

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.04.015

基于最优最劣和熵值法的肉制品中重金属污染程度综合评价模型

Comprehensive evaluation model of heavy metal pollution in meat products based on best-worst method and entropy method

王现发 陈 谊 孙悦红

WANG Xian-fa CHEN Yi SUN Yue-hong

(北京工商大学食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048)

(Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

摘要:提出一种基于最优最劣和熵值法的肉制品中重金属污染综合评价模型,该方法首先从毒性、含量 2 个方面构建评价体系,然后用最优最劣法评价各类肉制品的重金属污染程度,用熵值法对各地区肉制品中重金属污染程度进行综合评价。以某省 5 个城市 4 类肉制品重金属检测数据为例进行案例研究,对 4 类肉制品重金属污染程度排序发现,按内梅罗指数法和超标率两种评价方法计算的结果分别为熟肉干制品>腌腊肉制品>酱卤肉制品>熏煮香肠火腿制品和腌腊肉制品>酱卤肉制品>熟肉干制品>熏煮香肠火腿制品;而用文中综合评价方法计算的结果为酱卤肉制品>腌腊肉制品>熟肉干制品>熏煮香肠火腿制品。对 5 市肉制品重金属污染程度进行排序发现,按内梅罗指数法和超标率两种评价方法进行计算的结果均为 A 市>C 市>B 市>E 市>D 市,与文中方法的排序结果一致。对比方法和文中综合评价方法排序结果既有联系又有差异,造成差异的原因是对比方法考虑因素单一,而文中所提模型能较全面客观反映重金属污染情况,并可以有效突出不同地区重金属污染程度的差距。

关键词:综合评价方法;重金属污染;肉制品;最优最劣法;熵值法

Abstract: In order to evaluate the degree of heavy metal (Cd, Cr, Pb, As) pollution in different meat products and different regions comprehensively and quantitatively, a comprehensive evaluation

基金项目:国家重点研发计划(编号:2018YFC1603602);国家自然科学基金(编号:61972010)

作者简介:王现发,男,北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者:陈谊(1963—),女,北京工商大学教授,博士。

E-mail: chenyi@btbu.edu.cn

收稿日期:2020-12-04

method of heavy metal pollution in meat products based on the best-worst method (BWM)-entropy (E) model was proposed. Firstly, Building a comprehensive evaluation index system based on heavy metal toxicity and content. Then, the best-worst method was applied to evaluate the degree of heavy metal pollution in various meat products. Finally, the entropy method was used to comprehensively evaluate the degree of heavy metal pollution in different regions. The case study used in this study was from the results of heavy metal detection results on four meat products in five cities of a province. For the degree of heavy metal pollution in the different meats products, the ranking of results from higher to lower by two methods, the Nemero index method and over-standard rate, were dried cooked meat products>cured meat products>sauced meat products>smoked and boiled sausage and ham products, and cured meat products>sauced meat products>dried cooked meat products>dried cooked meat products, respectively. However, the ranking of results from higher to lower by the comprehensive evaluation value proposed by this study was sauced meat products>cured meat products>dried cooked meat products>dried cooked meat products. For the degree of heavy metal pollution over different regions, the ranking of results from higher to lower by two methods, the Nemero index method and over-standard rate, were city A>city C>city B>city E>city D, and the ranking of result is consistent with that of the method of this study. Comparing above ranking results by the two methods, and the comprehensive evaluation method of this paper, the same and different aspects were found. The reason for the discrepancy was that the comparison methods had limitations in terms of the completeness of evaluation. Our evaluation model in this study can evaluate the degree of heavy metal pollution more comprehensively and effectively, and can highlight the difference in degree of heavy metal pollution among

different regions.

Keywords: comprehensive evaluation method; heavy metal pollution; meat products; best-worst method; entropy method

肉制品是人体蛋白质、矿物质、维生素和脂肪等营养素的主要来源^[1-2],然而,肉制品中残留的重金属会造成人体多个系统与器官损害,同时其危害还具有长期性、隐蔽性、不可逆等特点^[3-4],所以对肉制品中的重金属检测与污染程度的评价是食品污染有害因素风险监测工作中的重要部分。然而,如何根据获取的检测结果对各类肉制品以及不同地区重金属污染程度进行综合定量评价,并依据评价结果为食品安全管理部门的工作给予指导仍是一个亟待解决的问题。

在现有类似的研究中,评价食品中的重金属污染程度方法主要有两类:①使用内梅罗指数法,该方法首先计算食品中各个重金属的分指数,然后计算各个分指数的均值,最后通过分指数的最大值和平均值计算食品的内梅罗指数,用以评价食品中的重金属污染程度^[5-9]。②采用单属性评价方法,通过统计食品的检测频次、检出含量等信息,与其限量标准进行对比得到超标率,以反映食品中重金属污染的严重程度,用于评价食品中重金属污染情况^[10-13]。然而使用当前两种方法计算某类食品中重金属的污染程度时,检测结果中其他属性如重金属毒性等信息被忽略,无法全面地对食品中重金属污染情况进行分析评价。同时,同一采样地区包含多类食品,采用内梅罗指数和超标率确定各地重金属污染情况,忽略了不同种类食品中重金属污染的空间变化情况对整体数据的空间分析造成的影响。

针对现有评价方法存在的不足,综合最优最劣法(Best-Worst Method)和熵值法(Entropy),拟提出一种肉制品中重金属污染综合评价模型BWM-E,分别对各类肉制品以及不同地区的肉制品中重金属污染情况进行综合评价。

1 材料与方法

1.1 试验数据

文中所用数据为中国某省2018年5个城市肉制品重金属抽检数据,由此省分析检测机构提供。酱卤肉制品、腌腊肉制品、熟肉干制品、熏煮香肠火腿制品为该地区主要生产与消费的肉制品。检测结果数据集包含多种属性:采样地区、抽样编号、采样食品类别、检验项目、检验结果、重金属最大限量标准。

1.2 重金属污染等级划分

重金属检出量与各重金属限量标准进行对比,得到各重金属检测频次、检出频次、超标频次等统计结果,以及4个污染等级:1级污染($ND < c \leq 0.1MRL$)、2级污染

($0.1MRL < c \leq 0.5MRL$)、3级污染($0.5MRL < c \leq MRL$)、4级污染($MRL < c$),其中,ND(Not Detection)表示未检出, c 表示重金属残留含量,MRL(Maximum residue limit)表示最高残留限量。

1.3 试验方法

BWM-E综合评价模型由3部分构成:①综合考虑重金属毒性和含量两方面因素,确定评价指标,用以对各类肉制品中重金属污染程度进行综合评价;②利用最优最劣法,通过构建比较向量计算各指标权重,以得到各类肉制品重金属污染指数;③在此基础上,利用熵值法,依据各类肉制品在不同地区的重金属污染指数的变化情况,从而确定在评价对比不同地区的肉制品重金属污染程度时,各类肉制品所占的比重,以计算不同地区的重金属污染综合评价结果。

1.3.1 评价指标选择 参照食品安全国家标准(GB 2762—2017)以及肉制品重金属检测数据,选取重金属种类(铅、镉、铬、总砷)与重金属污染等级2个属性作为评价指标,用于对肉制品的重金属污染程度进行综合评价,共得到16个评价指标如表1所示。

表1 评价指标表

Table 1 The evaluation factors

污染等级	铅	镉	铬	总砷
1级	Pb1	Cd1	Cr1	As1
2级	Pb2	Cd2	Cr2	As2
3级	Pb3	Cd3	Cr3	As3
4级	Pb4	Cd4	Cr4	As4

1.3.2 各类肉制品中重金属污染评价 采用最优最劣方法计算各类肉制品中重金属的污染程度。最优最劣法(BWM)是2015年由荷兰学者Rezaei^[14-15]提出的一种基于功能驱动的多准则决策方法,已被应用于多个领域^[16]。先由专家依据评价指标相对于评价目的的重要性确定最优或最重要指标和最劣或最不重要指标,然后将所有指标分别与最优指标和最劣指标两两比较判断评价指标相对重要性,最终确定各个指标的权重。与层次分析法^[17]相比,BWM虽然同样基于两两比较的原则,但并不是任意指标两两比较,而是构造一种结构化的比较方式,此种比较方式可以减少两两比较的次数,从而降低了因繁琐的两两比较而导致的主观错误,使得结果具有更好的一致性。使用BWM进行综合评价主要分为4个步骤:

(1) 确定评价指标集合: $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。

(2) 确定最优指标 C_B 与最劣指标 C_W :从评价指标集合中确定危害最大的指标作为最优指标与危害最小的指标作为最劣指标,当存在多个最优评价指标或者多个最劣评价指标时,只选取其中一组最优与最劣评价指标

即可。

(3) 构建比较向量:采用 1~9 标度法定量评价指标的重要性,将最优指标 C_B 与所有指标两两比较,将所有指标与最劣指标 C_W 两两比较,得到两个比较向量。

$$A_B = \{a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bm}\}, \quad (1)$$

$$A_W = \{a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}\}, \quad (2)$$

式中:

n ——指标数量;

a_{Bj} ——指标 C_B 和指标 C_j 的重要性之比;

a_{jW} ——指标 C_j 和指标 C_W 的重要性之比。

(4) 计算最优权重集:定义指标的最优权重集合

$\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$,应该满足对于每对 $\frac{\omega_B}{\omega_j}, \frac{\omega_j}{\omega_W}$,理想情况

下 $\frac{W_B}{W_j} = a_{Bj}, \frac{W_j}{W_W} = a_{jW}$,因此为了尽可能接近理想情况,

应该最小化 $\left\{ \left| \frac{\omega_B}{\omega_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{\omega_j}{\omega_W} - a_{jW} \right| \right\}$ 的最大值,同时

应满足各个指标权重非负,所有指标权重之和为 1。求解问题的公式为:

$$\begin{cases} \min \quad \xi \\ \text{s. t.} \\ \left| \frac{\omega_B}{\omega_i} - a_{Bi} \right| \leq \xi (i = 1, 2, \dots, n) \\ \left| \frac{\omega_i}{\omega_W} - a_{iW} \right| \leq \xi (i = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \\ \omega_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}, \quad (3)$$

式中:

W_B ——指标 C_B 的权重;

W_j ——指标 C_j 的权重;

a_{Bj} ——指标 C_B 和指标 C_j 的重要性之比;

a_{jW} ——指标 C_j 和指标 C_W 的重要性之比。

通过式(3)求解最优权重集合 $\{\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_n^*\}$ 与 ξ^* 。其中, ξ^* 越小一致性越好。将各评价指标权重与评价数据集中各类肉制品在该评价指标对应的分值进行加权求和,得到各类肉制品中重金属污染综合评价结果,即各类肉制品的重金属污染指数。

1.3.3 各地区肉制品中重金属污染综合评价 综合各类肉制品的重金属污染指数,利用熵值法对各地的肉制品重金属污染情况进行综合评价与比较。熵值法^[18]根据因子提供信息量的重要性确定其对最终评价结果的权重^[19],在分析各地肉制品中重金属污染变化情况时,若某类肉制品在不同地区的重金属污染指数相差很大,则该类肉制品在用于比较不同地区的重金属污染情况时具有更大的影响,对应的权重越大。过程主要分为 5 个步骤。

(1) 评价指标选择:对各地肉制品重金属污染情况进

行综合评价时,将各类肉制品作为评价指标,各类肉制品所对应的重金属污染指数作为评价指标值。设定评价矩阵为:

$$X = \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_m \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:

R_i ——第 i 个采样地区;

x_{ij} ——第 i 个地区第 j 类肉制品的重金属污染指数;

m ——采样地区数;

n ——各采样地区肉制品采样种类数。

(2) 规范化原始数据:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad (5)$$

式中:

n ——指标个数;

r_{ij} ——第 i 个地区第 j 个指标的规范值。

(3) 计算各指标熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}, \quad (6)$$

式中:

e_j ——第 j 个评价指标的熵值;

k ——比例系数(用于确保 $e_j \in [0, 1]$),一般取 $k = 1/\ln m$ 。

(4) 计算各指标权重:

$$g_j = 1 - e_j, \quad (7)$$

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j}, \quad (8)$$

式中:

g_j ——第 j 个指标的差异系数;

ω_j ——第 j 个指标的权重。

评价过程中,第 j 个指标的熵值越小,其所携带的信息量越大,得到的差异系 g_j 越大。若 $g_j = 0$,表示第 j 个指标对于评价过程的影响程度可忽略不计,则其权重 $\omega_j = 0$ 。

(5) 计算各方案评价结果:

$$E_i = \sum_{j=1}^n \omega_j x_{ij}, \quad (9)$$

式中:

ω_j ——第 j 个指标的权重;

E_i ——第 i 个地区的肉制品中重金属污染指数。

2 结果与讨论

选择某省 5 个城市 2018 年的肉制品重金属污染检

测数据集,共 2 123 条数据作为评价模型的应用实例,部分原始数据如表 2 所示。首先对不同地区各类肉制品的重金属污染情况进行综合评价;然后以市为单位,对不同地区肉制品中重金属污染情况进行综合评价与比较。

2.1 最优最劣法对各类肉制品重金属污染综合评价结果及对比分析

2.1.1 各类肉制品重金属污染综合评价结果

使用最优最劣法对肉制品的重金属状况进行综合评价。首先,对检测数据集进行预处理,然后将不同地区各类肉制品中不同重金属检出率根据评价指标所对应的分类情况进行统计,得到评价指标取值表,用以评价不同地区各类肉制品的重金属污染程度,如表 3 所示。然后使用 BWM 方法确定 4 种重金属的权重,依据肉制品中重金属限量标准^[20]与食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)制定的每周耐受摄入量(PTWI)、每月耐受摄入量(PTMI)或中国营养学会制定的相关标准^[4][由于国际上对 Cr 缺乏统一标准,因此参考中国营养学会制定的每日可耐受最高摄入量 500 $\mu\text{g}/\text{d}$;由于 As 的形态多样,毒性差异甚大,目前 JECFA 只制定了无机砷的 PTWI,故 As 参考 JECFA 制定的无机 As 的 PTWI,为 0.015 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{周})$;由于 JECFA 在 2010 年取消了 Pb 的 PTWI 值且并未再制定新的标准,因此 Pb 参考 JECFA 之前制定的 PTWI 值,为 0.025 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{周})$; JECFA 制定镉的 PTMI 为 0.025 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{月})$]选取最优指标和最劣指标,分别为镉和铬,将最优指标镉分别与铬、铅、总砷、镉两两比较,将铬、铅、总砷、镉分别与最劣指标铬作两两比较,得到一组比较向量 $\mathbf{A}_B=(9,4,3,1)$, $\mathbf{A}_W=(1,4,5,9)$ 。然后使用 BWM 方法确定各个污染等级的权重,其中最优指标为 4 级污染,最劣指标为 1 级污染,将最优指标 4 级污染分

别与 1 级、2 级、3 级、4 级两两比较,将 1 级污染、2 级污染、3 级污染、4 级污染分别与最劣指标 1 级污染作两两比较,得到一组比较向量 $\mathbf{A}_B=(9,6,3,1)$, $\mathbf{A}_W=(1,3,6,9)$ 。将两组比较向量代入式(3)计算各组权重 W_1 和 W_2 , W_1 中镉、铬、铅、砷权重分别为 0.571, 0.056, 0.160, 0.213, 其对应的 ξ 为 0.067, W_2 中 1 级、2 级、3 级、4 级污染权重分别为 0.055, 0.116, 0.232, 0.597, 其对应的 ξ 为 0.099, 两组比较向量所求 ξ 结果较为理想(<0.1), 可用为后续的分析^[21]。最后将两组权重 W_1, W_2 代入公式 $W=W_2^T W_1$, 得到 16 个评价指标的权重,如表 4 所示。

将各评价指标权重与表 3 中对应的评价指标值进行加权求和,得到综合评价结果如表 5 所示。结果显示,各类肉制品中重金属污染程度由高到低依次为:酱卤肉制品、腌腊肉制品、熟肉干制品、熏煮香肠火腿制品。主要原因为酱卤肉制品与腌腊肉制品中各类重金属检出率较高,且存在超标的样品,故其相较于其他两类肉制品污染程度更为严重。酱卤肉制品中各类重金属检出率均高于腌腊肉制品,且酱卤肉制品中毒性最大的重金属镉超标率较高,而腌腊肉制品中超标的重金属主要为毒性最小的铬,故酱卤肉制品中重金属污染最为严重。熟肉干制品中各类重金属检出率均高于熏煮香肠火腿制品,故熟肉干制品中重金属污染程度高于熏煮香肠火腿制品。

2.1.2 对比分析

将用文中提出的评价模型得到的 2018 年 A 市各类肉制品中重金属污染程度与采用内梅罗指数法(原始数据见表 5)、超标率得到的重金属污染情况进行对比,结果如表 6 所示。对比发现 3 种不同评价方法得到完全不同的评价结果。导致其差异的原因为,内梅罗指数法在评价各类肉制品重金属污染程度时,仅考虑了各类肉制品中重金属单项污染指数的最大值与平均值,导致其评价结果极易受最大值的影响。而超标率在

表 2 肉制品抽检数据原始表(部分)

Table 2 Original table of sampling inspection data of meat products(Part)

地区	抽样编号	食品类别	检验项目	检验结果/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	最大允许限量 ^[20] / $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
A 市	PP18420500470430316	酱卤肉制品	铅	ND	0.5
A 市	PP18420500470430316	酱卤肉制品	镉	0.001 87	0.1
B 市	PP18422800471804008	酱卤肉制品	铅	ND	0.5
B 市	PP18422800471804008	酱卤肉制品	镉	ND	0.1
C 市	XC19421181349030264	熏煮香肠火腿制品	铅	ND	0.5
C 市	XC19421181349030264	熏煮香肠火腿制品	总砷	ND	0.5
C 市	XC19421181349030263	腌腊肉制品	铅	ND	0.5
C 市	XC19421181349030263	腌腊肉制品	总砷	ND	0.5
D 市	PP18420000003339668	熟肉干制品	铅	ND	0.5
D 市	PP18420000003339668	熟肉干制品	总砷	0.052	0.5
E 市	PP1842000000333728	熏煮香肠火腿制品	铬	0.23	1.0
E 市	DC19420100003431599	熟肉干制品	镉	0.003 1	0.1

表 3 评价指标取值表[†]
Table 3 Evaluation factors' statistics

%

指标	A 市				B 市				C 市			
	酱卤肉	腌腊肉	熏煮香肠火腿	熟肉干	酱卤肉	腌腊肉	熏煮香肠火腿	熟肉干	酱卤肉	腌腊肉	熏煮香肠火腿	熟肉干
Pb1	14.0	24.7	15.4	6.7	0.0	21.7	8.3	20.7	7.6	4.0	9.1	9.1
Pb2	48.8	24.7	7.7	30.0	0.0	4.3	0.0	6.9	30.4	20.0	27.3	36.4
Pb3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	5.1	4.0	0.0	0.0
Pb4	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	0.0
Cd1	41.9	74.0	30.8	21.4	20.8	34.8	25.0	15.4	12.7	21.1	0.0	40.0
Cd2	32.6	4.1	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	22.8	0.0	10.0	0.0
Cd3	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.27	0.0	0.0	0.0
Cd4	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cr1	40.8	28.3	0.0	26.7	12.5	28.3	25.0	0.0	12.3	13.0	10.0	20.0
Cr2	28.6	28.3	27.2	33.3	4.2	13.0	16.7	15.4	28.8	21.7	10.0	10.0
Cr3	0.0	4.3	0.0	16.7	4.2	2.2	16.7	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0
Cr4	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.37	4.3	0.0	0.0
As1	60.5	45.2	7.7	34.4	45.9	65.2	50.0	50.0	25.8	41.7	0.0	0.0
As2	9.3	4.1	0.0	12.5	0.0	0.0	0.0	12.5	9.1	45.8	0.0	28.6
As3	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	4.2	0.0	0.0
As4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

指标	D 市				E 市			
	酱卤肉	腌腊肉	熏煮香肠火腿	熟肉干	酱卤肉	腌腊肉	熏煮香肠火腿	熟肉干
Pb1	0.0	12.5	4.5	0.0	21.7	35.3	5.6	0.0
Pb2	0.0	21.9	22.7	0.0	0.0	5.9	5.6	0.0
Pb3	0.0	3.1	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd1	15.6	0.0	0.0	0.0	10.5	18.2	11.1	11.1
Cd2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cd4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cr1	0.0	6.9	4.3	0.0	13.6	5.9	0.0	31.3
Cr2	0.0	27.6	13.0	0.0	0.0	5.9	5.6	25.0
Cr3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	6.3
Cr4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
As1	25.0	15.0	0.0	57.1	9.1	23.5	5.6	16.7
As2	0.0	0.0	6.2	7.1	0.0	0.0	0.0	16.7
As3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
As4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

[†] 表格中数值表示该指标所对应的检出频次与该指标所对应的重金属检测总数的比值,如 A 市 a 中 Pb4 所对应的值为 A 市 a 中 Pb4 检出数与 A 市 a 中 Pb 检测总数的比值。

表 4 评价指标权重
Table 4 Evaluation factor weight

评价指标	Pb1	Pb2	Pb3	Pb4	Cd1	Cd2	Cd3	Cd4
权重	0.009	0.019	0.037	0.096	0.031	0.066	0.133	0.341
评价指标	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	As1	As2	As3	As4
权重	0.003	0.006	0.013	0.033	0.012	0.025	0.049	0.127

表5 A市不同种类肉制品中重金属单项污染指数

Table 5 Single pollution index of heavy metals in different kinds of meat products in city A

肉制品种类	Pb	Cd	Cr	As
酱卤肉制品	0.126	0.139	0.091	0.047
腌腊肉制品	0.071	0.036	0.206	0.023
熏煮香肠火腿制品	0.047	0.012	0.037	0.003
熟肉干制品	0.112	0.030	0.260	0.063

表6 不同方法计算各类肉制品中重金属污染评价结果(A市)

Table 6 Evaluation results of heavy metal pollution in meat products by different methods (city A)

肉制品种类	内梅罗指数法	超标率/%	BWM
酱卤肉制品	0.121	4.08	7.661
腌腊肉制品	0.157	5.48	4.548
熏煮香肠火腿制品	0.038	0.00	1.513
熟肉干制品	0.201	0.00	2.907

评价肉制品重金属污染程度时,仅考虑了不合格的肉制品,未考虑有检出但合格的肉制品。同时两者在评价各类肉制品重金属污染时,均未考虑重金属毒性的差异,导致其结果仅能从某一方面反映肉制品重金属污染程度。而使用文中方法评价各类肉制品重金属污染程度时,综合考虑了含量与毒性两个因素,其结果更加客观全面。

2.2 熵值法对不同地区肉制品重金属污染综合评价结果及对比分析

2.2.1 各地肉制品重金属污染综合评价结果 经过最优最劣法计算出不同地区各类肉制品的重金属污染指数,在此基础上利用熵值法对不同地区肉制品重金属污染情况进行综合评价。将不同地区各类肉制品重金属污染综合评价结果代入式(5)~式(8),得到各类肉制品在不同地区重金属污染综合评价过程中的权值,如表7所示。将表7中各类肉制品权重与不同地区各类肉制品中重金属污染指数进行加权求和,得到各个地区的肉制品中重金属污染综合评价值,如表8所示。在此抽检数据集中,各地肉制品重金属污染程度由高到低依次为A市、B市、E市、D市。

2.2.2 对比分析 将用文中提出的评价模型得到的2018年5个城市肉制品中重金属污染程度与采用内梅罗指数法(原始数据见表8)、超标率得到的重金属污染情况进行对比。3种方法评价结果如表9所示,根据内梅罗指数法和超标率对不同地区重金属污染情况进行排序,发现得到完全相同的排序结果,各地区之间内梅罗指数和超标率差别较小。通过文中提出评价模型计算得到的各地肉制品中重金属污染程度排序结果与对比方法评价结

表7 各地肉制品重金属污染评价指标的权值

Table 7 Weights of heavy metal pollution evaluation factors for meat products in different regions

肉制品	酱卤肉制品	腌腊肉制品	熏煮香肠火腿制品	熟肉干制品
权重	0.560	0.190	0.142	0.108

表8 不同地区肉制品中重金属单项污染指数

Table 8 Single pollution index of heavy metals in meat products in different regions

地区	Pb	Cd	Cr	As
A市	0.089	0.054	0.148	0.034
B市	0.022	0.013	0.097	0.032
C市	0.119	0.029	0.070	0.064
D市	0.053	0.003	0.025	0.013
E市	0.022	0.007	0.067	0.012

表9 不同方法计算各地肉制品中重金属污染评价结果

Table 9 Evaluation results of heavy metal pollution in meat products by different methods

地区	内梅罗指数法	超标率/%	BWM-E
A市	0.119	2.84	5.683
B市	0.074	0.00	1.647
C市	0.098	2.11	3.376
D市	0.041	0.00	0.845
E市	0.051	0.00	0.862

果一致,但是A市、C市污染指数明显高于其他地区,尤其是A市。这是由于A市、C市肉制品重金属检出率明显高与其他地区且存在超标情况,此外,A市中毒性最大的重金属镉的检出率及超标率较高。

与内梅罗指数法和超标率两种评价方法相比,采用文中提出的评价模型进行各地区的肉制品重金属污染程度对比时,通过结合多属性评价,以及比较各类肉制品中重金属污染在不同地区间的变化情况,能够着重突出检测结果波动较大的地区,对监管人员和数据分析人员起到警示作用。

3 结论

综合肉制品的重金属检测数据的多种属性,构建了基于最优最劣和熵值法的肉制品重金属污染综合评价模型BWM-E,对各类肉制品中重金属污染情况进行定量的评价,在此基础上得到不同地区的肉制品重金属污染综合评价结果。与内梅罗指数法和超标率两种传统评价方法相比,此模型综合考虑毒性和含量两个因素,使得评价结果更全面客观地反映重金属污染情况,并有效突出不同地区肉制品重金属污染程度的差距。在以后的研究中,

可以综合考虑更多的风险影响因素,使风险评估更加客观合理。该方法同样可以应用于对其他食品的污染情况进行综合评价,为食品安全风险评估工作提供参考。

参考文献

- [1] WANG Xue-li, ZHANG Yan, GENG Zhi, et al. Spatial analysis of heavy metals in meat products in China during 2015—2017[J]. Food Control, 2019, 104: 174-180.
- [2] 王彩霞, 刘宇, 郭蓉, 等. 陕西生鲜肉类中重金属污染状况调查及健康风险评估研究[J]. 现代预防医学, 2018, 45(1): 35-39.
- [3] BRATTY M A, ALHAZMI H A, OGDIN S J, et al. Determination of heavy metals in various tissues of locally reared (baladi) chicken in jazan region of saudi arabia: Assessment of potential health risks[J]. Pakistan Journal of Zoology, 2018, 50(4): 1 509-1 517.
- [4] 程加迁, 王俊平. 蔬菜水果重金属膳食暴露评估中风险权重的确定方法[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 54-59.
- [5] 秦隆兵, 李祖祥, 杨玉荣, 等. 三峡库区根茎类蔬菜中重金属含量分析及评价[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 70-73.
- [6] 余志, 陈凤, 张军, 等. 方锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 2 086-2 094.
- [7] 付洁, 孙洪欣, 张敏, 等. 市售食用菌中重金属含量特征及其健康风险评价[J]. 中国食品学报, 2019, 19(6): 230-237.
- [8] 王彦斌, 杨一鸣, 曾亮, 等. 甘肃省榆中县菜地土壤与蔬菜中重金属含量及健康风险评估[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 234-241.
- [9] 张瑞宁, 谢娟, 蒲晓, 等. 河北燕郊地区市售常见蔬菜重金属含量与健康风险评估[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 229-233.
- [10] 邓丽丽, 王晓红, 张卓. 沈阳市市售蔬菜的农药残留、亚硝酸盐及重金属状况调查[J]. 现代食品, 2019, 21(2): 191-196.
- [11] 胡云卿, 杨柳桦, 林滔, 等. 某市自产蔬菜重金属污染调查研究[J]. 浙江预防医学, 2015, 27(4): 346-350.
- [12] 任艳军, 马建军. 秦皇岛市蔬菜中重金属污染状况及健康风险分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(2): 79-84.
- [13] 王丽华, 张世勇, 李玉芸. 重庆市蔬菜中铅、镉、汞、砷污染状况分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(12): 1 994-1 997.
- [14] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. Omega, 2015, 53: 49-57.
- [15] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method; Some properties and a linear model[J]. Omega, 2016, 64: 126-130.
- [16] MI Xiao-mei, TANG Ming, LIAO Hu-chang, et al. The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next? [J]. Omega, 2019, 87: 205-225.
- [17] 陈谊, 陈星如, 常巧英, 等. 一种基于 AHP-E 模型的多因子农药残留污染综合评价方法[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 276-283.
- [18] 陈华友. 熵值法及其在确定组合预测权重系数中的应用[J]. 安徽大学学报(自科版), 2003, 27(4): 1-6.
- [19] LIANG Ji-ye, SHI Zhong-zhi, LI De-yu, et al. Information entropy, rough entropy and knowledge granulation in incomplete information systems[J]. International Journal of General Systems, 2006, 35(6): 641-654.
- [20] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 2-9.
- [21] 李青林, 彭其渊, 郭经纬, 等. 基于 BWM 的中欧班列客户需求偏好异质性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(3): 32-36.
- [12] GU Peng, FENG Yao-ze, ZHU Le, et al. Unified classification of bacterial colonies on different agar media based on hyperspectral imaging and machine learning[J]. Molecules, 2020, 25(8): 1 797.
- [13] 石吉勇, 吴胜斌, 邹小波, 等. 基于高光谱技术的酸奶中常见致病菌的快速鉴别及计数[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(4): 1 186-1 191.
- [14] 罗微, 杜焱皓, 章海亮. PCA 和 SPA 的近红外光谱识别白菜种子品种研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(11): 3 536-3 541.
- [15] BONAH E, HUANG Xing-yi, REN Yi, et al. Vis-NIR hyperspectral imaging for the classification of bacterial foodborne pathogens based on pixel-wise analysis and a novel CARS-PSO-SVM model [J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 105: 103220.
- [16] 成甜甜, 王克俭, 韩宪忠, 等. 基于 PSO-LSSVM 和特征波长提取的羊肉掺假检测方法[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 52-56.
- [17] TANG He-sheng, XUE Song-tao, CHEN R, et al. Online weighted LS-SVM for hysteretic structural system identification[J]. Engineering Structures, 2006, 28(12): 1 728-1 735.
- [18] 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 73-74.
- [19] 栢凤女. 大肠杆菌、单增李斯特菌近红外特征敏感组分的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013: 22.
- [20] 石吉勇, 张芳, 胡雪桃, 等. 基于高光谱技术的乳杆菌快速鉴别[J]. 中国食品学报, 2018, 18(8): 208-213.
- [21] 穆渴心. 基于傅里叶变换近红外光谱结合化学计量学的食源性致病菌快速检测[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 16.

(上接第 67 页)