$$

式中,  $G(x)$  表示  $x$  对定性概念  $C$  的确定度.

由式(15)可知,对论域  $U$  中的定性概念  $T$  有贡献的定量值主要集中在  $[E_x - 3E_n, E_x + 3E_n]$  之间.  $[E_x - 3E_n, E_x + 3E_n]$  之外的云滴为小概率事件,一般可忽略,此即为  $3E_n$  规则.所选取的二维标准云的特征值  $E_{n1} = E_{n2}, H_1 = H_2$ , 二维云对称,因此,首先以半径为  $3E_n$ , 圆心为  $(E_{x1}, E_{x2})$  的圆作为标准云的边

界,绘制平面图.然后根据综合云分析结果,采用长轴和短轴分别为  $6E_{n_1}$  和  $6E_{n_2}$ ,圆心为  $(E_{x_1}, E_{x_2})$  的椭圆表示综合云的边界,绘制平面图.最后,观察综合云与各风险等级标准云的平面位置关系,计算综合云云滴到标准云圆心的距离  $d$ (式(16)),并与半径  $(3E_n)$  比较(若  $d \leq 3E_n$ ,则综合云云滴在标准云内),可以判断位于标准云中的综合云云滴个数,计算评价结果隶属于各风险等级的概率,确定深基坑施工风险等级隶属度.

$$d = \sqrt{(x_1 - E_{x_1})^2 + (x_2 - E_{x_2})^2} \quad (16)$$

### 3 工程实例验证

#### 3.1 工程概况及风险初步分析

基于本研究提出的深基坑施工风险评价方法,以南宁市地铁 5 号线某车站基坑为对象进行了深基坑施工风险评价.基坑开挖深度为 9.25~

15.30 m (>5 m,为深基坑),面积约为 1 500 m<sup>2</sup>,基坑周长约为 110 m,宽度约为 15.5 m.

勘察采用地质调查与测绘、钻探、物探、原位测试、水文地质试验和土、岩、水样室内试验相结合的综合勘察方法.开挖前对周边建筑物(A,B)进行了房屋安全性鉴定工作(图 5),工程施工设计风险较低;图 6 为深基坑支护剖面,该基坑主体采用 800 mm 厚地连墙,采用 3 道内支撑进行基坑支护(均为钢筋混凝土支撑,基坑局部设有板支撑).为降低基坑施工对周边建筑物的影响,靠近基坑边的建筑物 A,B 设有隔离桩(地连墙与隔离桩间距为 1.6 m,用拉梁连接).支护结构设计满足安全要求.坑底隆起、地面沉降等风险因素为易发因素,施工安全风险需要重点考虑;工程整体施工方案及技术较成熟,施工风险较低;未发现对工程不利的有害气体,且南宁市极端恶劣天气少,在本方案中不考虑偶然风险.

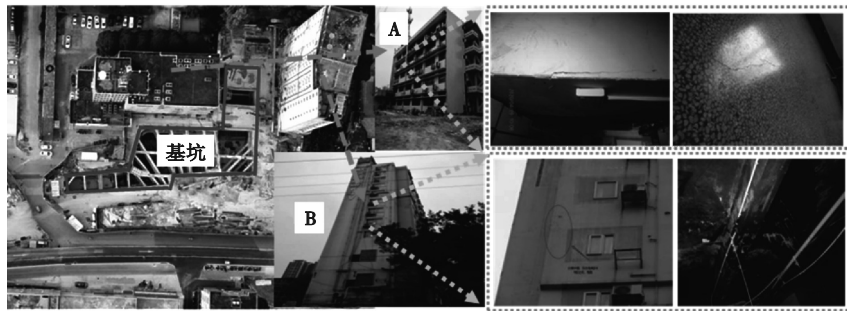


图 5 深基坑位置及勘察情况

Fig. 5 Location and investigation of deep foundation pit

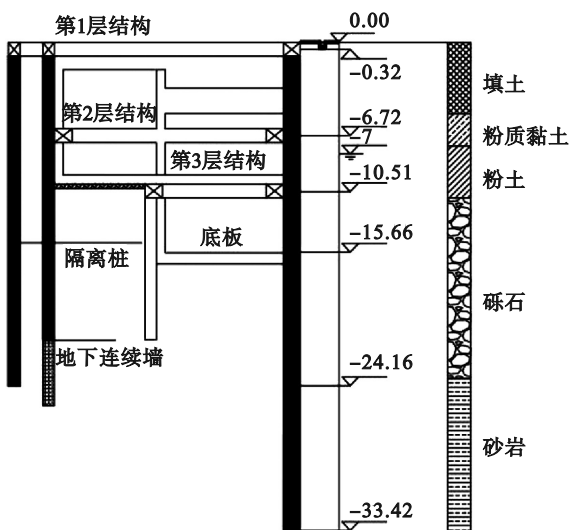


图 6 深基坑支护剖面(单位:m)

Fig. 6 Section of deep foundation pit support (unit:m)

险因素作为评价指标,并采用德尔菲法邀请相关专家(选取 5 份有效的问卷)依据实际情况评价指标可能性及损失.

采用层次分析法进行一致性检验后,可获得一级指标和二级指标的主客观权重.基于工程调查结果和专家经验获取的  $P_K$  和  $C$  评价数据,采用熵权法可获得一级指标、二级指标的  $P_K$  和  $C$  的客观权重.利用式(13)~式(14)计算综合权重.结果见表 4,由于篇幅限制未列出冗余的计算步骤.

6 类评价指标(一级指标)的二维评价云特征值如表 5 所示,通过判断该特征值与标准云特征值的相对位置可初步获取 6 类指标的风险等级,各指标的二维综合评价云特征值为  $E_{x_1}=0.734 3$ ,  $E_{x_2}=-0.592$ ,  $E_{n_1}=0.077 4$ ,  $E_{n_2}=0.063 9$ ,  $H_1=0.035 5$ ,  $H_2=0.028 5$ ,表征风险整体状况.通过正向云发生器生成  $N=1 000$  个云滴,可以绘制综合云图,如图 7a 所示.

#### 3.2 基于二维云模型的深基坑施工风险评价

根据工程调查结果,选取 R1~R6 共 26 个风

表 4 深基坑施工风险评价指标权重  
Table 4 Risk assessment index weight of deep foundation pit construction

准则层 (一级指标)	主观 权重	客观 权重	综合 权重	子准则层(二级指标)	主观 权重	$P_k$ 的客观 权重	$C$ 的客观 权重	$P_k$ 的综合 权重	$C$ 的综合 权重
R1:安全风险	0.430	0.162	0.429	R11:支护结构刚度不足	0.278	0.190	0.182	0.122	0.141
				R12:支护结构强度不足	0.366	0.212	0.190	0.258	0.267
				R13:坑底隆起	0.043	0.182	0.182	0.057	0.065
				R14:地面沉降	0.045	0.234	0.211	0.411	0.386
				R15:结构变形	0.269	0.182	0.234	0.152	0.141
R2:管理风险	0.046	0.196	0.056	R21:施工安全管理不规范	0.147	0.173	0.194	0.122	0.141
				R22:成本控制风险	0.241	0.223	0.224	0.258	0.267
				R23:管理人员管理经验不足	0.068	0.174	0.193	0.057	0.065
				R24:监测不及时	0.398	0.215	0.196	0.411	0.386
				R25:管理体制不健全	0.147	0.215	0.194	0.152	0.141
R3:施工风险	0.145	0.153	0.136	R31:施工设备运行风险	0.059	0.196	0.185	0.057	0.054
				R32:施工方案不合理、技术不足	0.161	0.217	0.193	0.175	0.156
				R33:施工质量差、施工不规范	0.310	0.196	0.193	0.305	0.300
				R34:地下水控制不足	0.310	0.196	0.193	0.305	0.300
				R35:开挖进程过快	0.161	0.196	0.237	0.158	0.191
R4:设计风险	0.201	0.159	0.196	R41:设计理论基础不足	0.101	0.243	0.255	0.099	0.104
				R42:缺乏可供参考的经验	0.134	0.270	0.245	0.147	0.133
				R43:支护结构设计不足	0.236	0.243	0.255	0.232	0.242
				R44:设计未考虑地下水和周围建筑	0.529	0.243	0.244	0.521	0.521
R5:环境风险	0.111	0.177	0.121	R51:不利的地质条件	0.122	0.337	0.334	0.126	0.122
				R52:不可抗力	0.558	0.303	0.333	0.520	0.558
				R53:周围建筑物及设施影响	0.320	0.360	0.333	0.354	0.319
R6:技术风险	0.067	0.152	0.063	R61:勘测失误	0.164	0.257	0.238	0.177	0.147
				R62:监测误警、漏警	0.307	0.232	0.241	0.300	0.279
				R63:开挖前调查不足	0.483	0.231	0.293	0.469	0.534
				R64:技术人员缺乏专业技能	0.046	0.280	0.228	0.054	0.039

表 5 6类风险初步分析结果  
Table 5 Preliminary analysis results of six types of risks

特征值	指标						
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	
$P_k$	$E_{x_1}$	0.706 9	0.698 6	0.718 4	0.810 8	0.752 0	0.678 5
	$E_{x_2}$	0.061 7	0.074 7	0.074 9	0.078 9	0.116 3	0.113 3
	$H_1$	0.024 5	0.019 0	0.026 8	0.038 1	0.062 9	0.038 3
$C$	$E_{x_2}$	0.548 2	0.699 1	0.579 1	0.646 9	0.569 1	0.655 7
	$E_{n_2}$	0.058 9	0.075 8	0.065 9	0.062 1	0.070 9	0.075 5
	$H_2$	0.030 1	0.018 5	0.021 5	0.028 8	0.028 9	0.040 7
风险等级		II级	I级	II级	I级	II级	I级

图 7b 为基于  $3E_n$  规则的综合云-标准云平面位置示意图, N, M, H 区域表示风险等级为 I 级区域, G, L, S 表示风险等级为 II 级区域, 线段  $mn$  为表征综合云  $3E_n$  位置的椭圆的长轴. 可见综合云主要分布在风险等级为 I ~ II 级区域内, 为进一步明确风险等级, 利用 MATLAB 依据式 (16) 遍

历综合云云滴, 计算综合云云滴到标准云圆心的距离(循环 50 次取均值), 结果见表 6, 综合云云滴在  $N_4$  (G 区域) 内的概率最大为  $P(N_4)=0.447$ , 根据最大隶属度原则可知, 该深基坑的施工风险为第 II 级, 与工程实际风险等级一致.

对照规范中<sup>[14]</sup>的风险接受准则可知, 该工程

宜采取风险管理措施,可采取风险处理措施,加 强日常管理与监测.

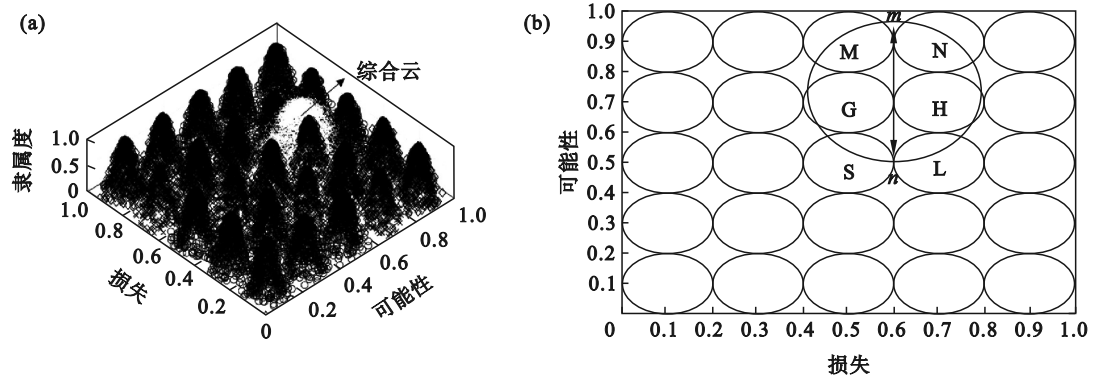


图 7 深基坑施工风险评价结果

Fig. 7 Risk assessment results of deep foundation pit construction

(a)—综合云; (b)—基于  $3E_n$  规则的综合云-标准云平面位置示意图.

表 6 标准云云内的综合云云滴数(循环 50 次取平均值)

Table 6 Number of integrated cloud drops in standard cloud (average value of 50 cycles)

循环次数	$N_1$ (H区域)	$N_2$ (M区域)	$N_3$ (N区域)	$N_4$ (G区域)	$N_5$ (L区域)	$N_6$ (S区域)
1	253	79	42	364	8	15
2	259	75	54	356	8	5
3	286	55	50	333	8	11
4	294	70	46	347	8	11
5	267	68	53	328	8	19
...	...	...	...	...	...	...
46	267	64	41	380	8	13
47	275	70	62	341	8	11
48	249	87	51	329	8	15
49	277	66	54	356	8	11
50	267	81	44	340	8	15
平均值	269.16	72.60	54.46	336.52	8.00	12.86
概率	0.357	0.096	0.072	0.447	0.011	0.017

### 3.3 与模糊综合评价法对比分析

采用模糊综合评价法<sup>[2]</sup>取  $P_k$  和  $C$  的乘积进行深基坑施工风险分析.采用模糊关系矩阵  $R$  表示因素集  $(P_k, C)$  与评价集  $T$  之间的模糊关系.根据模糊综合评价模型  $B=wR$ , 计算各指标的模糊综合评价向量  $B$ , 并通过加权平均原则计算  $B'$ . 经计算可得深基坑施工风险的模糊综合评价向量  $B' = B'(C) \times B'(P_k) = 2.175 \times 1.584 = 3.445$ , 根据式(17)~式(20)计算可得各等级隶属度为(0, 0.763, 0.237, 0), 依据最大隶属度原则, 风险等级为 II 级. 该结果与本研究提出的基于二维云模型的深基坑施工风险评价方法得到的结果是一致的, 也表明了所提出方法的可靠性.

$$I级: \left. \begin{aligned} &1, x \leq 0.5, \\ &\frac{2.5-x}{2}, 0.5 < x < 2.5, \\ &0, 2.5 \leq x. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$II级: \left. \begin{aligned} &0, x \leq 0.5, \\ &\frac{x-0.5}{2}, 0.5 < x < 2.5, \\ &\frac{6.5-x}{4}, 2.5 \leq x < 6.5, \\ &0, 6.5 \leq x. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$III级: \left. \begin{aligned} &0, x \leq 2.5, \\ &\frac{x-2.5}{4}, 2.5 < x < 6.5, \\ &\frac{12.5-x}{6}, 6.5 \leq x < 12.5, \\ &0, 12.5 \leq x. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\text{IV级: } \left. \begin{array}{l} 0, x \leq 6.5, \\ \frac{x-6.5}{6}, 6.5 < x < 12.5, \\ 1, 12.5 \leq x. \end{array} \right\} \quad (20)$$

与模糊综合评价方法相比,所提出的深基坑施工风险评价方法通过MATLAB代码实现,利用“云”的特点对风险可能性和损失程度进行耦合分析,计算了表征风险的二维综合云 $3E_n$ 范围内的云滴在各标准等级内发生的概率.比通过二者乘积所得到的风险评价结果更符合风险的随机性特点,更加符合实际情况.可见,本方法具有准确性高、评价快速、风险评价结果可视等优点.

## 4 结 论

1) 提出的深基坑施工风险评价新方法优化了深基坑施工风险评价过程,风险分析流程清晰易懂,分析方法易于操作,可提高风险评价效率.该方法应用于工程实例,并与现有风险评价方法对比,得到了准确的评价结果.

2) 将二维云作为评价模型,利用二维云表征 $P_k, C$ 的关系及各指标对风险的影响,量化了风险评价准则及施工风险.实现了评价结果的可视化,增加了评价准则的科学性和可信度,为施工安全防护和风险预警提供了理论依据.

3) 通过层次分析法考虑了风险影响因素的主观定性权重,通过熵权法考虑了客观定量权重,并组合计算综合权重,提高了风险分析中指标权重的准确性.

4) 二维云模型实现了风险模糊和随机不确定性的有机结合,通过二维云 $[E_x-3E_n, E_x+3E_n]$ 范围内综合云云滴在标准云中的概率判断风险等级隶属度,评价结果更科学准确.

### 参考文献:

- [1] Nie S M, Ren F. Study on risk management of deep foundation pit engineering [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014(638/639/640):574-579.
- [2] Zhou H B, Zhang H. Risk assessment methodology for a deep foundation pit construction project in Shanghai, China [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011, 137(12): 1185-1194.
- [3] Eskesen S D, Tengborg P, Kampmann J, et al. Guidelines for tunnelling risk management: international tunnelling association, working group No. 2 [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(3): 217-237.
- [4] 杜修力,张雪峰,张明聚,等. 基于证据理论的深基坑工程施工风险综合评价[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(1): 155-161.

(Du Xiu-li, Zhang Xue-feng, Zhang Ming-ju, et al. Risk synthetic assessment for deep pit construction based on evidence theory [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(1): 155-161.)

- [5] 王乾坤,亢显卫,朱科. 地铁深基坑施工风险耦合评价方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(8): 1152-1158.  
(Wang Qian-kun, Kang Xian-wei, Zhu Ke. Coupling evaluation method of the construction risk for subway deep foundation pit [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(8): 1152-1158.)
- [6] 胡长明,刘林,王晓华,等. 基于模糊熵-云理论的二维深基坑施工风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(2): 521-528.  
(Hu Chang-ming, Liu Lin, Wang Xiao-hua, et al. Risk assessment for the 2-D deep foundation pit based on the fuzzy entropy-cloud theory [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(2): 521-528.)
- [7] 曹文贵,翟友成,张永杰. 悬臂支护基坑失稳风险的改进风险矩阵分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(2): 210-216.  
(Cao Wen-gui, Zhai You-cheng, Zhang Yong-jie. Improved risk matrix method of instability risk for excavations with cantilever retaining [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(2): 210-216.)
- [8] Valipour A, Yahaya N, Md Noor N, et al. Hybrid SWARA-COPRAS method for risk assessment in deep foundation excavation project: an Iranian case study [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2017, 23(4): 524-532.
- [9] You W B, Wang J B, Zhang W, et al. Construction risk assessment of deep foundation pit in metro station based on G-COWA method [C]//The 2nd International Workshop on Renewable Energy and Development (IWRED). Bristol: IOP Publishing, 2018, 153: 052018.
- [10] Zhang L, Li H B. Construction risk assessment of deep foundation pit projects based on the projection pursuit method and improved set pair analysis [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2022, 12(4): 1922.
- [11] Huang Z, Fu H L, Zhang J B, et al. Structural damage evaluation method for metro shield tunnel [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2019, 33(1): 04018097.
- [12] Lyu J, Cheng X F, Shaw P. Terrain hazard risk analysis for flood disaster management in Chaohu basin, China, based on two-dimensional cloud [J]. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2020, 24(4): 532-542.
- [13] 中国土木工程学会. 地铁及地下工程建设风险管理指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.  
(China Society of Civil Engineering. Guideline of risk management for construction of subway and underground works [M]. Beijing: China Architecture Publishing, 2007.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范: GB 50652—2011 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for risk management of underground works in urban rail transit: GB 50652—2011 [S]. Beijing: China Railway Publishing, 2011.)