

基于模糊综合分析的食用油污染物风险评价研究

陈慧敏^{1,2}, 马欣玥^{1,2}, 于家斌^{1,2*}, 赵峙尧^{1,2}, 张 新^{1,2}

(1. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 2. 北京工商大学,
中国轻工业工业互联网与大数据重点实验室, 北京 100048)

摘 要: 目的 基于模糊综合分析实现对食用油污染物风险评价。**方法** 首先进行了指标筛选, 选取了易于检测且对食用油风险程度影响较大的 6 个指标作为风险评价因子, 然后进行相应的数据预处理; 并用层次分析法确定各指标主观权重, 对得到的权重进行一致性检验以确定其可用于综合评价计算; 用熵权法获得各指标的客观权重; 将二者经过耦合计算得到综合权重; 最后运用模糊综合评价法对食用油进行风险评价, 并根据最大隶属度确定评价结果。**结果** 本研究依托 150 组花生油数据, 用本方法对预处理后数据进行评价, 样本 1 的风险等级为“微风险”。**结论** 结合安全风险等级划分与评价专家组意见, 运用本研究评价方法得出的结果更加客观、全面, 可作为食用油风险评价的有效手段。

关键词: 食用油风险评价; 层次分析法; 熵权法; 模糊综合评价法

Research on risk assessment of edible oil pollutants based on fuzzy comprehensive analysis

CHEN Hui-Min^{1,2}, MA Xin-Yue^{1,2}, YU Jia-Bin^{1,2*}, ZHAO Zhi-Yao^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}

(1. School of Artificial Intelligence, Beijing Business University, Beijing 100048, China; 2. Key Laboratory of China Light Industry Internet and Big Data, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate the risk of edible oil pollutants based on fuzzy comprehensive analysis. **Methods** Firstly, the index screening was carried out, 6 indicators that were easy to detect and had a great impact on the risk degree of edible oil were selected as risk assessment factors and the corresponding data were preprocessed. Secondly, the subjective weight of each index was determined by analytic hierarchy process. The obtained weights were tested for consistency to determine that they could be used for comprehensive evaluation calculation. The objective weight of each index was obtained by entropy weight method. The comprehensive weight was obtained through coupling calculation. Finally, the fuzzy comprehensive evaluation method was used to evaluate the risk of edible oil, and the evaluation results were determined according to the maximum degree of membership. **Results** Based on 150 groups of peanut oil data, this paper evaluated the pretreated data with this method, and the risk level of sample 1 was “slight risk”. **Conclusion** Combined with the safety risk classification and the opinions of the evaluation expert group, the results obtained by using the evaluation method in this paper are more objective and comprehensive, and can be used as an effective means for risk evaluation of edible oil.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1101100)、北京市自然科学基金项目(4222042)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFF1101100), and the Beijing Municipal Natural Science Foundation (4222042)

*通信作者: 于家斌, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全风险评价和决策。E-mail: yujiabin@th.btbu.edu.cn

*Corresponding author: YU Jia-Bin, Ph.D, Associate Professor, Beijing Technology and Business University, No.11, Fucheng Road, Haidian District, Beijing 100048, China. E-mail: yujiabin@th.btbu.edu.cn

KEY WORDS: edible oil risk assessment; analytic hierarchy process; entropy weight method; fuzzy comprehensive evaluation method

0 引言

食品安全同社会稳定发展息息相关,当食品安全出现重大问题时^[1-2],会威胁人民健康,破坏社会稳定。如今,随着人民生活水平的提高,人民对食品安全的关注程度也在日渐提高。目前,我国面临的食品安全方面的问题与挑战仍然严峻,因此应加大对食品安全问题的重视程度^[3-4]。作为人们日常生活的必需品,食用油的安全问题更是食品安全问题的重要一环。同时,我国是食用油生产和贸易大国,无论是食用油的生产量还是销售量都在逐年增长,因此保障食用油的质量安全显得尤为重要。

目前,国内外风险评价方法主要分为 3 种:定性评价、定量评价和定性-定量结合评价。定性评价是根据专家的知识、经验和判断对风险进行分析,从而得出结果的方法。代表性的方法包括德尔菲法^[5]、决策树^[6]、危害分析临界控制点(hazard analysis critical control point, HACCP)法^[7]等,定性评价缺点在于过度依赖评价者的主观判断,无法处理大量高维的食用油检测数据。定量评价则是采用数学的方法,对数据进行收集处理,从而对评价对象作出定量结果的价值判断。定量评价方法可以通过数据驱动算法挖掘大量检测数据中的风险规律从而得到风险程度量化值,如熵权系数法^[8]、蒙特卡洛仿真法^[9]、支持向量机法^[10]、人工神经网络法^[11]、深度学习法^[12]等,但是由于定量评价过于依赖数据,导致评价过程只关注可量化的产品属性,并且数据中存在噪声会影响评价结果。同时,有些属性勉强量化后,并不能很好地反映评价结果,有些属性则难以量化。定性-定量结合评价是将上述两个评价方法进行结合。定性-定量结合方法中具有代表性的有如云模型^[13]和模糊综合评价法^[14],二者皆依据隶属度理论将定量风险值以及区间转化为定性语言集。

模糊综合评价法是用模糊数学可以对受到多种因素影响的事件做出一个总体的较为合理的评价的方法^[15]。它能较好地解决难以量化的问题,适合非确定性事件的评价,因此被应用于多个领域。张春生等^[16]基于高校食堂食品安全风险评价指标体系,组织专家对评价对象进行现场考核评分,应用模糊综合法完成某高校食堂风险水平的量化,为高校食堂风险预警及防控提供借鉴和参考。孙成伟等^[17]利用模糊综合评价法,构建粮食安全评价模型。从生产安全、消费安全和流通安全 3 个角度,选取城乡收入比、粮食消费价格指数、耕地面积和铁路里程数等 17 项指标,评价了 2001—2017 年中国粮食安全。

权重系数的评价方法可分为两类方法:主观方法和

客观方法。主观方法比较依赖于专家经验,专家依据各个指标的重要程度给出权重,再对指标进行综合分析评价,这类方法研究的较早所以较为成熟。主观评价方法包括层次分析法、二项系数法^[18]和环比评分法^[19]等。层次分析法主要是通过建立层次结构模型并结合专家意见构建风险判断矩阵^[20]。如刘淑娟等^[21]采用层次分析法将垃圾处理设施中的非定量指标的定性分析转化为定量性的分析,以保证评审工作的客观性。客观方法则是通过对数据进行整理、计算和分析得到的,客观方法需要通过搭建评价模型,根据风险因子自身的特点和影响目标的程度进行评估来确定权重。客观方法有熵权系数法^[22]、标准离差法^[23]、CRITIC 法^[24]等。合理的粮食物流节点对粮食流通起到关键作用,王笑丛等^[25]采用熵权法得到粮食物流节点的指标权重,以便对其布局提供合理的优化建议。主观赋权方法受专家自身影响较大,常常有人质疑其客观性,而客观方法进行分析时仅仅从数据的角度出发不与实际状况相结合,两者都既有优点又有缺点。因此主客观结合的评价方法被广泛运用在食品安全领域^[26],如承海等^[27]将主观方法模糊评价法与客观方法熵权法相结合,构建出了一种客观且实用性强的食品安全风险综合评价模型,有效提升了食品安全监控的效率。

本研究首先用主客观结合的方法确定食用油污染物中各风险因子权重;然后构建了通用型 5 级安全风险等级,采用模糊综合评价法对食用油进行安全评价,得到风险等级划分结果,以期为我国食用油安全问题分析与风险预警提供理论依据,为探索构建新的食品安全风险评估模型提供有效参考。

1 材料与方法

1.1 数据特点与处理

本研究以 2017—2019 年间 11345 行、150 组花生油检测数据为对象进行实例分析。此数据主要由抽检省份、抽检时间、抽检项目、检验结果等类别组成,其中危害物检测项目包含总汞(Hg)、酸值、过氧化值、总砷(As)、铅(Pb)、黄曲霉毒素 B₁、苯并[a]芘等。数据检测指标种类繁多,且数值信息包含大量空值,描述信息也包含了一些离散值,因此需要对数据进行预处理:

首先进行指标筛选,选取常见的易于检测的,对花生油风险程度影响较大的,且对人体危害性较大的 6 种污染物:酸值、过氧化值、总砷(As)、铅(Pb)、黄曲霉毒素 B₁、苯并[a]芘进行权重评定。这些污染物对油的生产、贮存和消费者身体健康均存在危害。

其次进行数据预处理,步骤如下:①删除无用信息。剔除与食品安全关系不大的食品感官类指标,如口感、颜色、

形状等, 简化这些信息以强调影响风险程度的特性。②删除多余符号。例如某个食用油样品铅的检测结果为<0.01 mg/kg, 且检测结果并未超过铅的限值 0.25 mg/kg, 则去掉结果中的<符号, 记为 0.01 mg/kg。③使用极小值替代未检出指标数据。为了保证得到的输入矩阵能够被评价模型识别并且是正定的, 本研究利用极小的数字“0.001”代替“未检出”, 而不是用“0”代替。本研究对未检出指标数据的处理参考了文献[28]。④用公式(1)对各指标检测原值去量纲化处理:

$$x_{ij} = \frac{T_{ij}}{\text{MRL}}$$

(1)

式中, x_{ij} 为无量纲的分析值; T_{ij} 为检测原值; MRL 为研究因素相应的限量标准, 即危害物最大残留限量(maximum residue limit, MRL)。

部分原始检测数据如表 1 所示, 对其进行预处理之后的数据如表 2 所示。

1.2 构建风险评价模型

首先建立食用油污染物风险综合评价指标体系, 在此基础上, 实现对原始数据的综合评价。本研究以 6 项污染物检测原值为定量分析基础, 构建食用油污染物风险综合评价指标体系。通过对多维复杂的食用油危害物检测数据进行数据预处理, 得到了食用油危害物的各风险因子指标, 采用层次分析法、熵权法主客观结合的综合权重分配方法获得各风险因子权重, 最后运用模糊综合评价得到食

用油安全风险评价结果, 具体流程如图 1 所示。

本研究中, 先运用层次分析法获取主观权重, 用熵权法获取客观权重, 将两者进行耦合计算得到综合权重, 然后进行模糊综合评价。该方法兼顾了定性分析与定量分析。

1.3 权重获取

1.3.1 层次分析法指标权重获取

在用于评估食品安全风险的方法中, 需确定食品安全多指标风险因子主观权重时常常使用层次分析法。本研究评估采用 1~9 标度法所示标度准则及解释: a_{ij} 的值域为 [1/9,9], 通过数值的大小来比较两个指标之间的重要程度。 a_{ij} 数值越大表明 a_i 相对于要素 a_j 越重要, 反之则相反。该方法分解评估目标至多个层次, 对目标的每一层中不同因子的相对重要程度进行判断。定义判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

运用层次分析法算取其权重, 可按照以下两个步骤来进行:

步骤 1: 构造层次中元素的判断矩阵;

在各个层次中每个指标的权重值不同。将某一层次上各个不同的影响因子与准则层中的某一个准则或者将其与对目标的影响程度进行两两比较, 给出相应的判断, 将判断写成矩阵形式。用 a_{ij} 表示第 i 个因素相对于第 j 个因素的重要等级评分如公式(2)。

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

(2)

表 1 部分原始数据
Table 1 Partial raw data

样本	酸值 /(mg/kg)	过氧化值 /(g/100 g)	总砷 /(mg/kg)	铅 /(mg/kg)	黄曲霉毒素 B ₁ /(μg/kg)	苯并[a]芘 /(μg/kg)
样本 1	0.770	0.020	0.038	未检出	0.750	1.3
样本 2	0.170	0.700	<0.010	0.044	0.021	未检出
样本 3	0.130	2.600	0.014	<0.040	5.810	2.5
样本 4	1.400	0.520	0.051	0.081	0.502	未检出
样本 5	0.056	0.012	0.010	未检出	0.750	0.8
样本 6	0.150	0.025	0.014	0.046	0.100	1.2
标准限值	3	0.25	0.1	0.1	10	10

注: 酸值、过氧化氢的标准限值参考 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》。总砷、铅、苯并[a]芘的标准限值参考 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》。黄曲霉毒素 B₁ 的标准限值参考 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》。

表 2 预处理后的部分数据
Table 2 Partial data after preprocessing

样本	酸值	过氧化值	总砷	铅	黄曲霉毒素 B ₁	苯并[a]芘
样本 1	0.257	0.080	0.38	0.01	0.0750	0.130
样本 2	0.057	2.800	0.10	0.44	0.0021	0.001
样本 3	0.433	10.400	0.14	0.40	0.5810	0.250
样本 4	0.467	2.080	0.51	0.81	0.0502	0.001
样本 5	0.019	0.048	0.10	0.01	0.0750	0.080
样本 6	0.050	0.100	0.14	0.46	0.0100	0.120

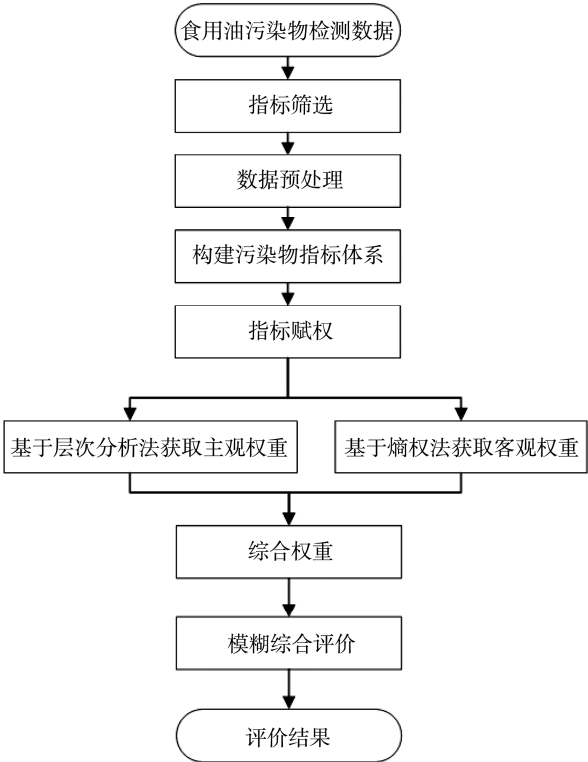


图 1 食用油安全风险评价流程图

Fig.1 Flow chart of edible oil safety risk assessment

得到判断矩阵 A 如公式(3)。

$$A=(a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其判断矩阵标度定义如表 3 所示。

表 3 判断矩阵标度定义

Table 3 Scaling definition of judgment matrix

标度	含义
1	两个因素相比, 具有相同的重要性
3	两个因素, 前者与后者相比稍微重要
5	两个因素, 前者与后者相比显著重要
7	两个因素, 前者与后者相比强烈重要
9	两个因素, 前者与后者相比极端重要
2,4,6,8	表示处于上述相邻值之间
倒数	若因素 i 和因素 j 的重要性之比为 a_{ij} , 那么因素 j 和因素 i 的重要性之比为 $1/a_{ij}$

得到判断矩阵 A 后, 按公式(4)运用方根法确定权重 ω_i 。

$$\omega_{ii} = \left[\frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)} \right]^T \quad (4)$$

步骤 2: 层次单排序和一致性检验

1)计算一致性指标

确定判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量 α 。计算特征值 $\lambda_{\max}$, 如公式(5):

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\alpha)_i}{n\alpha_i} \quad (5)$$

其中, n 为判断矩阵的阶数。

定义一致性指标(consistency index, CI), 如公式(6)。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

2)查找一致性指标

表 4 为平均随机一致性指标(random index, RI)。

表 4 平均随机一致性指标

Table 4 Average random consistency indicators

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

3)计算一致性比例

如公式(7), 当一致性比例(consistent ratio, CR)<0.10时, 表示所建立的判断矩阵是符合一致性的, 否则应对步骤 2 所得的判断矩阵作适当修正, 直到一致性比例符合条件。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

1.3.2 熵权法指标权重获取

根据信息熵的定义, 对于某一项风险因子, 这个风险因子的离散程度可以用熵值来进行判断, 得到的信息熵值越小, 该风险因子的离散程度也就越大, 在整体的综合评价中该风险因子的影响(即权重)就越大^[29]。如果某项指标的值全部相等, 则该指标在综合评价中就不起作用。如今已有很多学者将熵权法运用于食品安全风险因子的评定。

运用熵权法算取其权重, 可按照以下 2 个步骤来进行:

1)熵值计算

对于风险研究指标, 6 类评价指标及相应 6 个检测结果可构成样本矩阵 $X=(x_{ij})_{6 \times 6}$, 其中 $i=1, 2, 3, \dots, 6, j=1, 2, 3, \dots, 6$ 。

熵值计算过程如下:

首先, 因为各风险指标的检测值均非负, 故采用极差标准法对其进行归一化处理, 如公式(8):

$$V_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j(\min)}}{x_{j(\max)} - x_{j(\min)}} \quad (8)$$

式中, V_{ij} 为第 j 类指标第 i 个检测值经归一化处理后的计算结果, $x_{j(\max)}$ 为第 j 类指标 6 个检测结果最大值, $x_{j(\min)}$ 为第 j 类指标 6 个检测结果最小值。

根据熵值定义, 采用公式(9)计算第 j 类指标熵值(e_j):

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \cdot \ln P_{ij} \quad (9)$$

其中, P_{ij} 为第 j 类指标第 i 个评价所占比重, 如公式(10)。

$$P_{ij} = \frac{V_{ij}}{\sum_{j=1}^n V_{ij}} \quad (10)$$

由上式(8)~(10)计算各指标的熵值。

2)熵权计算

第 j 类研究指标的熵权 ω_j 如公式(11)所示:

$$\omega_{2j} = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j} \quad (11)$$

其中, m 为评价指标个数。且满足条件如公式(12)。

$$\sum_{j=1}^m \omega_{2j} = 1 \quad (12)$$

1.3.3 综合权重获取

通过层次分析法确定食品安全多指标风险因子主观权重 ω_{1i} , 再利用熵权法确定客观权重 ω_{2j} , 并将二者结合得到综合权重 W 如公式(13):

$$W = \frac{\omega_{1i} \omega_{2j}}{\sum_{i=1}^n \omega_{1i} \omega_{2j}} \quad (13)$$

其中, $\omega_{1i} \omega_{2j}$ 为各指标权重值乘积。

通过将两种方法得到的指标权重进行耦合计算, 避免了层次分析法受专家自身影响较大, 被质疑其客观性与熵权法进行分析时仅仅从数据的角度出发不与实际状况相结合的问题, 使系统安全评价结果更加精确。

1.4 基于模糊综合分析的评价模型

模糊综合评价法运用的是一种具有不确定性的数学方法, 对受多个指标干扰的评估对象进行综合评估^[30]。该方法的数学模型相对简单易懂, 容易被专业人士掌握。在实际应用中, 运用模糊综合评判法得到的评价结果是系统且合理的。因此本研究采用模糊综合评价法进行食用油风险评价, 最后依据最大隶属度确定评价结果。

首先进行评语集构建, 本研究依据 5 标度模式, 以国家标准为基础设定 5 等级安全风险评语集, 即 $V = \{\text{微风险, 低风险, 中风险, 高风险, 极高风险}\}$, 针对食品行业特性, 本研究引入危害物 MRL。每个风险等级对应的量化值分别为 0.25MRL、0.50MRL、0.75MRL、1.00MRL 和 2.00MRL。对于前 4 个风险等级以等距法设定对应量化值, 为突出极高风险的危害性, 将其对应量化值设为 2 倍的国家限量标准。故评价对象因素集如公式(14)下:

$$U = u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6 \quad (14)$$

根据危害物 MRL 所构建的评语集如表 5 所示。

表 5 食用油污染物安全风险等级划分

Table 5 Classification of safety risk levels of edible oil pollutants

指标	安全风险等级				
	I(微)	II(低)	III(中)	IV(高)	V(超高)
等级秩	0	1	2	3	4
代表值	0.25 MRL	0.50 MRL	0.75 MRL	1.00 MRL	2.00 MRL

然后进行隶属度函数构建。本研究食用油的 6 类风险因子均属于负效应类指标, 即指标检测值需小于关键限值, 适用于降半梯形隶属度函数。对于第 j 类风险因子的第 i 个分析值(x_{ij}), 隶属度计算方法为如式(15)~(17):

当 $q=1$ 时,

$$r_{ijq} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \leq y_q \\ \frac{y_{q+1} - x_{ij}}{y_{q+1} - y_q} & y_q \leq x_{ij} \leq y_{q+1} \\ 0 & x_{ij} \geq y_{q+1} \end{cases} \quad (15)$$

当 $q=2,3,4$ 时,

$$r_{ijq} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq y_{q-1} \\ \frac{x_{ij} - y_{q-1}}{y_q - y_{q-1}} & y_{q-1} \leq x_{ij} \leq y_q \\ \frac{y_{q+1} - x_{ij}}{y_{q+1} - y_q} & y_q \leq x_{ij} \leq y_{q+1} \\ 0 & x_{ij} \geq y_{q+1} \end{cases} \quad (16)$$

当 $q=5$ 时,

$$r_{ijq} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq y_{q-1} \\ \frac{x_{ij} - y_{q-1}}{y_q - y_{q-1}} & y_{q-1} \leq x_{ij} \leq y_q \\ 1 & x_{ij} \geq y_q \end{cases} \quad (17)$$

其中, y_q 表示各评价等级的代表值, 即 $y = \{0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 2.00\}$, 计算出第 j 类风险因子的第 i 个检测数据 x_{ij} 所对应 5 个风险等级的隶属度 r_{ijq} 后, 根据最大隶属度原则即可判断出食用油所属的风险等级。

然后进行模糊综合风险评价, 主要有以下两个步骤:

1)构建模糊子集

首先, 用上文中公式(1)对各指标检测原值去量纲化处理。将无量纲的分析值 x_{ij} 带入相应的隶属函数式中计算, 获得检测样本对于各评价等级的隶属度, 构成第 j 类研究指标的模糊子集 R_j , 如公式(18)。

$$R_j = \begin{bmatrix} r_{1j} \\ r_{2j} \\ \dots \\ r_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1j1} & h_{1j2} & \dots & h_{1j5} \\ h_{2j1} & h_{2j2} & \dots & h_{2j5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{nj1} & h_{nj2} & \dots & h_{nj5} \end{bmatrix} \quad (18)$$

对各等级隶属度取平均, 即获得该风险因子复合隶属度向量 R_{jq} , 式中, $q = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, 如公式(19)。

$$R_{jq} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ijq}}{n} \quad (19)$$

2)综合风险评价计算

以 6 类污染物指标风险复合隶属度向量构建模糊矩阵 $R = (R_{jq})_{6 \times 5}$ 。其中, $j = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $q = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。应

用熵权对模糊矩阵进行合成计算,即可获得各评价因素模糊综合评价矢量 B ,按公式(20)计算:

$$B=W\circ R=(W_1\ W_2\ W_3\ \dots\ W_6)\circ$$
$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{15} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{61} & R_{62} & \dots & R_{65} \end{bmatrix}=(b_1\ b_2\ b_3\ b_4\ b_5) \quad (20)$$

式中, $W_1, W_2, \dots, W_6$ 是各指标熵权; 式中, $\circ$ 是模糊合成算子。积-和算子 $M(\bullet, \oplus)$ 是模糊合成算子的方法之一, 此算子既能突出权重, 又可兼顾各类指标, 综合效能强, 信息损失小, 故本研究选取此算子用于模糊矩阵合成运算。

采用依据等级秩的加权平均计算方法如公式(21)所示, 即可计算各风险因子综合评价值(FSI), 其所属风险等级可基于最大隶属度原则判断。

$$FSI=\frac{\sum_{q=1}^5(b_q\cdot s_q)}{\sum_{q=1}^5b_q} \quad (21)$$

式中, s_q 是各评价等级秩。

对以上算法进行迭代, 可逐级构建各级评价指标相应的模糊子集并计算综合评价指数。

2 结果与分析

实验环境为 Windows10 64 位操作系统, 处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-10400 CPU @ 2.90 GHz, 运行内存为 32 GB, 显卡为一块 NVIDIA RTX 2060(80 w), 实验基于 Matlab R2020a。为验证本研究提出风险评估方法的有效性, 将经过预处理的花生油检测数据作为模型输入数据。然后用层次分析法获得主观, 熵权法获得客观权重, 将两者结合得到综合权重。然后用模糊综合评价法对花生油数据样本进行风险评价, 最后依据最大隶属度确定评价结果。

首先经过专家打分, 得到的判断矩阵如表 6 所示, 依据公式(4)确定权重。其次根据判断矩阵得出特征值和特征向量, 最后根据上文理论方法依据公式(5)和公式(6)进行一致性检验, 结果显示各矩阵均通过一致性验证。

表 6 判断矩阵
Table 6 Judgment matrix

A	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
a_1	1	2	3	5	9	7
a_2	1/2	1	3	7	5	5
a_3	1/3	1/3	1	6	3	3
a_4	1/5	1/7	1/6	1	1/4	1/4
a_5	1/9	1/5	1/3	4	1	1/2
a_6	1/7	1/5	1/3	4	2	1

根据层次分析法所得指数层各指标权重为

$$\omega_i=[0.4040,0.2809,0.1497,0.0326,0.0580,0.0747]$$

然后对指数层的指标元素所得权重进行一致性检验, 根据公式(5)可得 $\lambda_{\max}=4.28$, 根据公式(6)可得 $CI=0.069$, 最后根据公式(7)计算可得 $CR=0.077$, 其值小于 0.1, 说明该指数层判断矩阵符合一致性检验, 因此权重可用于综合评价计算。计算得到的各项权重如表 7 所示。

其中, 样本 1 根据隶属度函数计算得到各评价等级对应的隶属度, 构成的隶属度矩阵如表 8 所示。

根据公式(21)计算各风险因子的综合评价值 FSI, 样本 1 的综合风险评价值为:

$$[0.8596, 0.1404, 0, 0, 0, 0]$$

基于最大隶属度原则判断其所属风险等级, 因此样本 1 的风险等级为微风险。

将预处理后的原始数据结合食用油污染物安全风险等级划分进行评价, 对于样本 1, 大部分污染物的检测值均小于 0.25MRL, 评价专家组意见为可划分为“微风险”, 与本研究评价方法结果一致。因此, 对于本研究中花生油数据样本的风险等级评价, 评价专家组认为该评价方法相对健全, 能够准确地判断食用油数据的风险等级, 使监管部门能及时作出相应的处理措施。对于评价结果为“极高风险”的食用油样本, 可直接将该批食用油列为不合格类别, 禁止上架销售; 对于评价结果为“高风险”“中风险”的食用油样本, 则需要重点检测该批食用油, 避免漏检、错检的情况发生; 对于评价结果为“低风险”的食用油样本, 可适当降低该批次的检测力度; 对于评价结果为“微风险”的食用油样本, 基于评价专家组的评价, 可以选择免检。

表 7 各项污染物权重
Table 7 Weights of each pollutant

指标	酸值	过氧化值	总砷	铅	黄曲霉毒素 B ₁	苯并[a]芘
主观权重	0.4040	0.2809	0.1497	0.0326	0.0580	0.0747
客观权重	0.3243	0.2076	0.2274	0.0497	0.0591	0.1316
综合权重	0.5499	0.2447	0.1429	0.0068	0.0144	0.0413

表 8 样本 1 隶属度矩阵
Table 8 Membership matrix of sample 1

	微风险	低风险	中风险	高风险	极高风险
酸值	0.976	0.024	0	0	0
过氧化值	0.48	0.52	0	0	0
总砷	1	0	0	0	0
铅	1	0	0	0	0
黄曲霉毒素 B ₁	1	0	0	0	0
苯并[a]芘	1	0	0	0	0

3 讨论与结论

本研究收集了 2017—2019 年间 150 组花生油的检测数据, 依据研究对象及花生油污染物风险因子构建了食用油评价指标体系; 采用层次分析法、熵权法主客观结合的综合权重分配方法获得 6 项风险因子的权重, 其中酸值为 0.5499, 过氧化值为 0.2447, 总砷为 0.1429, 铅为 0.0068, 黄曲霉毒素 B₁ 为 0.0144, 苯并[a]芘为 0.0413; 最后运用模糊综合评价得到花生油安全风险评价结果。以样本 1 为例, 根据本研究的评价方法得到的 FSI 评价值, 隶属于微风险的值最高, 故样本 1 评价结果为微风险, 可选择免检。通过模型构建及数据输出评价结果, 结合专家结果, 可知与单一定性或定量评价相比, 本研究的定性-定量结合评价方法具有更高的综合分析能力和更客观的评价能力。本研究方法的深入和拓展, 将全面提升食用油安全监管的效率。

相比于其他领域, 用于食品安全风险评估的方法和模型较少, 因此更应该将其他领域已较为成熟的多指标综合评价方法如灰色关联分析、支持向量机等方法引入到食品安全风险评估中, 不断更新方法, 使食品安全监管体系更加完善。

参考文献

[1] 2006 年—2016 年重大食品安全事件回顾[J]. 中国防伪报道, 2017, (2): 28–33.
Review of major food safety incidents from 2006 to 2016 [J]. China Anti-Counterf Report, 2017, (2): 28–33.

[2] 裘胜. 常态化疫情防控时期的食品安全问题及对策[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(15): 6228–6232.
QIU S. Food safety problems and countermeasures in the period of normal epidemic prevention and control [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(15): 6228–6232.

[3] 王承. 我国食品安全政府监管存在的问题及对策[J]. 食品安全导刊, 2018, (27): 8–11.
WANG C. Existing problems and countermeasures of Chinese food safety government supervision [J]. China Food Saf Magaz, 2018, (27): 8–11.

[4] 武晓娟. 我国食品安全问题分析及对策研究[J]. 食品安全导刊, 2021, (32): 183–185.

WU XJ. Chinese food safety problem analysis and countermeasure research [J]. China Food Saf Magaz, 2021, (32): 183–185.

[5] REON M, TANKISO M, MICHIAEL A. Appraising executive compensation esg-based indicators using analytical hierarchical process and delphi techniques [J]. J Risk Financ Manag, 2022, 15(10): 469.

[6] 樊良优, 姚小强, 王刚, 等. 基于决策树的指挥控制决策方法[J/OL]. 电光与控制: 1-7. [2022-11-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.TN.20220913.1940.033.html>
FAN LY, YAO XQ, WANG G, *et al.* Command and control decision method based on decision tree [J/OL]. Electron Opt Control: 1-7. [2022-11-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.TN.20220913.1940.033.html>

[7] 曹广芝, 朱相师, 张路锋, 等. 危害分析临界控制点管理体系在非洲猪瘟防控中的应用[J]. 四川畜牧兽医, 2022, 49(8): 44–46.
CAO GZ, ZHU XS, ZHANG LF, *et al.* Application of hazard analysis critical control point management system in the prevention and control of African swine fever [J]. Sichuan Animal Veter Sci, 2022, 49(8): 44–46.

[8] 张媛媛, 于咏梅, 王蕾. 基于熵权-变异系数组合权重的金银花质量评价模型构建[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(10): 4303–4308.
ZHANG YY, YU YM, WANG L. Construction of honeysuckle quality evaluation model based on combined weight of entropy weight and coefficient of variation [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(10): 4303–4308.

[9] 王小艺, 陈谦, 赵峙尧, 等. 基于蒙特卡洛仿真的小麦仓储环节菌落总数风险评估方法[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 166–171.
WANG XY, CHEN Q, ZHAO ZY, *et al.* Risk assessment method of total bacterial colony in wheat storage based on Monte Carlo simulation [J]. Food Sci, 2020, 41(23): 166–171.

[10] 刘翠玲, 戴月, 赵琦. 农产品质量安全风险评估方法探索[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(6): 79–84.
LIU CL, DAI Y, ZHAO Q. Exploration of risk assessment methods for agricultural product quality and safety [J]. J Food Sci Technol, 2016, 34(6): 79–84.

[11] 王星云, 左敏, 肖克晶, 等. 基于 BP 神经网络的食物安全抽检数据挖掘[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(6): 85–90.
WANG XY, ZUO M, XIAO KJ, *et al.* Food safety sampling data mining based on BP neural network[J]. J Food Sci Technol, 2016, 34(6): 85–90.

[12] 王小艺, 李柳生, 孔建磊, 等. 基于深度置信网络-多类模糊支持向量机的粮食供应链危害物风险预警[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 17–24.
WANG XY, LI LS, KONG JL, *et al.* Hazard risk warning of grain supply chain based on deep confidence network and multi-class fuzzy support vector machine [J]. Food Sci, 2020, 41(19): 17–24.

[13] YU J, SHEN Z, ZHAO Z, *et al.* Water eutrophication evaluation based on multidimensional trapezoidal cloud model [J]. Soft Comput, 2021, 25(4): 2851–2861.

[14] WANG Q, ZHANG Y. Evaluation of environmental carrying capacity in Xiong'an New Area based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. J Comput Methods Sci, 2022, 22(5): 1737–1750.

[15] 高亚男, 王文倩, 王建新. 集成模糊层级划分的 LightGBM 食品安全风险预警模型: 以肉制品为例[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 197–207.

- GAO YN, WANG WQ, WANG JX. A food safety risk prewarning model using lightgbm integrated with fuzzy hierarchy partition: A case study for meat products [J]. Food Sci, 2021, 42(1): 197–207.
- [16] 张春生, 赵文静, 董良飞, 等. 基于模糊综合法的高校食堂食品安全风险评价[J]. 现代预防医学, 2021, 48(3): 427–429, 468.
- ZHANG CS, ZHAO WJ, DONG LF, *et al.* Risk evaluation of food safety risk in college canteens based on fuzzy evaluation method [J]. Mod Prev Med, 2021, 48(3): 427–429, 468.
- [17] 孙成伟, 张杰, 谷宝同, 等. 基于模糊综合评价的中国粮食安全现状分析[J]. 山西农经, 2019, 255(15): 2–4.
- SUN CW, ZHANG J, GU BT, *et al.* Analysis of China's food security situation based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Shanxi Agric Econ, 2019, 255(15): 2–4.
- [18] 徐其春, 张乃夫, 葛磊蛟, 等. 基于二项系数和变异系数混合的电网投资决策评价计算方法[J]. 中国测试, 2021, 47(12): 6–13.
- XU QC, ZHANG NF, GE LJ, *et al.* Evaluation method of power grid investment decision based on binomial coefficient and variation coefficient [J]. China Meas Test, 2021, 47(12): 6–13.
- [19] 刘宁, 刘宇, 龚先政, 等. 基于关联环比评分法的水足迹评价背景数据遴选模型研究[J]. 质量与认证, 2021, (6): 65–68.
- LIU N, LIU Y, GONG XZ, *et al.* Study on background data selection model of water footprint assessment based on correlation ring comparison scoring method [J]. China Qual Certif, 2021, (6): 65–68.
- [20] RODRIGUEZ R, LEY B. Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process [J]. Interfaces, 2002, 32(6): 93.
- [21] 刘淑娟, 葛翔. 垃圾处理设施项目评审中层次分析法的应用[J]. 行政事业资产与财务, 2022, (2): 58–60.
- LIU SJ, GE X. Application of analytic hierarchy process (AHP) in waste disposal facility project evaluation [J]. Assets Finan Administr Instit, 2022, (2): 58–60.
- [22] LU HZ, CHUN X, CAO X, *et al.* The sustainability evaluation of masks based on the integrated rank sum ratio and entropy weight method [J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5706–5706.
- [23] 杨梦, 雷博, 史露娜, 等. 基于标准离差法的模糊散度多阈值图像分割[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(5): 219–225.
- YANG M, LEI B, SHI LN, *et al.* Fuzzy divergence multi threshold image segmentation based on standard deviation method [J]. Computer Appl Software, 2020, 37(5): 219–225.
- [24] RAU KA, MAT KM, RIZAL H, *et al.* A modified CRITIC method to estimate the objective weights of decision criteria [J]. Symmetry, 2021, 13(6): 973.
- [25] 王笑丛, 杨玉苹, 冀浏果, 等. 熵权系数法在新时期粮食物流节点规划布局中的应用——以沿海通道为例[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(4): 23–27.
- WANG XC, YANG YP, JI LG, *et al.* The application of entropy weight coefficient method in the planning and layout of grain logistics nodes in the new era: A case study of coastal passage [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2022, 30(4): 23–27.
- [26] GENG ZQ, SHANG DR, HAN YM, *et al.* Early warning modeling and analysis based on a deep radial basis function neural network integrating an analytic hierarchy process a case study for food safety [J]. Food Control, 2019, 96: 329–342.
- [27] 承海, 邢家漂, 郑睿行, 等. 基于熵权-模糊分析法的农产品农药残留安全风险综合评价[J]. 中国食品学报, 2021, 21(5): 331–339.
- CHENG H, XING JL, ZHENG RX, *et al.* Comprehensive evaluation of pesticide residue safety risk in agricultural products based on entropy weight-fuzzy analysis method [J]. J Chin Instit Food Sci Technol, 2021, 21(5): 331–339.
- [28] GENG ZQ, ZHAO SS, TAO GC, *et al.* Early warning modeling and analysis based on analytic hierarchy process integrated extreme learning machine (AHP-ELM): Application to food safety [J]. Food Control, 2017, 78: 33–42.
- [29] SHANNON CE. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technol J, 1948, 27(4): 623–656.
- [30] 周泽义, 樊耀波, 王敏健. 食品污染综合评价的模糊数学方法[J]. 环境科学导刊, 2000, (3): 22–26.
- ZHOU ZY, FAN YB, WANG MJ. Study of fuzzy mathematics method in comprehensive assessment of food contamination [J]. Environ Sci Surv, 2000, (3): 22–26.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



陈慧敏, 硕士, 主要研究方向为食品安全风险评价和决策。

E-mail: chm_0504@163.com



于家斌, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品安全风险评价和决策。

E-mail: yujiabin@th.btbu.edu.cn