

灰色-层次分析法在职业病危害风险评价中的应用

巫丰宏, 郑玉玲, 黄荣峥, 盘毓毅

南宁市疾病预防控制中心, 广西壮族自治区, 南宁 530023

摘要: **目的** 借鉴及应用系统科学领域中的灰色-层次分析法, 探索建立职业病危害风险评价方法。 **方法** 采用层次分析法建立职业病危害风险评价指标的层次结构, 计算出各风险评价指标权重, 运用灰色评价原理对各个风险评价指标评分信息进行单值化处理, 最终得到综合风险评价价值。 **结果** 职业病危害风险评价指标层次结构的一级指标权重为: $A=(0.455, 0.09, 0.455)$; 二级指标权重分别为: $A_1=(0.643, 0.283, 0.074)$, $A_2=(0.074, 0.643, 0.283)$, $A_3=(0.581, 0.110, 0.309)$ 。应用灰色-层次分析法得出某制药厂的职业病危害风险综合评价值为 2.499, 介于中等风险及较高风险之间。 **结论** 灰色-层次分析法可应用于职业病危害风险评价, 该方法仍需要在实践中不断进行检验及完善。

关键词: 灰色系统理论; 层次分析法; 职业病危害; 风险评价

Application of grey system theory-analytic hierarchy process in risk assessment of occupational hazards

WU Feng-hong, ZHENG Yu-ling, HUANG Rong-zheng, PAN Yu-yi

Nanning Center for Disease Control and Prevention, Guangxi, Nanning 530023, China.

Abstract: **Objective** To apply grey system theory-analytic hierarchy process so as to explore and establish the risk assessment method for occupational hazards. **Methods** Hierarchical structure of risk index system of occupational hazards and the weight value for each risk index were constructed by using analytic hierarchy process, then the weight value of each risk index was normalized by using grey system theory comprehensively, and finally the risk value of occupational hazards was generated. **Results** The weight value of first-rank index was: $A=(0.455, 0.09, 0.455)$. The weight value of second-rank indexes were: $A_1=(0.643, 0.283, 0.074)$, $A_2=(0.074, 0.643, 0.283)$, $A_3=(0.581, 0.110, 0.309)$ respectively. Comprehensive risk value of occupational hazards of one pharmaceutical factory was 2.499, which between middle and high risk-rank. **Conclusions** Method of grey system theory-analytic hierarchy process can be applied in risk assessment of occupational hazards, but this method is still needed to be verified and improved continually in practice.

Key words: Grey system theory; Analytic hierarchy process; Occupational hazard; Risk assessment

职业病防治工作关系到劳动者身体健康和生命安全, 是实现劳动力资源和国民经济可持续发展的保障。最新数据显示: 2013 年我国新发职业病病例为 26393 例^[1], 上世纪

基金: 广西卫生厅课题 (项目编号: Z2013709)

作者简介: 巫丰宏(1983-), 男, 博士研究生, 主管医师, 主要从事环境与职业卫生工作。

50 年代以来全国累计报告职业病病例已超过 80 万例，职业病防治工作形势依然严峻。

《国家职业病防治规划（2009-2015 年）》（国办发〔2009〕43 号）要求建立健全职业病防治体系、落实职业病防治责任，加强对严重威胁人民健康的职业病等疾病的监测与预防控制，保障劳动者健康权益^[2]。职业病危害风险评价是职业病防治工作体系中的一个重要环节，也是落实预防为主、监管关口前移等职业病防治措施的具体体现。职业病危害评价工作在我国得到了快速的发展，但一般仍局限于定性评价，目前仍缺乏有效的定量评估方法。本研究通过创造性借鉴及运用系统科学领域中的灰色-层次分析法，探索建立职业病危害风险评价指标体系及定量评价方法，量化反映作业场所职业病危害状况，为进一步完善职业病危害风险评价，制定职业病防治管理决策提供科学依据。

1 研究方法

1.1 建立职业病危害风险评价指标体系及其层次结构

查阅文献资料，同时采用专家咨询的方法，系统地对可能影响职业病危害风险的因素进行分类识别；初步建立“危害因素特征风险”、“接触者特征风险”、“防护措施风险”3 项一级指标，以及“危害因素毒性或危害风险”、“危害因素浓度或强度风险”、“危害因素作用方式风险”、“接触者健康素质风险”、“接触者防护意识风险”、“危害接触情况风险”、“职业卫生管理风险”、“生产工艺风险”、“防护设施风险”共 9 项二级指标。根据不同指标间的层次及从属关系，建立评价指标的层次结构。见图 1。

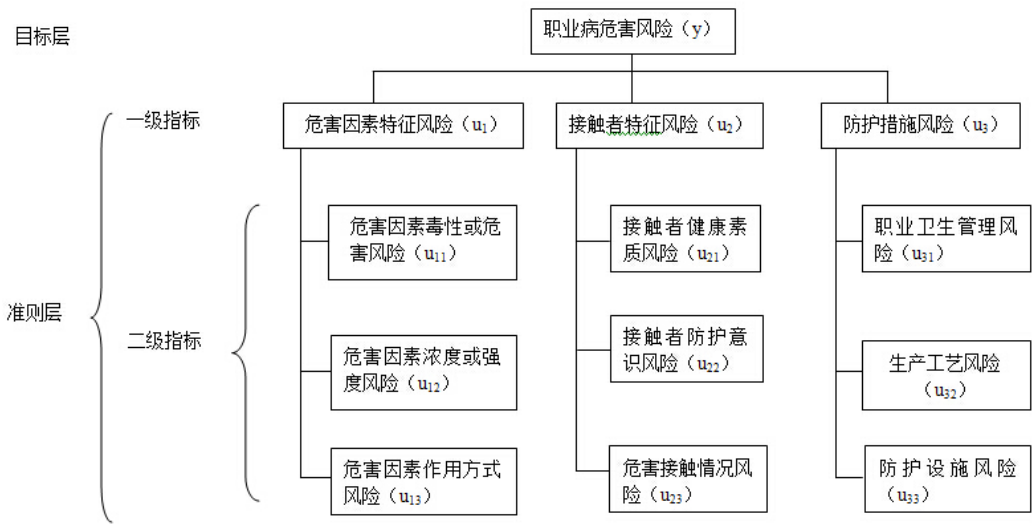


图 1 职业病危害风险评价指标层次结构

1.2 运用层次分析法确定评价指标权重

1.2.1 构建评价指标的判断矩阵 根据层次分析法原理，在明确各评价指标的相互关系的基础上，将复杂问题依据各自从属关系自上而下的分解成若干层次，划分目标层（y）及准则

层（u）。在本次研究中，目标层（y）为职业病危害风险，准则层（u）包括一级指标及二级指标；一级指标记 u_i 分别为： u_1 、 u_2 、 u_3 ；二级指标 u_{ij} 分别为： u_{11} 、 u_{12} 、 u_{13} ， u_{21} ， u_{22} ， u_{23} ， u_{31} 、 u_{32} ， u_{33} 。见图 1。在划分目标层及准则层后，依据 9 级标度法，专家对同一层次评价指标两两之间的重要性进行打分，构建评价指标的判断矩阵，见图 2。9 级标度法的含义见表 1。一级指标 u_i 对 y 的判断矩阵 \bar{A} 见图 2。

| 表 1 9 级标度法 | |
|------------|---------------------|
| 标度 | 含义 |
| 1 | 表示两个因素相比，具有相同重要性 |
| 3 | 表示两个因素相比，前者比后者稍重要 |
| 5 | 表示两个因素相比，前者比后者明显重要 |
| 7 | 表示两个因素相比，前者比后者很重要 |
| 9 | 表示两个因素相比，前者比后者极重要 |
| 2,4,6,8 | 表示上述相邻判断的中间值 |
| 上列各数的倒数 | 表示两个因素相比，后者比前者的重要程度 |

| y | u_1 | u_2 | u_3 |
|-------|-------|-------|-------|
| u_1 | 1 | 5 | 1 |
| u_2 | 1/5 | 1 | 1/5 |
| u_3 | 1 | 5 | 1 |

图 2 一级指标 u_i 对 y 的判断矩阵 \bar{A}

一级指标 u_i 对 y 的判断矩阵记为 \bar{A}
 $=\begin{bmatrix} 1 & 5 & 1 \\ 0.2 & 1 & 0.2 \\ 1 & 5 & 1 \end{bmatrix}$

同理，二级指标 u_{1j} 对 u_1 的判断矩阵记为 $\overline{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 \\ 0.333 & 1 & 5 \\ 0.143 & 0.2 & 1 \end{bmatrix}$

二级指标 u_{2j} 对 u_2 的判断矩阵记为 $\overline{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.143 & 0.2 \\ 7 & 1 & 3 \\ 5 & 0.333 & 1 \end{bmatrix}$

二级指标 u_{3j} 对 u_3 的判断矩阵记为 $\overline{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 2 \\ 0.2 & 1 & 0.333 \\ 0.5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$

1.2.2 计算判断矩阵的特征向量及各评价指标权重 以计算一级指标的权重为例。先对一级指标判断矩阵 \overline{A} 的各列求和，然后对每一列进行归一化处理，计算公式为： $B_{ij}=A_{ij}/\sum A_{ij}$ 。 A_{ij} 为矩阵 \overline{A} 每一列中的数值， $\sum A_{ij}$ 为该列的和。经归一化处理后得到一个新的矩阵，称 \overline{B} 矩阵，对 \overline{B} 矩阵的每一行求和，即得到特征向量 SUM；对 \overline{B} 矩阵每行的和进行归一化处理，即得到各指标的权重 W，计算公式为： $W_i=B_i/\sum B_j$ 。 B_j 为 \overline{B} 矩阵每行的和， $\sum B_j$ 为各行的和，见图 3。即一级指标 u_1 、 u_2 、 u_3 相对于目标层（y）的权重 W 分别为 0.455、0.09、0.455，记为 $A=(0.455, 0.09, 0.455)$ 。同理，可计算得出二级指标 u_{1j} 、 u_{2j} 、 u_{3j} 的权重分别为： $A_1=(0.643, 0.283, 0.074)$ ， $A_2=(0.074, 0.643, 0.283)$ ， $A_3=(0.581, 0.110, 0.309)$ 。

| B | B ₁ | B ₂ | B ₃ | SUM | W |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|-------|
| B ₁ | 0.455 | 0.455 | 0.455 | 1.365 | 0.455 |
| B ₂ | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.270 | 0.090 |
| B ₃ | 0.455 | 0.455 | 0.455 | 1.365 | 0.455 |

图 3 \overline{B} 矩阵特征向量及权重

1.2.3 判断矩阵的一致性检验

评价指标的判断矩阵是通过专家打分法来建立，有可能存在系统性误差，为了保证指标权重的合理性及正确性，需要对判断矩阵进行一致性检验，没有通过一致性检验的矩阵

需进行修正再检验。以计算一级指标权重的判断矩阵为例，先计算该矩阵的最大特征根

λ_{\max} ，计算公式为： $\lambda_{\max} = \sum \frac{(\bar{A}W)_i}{nW_i}$ 。 $\bar{A}W$ 为判断矩阵 \bar{A} 与权重 W 相乘， n 为矩

阵的阶数，在此为 3 阶矩阵。计算结果为 $\lambda_{\max}=3.000081$ 。然后计算矩阵的一致性指标

(Constant Index),计算公式为： $CI = \frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$ ， n 为矩阵的阶数。最后进行一致性检

验，计算公式为： $CR = \frac{CI}{RI}$ ， RI 为平均随机一致性指标，为常量。1~10 阶判断矩阵的

RI 值见表 2。当阶数 n 大于 2 时，判断矩阵的一致性检验结果 $CR<0.10$ 时，即认为判断矩阵具有合理的一致性。由此，可以计算出其它各级指标权重的判断矩阵的一致性检验结果，见表 3，均符合一致性要求。

表 2 平均随机一致性指标 RI 值

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0.52 | 0.89 | 1.12 | 1.26 | 1.36 | 1.41 | 1.46 | 1.49 |

表 3 各级指标权重的判断矩阵的一致性检验结果

| 指标 | λ_{\max} | CI | CR |
|---------------|------------------|-----------|----------|
| 一级指标 u_i | 3.000081 | 0.0000405 | 0.000078 |
| 二级指标 u_{1j} | 3.065743 | 0.0328715 | 0.063214 |
| 二级指标 u_{2j} | 3.065743 | 0.0328715 | 0.063214 |
| 二级指标 u_{3j} | 3.003684 | 0.0018420 | 0.003542 |

1.3 运用灰色系统理论进行指标综合评价

1.3.1 构建评分矩阵 在进行综合评价时需将定性指标转化为定量化处理，即通过制定评价指标的评分等级标准来实施。本研究将职业病危害风险等级划分为 4 个类别，即低风险、中等风险、较高风险和高风险，分别赋值为 1、2、3、4；指标等级介于相邻两个之间的赋值分别为 1.5、2.5、3.5。组织专家对风险评价指标进行等级评分，将第 k 位专家对评价指

标 u_{ij} 的评分记为 d_{ijk} ，构建评分矩阵 D 。在本研究中，组织 5 位 ($k=5$) 职业卫生专家对职业病危害风险评价指标 u_{11} 、 u_{12} 、 u_{13} ， u_{21} ， u_{22} ， u_{23} ， u_{31} 、 u_{32} ， u_{33} 进行评分；

$$D = \begin{bmatrix} d_{111} & d_{121} & d_{131} & d_{211} & d_{221} & d_{231} & d_{311} & d_{321} & d_{331} \\ d_{112} & d_{122} & d_{132} & d_{212} & d_{222} & d_{232} & d_{312} & d_{322} & d_{332} \\ d_{113} & d_{123} & d_{133} & d_{213} & d_{223} & d_{233} & d_{313} & d_{323} & d_{333} \\ d_{114} & d_{124} & d_{134} & d_{214} & d_{224} & d_{234} & d_{314} & d_{324} & d_{334} \\ d_{115} & d_{125} & d_{135} & d_{215} & d_{225} & d_{235} & d_{315} & d_{325} & d_{335} \end{bmatrix}$$

1.3.2 确定评价灰类、评价系数、白化权函数及评价权向量。评价灰类的划定依据于风险评价等级数，本次研究中设定 4 个评价灰类，即 $e=(1、2、3、4)$ ，分别表示低风险、中等风险、较高风险、高风险。参照类似的灰类数设定^[3]，对应于评价灰类 e 的白化权函数记为 f_e ，见表 4。对于评价指标 u_{ij} 属于第 e 种灰类的评价系数记为 x_{ije} ，则有 $x_{ije} = \sum f_e(d_{ijk})$ ，其中 k 为评分专家数目，在此 $k=5$ 。评价指标 u_{ij} 属于各个灰类 ($e=1、2、3、4$) 的总评价系数 $x_{ij} = x_{ij1} + x_{ij2} + x_{ij3} + x_{ij4}$ ；评价指标 u_{ij} 属于各个灰类 ($e=1、2、3、4$) 的评价权向量 r_{ije} 计算公式为： $r_{ije} = x_{ije} / x_{ij}$ ，则 4 个灰类的评价权向量 $r_{ije} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4})$ 。本次研究中的 9 个二级评价指标的评价权向量分别为：

$r_{11e}, r_{12e}, r_{13e}, r_{21e}, r_{22e}, r_{23e}, r_{31e}, r_{32e}, r_{33e}$ 。由此可建立各一级评价指标 u_i 的灰色评价矩阵

R_i ，本次研究中 3 个一级评价指标的灰色评价矩阵分别为：

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11e} \\ r_{12e} \\ r_{13e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{111} & r_{112} & r_{113} & r_{114} \\ r_{121} & r_{122} & r_{123} & r_{124} \\ r_{131} & r_{132} & r_{133} & r_{134} \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} r_{21e} \\ r_{22e} \\ r_{23e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{211} & r_{212} & r_{213} & r_{214} \\ r_{221} & r_{222} & r_{223} & r_{224} \\ r_{231} & r_{232} & r_{233} & r_{234} \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} r_{31e} \\ r_{32e} \\ r_{33e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{311} & r_{312} & r_{313} & r_{314} \\ r_{321} & r_{322} & r_{323} & r_{324} \\ r_{331} & r_{332} & r_{333} & r_{334} \end{bmatrix}$$

表 4 评价灰类及白化权函数

| 评价灰类 (e) | 灰数 (d_{ijk}) | 白化权函数 |
|--------------|------------------|-------|
|--------------|------------------|-------|

| | | |
|---------------|---------------------------|--|
| 低风险 (e=1) | $d_{ijk} \in [0,1,2]$ | $f_1(d_{ijk}) = \begin{cases} 1 & d_{ijk} \in [0,1] \\ \frac{d_{ijk}-2}{-1} & d_{ijk} \in [1,2] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0,2] \end{cases}$ |
| 中等风险 (e=2) | $d_{ijk} \in [0,2,4]$ | $f_2(d_{ijk}) = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{2} & d_{ijk} \in [0,2] \\ \frac{d_{ijk}-4}{-2} & d_{ijk} \in [2,4] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0,4] \end{cases}$ |
| 较高风险 (e=3) | $d_{ijk} \in [0,3,6]$ | $f_3(d_{ijk}) = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{3} & d_{ijk} \in [0,3] \\ \frac{d_{ijk}-6}{-3} & d_{ijk} \in [3,6] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0,6] \end{cases}$ |
| 高风险 (e=4) | $d_{ijk} \in [4, \infty]$ | $f_4(d_{ijk}) = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{4} & d_{ijk} \in [0,4] \\ 1 & d_{ijk} \in [4, \infty] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0, \infty] \end{cases}$ |

1.3.3 灰色综合评价计算

对一级评级指标 u_i 属于各个评价灰类的灰色评价权向量矩阵 $B_i = A_i \times R_i$ ；对风险评价指标的灰色评价权向量矩阵 B_i 进行综合，记为 B ，则有：

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}$$

在本次研究中，一级指标 u_1 、 u_2 、 u_3 相对于目标层 (y) 的权重为 A ，则整个风险评价指标体系的灰色评价权向量 M 计算公式为：

$$M = A \times B = A \times \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}$$

在本次研究中的评价灰类 e 划分为 4 类，其赋值向量定为 C ($C=1,2,3,4$)，则灰色综合

评价风险值 Z 计算公式为：

$$Z = M \times C = M \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix}$$

2 结果

2.1 风险评价指标权重

本次研究中，层次分析法确定各级风险评价指标的权重为：一级指标 u_i 的权重 $A=(0.455, 0.09, 0.455)$ 。二级指标 u_{ij} 的权重分别为： $A_1=(0.643, 0.283, 0.074)$ ， $A_2=(0.074, 0.643, 0.283)$ ， $A_3=(0.581, 0.110, 0.309)$ 。所计算出的权重，经一致性检验均符合要求。

2.2 灰色评价结果

2.2.1 对风险评价指标进行评分，获得评分矩阵 D

利用本次研究所建立的职业病危害风险评价指标体系，组织 5 位职业卫生专家对某制药厂的风险评价指标进行评分，获得评分矩阵 D 。

$$D = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & 1.5 & 1 & 1.5 & 1 & 1 & 1.5 \\ 2.5 & 1.5 & 2.5 & 1 & 1 & 1.5 & 1.5 & 1.5 & 1 \\ 2 & 1 & 3 & 1.5 & 1.5 & 1.5 & 1.5 & 1 & 1.5 \\ 3 & 1 & 3 & 1.5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 3 & 1.5 & 3 & 1 & 1 & 1.5 & 1.5 & 1.5 & 2 \end{bmatrix}$$

2.2.2 评价灰类、白化权函数、评价系数及评价权向量

本次研究中评价灰类 $e=(1、2、3、4)$ ，分别表示低风险、中等风险、较高风险、高风险。对应于评价灰类 e 的白化权函数记为 f_e ，见表 4。对于评价指标 u_{ij} 属于第 e 种灰类的评价系数记为 x_{ije} ，则有 $x_{ije} = \sum f_e(d_{ijk})$ ，其中 k 为评分专家数目，在此 $k=5$ 。以指标 u_{11} 为例， u_{11} 属于 e 种灰类的评价系数记为 $x_{11e} = \sum f_e(d_{11k})$ 。

$$\begin{aligned} \text{当 } e=1 \text{ 时, } x_{111} &= f_1(d_{111}) + f_1(d_{112}) + \dots + f_1(d_{115}) \\ &= f_1(2) + f_1(2.5) + f_1(2) + f_1(3) + f_1(3) = 0+0+0+0+0=0; \end{aligned}$$

$$\text{当 } e=2 \text{ 时, } x_{112} = f_2(d_{111}) + f_2(d_{112}) + \dots + f_2(d_{115})$$

$$= f_2(2) + f_2(2.5) + f_2(2) + f_2(3) + f_2(3) = 1 + 0.75 + 1 + 0.5 + 0.5 = 3.75;$$

当 $e=3$ 时, $x_{113} = f_3(d_{111}) + f_3(d_{112}) + \dots + f_3(d_{115})$

$$= f_3(2) + f_3(2.5) + f_3(2) + f_3(3) + f_3(3) = 0.67 + 0.83 + 0.67 + 1 + 1 = 4.17$$

当 $e=4$ 时, $x_{114} = f_4(d_{111}) + f_4(d_{112}) + \dots + f_4(d_{115})$

$$= f_4(2) + f_4(2.5) + f_4(2) + f_4(3) + f_4(3)$$

$$= 0.5 + 0.625 + 0.5 + 0.75 + 0.75 = 3.125$$

评价指标 u_{11} 属于各个灰类 ($e=1, 2, 3, 4$) 的总评价系数 $x_{11} = x_{111} + x_{112} + x_{113} + x_{114}$,

即 $x_{11} = 0 + 3.75 + 4.17 + 3.125 = 11.045$ 。

因此, 评价指标 u_{11} 属于各个灰类的评价权向量 r_{11e} 为:

当 $e=1$ 时, $r_{111} = x_{111} / x_{11} = 0 / 11.045 = 0$;

当 $e=2$ 时, $r_{112} = x_{112} / x_{11} = 3.75 / 11.045 = 0.339$;

当 $e=3$ 时, $r_{113} = x_{113} / x_{11} = 4.17 / 11.045 = 0.378$;

当 $e=4$ 时, $r_{114} = x_{114} / x_{11} = 3.125 / 11.045 = 0.283$;

则评价指标 u_{11} 的评价权向量 $r_{11e} = (r_{111}, r_{112}, r_{113}, r_{114}) = (0, 0.339, 0.378, 0.283)$ 。

同理, 可以计算出其它评价指标的评价权向量为:

$$r_{12e} = (r_{121}, r_{122}, r_{123}, r_{124}) = (0.381, 0.286, 0.190, 0.143)$$

$$r_{13e} = (r_{131}, r_{132}, r_{133}, r_{134}) = (0, 0.292, 0.405, 0.303)$$

$$r_{21e} = (r_{211}, r_{212}, r_{213}, r_{214}) = (0.322, 0.308, 0.205, 0.155)$$

$$r_{22e} = (r_{221}, r_{222}, r_{223}, r_{224}) = (0.431, 0.263, 0.174, 0.132)$$

$$r_{23e} = (r_{231}, r_{232}, r_{233}, r_{234}) = (0.209, 0.365, 0.243, 0.183)$$

$$r_{31e} = (r_{311}, r_{312}, r_{313}, r_{314}) = (0.332, 0.308, 0.205, 0.155)$$

$$r_{32e} = (r_{321}, r_{322}, r_{323}, r_{324}) = (0.381, 0.286, 0.190, 0.143)$$

$$r_{33e} = (r_{331}, r_{332}, r_{333}, r_{334}) = (0.187, 0.375, 0.251, 0.187)$$

由此可建立各一级评价指标 u_i 的灰色评价矩阵 R_i , 本次研究中 3 个一级评价指标的灰色评价矩阵分别为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11e} \\ r_{12e} \\ r_{13e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{111} & r_{112} & r_{113} & r_{114} \\ r_{121} & r_{122} & r_{123} & r_{124} \\ r_{131} & r_{132} & r_{133} & r_{134} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.339 & 0.378 & 0.283 \\ 0.381 & 0.286 & 0.190 & 0.143 \\ 0 & 0.292 & 0.405 & 0.303 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} r_{21e} \\ r_{22e} \\ r_{23e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{211} & r_{212} & r_{213} & r_{214} \\ r_{221} & r_{222} & r_{223} & r_{224} \\ r_{231} & r_{232} & r_{233} & r_{234} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.322 & 0.308 & 0.205 & 0.155 \\ 0.431 & 0.263 & 0.174 & 0.132 \\ 0.209 & 0.365 & 0.243 & 0.183 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} r_{31e} \\ r_{32e} \\ r_{33e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{311} & r_{312} & r_{313} & r_{314} \\ r_{321} & r_{322} & r_{323} & r_{324} \\ r_{331} & r_{332} & r_{333} & r_{334} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.332 & 0.308 & 0.205 & 0.155 \\ 0.381 & 0.286 & 0.190 & 0.143 \\ 0.187 & 0.375 & 0.251 & 0.187 \end{bmatrix}$$

2.2.3 综合评价

对一级评级指标 u_i 属于各个评价灰类的灰色评价权向量矩阵 $B_i = A_i \times R_i$ ；在本次研究中 3 个一级评价指标 u_1 、 u_2 、 u_3 的灰色评价权向量矩阵分别为：

$$B_1 = A_1 \times R_1 = (0.643, 0.283, 0.074) \times \begin{bmatrix} 0 & 0.339 & 0.378 & 0.283 \\ 0.381 & 0.286 & 0.190 & 0.143 \\ 0 & 0.292 & 0.405 & 0.303 \end{bmatrix} = (0.108, 0.320, 0.327, 0.245)$$

$$B_2 = A_2 \times R_2 = (0.074, 0.643, 0.283) \times \begin{bmatrix} 0.322 & 0.308 & 0.205 & 0.155 \\ 0.431 & 0.263 & 0.174 & 0.132 \\ 0.209 & 0.365 & 0.243 & 0.183 \end{bmatrix} = (0.361, 0.295, 0.196, 0.148)$$

$$B_3 = A_3 \times R_3 = (0.581, 0.110, 0.309) \times \begin{bmatrix} 0.332 & 0.308 & 0.205 & 0.155 \\ 0.381 & 0.286 & 0.190 & 0.143 \\ 0.187 & 0.375 & 0.251 & 0.187 \end{bmatrix} = (0.293, 0.326, 0.218, 0.163)$$

对风险评价指标的灰色评价权向量矩阵 B_i 进行综合，记为 B ，则有：

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.108 & 0.320 & 0.327 & 0.245 \\ 0.361 & 0.295 & 0.196 & 0.148 \\ 0.293 & 0.326 & 0.218 & 0.163 \end{bmatrix}$$

在本次研究中，一级指标 u_1 、 u_2 、 u_3 相对于目标层（y）的权重为 $A=(0.455, 0.09, 0.455)$ ，则整个风险评价指标体系的灰色评价权向量 M 为：

$$M = A \times B = (0.455, 0.09, 0.455) \times \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = (0.215, 0.320, 0.266, 0.199)$$

在本次研究中，评价灰类 e 划分为 4 类，即低风险、中等风险、较高风险和高风险；其赋值向量定为 C （ $C=1, 2, 3, 4$ ），则最终的灰色综合评价风险值 Z 为：

$$Z = M \times C = M \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} = (0.215, 0.320, 0.266, 0.199) \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} = 2.499$$

因此，该制药厂的职业病危害风险综合评价值为 2.499，介于中等风险及较高风险之间。

3 讨论

《中华人民共和国职业病防治法》中明确规定了新建、改建、扩建和技术改造、技术引进项目需进行职业病危害因素的职业卫生评价^[4]。当前传统的评价方法主要有类比法、检查表法、危害作业分级法等，但这些评价方法也存在着较大的局限性，如类比法很少能找到在生产工艺、原材料、生产规模、生产管理、工作环境区域等多个关键因素都近似的类比对象^[5]；检查表法只能定性地反映建设项目在职业病危害防治措施与现行法律法规标准是否符合，既无法评价工作场所职业病危害因素的种类、分布及强度对周边岗位的影响，也不能评估职业病危害的健康风险程度^[6]；而危害作业分级法也未考虑到防护措施等因素的影响^[7]。风险评价法是职业病危害评价方法当中的一种新型评价方法^[8]，能够对劳动者所承受的整体职业健康风险水平进行量化估算。2007 年我国卫生部颁布实施的《建设项目职业病危害预评价技术导则》中提出了风险评估法的概念^[9]，但没有明确给出具体的做法，而是鼓励职业卫生工作者在实践工作中进行研究创新、应用和完善。

灰色系统理论（Grey System Theory）是由我国著名学者邓聚龙教授提出的一种系统理论学新概念，是系统科学的一种深化和发展。灰色系统是指部分信息未知或不确知的贫信息系统，一般的统计方法难以奏效。灰色系统理论主要研究部分信息已知、部分信息未知的贫信息系统，适用于只有少量测量数据的项目，对样本量没有严格要求，不要求样本数据服从任何分布^[10,11]。灰色系统理论包括灰色预测、灰色判断、灰色聚类及灰色评价等方面，已经广泛应用于经济、气象、农业、航天、管理、工业控制等领域，并取得了显著的成绩^[12-16]。层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）是美国运筹学家萨蒂提出的一种权重决策分析方法^[17]。该方法是对一些较为复杂的多目标决策问题进行分解，分解成多个目标或准则，建立多指标的若干层次，然后将定性指标进行量化，计算出层次单排序（权重）和总排序（总权重）。其特点就是利用较少的定量信息来构建一个层次结构模型，把思维过程数学化^[18]。层次分析法适用于那些难于完全量化分析的问题，适合于对决策结果难以直接计算量化的问题。

在本次研究中，首先对可能影响职业病危害风险的因素系统地进行分类识别，构建“危害因素特征风险-接触者特征风险-防护措施风险”的一级评价指标体系，其次采用层次分析法将一级指标分解，建立评价指标的层次结构，计算出各风险评价指标权重，并对指标权重进行一致性检验，最后运用灰色评价原理将分散的各个风险评价指标权重信息处理成不同灰类的权向量，再进行单值化处理，最终得到综合风险评价值。该评价方法与传统的类比法、检查表法相比，其优势在于可以将多个定性指标进行量化评估，计算出职业病危害的综合风险值；而危害作业分级法是建立在危害因素的毒性分级、危害因素的浓度或强度水平、危害因素接触情况的基础上开展分级评价，并未考虑到职业卫生管理水平、生产工艺状况、职业病防护设施状况等其它情况^[19]；本次研究中建立的评价指标体系相比危害作业分级法更为全面及灵活，且均能将定性评价指标进行数字化处理，对风险水平进行综合量化评估，所反映出的风险状况更为全面及客观。国家安监总局 2012 年发布的《建设项目职业病危害风险分类管理目录》，对可能产生职业病危害的风险程度按照主要行业进行分类，危害风险程度分为“一般”、“较重”及“严重”三个级别^[20]。按照该目录的职业病危害风险划分办法，本次研究中的某制药厂属于化学药品原料药制造行业，职业病危害风险属于“严重”级别；该制药厂为外资独资企业，生产工艺先进，生产机械化、自动化及密闭化程度较高，职业病危害防护措施较为合理及全面，职业卫生管理较为规范，因此运用灰色-层次分析法对其职业病危害风险进行综合评价，结果为介于中等风险及较高风险之间，这与目录的风险程度划分结果存在一定的差异。但在该目录中也指出：在实际运用中，如果建设项目可能产生的职业病危害的风险程度，与其在《目录》中所列行业职业病危害的风险程度有明显区别的，建设单位和职业卫生技术服务机构可以作出综合判断，根据评价结果确定该建设项目职业病危害的风险类别。

美国风险研究专家 A.H. Mowbray 认为，风险是事件发生的不确定性的客观体现^[21]。而这种不确定信息的集合，就是一种贫信息系统，即部分信息未知或不确知。职业病危害风险同样也是一种贫信息系统，具体表现在只有少部分可测量的定量指标信息，如工作场所职业病危害因素的浓度或强度值、危害因素浓度或强度可接受的阈限值等，其它更多的是定性指标信息，如职业卫生管理水平、工人防护意识高低、生产工艺先进程度、职业病防护设施水平等。灰色-层次分析法可以用于处理这类贫信息系统，可以将定性分析的内容通过数理方法转化为定量分析，使分析结果更具科学性和客观性。尽管如此，灰色-层次分析法也存在不足。例如，风险评价指标体系及层次结构、指标评分是根据专家的知识水平及经验程度来建立，存在一定的主观性；此外，定性指标经数学方法转化为定量指标过程

中也可能出现系统性误差,需要进行一致性检验及校正。因此,作为方法学上的一种新的应用尝试,本次研究中所应用的职业病危害风险评价指标体系以及灰色-层次分析法,仍需要在职业卫生实践当中不断地进行检验及完善,以更真实地反映工作场所职业病危害风险状况。

参考文献:

- [1] 国家卫生计生委. 卫生计生委通报 2013 年职业病防治工作情况[EB]. http://www.gov.cn/xinwen/2014-06/30/content_2710053.htm.
- [2] 国办发[2009]43 号. 国家职业病防治规划(2009-2015 年)[Z].
- [3] 罗键,林建伟,李方文. 多层次灰色评价法在后勤综合保障能力评估中的应用[J]. 后勤工程学院学报, 2008, 24(4): 56-61.
- [4] 中华人民共和国职业病防治法[S]. [2011]第 52 号.
- [5] 钱均琪,吕敏,陈阳,等.有关建设项目职业病危害评价工作中难点的商榷[J].职业与健康, 2007, 23(1): 57-58.
- [6] 赵阳,樊晶光.建设项目职业病危害预评价方法探讨[J].中国安全科学学报, 2006, 16(11): 81-85.
- [7] 邹立海.建设项目职业病危害预评价常见问题分析[J].中国职业医学,2007, 34(4): 314-315.
- [8] 宾海华,张胜,涂晓志. 职业危害风险评估法在电镀行业职业病危害评价中的应用[J].实用预防医学, 2014, 21(3): 332-334.
- [9] GBZ/T 196-2007. 建设项目职业病危害预评价技术导则[S].
- [10] 罗佑新,张龙庭等著,灰色系统理论及其在机械工程中的应用[M],长沙:国防科技大学出版社, 2001 年.
- [11] 刘思峰,党耀国,方志耕等著,灰色系统理论及其应用[M],科学出版社, 2004 年.
- [12] 钟洪燕. 基于灰色系统理论的宏观经济运行机制及预测[J]. 统计与决策, 2014, 397: 145-148.
- [13] 祝华远,纪云飞,史凤隆. 基于灰色系统理论的军机维修性定性要求评价[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 40-44.
- [14] 王文明,王华,胡文斌,等. 灰色系统 GM(1,1) 模型在手足口病发病预测中的应用[J]. 中国校医, 2014, 27(10): 769-770.
- [15] 周应育,黄道平,周权,等. 常德市 ≥ 50 岁年龄组人群 HIV/AIDS 流行特征分析与灰

色系统 G (1,1) 模型对流行趋势的预测[J]. 实用预防医学, 2013, 20(9): 1072-1074.

[16] 柴永飞, 刘世忠. 灰色系统理论在巴河大桥施工控制中的应用[J]. 兰州工业学院学报, 2013, 20(6): 42-46.

[17] 王立新, 李勇, 任荣明. 基于灰色多层次评价方法的企业技术创新风险评估研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006(7): 98-104.

[18] 杨恒仓. 基于灰色层次分析法的高校贷款风险评价研究[J]. 会计之友, 2012(30): 114-116.

[19] GBZ/T 229.2-2010. 工作场所职业病危害作业分级 第 2 部分: 化学物[S].

[20] 中华人民共和国安全生产监督管理总局. 建设项目职业病危害风险分类管理目录[Z]. 安监总安健[2012]73 号.

[21] 郭晓亭, 蒲勇健, 林略. 风险概念及其数量刻画[J]. 数量经济技术经济研究, 2004(2): 111-115.