DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260107002
引用格式: 杨尚超, 黄慧, 孙竞雅, 等. 基于熵权-逼近理想解排序法耦合模型的黄曲霉毒素 B_1 快检产品评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 58–67.
Yang Shangchao, Huang Hui, Sun Jingya, et al. Evaluation of rapid test products for aflatoxin B_1 based on the entropy weight method-technique for order preference by similarity to an ideal solution coupling model [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 58–67. (in Chinese with English abstract).

基于熵权-逼近理想解排序法耦合模型的黄曲霉毒素 B_1 快检产品评价

杨尚超[1,2], 黄　慧[3], 孙竞雅[1,2], 王海波[1,2], 李　锐[1,2*]

[1. 广西—东盟食品检验检测中心, 南宁　530000; 2. 国家市场监督管理总局技术创新中心(天然香料香精), 南宁　530000; 3. 湖北大学知行学院, 武汉　430000]

摘　要: 目的　基于熵权-逼近理想解排序法耦合模型(entropy weight method-technique for order preference by similarity to an ideal solution coupling model, EW-TOPSIS), 对市售黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxin B_1, $AFTB_1$)快检产品开展评价。**方法**　将不同品牌的黄曲霉毒素 B_1 快检产品在不同应用环境、不同操作人员、不同食品基质的多维度下进行检测, 考察灵敏度、假阴性率、假阳性率 3 项指标。用 EW-TOPSIS 分析, 经熵权法客观赋权消除主观偏差, 再结合 TOPSIS 法计算产品与理想解贴近度排序, 全面评价 3 个品牌综合性能, 最终构建完整科学的 $AFTB_1$ 快检产品评价体系。**结果**　熵权法赋权显示灵敏度、假阴性率、假阳性率权重分别为 0.3377、0.3377、0.3247。3 个品牌性能优劣贴近度排序为甲(0.8597)>乙(0.6136)>丙(0.4214)。贴近度越高综合性能越优, 甲品牌在极端温度及不同操作人员条件下仍表现稳定, 在准确性、特异性、适用性上突出, 乙、丙品牌依次递减。**结论**　该模型适用于对各种品牌多种基质的快检产品进行综合性评价, 为基层选型、监管部门质控提供依据, 同时为快检产品评价提供新思路, 推动快检技术在食品安全领域规范化应用。

关键词: 黄曲霉毒素 B_1; 快检产品; 熵权-逼近理想解排序法耦合模型; 评价
中图分类号: TS207　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)13–0058–10

Evaluation of rapid test products for aflatoxin B_1 based on the entropy weight method-technique for order preference by similarity to an ideal solution coupling model

YANG Shang-Chao[1,2], HUANG Hui[3], SUN Jing-Ya[1,2], WANG Hai-Bo[1,2], LI Rui[1,2*]

(1. *Guangxi-ASEAN Food Inspection Center*, *Nanning* 530000, *China*; 2. *Technology Innovation Center of Natural Fragrances and Flavors*, *State Administration for Market Regulation*, *Nanning* 530000, *China*; 3. *Zhixing College*, *Hubei University*, *Wuhan* 430000, *China*)

收稿日期: 2026-01-07
基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB24010013); 广西市场监督管理局科技计划项目(GXSJKJ2025-16)
第一作者: 杨尚超(1999—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为食品检测及质量分析。E-mail: 1459705146@qq.com
***通信作者:** 李锐(1976—), 男, 硕士研究生, 副主任药师, 主要研究方向为食品检测及质量分析。E-mail: 59240015@qq.com

ABSTRACT: Objective　To evaluate commercially available rapid test products for aflatoxin B_1 based on the entropy weight method-technique for order preference by similarity to an ideal solution coupling model (EW-TOPSIS). **Methods**　Rapid test products of different brands for aflatoxin B_1 were tested under multi-dimensional conditions involving different application environments, different operators and different food matrices. The 3 indicators, namely sensitivity, false negative rate and false positive rate, were examined. EW-TOPSIS analysis was performed, in which objective weighting through the entropy weight method was employed to eliminate subjective bias, and then the TOPSIS method was combined to calculate the closeness of products to the ideal solution for ranking. The comprehensive performance of 3 brands was systematically evaluated, and ultimately a complete and scientific evaluation system for $AFTB_1$ rapid test products was established. **Results**　The weights of sensitivity, false negative rate and false positive rate determined by the entropy weight method were 0.3377, 0.3377 and 0.3247, respectively. The ranking of the 3 brands based on the closeness coefficient was brand A (0.8597)>brand B (0.6136)>brand C (0.4214). A higher closeness coefficient indicated better comprehensive performance; therefore, Brand A was identified as the optimal one, which remained stable under extreme temperatures and with different operators, exhibiting outstanding performance in accuracy, specificity, and applicability, followed by brand B and brand C in descending order. **Conclusion**　This model is applicable for the comprehensive evaluation of rapid test products of various brands and matrices, providing a basis for product selection at the grassroots level and quality control by regulatory authorities, while also offering a novel approach for the evaluation of rapid test products and promoting the standardized application of rapid test technology in the field of food safety.

KEY WORDS: aflatoxin B_1; rapid test products; entropy weight method-technique for order preference by similarity to an ideal solution coupling model; evaluation

0　引　言

黄曲霉毒素 B_1 (aflatoxin B_1, $AFTB_1$)是一种强致癌性真菌毒素, 对人体健康危害极大, 长期摄入会诱导基因突变[1], 显著增加肝癌、胃癌等癌症风险[2–4], 各级监管部门将其列为重点监控项目。GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》明确规定, 腐乳、小麦、杏仁中 $AFTB_1$ 限量为 5 μg/kg[5]。检测 $AFTB_1$ 的实验室方法包括高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)[6–8]、液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)[9–11]、酶联免疫吸附法[12–14]、薄层色谱法[15–17]等, 上述方法准确性高, 但操作烦琐, 耗时久、成本高昂, 难以满足现场快速筛查需求[18–19]。

快速检测(以下简称快检)技术的兴起弥补了传统方法的不足, 胶体金免疫层析法[20–22]因操作简便、检测快速被广泛应用。市场上 $AFTB_1$ 快检产品品牌众多, 多以抗原抗体特异性结合[23–25]为原理, 但缺乏一套科学有效的产品评价体系。国家市场监督管理总局 2023 年颁布的食品快速检测产品符合性评价技术要求规定了灵敏度、假阴性率、假阳性率等指标, 上述指标均在理想环境下检测而得, 未涉及对指标结果的评判。

基于熵权-逼近理想解排序法耦合模型(entropy weight method-technique for order preference by similarity to an ideal solution coupling model, EW-TOPSIS)是将熵权法与逼近理想解排序法有机结合的多属性决策方法。熵权法通过指标数据离散程度客观赋权——熵值越小, 信息量越大, 权重越高, 有效规避主观偏差。TOPSIS 法通过构造理想解与负理想解, 计算各评价对象与二者的距离, 得出相对贴近度作为综合排序依据。二者的耦合逻辑在于: 熵权法解决“指标重要性如何确定”的客观赋权问题, TOPSIS 法解决“多指标如何综合比较”的排序问题。模型运行从原始数据出发, 经熵权法计算权重, 引入 TOPSIS 法构建加权决策矩阵, 最终得到无量纲的相对贴近度指数。这种耦合可实现从信息提取到决策排序的完整链条, 为多属性评价提供科学的工具。

本研究以胶体金免疫层析快检产品为对象, 针对其在 AFB_1 检测中缺乏系统性评价方法、且实际应用受环境、操作人员及食品基质等因素影响导致性能表现不一的现状, 创新性地将 EW-TOPSIS[26–30]引入快检产品综合性能评价领域。利用熵权法根据实验数据的离散程度客观赋权, 避免主观偏差; 进而采用 TOPSIS 法计算各产品与理想解的贴近度, 实现综合性能的量化排序。该模型为快检产品的科学选型与质量控制提供了新的量化工具, 不仅拓展了多属性决策方法在食品安全快检领域的应用, 也推动评价标准从实验室理想条件向实际应用场景延伸。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

腐乳、小麦、杏仁均为市售。

乙腈(色谱纯，默克股份两合公司)；$AFTB_1$ 标准物质(纯度 98.60%，普瑞邦有限公司)。

$AFTB_1$ 快检产品：共 3 个品牌，分别标记为甲、乙、丙品牌，原理均为胶体金免疫层析法，均包含腐乳、小麦、杏仁 3 种基质的检测方法，标称检出限均为 5 μg/kg。

1.2 仪器与设备

QTRAP 4500 型液相色谱串联质谱仪(美国应用生物系统公司)；Waters Atlantis T3 色谱柱(2.1 mm×150 mm, 3 μm)(美国 Waters 公司)；MS303TS 型电子天平(精度 0.001 mg，瑞士梅特勒-托利多公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 标准溶液制备

精密称取 1 mg 的 $AFTB_1$ 标准物质，置于 100 mL 容量瓶中，用乙腈溶解并定容至刻度，配成质量浓度 10 μg/mL 的 $AFTB_1$ 储备液。精密量取 1 mL $AFTB_1$ 储备液，置于 100 mL 容量瓶中，用乙腈溶解并定容至刻度，配成 100 ng/mL 的 $AFTB_1$ 标准溶液。

1.3.2 阴性样品制备

取腐乳、小麦、杏仁样品，用 GB 5009.22—2016《食品安全国家标准 食品中黄曲霉毒素 B 族和 G 族的测定》第一法检测，不含 $AFTB_1$，各取 5 g，分装于 50 mL 离心管中，作为阴性样品中的空白样品。

取腐乳、小麦、杏仁空白样品各 5 g，分装于 50 mL 离心管中，分别精密加入 125 μL $AFTB_1$ 标准溶液，配成 2.5 μg/kg 的 $AFTB_1$ 加标样品，作为阴性样品中的 0.5 倍检出限样品。

1.3.3 阳性样品制备

取腐乳、小麦、杏仁阴性样品各 5 g，分装于 50 mL 离心管中，分别精密加入 250 μL $AFTB_1$ 标准溶液，配成 5 μg/kg 的 $AFTB_1$ 加标样品，作为阳性样品中的 1 倍检出限样品。

1.3.4 样品均匀性和稳定性考察

将配制好的阴性样品中的空白样品、阴性样品中的 0.5 倍检出限样品、阳性样品中的 1 倍检出限样品，按照 CNAS—GL003《能力验证样品均匀性和稳定性评价指南》考察其均匀性和稳定性，均匀性符合要求，样品在冷冻条件下 90 d 内稳定。

1.3.5 检 测

根据快速检测产品说明书进行操作，每个品牌每种基质均检测空白样品、0.5 倍检出限样品、1 倍检出限样品，并记录检测结果。

1.3.6 EW-TOPSIS 构建

该模型建立首先确定以灵敏度、假阴性率、假阳性率为评价指标，通过实验获取各品牌在不同基质下的原始数据；采用极差变换法对数据进行标准化处理，其中灵敏度为效益型指标，假阴性率和假阳性率为成本型指标；然后运用熵权法根据各指标数据的信息熵客观计算权重；再将标准化值与对应权重相乘得到加权规范化决策矩阵；最后通过 TOPSIS 法计算各方案与正负理想解的欧氏距离及相对贴近度，根据贴近度高低对产品综合性能进行排序。计算流程见图 1。

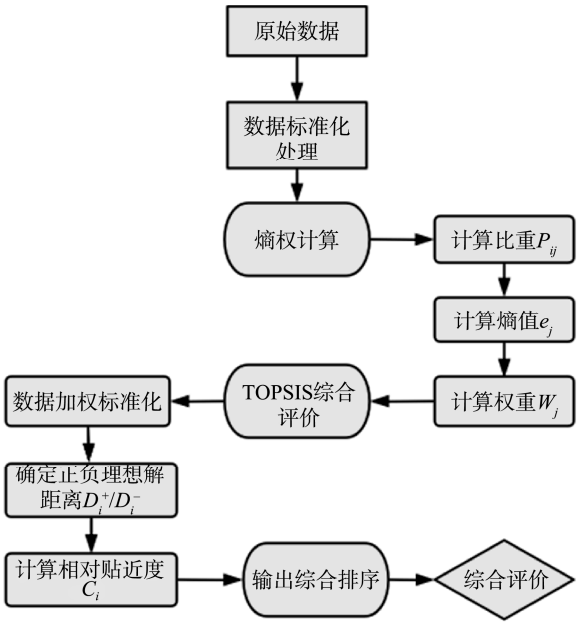


图 1 计算流程

Fig.1 Calculation process

灵敏度、假阴性率和假阳性率，其计算如公式(1)~(3)所示：

$$\text{灵敏度}/\%=\frac{B}{A}\times 100\% \tag{1}$$

$$\text{假阴性率}/\%=\frac{A-B}{A}\times 100\% \tag{2}$$

$$\text{假阳性率}/\%=\frac{D}{C}\times 100\% \tag{3}$$

式中：A 为阳性样品数；B 为检测结果为阳性的阳性样品数；C 为阴性样品数；D 为检测结果为阳性的阴性样品数。

指标数据标准化其计算如公式(4)、(5)所示：

$$\text{效益型指标：}\ r_{ij}=\frac{x_{ij}-\min x_j}{\max x_j-\min x_j} \tag{4}$$

$$\text{成本型指标：}\ r_{ij}=\frac{\max x_j-x_{ij}}{\max x_j-\min x_j} \tag{5}$$

式中：r_{ij} 为第 i 个方案第 j 项指标的标准化值；x_{ij} 为第 i 个方案第 j 项指标的原始值；$\min x_j$ 为第 j 项指标的最小值；$\max$

x_j 为第 j 项指标的最大值。

信息熵确定各指标权重其计算如公式(6)~(8)所示:

$$\text{比重:}\ P_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sum r_{ij}} \tag{6}$$

$$\text{熵值}^{[26-27]}:\ e_j=\frac{1}{\ln n}\sum_i^n P_{ij}\ln P_{ij} \tag{7}$$

$$\text{权重:}\ W_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{m}\left(1-e_j\right)} \tag{8}$$

式中: P_{ij} 为第 j 项指标下第 i 个方案的特征比重; $\sum r_{ij}$ 为第 j 项指标所有方案标准化值之和; e_j 为第 j 项指标的信息熵; $\frac{1}{\ln n}$ 为标准化系数(熵值范围在[0,1]之间); $\sum_{i=1}^{n}Pij\ln Pij$ 为第 j 项指标所有方案比重与比重对数的乘积和; $\ln P_{ij}$ 为比重 P_{ij} 的自然对数; n 为方案总数; w_j 为第 j 项指标的权重; 1-e_j 为第 j 项指标的差异系数; $\sum_{j=1}^{m}\left(1-e_j\right)$ 为所有 m 个指标差异系数的和; m 为指标总数。

加权规范化值其计算如公式(9)所示:

$$V_{ij}=w_{ij}\times r_{ij} \tag{9}$$

式中: V_{ij} 为第 i 个方案第 j 项指标的加权标准化值; w_{ij} 为第 j 项指标的熵权重。

TOPSIS 结果表其计算如公式(10)~(12)所示:

$$\text{正理想解距离:}\ D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(v_{ij}-v_j^+\right)^2} \tag{10}$$

$$\text{负理想解距离:}\ D_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(v_{ij}-v_j^-\right)^2} \tag{11}$$

$$\text{相对贴近度:}\ C_i=\frac{D_i}{D_i^+-D_i^-} \tag{12}$$

式中: D_i^+ 为第 i 个方案与正理想解的距离; $\sum_{j=1}^{m}$ 为对 m 个指标的求和; v_{ij} 为第 i 个方案第 j 项指标的加权标准化值; v_j^+ 为第 j 项指标的正理想解; m 为指标总数; D_i^- 为第 i 个方案与负理想解的距离; v_j^- 为第 j 项指标的负理想解; C_i 为第 i 个方案的相对贴近度, 范围: $0\leqslant C_i\leqslant 1$。

综合评价其计算公式如(13)所示, 范围: $0\leqslant \bar{C}_{\text{品牌}}\leqslant 1$:

$$\bar{C}_{\text{品牌}}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}C_i \tag{13}$$

式中: k 为参与评价的方案总数。

1.4　数据处理

采用描述性统计对原始检测数据进行整理汇总, 所有统计计算均在 Microsoft Excel 2019 软件中完成, 采用自定义公式进行计算, 运用熵权法基于信息论原理对 3 项指标进行客观赋权, 消除主观偏差; 进而采用 TOPSIS 法计算各产品与理想解的欧氏距离及相对贴近度, 实现综合性能的量化排序。

2　结果与分析

2.1　理想环境下检测结果考察

在理想环境(温度 25 ℃±1 ℃, 湿度 50%±5%, 由专业检测人员操作)下每个品牌每种基质检测空白样品 50 份、0.5 倍检出限样品 50 份, 1.0 倍检出限样品 60 份, 结果见表 1。灵敏度越高代表产品对阳性样本的识别能力越强, 假阴性率越低表示漏检风险越小, 假阳性率越低表示误判阴性样本为阳性的概率越小。从表 1 可知, 在理想环境下, 各品牌在腐乳基质中灵敏度表现相近。但在小麦基质中, 甲品牌灵敏度为 98.3%、假阴性率 1.7%、假阳性率 2.0%; 乙品牌灵敏度降至 96.7%、假阴性率 3.3%、假阳性率 3.0%; 丙品牌进一步降至 95.0%、假阴性率 5.0%、假阳性率 4.0%。

表 1　理想环境下的检测结果

Table 1　Detection results in normal environment

基质	品牌	阳性样品数	检测结果为阳性的阳性样品数	阴性样品数	检测结果为阳性的阴性样品数	灵敏度/%	假阴性率/%	假阳性率/%
腐乳	甲	60	59	100	1	98.3	1.7	1.0
	乙	60	59	100	2	98.3	1.7	2.0
	丙	60	59	100	2	98.3	1.7	2.0
小麦	甲	60	59	100	2	98.3	1.7	2.0
	乙	60	58	100	3	96.7	3.3	3.0
	丙	60	57	100	4	95.0	5.0	4.0
杏仁	甲	60	58	100	1	96.7	3.3	1.0
	乙	60	57	100	2	95.0	5.0	2.0
	丙	60	56	100	3	93.3	6.7	3.0

在杏仁基质中，各品牌也呈现出在小麦基质中相同的趋势。上述数据表明，甲品牌在 3 类基质中均保持较高灵敏度和较低的误判率，性能稳定性优于乙、丙品牌，尤其在复杂基质(小麦、杏仁)中优势更为明显。

2.2 极端环境下检测结果考察

为模拟快检产品在实际应用中可能遇到的非理想温度条件，本研究选择 35 ℃(模拟夏季高温环境)和 10 ℃(模拟低温或冷藏环境)作为极端温度点，依据产品说明书推荐的保存和使用温度范围设定。分别在 35 ℃、10 ℃下对每个品牌每种基质检测空白样品 10 份、0.5 倍检出限样品 10 份，1.0 倍检出限样品 20 份，结果见表 2。从表 2 可知，在 35 ℃高温条件下，甲品牌在腐乳、小麦、杏仁基质中的灵敏度分别为 95.0%、95.0%、90.0%，假阴性率分别为 5.0%、5.0%、10.0%，假阳性率分别为 5.0%、5.0%、5.0%，略优于乙和丙品牌；在 10 ℃低温条件下，甲品牌在腐乳、小麦、杏仁基质中的灵敏度分别为 95.0%、90.0%、90.0%，假阴性率分别为 5.0%、10.0%、10.0%，假阳性率分别为 5.0%、5.0%、5.0%；略优于乙和丙品牌；以上数据显示，甲品牌在极端温度条件下仍保持较高的灵敏度和较低的误判率，显示出良好的环境适应性。乙、丙品牌在高温条件下性能下降更为明显，低温条件下部分基质表现与甲品牌接近，表明其对温度变化较为敏感，可能影响现场检测的准确性。

2.3 不同人员检测结果考察

鉴于使用快检产品的操作人员可能是未经过严格专业培训的实验人员，特设置专业检测人员和非专业人员 2 组来进行检测，用以考察快检产品对不同人群的适用性。6 名操作者(人员 1、2、4 为专业检测人员，人员 3、5、6 为非专业人员)，每个品牌每种基质检测空白样品 10 份、0.5 检出限样品 10 份、1 倍检出限样品 20 份，结果见表 3。由表 3 可知，甲品牌在专业和非专业人员操作下性能表现高度一致，灵敏度波动范围小于等于 5.0%，假阴性率和假阳性率波动范围小于等于 5.0%，说明其操作简便、抗干扰能力强，适用于不同操作水平的用户。乙、丙品牌在非专业人员操作下，假阴性率较专业人员操作时上升 5.0%~10.0%，假阳性率上升 0%~5%，反映出其对操作人员的专业性有一定依赖，可能限制其在基层现场的推广应用。

2.4 EW-TOPSIS 构建结果

2.4.1 原始指标数据汇总

本研究选用甲、乙、丙 3 个品牌分别检测腐乳、小麦、杏仁 3 种基质，共 9 个实验方案，对灵敏度、假阴性率、假阳性率 3 项指标进行了评价，汇总后见表 4。

2.4.2 进行指标数据标准化

为了消除不同指标间量纲和数量级的影响，使数据具有可比性，需对原始数据进行标准化处理(也称无量纲化)。本研究采用极差变换法，将各指标数据线性变换至[0,1]区间，得到标准化后的指标数据(表 5)。其中，灵敏度为效益型指标，假阴性率和假阳性率为成本型指标，分别采用对应的极差变换公式进行计算。在评价体系中，指标根据其经济意义分为两类：灵敏度代表正确识别阳性样本的能力，其值越高表明产品性能越优，故定义为效益型指

表 2 极端环境下的检测结果

Table 2 Detection results in extreme environment

温度/℃	基质	品牌	阳性样品数	检测结果为阳性的阳性样品数	阴性样品数	检测结果为阳性的阴性样品数	灵敏度/%	假阴性率/%	假阳性率/%
35	腐乳	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		丙	20	19	20	2	95.0	5.0	10.0
	小麦	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
	杏仁	甲	20	18	20	1	90.0	10.0	5.0
		乙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
		丙	20	16	20	3	80.0	20.0	15.0
10	腐乳	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	19	20	2	95.0	5.0	10.0
		丙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
	小麦	甲	20	18	20	1	90.0	10.0	5.0
		乙	20	18	20	1	90.0	10.0	5.0
		丙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
	杏仁	甲	20	18	20	1	90.0	10.0	5.0
		乙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
		丙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0

表 3　不同人员的检测结果

Table 3　Detection results of different personnel

人员	基质	品牌	阳性样品数	检测结果为阳性的阳性样品数	阴性样品数	检测结果为阳性的阴性样品数	灵敏度/%	假阴性率/%	假阳性率/%
1	腐乳	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		丙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
	小麦	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
	杏仁	甲	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	3	85.0	15.0	15.0
2	腐乳	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		丙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
	小麦	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
	杏仁	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	3	85.0	15.0	15.0
3	腐乳	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		丙	20	19	20	2	95.0	5.0	10.0
	小麦	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
	杏仁	甲	20	18	20	1	90.0	10.0	5.0
		乙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
		丙	20	16	20	3	80.0	20.0	15.0
4	腐乳	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	19	20	2	95.0	5.0	10.0
		丙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
	小麦	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
	杏仁	甲	20	18	20	1	90.0	10.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	3	85.0	15.0	15.0
5	腐乳	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
	小麦	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	3	85.0	15.0	15.0
	杏仁	甲	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	3	85.0	15.0	15.0

表 3(续)

人员	基质	品牌	阳性样品数	检测结果为阳性的阳性样品数	阴性样品数	检测结果为阳性的阴性样品数	灵敏度/%	假阴性率/%	假阳性率/%
6	腐乳	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	1	90.0	10.0	5.0
		丙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
	小麦	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	2	85.0	15.0	10.0
	杏仁	甲	20	19	20	1	95.0	5.0	5.0
		乙	20	18	20	2	90.0	10.0	10.0
		丙	20	17	20	3	85.0	15.0	15.0

表 4 原始指标数据

Table 4 Data of raw indicator

品牌	基质	灵敏度	假阳性率	假阴性率
甲	腐乳	0.983	0.01	0.017
	小麦	0.983	0.02	0.017
	杏仁	0.967	0.01	0.033
乙	腐乳	0.983	0.02	0.017
	小麦	0.967	0.03	0.033
	杏仁	0.950	0.02	0.050
丙	腐乳	0.983	0.02	0.017
	小麦	0.950	0.04	0.050
	杏仁	0.933	0.03	0.067

标(越大越好); 假阴性率和假阳性率分别代表漏检和误判的风险, 其值越高表明产品性能越差, 故定义为成本型指标(越小越好)。

表 5 指标标准化数据汇总

Table 5 Summary of standardized indicator data

品牌	基质	灵敏度	假阳性率	假阴性率
甲	腐乳	1.000	1.000	1.000
	小麦	1.000	0.667	1.000
	杏仁	0.680	1.000	0.680
乙	腐乳	1.000	0.667	1.000
	小麦	0.680	0.333	0.680
	杏仁	0.340	0.667	0.340
丙	腐乳	1.000	0.667	1.000
	小麦	0.340	0.000	0.340
	杏仁	0.000	0.333	0.000

2.4.3 信息熵确定各指标权重

在熵权 TOPSIS 法中, 首先需要根据标准化后的数据计算各指标值的特征比重 p(表 6), 以此反映数据在不同方案间的分布情况。然后, 根据信息论原理, 计算各指标的信息熵 e_j。信息熵越小, 说明该指标的离散程度越大, 提供的信息量越多, 因此在综合评价中应赋予更高的权重。最后, 通过归一化处理得到各指标的客观权重 w_j(表 7)。整个过程完全基于数据的内在特征, 避免了主观赋权的偏差。计算结果见表 6、7。

表 6 各品牌评价指标比重表

Table 6 Weight table of evaluation indicators for various brands

方案	灵敏度	假阳性率	假阴性率
甲-腐乳	0.1656	0.1875	0.1656
甲-小麦	0.1656	0.1250	0.1656
甲-杏仁	0.1126	0.1875	0.1126
乙-腐乳	0.1656	0.1250	0.1656
乙-小麦	0.1126	0.0625	0.1126
乙-杏仁	0.0563	0.1250	0.0563
丙-腐乳	0.1656	0.1250	0.1656
丙-小麦	0.0563	0.0000	0.0563
丙-杏仁	0.0000	0.0625	0.0000

表 7 熵权表

Table 7 Table of entropy weight

指标	信息熵 e_i	权重 w_j
灵敏度	0.9133	0.3377
假阳性率	0.9166	0.3247
假阴性率	0.9133	0.3377

2.4.4 加权规范化值

在得到各指标的客观权重后, 需将其与标准化数据相结合, 构建加权规范化决策矩阵。具体操作是将表 5 中的标准化值 r_{ij} 乘以对应指标的权重 w_j, 得到加权规范化值 v_{ij}(表 8)。这个矩阵是后续进行 TOPSIS 分析的基础, 它既保留了原始数据的特征, 又体现了不同指标的重要性差异。

表 8　加权标准化数据
Table 8　Weighted standardized data

方案	灵敏度	假阳性率	假阴性率
甲-腐乳	0.3377	0.3247	0.3377
甲-小麦	0.3377	0.2164	0.3377
甲-杏仁	0.2296	0.3247	0.2296
乙-腐乳	0.3377	0.2164	0.3377
乙-小麦	0.2296	0.1082	0.2296
乙-杏仁	0.1148	0.2164	0.1148
丙-腐乳	0.3377	0.2164	0.3377
丙-小麦	0.1148	0.0000	0.1148
丙-杏仁	0.0000	0.1082	0.0000

2.4.5　TOPSIS 结果

在 TOPSIS 法中, 正负理想解距离分别反映方案与最优、最劣表现的差距, 据此算出的相对贴近度则直接量化方案优劣, 其值越接近 1, 表明综合表现越佳, 结果计算见表 9。

表 9　TOPSIS 结果
Table 9　Results of TOPSIS

方案	正理想解距离	负理想解距离	C_i
甲-腐乳	0.0000	0.5774	1.0000
甲-小麦	0.1082	0.5243	0.8289
甲-杏仁	0.1528	0.4592	0.7503
乙-腐乳	0.1082	0.5243	0.8289
乙-小麦	0.2649	0.3423	0.5637
乙-杏仁	0.3332	0.2706	0.4481
丙-腐乳	0.1082	0.5243	0.8289
丙-小麦	0.4525	0.1624	0.2641
丙-杏仁	0.5243	0.1082	0.1711

2.4.6　品牌综合评价

通过EW-TOPSIS计算各品牌的相对贴近度均值(表10), 甲品牌为 0.8597, 乙品牌为 0.6136, 丙品牌为 0.4214。相对贴近度越接近 1, 表示该品牌综合性能越接近理想水平。甲品牌的贴近度高达 0.8597, 明显高于乙、丙品牌, 表明其在灵敏度、假阴性率、假阳性率 3 项核心指标上综合表现最优, 且在不同基质、不同环境条件和不同操作人员维度下均保持稳定性能。乙品牌贴近度为 0.6136, 处于中等水平, 在部分基质和条件下表现良好, 但存在一定波动性。丙品牌贴近度仅为 0.4214, 与理想解差距较大, 尤其在复杂基质和极端环境下性能下降明显。综上, 基于 EW-TOPSIS 模型的综合评价结果表明, 3 个品牌性能优劣排序为甲品牌>乙品牌>丙品牌, 甲品牌可作为基层快检和监管部门的首选产品。

表 10　品牌综合评价
Table 10　Comprehensive evaluation of brands

品牌	$\bar{C}$	排名
甲	0.8597	1
乙	0.6136	2
丙	0.4214	3

3　讨论与结论

本研究针对市售 AFB_1 胶体金免疫层析快检产品缺乏综合评价方法的现状, 首次将 EW-TOPSIS 引入快检产品性能评价领域。通过多维度实验设计(3 种食品基质、2 种极端温度条件、2 类操作人员)获取灵敏度、假阴性率、假阳性率 3 项核心指标的实测数据, 运用熵权法客观赋权(灵敏度 0.3377、假阴性率 0.3377、假阳性率 0.3247), 结合 TOPSIS 法计算各品牌与理想解的贴近度, 实现对快检产品综合性能的量化评价。研究结果表明, 3 个品牌性能优劣排序为甲品牌(贴近度 0.8597)>乙品牌(0.6136)>丙品牌(0.4214), 甲品牌在 3 类基质、两种极端温度及不同操作人员条件下均保持较高灵敏度和较低误判率, 显示出优异的综合性能和环境适应性。

与已有快检产品评价研究相比, 本研究具有明显的方法学创新。目前国内外快检产品评价多采用单一指标判定或简单加权评分法, 前者难以反映产品综合性能, 后者则存在主观赋权的局限性。本研究采用的 EW-TOPSIS, 通过信息熵客观反映指标数据的内在变异程度, 避免了主观偏差; 同时 TOPSIS 法通过计算与理想解的欧氏距离, 能够直观量化各产品与理想性能水平的差距。这种基于数据驱动的评价方法, 在中药材质量评价、农业种质资源筛选等领域已得到广泛应用, 但在食品安全快检产品评价中尚属首次。

模型输出的指标权重显示, 灵敏度、假阴性率、假阳性率三者的权重高度接近(0.3377、0.3377、0.3247), 这一结果揭示了两个重要规律: (1)3 项指标在快检产品综合评价中具有同等重要的地位, 任何单一指标的偏废都将影响产品的综合竞争力; (2)熵权法基于实际检测数据的离散程度赋权, 权重相近说明 3 项指标在实际应用场景中的区分能力相当, 这为快检产品生产企业提供了明确的改进方向——需同时提升灵敏度、降低漏检率和误判率, 而非片面追求某一项指标的优化。EW-TOPSIS 将多维度、多指标的实验数据整合为一个综合评价值, 有效解决了监管部门在实际选型中面临的“指标多、难比较”的困境, 可直接根据贴近度高低进行产品选型。同时, 模型的多维度实验设计(不同基质、温度、操作人员)使评价结果更贴近快检产品的实际应用场景, 较之传统仅基于实验室理想条件的评价方法具有更强的实践指导意义。

本研究仍存在一定局限: 仅考察了腐乳、小麦、杏仁

三种基质，未涵盖更多复杂食品体系；实验条件与真实野外场景的长时间、多干扰因素环境仍有差距。该模型可为监管部门、粮油企业在快检产品选型、采购招标中提供量化决策依据。后续研究建议扩大品牌数量和基质种类，引入检测时间、操作便捷性、成本等更多评价指标，并开展现场验证实验，以进一步检验模型的有效性和可靠性，推动快检技术在食品安全领域的规范化应用。

参考文献

[1] 潘国栋, 马振伟, 陈霞, 等. 黄曲霉毒素多模态传感技术在食品安全检测中的应用[J]. 食品安全导刊, 2025(20): 190–192.
Pan Guodong, Ma Zhenwei, Chen Xia, et al. Application of multimodal sensor technology for aflatoxin detection in food safety [J]. China Food Safety Magazine, 2025(20): 190–192.

[2] 郭明珠, 武爱波, 余佃贞. 茶叶中黄曲霉毒素的安全性风险研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(22): 7143–7149.
Guo Mingzhu, Wu Aibo, Yu Dianzhen. Research progress on safety risks of aflatoxins in tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(22): 7143–7149.

[3] 赵盼盼, 黄志伟, 张华, 等. 2020—2022 年 11 种植物性饲料原料中黄曲霉毒素 B_1、赭曲霉毒素 A、伏马毒素(B_1+B_2)检测分析及污染防控措施[J]. 粮食与饲料工业, 2023(5): 64–68.
Zhao Panpan, Huang Zhiwei, Zhang Hua, et al. Detection and contamination control of aflatoxin B_1, ochratoxin a and fumonisins (B_1+B_2) in 11 plant-based feed raw materials (2020—2022) [J]. Cereal & Feed Industry, 2023(5): 64–68.

[4] 张凤芳, 李进春, 陈霞, 等. 黄曲霉毒素污染情况及消减技术研究进展[J]. 现代食品, 2024, 30(13): 39–44, 55.
Zhang Fengfang, Li Jinchun, Chen Xia, et al. Research progress on the pollution situation and mitigation technologies of aflatoxins [J]. Modern Food, 2024, 30(13): 39–44, 55.

[5] 毛永荣, 胡斌, 姜佳佳, 等. 我国现行食用植物油国家标准质量指标和安全指标分析[J]. 粮食加工, 2024, 49(1): 56–63.
Mao Yongrong, Hu Bin, Jiang Jiajia, et al. Analysis of quality and safety indicators in current national standards for edible vegetable oils in China [J]. Grain Processing, 2024, 49(1): 56–63.

[6] Lijalem Y G, Yu H, Choi K, et al. Accurate determination of aflatoxins in red peppers by isotope dilution ultrahigh-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry [J]. Food Control, 2026, 179: 111570.

[7] Akullo J O, Okello D K, Mohammed A, et al. A comprehensive review of aflatoxin in groundnut and maize products in africa: prevalence, detection and mitigation strategies [J]. Journal of Food Quality, 2025, 2025(1): 2810946.

[8] 龙泽坤, 王秀雯, 丁耀魁, 等. 基于量子点的电致化学发光传感器及其在食品真菌毒素残留检测中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(15): 166–176.
Long Zekun, Wang Xiuwen, Ding Yaokui, et al. Research progress of quantum dot-based electrochemiluminescence sensor and its application in the detection of mycotoxin residues in food [J]. Food Research and Development, 2020, 46(15): 166–176.

[9] 赵晓野, 王儒, 王婷, 等. 黄曲霉毒素的危害及检测方法研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022(3): 155–158.
Zhao Xiaoye, Wang Ru, Wang Ting, et al. Research progress on hazards and detection methods of aflatoxins [J]. Journal of Food Safety Guide, 2022(3): 155–158.

[10] 崔梦杰, 王督, 齐飞艳, 等. 抗黄曲霉产毒花生种质的筛选与评价[J]. 作物学报, 2025, 51(11): 2996–3004.
Cui Mengjie, Wang Du, Qi Feiyan, et al. Screening and evaluation of peanut germplasm resistant to aflatoxin production [J] Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(11): 2996–3004.

[11] 乔香君, 邵翠萍, 古绍彬, 等. 坚果类食品中真菌毒素污染现状及其检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(16): 186–192.
Qiao Xiangjun, Shao Cuiping, Gu Shaobin, et al. Current status of mycotoxin contamination in nut foods and research progress on detection techniques [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(16): 186–192.

[12] Moshcheva A G, Shykhalieva F D, Galvidis I A, et al. Occurrence of Alternaria mycotoxins and aflatoxins contamination in vegetable oils by enzyme immunoassay study [J]. One Health Advances, 2025, 3(1): 8.

[13] Zhang Lei, Huang Huiqiang, Liao Mengyao, et al. Ultrasensitive colorimetric immunoassay for aflatoxin B_1 detection in lotus seed powder based on enhanced catalysis of Au@Pt with in situ deposition of PtNPs [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 102030.

[14] 严晓贤, 吴兴强, 夏寒, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法测定酥油中 17 种真菌毒素[J]. 中国油脂, 2025, 50(7): 130–137.
Yan Xiaoxian, Wu Xingqiang, Xia Han, et al. QuEChERS-ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for the determination of 17 fungal toxins in ghee [J]. China Oils and Fats, 2025, 50(7): 130–137.

[15] Mbatchou A, Tsofack F N, Donfack J H, et al. Dichrocephala integrifolia (L.f.) kuntze leaf aqueous extract improves liver architecture in a model of aflatoxin containing peanut induced hepatotoxicity in wistar rats [J]. Journal of Toxicology, 2025, 2025(1): 5551651.

[16] Ponnusamy P, Rajendran U S, Nair M G, et al. Biomarker-based evaluation of aflatoxin B_1 exposure in cattle [J]. Veterinary world, 2025, 18(5): 1297–1305.

[17] 吴焕玲, 刘畅, 张辰辰, 等. 中药中黄曲霉毒素的污染现状与防控建议[J]. 中国现代中药, 2025, 27(7): 1401–1416.
Wu Huanling, Liu Chang, Zhang Chenchen, et al. Current pollution status of aflatoxins in traditional Chinese medicine and control suggestions [J]. Modern Chinese Medicine, 2025, 27(7): 1401–1416.

[18] 喻理, 马飞, 赵安顺, 等. 基于碳纳米材料的黄曲霉毒素电化学检测方法研究现状[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(20): 281–290.
Yu Li, Ma Fei, Zhao Anshun, et al. Research status of electrochemical detection methods for aflatoxins based on carbon nanomaterials [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(20): 281–290.

[19] 褚璇, 王伟, Lawrence Kurt C, 等. 基于颜色特征的含黄曲霉毒素玉米颗粒的检出方法[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(4): 112–118.
Chu Xuan, Wang Wei, Lawrence K C, et al. Detection method for corn pellets containing aflatoxin based on color characteristics [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(4): 112–118.

[20] 尹玉云, 陶健, 焦强, 等. 用于黄曲霉毒素 B1 快速检测的胶体金试剂盒质量评价[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(5): 130–137.
Yin Yuyun, Tao Jian, Jiao Qiang, et al. Quality evaluation of colloidal gold kit for rapid detection ofaflatoxin B1 [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(5): 130–137.

[21] 张亚平, 单鲁豫, 穆琦瑄, 等. 黄曲霉毒素富集-检测-降解解毒方法的研究进展[J]. 天津中医药大学学报, 2023, 42(5): 656–663.
Zhang Yaping, Shan Luyu, Mu Qixuan, et al. Research progress on aflatoxin enrichment-detection-degradation detoxification methods [J]. Journal of Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, 2023, 42(5): 656–663.

[22] 李育瑄, 孙颖, 向婷, 等. 基于胶体金免疫层析技术制备黄曲霉毒素 B_1 快速检测试纸条的研究[J]. 中国食品工业, 2026(8): 139–142, 145.
Li Yuxuan, Sun Ying, Xiang Ting, et al. Study on preparation of aflatoxin B_1 rapid detection test strip based on immune colloidal gold technique [J]. China Food Industry, 2026(8): 139–142, 145.

[23] 褚兰玲, 王云政, 戴宇琪, 等. 食品中黄曲霉毒素检测研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 1–8.
Chu Lanling, Wang Yunzheng, Dai Yuqi, et al. Research progress on detection of aflatoxins in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 1–8.

[24] 郝伟, 杨利芳, 王亮, 等. 食品中常见真菌毒素检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 165–172.
Hao Wei, Yang Lifang, Wang Liang, et al. Research progress on detection technologies of common mycotoxins in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 165–172.

[25] An Deyu, Wang Nan. Application of multi-objective decision-making based on entropy weight-topsis method and rsr method in the analysis of orthopedic disease [J]. Discover Artificial Intelligence, 2025, 5(1): 208.

[26] Han Qingyang, Chen Lijie, Tang Xuanhao, et al. Research on topsis multi-indicator evaluation model based on entropy weight method for c2n site selection [J]. Annals of Nuclear Energy, 2025, 221: 111566.

[27] Zheng Yu, Zhao Yanbing, Zou Xinjie, et al. Design and optimization of the RGB beam combiner in micro display using entropy weight-TOPSIS method [J]. Journal of Central South University, 2025, 32(2): 483–494.

[28] Ma Tingting, Gao Fujie, Han Bingfang, et al. Selection of irrigation regime for seed production of native plant *Lespedeza potaninii* in desert steppe [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(12): 3401–3408.

[29] 王文迪, 张智勇, 刘晓芳, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的大豆种质资源综合评价[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(18): 20–23.
Wang Wendi, Zhang Zhiyong, Liu Xiaofang, et al. Comprehensive evaluation of soybean germplasm resources based on entropy weight TOPSIS method [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2024, 30(18): 20–23.

[30] 何肖云, 刘文静, 吴建鸿, 等. 福建省花生土壤黄曲霉菌分布及收获期花生黄曲霉毒素污染研究[J]. 生物灾害科学, 2025, 48(4): 534–540.
He Xiaoyun, Liu Wenjing, Wu Jianhong, et al. Study on distribution of *Aspergillus flavus* in peanut-growing soils and aflatoxin contamination in peanuts at harvest stage in Fujian Province [J]. Biological Disaster Science, 2025, 48(4): 534–540.

(责任编辑: 曹岱琳　安香玉)