

基于层次分析法和随机森林回归算法的 谷物资源风险评估模型

Risk assessment model of grain resources based on AHP and
random forest regression algorithm

陈卓 丁利 曹天红 程云辉 文李

CHEN Zhuo DING Li CAO Tian-hong CHENG Yun-hui WEN Li

许宙 陈茂龙 焦叶 李虹辉

XU Zhou CHEN Mao-long JIAO Ye LI Hong-hui

(长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南, 长沙 410114)

(School of Food and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha, Hunan 410114, China)

摘要:目的:保障谷物资源的消费安全。方法:根据国家相关标准,确定以镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、黄曲霉毒素(AFs)、伏马毒素(FB)、玉米赤霉烯酮(ZEN)、脱氧雪腐镰刀菌烯酮(DON)8个化学污染物为谷物质量安全的风险评价指标,采用基于熵权法的层次分析法(EW-AHP)计算各风险评价指标的权重,并利用权重将谷物资源中生物危害因素的日常采样数据量化为具体的风险值作为风险评估模型的输出。同时将评价指标的数据作为风险评估模型的输入,选择随机森林回归(LR)、支持向量机回归(SVM)、BP神经网络回归(BP)和K近邻回归(KNN)4种机器学习算法进行模型的构建和比较。结果:基于熵权的层次分析法随机森林回归算法(AHP-RF)构建的模型的预测相关系数达0.99以上,利用风险评估模型对2019年8月的谷物检测数据进行风险预测分析,相关结果与实际相符。结论:基于AHP-RF方法构建的风险评估模型可为谷物资源的安全监管提供有针对性的参考建议。

关键词:谷物资源;层次分析法;随机森林回归;风险评估模型

Abstract: Objective: To ensure the consumption safety of grain resources. Methods: According to the relevant national standards, eight chemical pollutants, such as As cadmium (Cd), arsenic (As), lead (Pb), chromium (Cr), aflatoxin (AFs), fumonisin (FB), zearalenone (ZEN) and deoxynivalenone (Don), were identified as the risk assessment indexes of grain quality and safety, and the entropy weight method was adopted. At the same time, taking the data of evaluation index as the input of risk assessment model, four machine learning algorithms, namely, random forest regression (LR), support vector machine regression (SVM), BP neural network regression (BP) and K-nearest neighbor regression (KNN), are selected to construct and compare the models. Results: The prediction correlation coefficient of the model constructed by AHP-RF based on entropy weight was above 0.99. The risk assessment model was used to predict and analyze the grain detection data in August 2019, and the correlation results were consistent with the reality. Conclusion: The risk assessment model based on AHP-RF method can provide targeted reference suggestions for the safety supervision of grain resources.

Keywords: grain resources; analytic hierarchy process; random forest regression; risk assessment model

基金项目:国家重点研发计划(编号:2019YFC0810901);湖南省自然科学基金(编号:2021JJ30024)

作者简介:陈卓,男,长沙理工大学在读硕士研究生。

通信作者:程云辉(1964—),女,长沙理工大学教授,博士。

E-mail: chengyh6488@sina.com

丁利(1981—),女,长沙理工大学教授,博士。

E-mail: 5284530@qq.com

收稿日期:2021-10-06

谷物是中国居民膳食的主要成分,第5次中国全面饮食研究(CTDS)^[1]表明,谷物、豆类及其制品占中国居民每日食物消费总量的37.44%。其主要提供膳食纤维、糖、蛋白质^[2],并含有多种脂类^[3]、维生素、植物甾醇、角鲨烯^[4]。然而,谷物及其衍生食品中包含的重金属、真菌

毒素、农药和一些食品添加剂存在潜在危害^[5]。低水平的重金属暴露也会损害器官^[6],其中铅(Pb)、镉(Cd)和砷(As)被认为是谷物中常见的有毒重金属^[7]。镉会对肺、骨、肾、肝、免疫系统和生殖器官等产生一系列损伤^[8],砷会影响血管系统并导致高血压和心血管疾病^[9]。有研究^[10]表明,25%的谷物受到了不同程度的真菌毒素污染。有关谷物中真菌毒素污染的监管和研究主要集中于黄曲霉毒素、伏马毒素玉米赤霉烯酮以及脱氧雪腐镰刀菌烯醇等方面^[11],其中,黄曲霉毒素B₁对哺乳动物毒性最大,可造成中毒性肝炎、出血、水肿、免疫抑制和肝癌等损害^[12]。目前,对谷物接触不同污染物的风险评估研究已广泛开展,涉及单一物质或同源化合物,如真菌毒素^[13-15]和重金属^[16-17]。谷物及其衍生食物通常被多类污染物污染,仅涉及单一或同类污染物的风险评估可能导致其对潜在健康风险的低估^[18]。而目前有关谷物资源同时接触多类污染物的健康风险评估尚未见报道。

目前,食品风险评估技术可分为定量评估法(灰色系统理论和故障分析法)、定性评估法(德尔菲法、蒙特卡洛法和决策树法)以及综合评估法(人工神经网络、粗糙学以及层次分析法)。定性分析方法主要用于从政策和理论分析中得出风险评估结论,然而,由于数据主要来自问卷调查,因此不能准确地构建预警模型,定量分析中德尔菲法在预测单个标量指标方面比较成功,但不能处理多指标的复杂系统。综合评估方法中层次分析法(AHP)适用于对多指标的复杂问题进行决策,而传统的层次分析法依赖于研究者的经验来构建判断矩阵,容易导致误判^[19]。基于熵权的层次分析法(EM-AHP)根据谷物检测数据的内在规律计算各评价指标的权重,反映谷物资源的整体风险。人工神经网络(ANN)是一种有效的计算模型,被广泛应用于非线性函数近似^[20]、模式识别^[21]、复杂流程工业能量预测^[22]、工业过程控制与风险管理^[23]、红枣缺陷识别^[24]、白酒酒花分类^[25],可以在系统确切结构未知的条件下进行建模,针对谷物检测数据具有高维属性、复杂性、离散性和非线性等特点,但人工神经网络建立的谷物风险预警模型并不准确。

研究拟采用基于熵权的层次分析法通过数据压缩和数据过滤提取谷物检测数据的特征信息,并结合人工神

经网络构建谷物安全风险预警模型;以镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、黄曲霉毒素(AFs)、伏马毒素(FB)、玉米赤霉烯酮(ZEN)、

脱氧雪腐镰刀菌烯酮(DON)为谷物质量安全评价指标,并作为模型的输入,选择随机森林回归(LR)、支持向量机回归(SVM)、BP神经网络回归(BP)、K近邻回归(KNN)4种机器学习算法进行模型的构建和比较,其中由基于熵权的层次分析法结合随机森林算法(RF)构建的模型(AHP-RF)预测效果最好,其谷物风险预警模型如图1所示。利用AHP-RF模型对2019年8月的谷物检测数据进行风险预测分析,旨在为谷物资源的安全监管提供有针对性的参考建议。

1 材料与方法

1.1 指标构建和数据来源

谷物资源中化学残留的标准化可加强植物油质量安全监管,依据卫生部(<http://www.samr.gov.cn/>)和市场监督管理总局(<http://www.samr.gov.cn/spcjs/>)发布的国家食品安全标准,同时结合市场监督管理局的抽检数据,得出评价植物油质量的8个指标分别为镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、黄曲霉毒素(AFs)、伏马毒素(FB)、玉米赤霉烯酮(ZEN)和脱氧雪腐镰刀菌烯酮(DON),谷物中污染数据来源于小麦、大米、玉米、燕麦、大麦、高粱、黑麦和小米。其中重金属污染数据来源于文献^[26-46],真菌毒素数据来源于文献^[47-62]。

1.2 基于熵权的层次分析法

假设相关函数的 j 参数是 $c_{ij}(y)$ (i 表示第 i 次采样):

$$c_{ij}(y) = \begin{cases} 0 & y \notin [y_j(1), y_j(4)] \\ \frac{y_{ij} - y_j(1)}{y_j(2) - y_j(1)} & y \in [y_j(1), y_j(2)] \\ 1 & y \in [y_j(2), y_j(3)] \\ \frac{y_j(4) - y_{ij}}{y_j(4) - y_j(3)} & y \in [y_j(3), y_j(4)] \end{cases} \quad (1)$$

相关函数称为标准相关函数,其中 $y_j(1), y_j(2), y_j(3), y_j(4)$ 是 $c_{ij}(y)$ 的节点,预处理后的信息矩阵为:

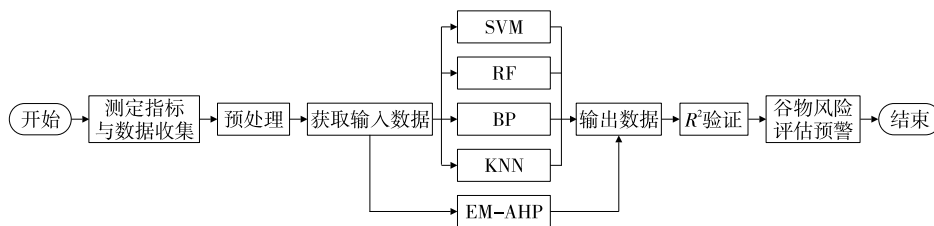


图1 谷物资源风险评估模型

Figure 1 Risk assessment model of grain resources

$$C_{n \times m} = 2 \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

中心标准化

$$\begin{cases} c'_{ij} = \frac{c_{ij} - \bar{c}_j}{s_j} \\ \bar{c}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{ij} \\ s_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_{ij} - \bar{c}_j)^2} \end{cases} \quad (3)$$

然后,负数变为零(并使用正零,零加上正十进制数 ϵ), $r_{ij} = k'_{ij} - t_j + \epsilon (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$, 正定矩阵 $D_{n \times m}$ 为:

$$D_{n \times m} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用 $D_{n \times m}^j$, 得到 n 维矩阵 COR :

$$COR = DD^T = \begin{bmatrix} o_{11} & o_{12} & \cdots & o_{1n} \\ o_{21} & o_{22} & \cdots & o_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ o_{n1} & o_{n2} & \cdots & o_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于 n 对称矩阵, 特征值 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 可以通过乘积的均方根法(几何平均法)得到:

$$\omega_i = \frac{(\prod_{j=1}^n o_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n o_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

用 W 融合样本, 得到谷物风险融合数据:

$$Y^T W = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \cdots \\ \omega_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 随机森林

首先,通过对样本集进行重采样来生成相同数量的样本。假设特征数为 K , 对 N 个样本在 K 个特征中随机选择 T 个特征, 通过建立决策树得到最佳分割点。最后, 使用多数投票机制进行预测。随机森林算法结构如图 2 所示。

1.4 支持向量机

支持向量机(SVM)是一种通用的前馈网络类型, 可应用于分类(聚类)、回归、字符识别和时间序列, SVM 的训练算法创建了一个模型, 该模型将新样本分配给两个类别之一, 使其成为非概率二元线性分类器。SVM 在回归方法中的工作原理是找到符合统计学习理论的线性分离函数, SVM 具有良好的泛化能力, 能够解决小样本问题。

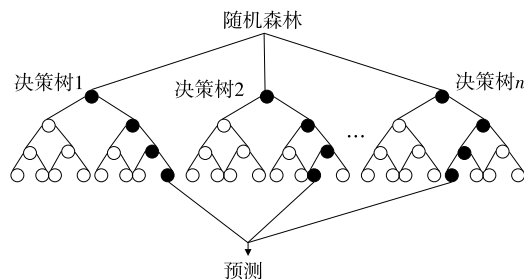


图 2 随机森林结构原理图

Figure 2 Schematic diagram of random forest structure

1.5 神经网络

BP 神经网络是根据误差反向传播进行训练的反馈神经网络。基本思想是梯度下降法, 通过反向传播不断调整网络的权值和阈值, 使网络的实际输出和预期输出之间的误差平方和最小, 主要过程是: 对于 n 个输入学习样本: " $X_1, X_2, \dots, X_n$ ", 已知对应的 m 个输出样本为 " $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ ". 网络的实际输出 ($Z_1, Z_2, \dots, Z_n$) 和目标向量 ($T_1, T_2, \dots, T_m$) 之间的误差用于校正其权重, 使得 Z_n 尽可能接近预期的 T_m 。

1.6 K 近邻算法

K 近邻算法没有显式的学习过程或训练过程, 是懒惰学习, 数据集事先已经有了分类标签和数据特征值, 通过测量不同特征值之间的距离来对数据进行分类。

计算相邻样本的距离采用欧式距离或曼哈顿距离:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - y_k)^2} \quad (8)$$

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n |x_k - y_k|} \quad (9)$$

算法过程:

(1) 计算测试数据与各训练数据之间的距离。

(2) 按距离的递增关系排序。

(3) 选取距离最小的 K 个点。

(4) 确定前 K 个点所在类别的出现频率。

(5) 返回前 K 个点中出现频率最高的类别作为测试数据的预测分类。

2 风险评估模型构建

2.1 基于熵权的层次分析法

为确定 8 种危险因素 (Cd、As、Pb、Cr、AFB、FB、ZEN、DON) 的离散程度, 判断 8 种危害指标对综合评价的影响, 将预处理后的检验数据作为风险评估模型的输入, 利用基于熵权的层次分析法对检验数据中的 8 个风险评价指标进行风险融合。部分 AHP 融合结果见表 1, 基于熵权的层次分析法融合的各风险评价指标的权重比例如图 3 所示, 各指标权重相差不大说明数据离散程度适合建模。

表 1 部分 AHP 风险融合结果

Table 1 Results of partial AHP risk fusion

Cd/ (mg · kg ⁻¹)	As/ (mg · kg ⁻¹)	Cr/ (mg · kg ⁻¹)	Pb/ (mg · kg ⁻¹)	AFs/ (μg · kg ⁻¹)	FB/ (μg · kg ⁻¹)	ZEN/ (μg · kg ⁻¹)	DON/ (μg · kg ⁻¹)	风险融合值
0.063	0.062	0.026	0.099	17.47	15.00	38.54	1 777.26	220.11
0.015	0.035	0.08	0.037	10.87	19.34	5.27	2 012.27	243.79
0.056	0.049	0.042	0.094	10.80	5.25	20.54	4 776.08	572.98
0.053	0.082	0.038	0.016	2.91	14.11	7.55	4 602.92	550.85
0.036	0.045	0.008	0.088	7.27	17.17	38.28	273.49	40.03
0.098	0.008	0.017	0.076	5.67	11.38	6.86	3 790.21	454.05
0.044	0.060	0.031	0.056	11.31	2.60	16.32	216.99	29.51
0.046	0.080	0.082	0.071	8.70	6.50	7.31	117.97	16.79
0.012	0.094	0.054	0.025	7.60	12.43	35.73	3 539.68	428.03
0.011	0.092	0.034	0.064	3.75	7.67	13.02	2 651.54	318.57
0.055	0.058	0.006	0.056	10.34	12.43	25.32	1 178.68	146.08
0.042	0.063	0.003	0.041	13.25	17.14	19.47	2 056.42	250.77
0.028	0.030	0.091	0.093	11.97	3.47	9.58	1 699.06	205.32
0.011	0.075	0.011	0.083	10.28	3.02	17.13	974.03	119.64
0.100	0.052	0.004	0.054	1.57	10.09	27.17	602.02	76.28
0.085	0.057	0.034	0.057	17.18	15.03	14.56	1 483.86	182.28
0.046	0.032	0.071	0.032	6.06	4.53	32.53	1 705.14	208.15
0.060	0.049	0.087	0.097	8.61	16.71	7.34	2 968.25	357.26
0.035	0.041	0.088	0.061	4.16	12.82	18.48	3 325.92	400.15
0.071	0.075	0.079	0.048	13.15	6.65	12.73	1 813.46	219.83

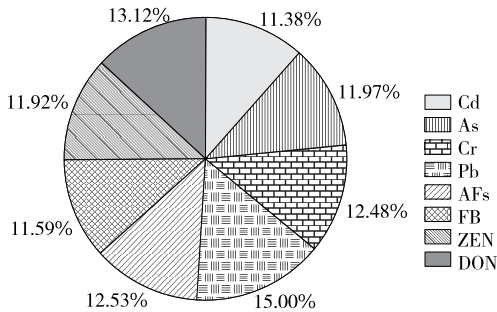


图 3 谷物资源中各危险因素的权重

Figure 3 Weight of risk factors in grain resources

标准化后确定谷物资源化学危害等级范围[0.05, 0.92],采用五分法^[63]将化学危害等级范围划分为 5 个风险评价等级(见表 2)。

表 2 谷物资源化学危害等级

Table 2 Chemical hazard grade of grain resources

风险区间	风险等级
[0.05,0.224]	低风险
[0.024,0.448]	较低风险
[0.448,0.662]	中风险
[0.662,0.796]	较高风险
[0.796,0.92]	高风险

2.2 数据标准化与风险等级确定

用 min-max 归一化法对检验数据进行线性变换。每个指标数据映射到区间[0,1]。min-max 归一化公式如下:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, \quad (10)$$

式中:

$$x_j^{\max} = \max \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{1j}\};$$

$$x_j^{\min} = \min \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{1j}\};$$

$$i = 1, 2, \dots, 1;$$

$$j = 1, 2, \dots, m。$$

2.3 机器学习算法构建回归模型

将风险融合的结果作为预警模型的预期输出。构建 8 输入单输出训练样本数据,预处理检验数据总量 1 067。从数据中选择 75%的样本作为训练样本数据,其余的作为测试样本数据。

为了验证该模型的有效性,采用随机森林(RF)、BP 神经网络(BP)、K 近邻回归(KNN)和支持向量机(SVM)回归对数据进行建模。

在随机森林(RF)中,采用 min-max 标准化进行定量

数据标准化,决策树个数为 100,分裂 1 个内部节点需要的最少样本为 2,每个叶子节点需要的最少样本数为 2。

在单层 BP 神经网络中,采用 min-max 标准化进行定量数据标准化,迭代次数为 200,激励函数为 rule 函数,求解器为 adam,输入层、隐藏层和输出层的节点数分别为 8,20,1。

在 K 近邻回归(KNN)中,采用 min-max 标准化进行

定量数据标准化,所选用的近邻数为 5,预测权函数为 uniform,叶大小为 30,向量距离算法为欧式距离。

在支持向量机(SVM)回归中,采用 min-max 标准化进行定量数据标准化,核函数为 bf(径向基核),残差收敛条件为 0.000 1,使用收缩启发式。

由图 4 可知,RF 的泛化结果比 BP、KNN 和 SVM 的更接近实际值。

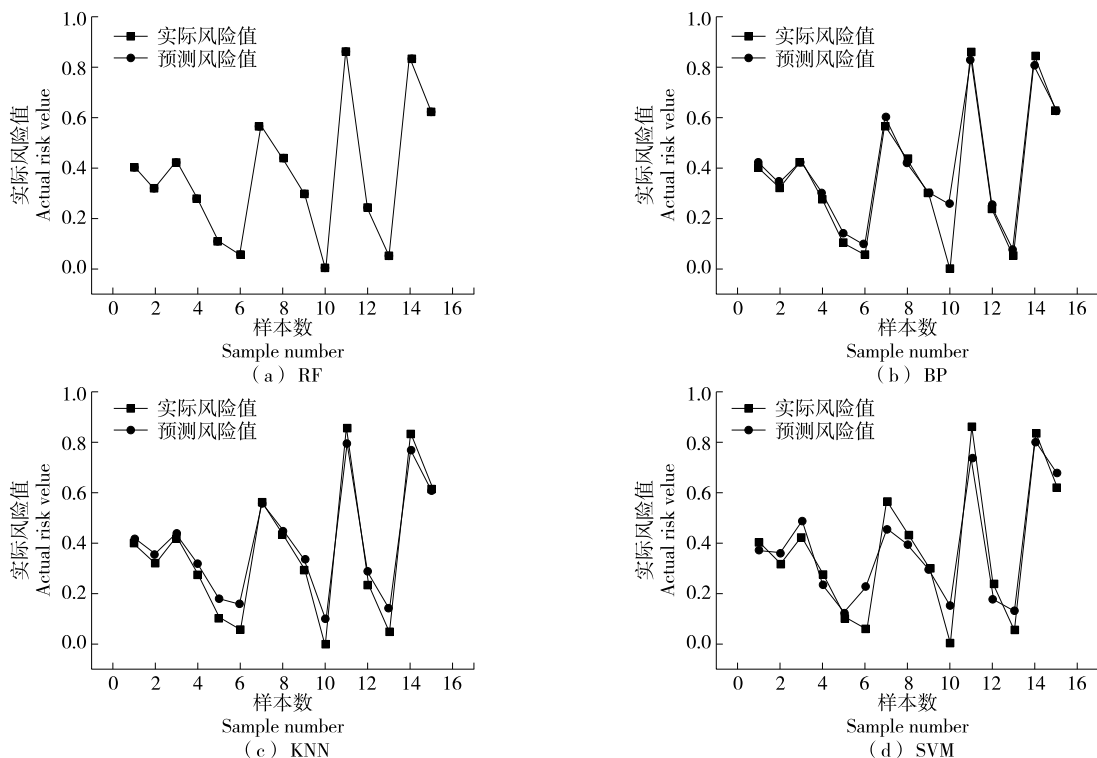


图 4 4 种机器学习算法的预测风险值与实际风险值的拟合结果

Figure 4 Fitting results of four machine learning algorithms to predict risk value and actual risk value

由 RF、BP、KNN 和 SVM 分别结合基于熵权的层次分析法对数据进行建模,由表 3 可知,4 个模型的线性回归决定系数分别 0.999 8,0.928 6,0.900 8,0.963 1,说明 RF 算法的效果优于其他 3 种算法。

由图 5 可知,基于熵权的层次分析法组合随机森林回归方法的拟合度优于其他 3 种方法,可用于谷物化学危害要素危害程度的预测。

4 谷物资源风险评估分析

采用 AHP-RF 模型对 2019 年 8 月 20 个样本的检验

表 3 4 种回归算法的稳定性比较

Table 3 Comparison of stability of four regression algorithms

回归算法	R^2	回归算法	R^2
RF	0.999 8	KNN	0.900 8
BP	0.928 6	SVM	0.963 1

数据进行评估,预测结果如图 6 所示。

由图 6 可知,AHP-RF 风险评估模型可以准确预测 2019 年 8 月初的食品安全风险。2019 年 8 月前 20 d 的风险平均值为 0.630,属于[0.448,0.662],整体风险处于中等风险范围。2019 年 8 月前 10 d 的风险分析表明,平均风险值为 0.675,而 8 月后 10 d 的平均风险值为 0.586,因此 2019 年 8 月前 10 d 的整体风险较大。2019 年 8 月高于高风险预警参考值 0.792 的数据共有 7 个,占总数据的 35%。而 3—7 月数据中风险值高于高风险预警参考值的数据仅占数据总量的 9.6%,因此 8 月高风险数据占比明显上升,整体风险趋势明显上升。因此,相关部门需重点关注这一时期的粮食生产。8 月初检验样本的风险明显增加,相关部门应更重视 2019 年 8 月初的检验样本,并采取如加强监管,督促相关企业生产高质量、低风险的产品等相关措施,以控制风险的持续增长,避免食品安全事故的发生。

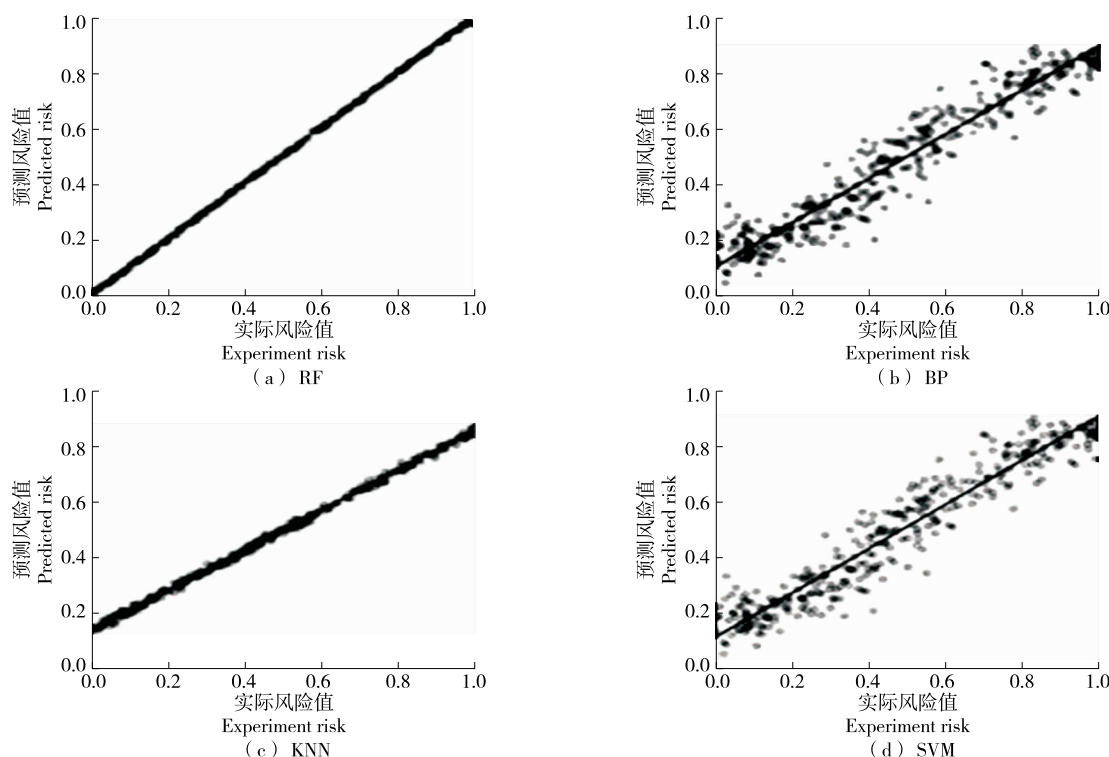


图5 4种机器学习算法的线性回归分析

Figure 5 Linear regression analysis of four machine learning algorithms

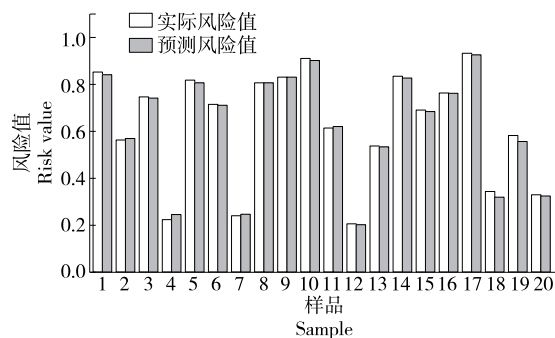


图6 AHP-RF 风险评估模型的预测风险值与实际风险值

Figure 6 Comparison between the predicted risk value and the actual risk value of AHP-RF risk assessment model in August 2019

5 结论

提出了一种 AHP-RF 方法,建立以谷物资源检测数据作为输入,采用基于熵权的层次分析法提取数据的特征变量作为随机森林算法输出的谷物资源风险预警模型。结果表明,该模型独立检验集的 $R^2 > 0.99$,表明其能够较好地实现谷物资源的风险评估。将 AHP-RF 方法应用于 2019 年 8 月的谷物资源风险分析,发现 2019 年 8 月的谷物资源风险增加,存在安全隐患问题。食品检验部门可以利用此结果提高食品安全预警的效率。为了进一步研究,将研究卷积神经网络(CNN)来优化数据预处理

过程,CNN 具有较强的非线性拟合能力和特征提取能力,应用于谷物资源预警分析可能会揭示更多的未知规律。但 CNN 模型复杂度高、成本高、对数据质量要求高,为此需要收集更多数据,建立质量更完善的谷物安全风险指标数据集,并将数据集与 CNN 结合建立模型,将有助于建立准确、智能的食品风险预警系统。

参考文献

- [1] GAO Jie, ZHAO Yun-feng, FENG Yun, et al. Dietary exposure of acrylamide from the fifth Chinese Total Diet Study[J]. Food and Chemical Toxicology, 2016, 87: 97-102.
- [2] 周小玲, 李娜, 张冬生. 高温高湿处理对小麦中蛋白质性质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 7-13.
ZHO Xiao-ling, LI Na, ZHANG Dong-sheng. Effect of high temperature and high humidity on the properties of protein in wheat[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 7-13.
- [3] 张荣彬, 颜景超, 高文明, 等. 粳米与籼米组合对婴幼儿米粉食用品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 193-198.
ZHANG Rong-bin, YAN Jing-chao, GAO Wen-ming, et al. Effect of the combination of japonica rice and indica rice on the edible quality of infant rice flour[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 193-198.
- [4] 吴晓娟, 吴伟. 米糠油安全生产标准方法的研究与实践[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 89-94.
WU Xiao-juan, WU Wei. Research and practice of rice bran oil

- safety production standard method[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 89-94.
- [5] FRANK T, ANNE N. Contaminants in grain: A major risk for whole grain safety? [J]. Nutrients, 2018, 10(9): 1 213-1 215.
- [6] KUKUSAMUDE C, SRICHARON P, LIMCHOO WONG N, et al. Heavy metals and probabilistic risk assessment via rice consumption in Thailand[J]. Food Chemistry, 2020, 334: 127402.
- [7] ALLDRICK A. Chemical contamination of cereals [J]. Chemical Contaminants & Residues in Food, 2017: 427-449.
- [8] 蔡文华, 胡曙光, 许秀敏. 2012—2014 年广东省大米中铅镉的暴露风险评估[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 47-50.
- CAI Wen-hua, HU Shu-guang, XU Xiu-min. Exposure risk assessment of lead and cadmium in rice in Guangdong Province from 2012 to 2014[J]. Food & Machinery, 2015, 31(4): 47-50.
- [9] JOMOVA K, JENISOVA Z, FESZTEROVA M, et al. Arsenic: Toxicity, oxidative stress and human disease[J]. J Appl Toxicol, 2011, 31(2): 95-107.
- [10] FINK Gremmels. Mycotoxins: Their implications for human and animal health[J]. Veterinary Quarterly, 2009, 21(4): 115-120.
- [11] 李雅静, 秦曙, 杨艳梅, 等. 中国谷物真菌毒素污染研究现状[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 186-194.
- LI Ya-jing, QIN Shu, YANG Yan-mei, et al. Research status of mycotoxin contamination in grains in China[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(3): 186-194.
- [12] LI Rui, WANG Xu, ZHOU Ting, et al. Occurrence of four mycotoxins in cereal and oil products in Yangtze Delta region of China and their food safety risks[J]. Food Control, 2014, 35(1): 117-122.
- [13] XIONG Jiang-lin, XIONG Li-li, ZHOU Hua-lin, et al. Occurrence of aflatoxin B₁ in dairy cow feedstuff and aflatoxin M₁ in UHT and pasteurized milk in central China[J]. Food Control, 2018, 92: 386-390.
- [14] YU Xi, LI Zhan-ming, ZHAO Meng-zhe, et al. Quantification of aflatoxin B₁ in vegetable oils using low temperature clean-up followed by immuno-magnetic solid phase extraction[J]. Food chemistry, 2019, 275: 390-396.
- [15] ZHAO Ya-rong, WANG Qiong-shan, HUANG Jian-xiang, et al. Mycotoxin contamination and presence of mycobiota in rice sold for human consumption in China[J]. Food Control, 2018, 98: 19-23.
- [16] BEHROUZ T O, NABI S, MAHMOOD A, et al. The concentration of heavy metals in instant noodle samples from Iran's market: Probabilistic health risk assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 30 928-30 937.
- [17] CAI Li-mei, XU Zhen-cheng, QI Jian-ying, et al. Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near Tonglushan mine in Hubei, China [J]. Chemosphere, 2015, 127: 127-135.
- [18] YANG Xian-li, ZHAO Zhi-yong, TAN Yang-lan, et al. Risk profiling of exposures to multiclass contaminants through cereals and cereal-based products consumption: A case study for the inhabitants in Shanghai, China[J]. Food Control, 2019, 109: 106964.
- [19] GENG Zhi-qiang, ZHAO Shan-shan, TAO Guang-can. 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.
- [20] YANG Si-bo, GUAN Sheng-wei, TING Tao, et al. Investigation of neural networks for function approximation[J]. Procedia Computer Science, 2013, 17: 586-594.
- [21] ALFARO P, MARGÜELLES A, CHAIREZ I. Pattern recognition for electro-encephalographic signals based on continuous neural networks[J]. Neural Networks, 2016, 79: 88-96.
- [22] GENG Zhi-qiang, QIN Lin, HAN Yong-ming, et al. Energy saving and prediction modeling of petrochemical industries: A novel elm based on fahp[J]. Energy, 2017, 122: 350-362.
- [23] SRIDEVI K, SIVARAMAN E, MULLAI P. Back propagation neural network modelling of biodegradation and fermentative bio-hydrogen production using distillery wastewater in a hybrid upflow anaerobic sludge blanket reactor[J]. Bioresource Technology, 2014, 165(8): 233-240.
- [24] 张忠志, 薛欢庆, 范广玲. 基于改进卷积神经网络的红枣缺陷识别[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 158-162.
- ZHANG Zhong-zhi, XUE Huan-qing, FAN Guang-ling. Red jujube defect recognition based on improved convolutional neural network[J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 158-162.
- [25] 潘斌, 韩强, 姚娅川. 基于卷积神经网络的白酒酒花分类研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 30-37.
- PAN Bin, HAN Qiang, YAO Ya-chuan. Research on classification of liquor hops based on convolutional neural network[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 30-37.
- [26] 杨富华, 杨乐, 徐晓枫, 等. 2017—2019 年内蒙古地区地产谷物与蔬菜中铅、镉、总汞和总砷污染状况[J]. 卫生研究, 2021, 50(5): 846-848.
- YANG Fu-hua, YANG Le, XU Xiao-feng, et al. Pollution status of lead, cadmium, total mercury and total arsenic in local grains and vegetables in Inner Mongolia from 2017 to 2019[J]. Health Research, 2021, 50(5): 846-848.
- [27] 周维斌. 谷物中镉快速检测准确性探究[J]. 现代食品, 2021(14): 223-225.
- ZHOU Wei-bin. Study on the accuracy of rapid detection of cadmium in grains[J]. Modern Food, 2021(14): 223-225.
- [28] 陈春坛, 李亚兰, 唐丽, 等. 川东地区谷类重金属污染状况及健康风险评估[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 134-138, 185.
- CHEN Chun-tan, LI Ya-lan, TANG Li, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of cereals in eastern Sichuan[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2021, 40(2): 134-138, 185.
- [29] 张翠霞. 菏泽市主要农产品中铅、镉污染状况调查及膳食暴露评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(12): 1 519-1 522.
- ZHANG Cui-xia. Investigation of lead and cadmium pollution in main agricultural products and assessment of dietary exposure in heze city[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(12): 1 519-1 522.

- [30] 张小红, 赵青, 路兴乐. 滨州市谷物及蔬菜中铅、镉、总砷暴露量及风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(7): 877-879, 883.
- ZHANG Xiao-hong, ZHAO Qing, LU Xing-le. Exposure and risk assessment of lead, cadmium and total arsenic in grains and vegetables in Binzhou city[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(7): 877-879, 883.
- [31] 李秋月, 许皓, 方惠千, 等. 桐乡市 2015—2018 年食品中重金属污染物的监测分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2021, 31(7): 892-895.
- LI Qiu-yue, XU Hao, FANG Hui-qian, et al. Monitoring and analysis of heavy metal pollutants in food in Tongxiang from 2015 to 2018[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021, 31(7): 892-895.
- [32] 吴艾琳, 罗书全, 赵怡楠, 等. 基于污染指数法对重庆市市售食品中重金属污染调查及评价[J]. 中国食品卫生杂志, 2021, 33(2): 175-180.
- WU Ai-lin, LUO Shu-quan, ZHAO Yi-nan, et al. Investigation and evaluation of heavy metal pollution in food sold in Chongqing based on pollution index method[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2021, 33(2): 175-180.
- [33] 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 等. 海南省集约化种植园中谷物、蔬菜 and 水果中重金属累积程度及健康风险[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4 916-4 924.
- YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, et al. Accumulation degree and health risk of heavy metals in grains, vegetables and fruits in intensive plantations in Hainan Province[J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4 916-4 924.
- [34] 吴丽珠, 高红梅, 马英. 上海市青浦区主要市售谷物及其制品的铅、镉、汞污染及健康风险评估[J]. 上海预防医学, 2019, 31(6): 451-456.
- WU Li-zhu, GAO Hong-mei, MA Ying. Lead, cadmium and mercury pollution and health risk assessment of main commercially available cereals and their products in Qingpu District of Shanghai[J]. Shanghai Preventive Medicine, 2019, 31(6): 451-456.
- [35] 董峰光, 王朝霞, 宫春波, 等. 烟台市市售谷物及其制品重金属污染状况及暴露风险评估[J]. 职业与健康, 2017, 33(6): 756-759.
- DONG Feng-guang, WANG Chao-xia, GONG Chun-bo, et al. Heavy metal pollution status and exposure risk assessment of grain and its products in Yantai[J]. Occupation and Health, 2017, 33(6): 756-759.
- [36] 黄楚珊, 胡国成, 陈棉彪, 等. 矿区家庭谷物和豆类重金属含量特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1 171-1 178.
- HUANG Chu-shan, HU Guo-cheng, CHEN Mian-biao, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metals in family grains and beans in mining areas[J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 1 171-1 178.
- [37] 梁琼, 李拥军. 甘肃省市售谷物制品中铅和镉污染调查及健康风险预警分析[J]. 卫生研究, 2016, 45(5): 844-846.
- LIANG Qiong, LI Yong-jun. Investigation of lead and cadmium pollution in grain products sold in Gansu Province and early warning analysis of health risks[J]. Health Research, 2016, 45(5): 844-846.
- [38] 陆文, 刘晶晶, 张亮. 2012—2014 年铁岭市谷物及其制品中重金属监测结果分析[J]. 现代预防医学, 2016, 43(15): 2 729-2 731, 2 751.
- LU Wen, LIU Jing-jing, ZHANG Liang. Analysis of monitoring results of heavy metals in grains and their products in Tieling from 2012 to 2014[J]. Modern Preventive Medicine, 2016, 43(15): 2 729-2 731, 2 751.
- [39] 张荷香, 陈江, 章荣华, 等. 2009—2013 年浙江省谷物及制品中铅污染状况分析[J]. 卫生研究, 2016, 45(4): 668-669, 676.
- ZHANG He-xiang, CHEN Jiang, ZHANG Rong-hua, et al. Analysis of lead pollution in grains and products in Zhejiang Province from 2009 to 2013[J]. Health Research, 2016, 45(4): 668-669, 676.
- [40] 钞凤. 2013 年河南省食品中铅、镉污染物监测与分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2016: 9-25.
- CHAO Feng. Monitoring and analysis of lead and cadmium pollutants in food in Henan province in 2013 [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016: 9-25.
- [41] 朱庆麒. 快速检测粮食谷物制品中镉的方法探讨[D]. 苏州: 苏州大学, 2016: 13-27.
- ZHU Qing-qi. Discussion on rapid detection method of cadmium in grain products[D]. Suzhou: Suzhou University, 2016: 13-27.
- [42] 涂鸿, 秦礼康, 韦柳燕, 等. 不同设备和工艺加工薏仁谷精米和碎米重金属污染评价[J]. 中国酿造, 2016, 35(3): 120-123.
- TU Hong, QIN Li-kang, WEI Liu-yan, et al. Assessment of heavy metal pollution in milled rice and broken rice of Coix seed valley processed by different equipment and technology[J]. Brewing in China, 2016, 35(3): 120-123.
- [43] 王彩霞, 郭蓉, 程国霞, 等. 陕西省谷物中重金属污染状况及健康风险评估[J]. 卫生研究, 2016, 45(1): 35-38, 44.
- WANG Cai-xia, GUO Rong, CHENG Guo-xia, et al. Heavy metal pollution status and health risk assessment of cereals in Shaanxi province[J]. Health Research, 2016, 45(1): 35-38, 44.
- [44] 张永发, 邝继云, 谢茵, 等. 海南省农产品重金属污染评价与特征分析[J]. 中国土壤与肥料, 2018(5): 169-176.
- ZHONG Yong-fa, KUANG Ji-yun, XIE Yin, et al. Evaluation and characteristic analysis of heavy metal pollution in agricultural products in Hainan province[J]. China Soil and Fertilizer, 2018(5): 169-176.
- [45] 刘辉, 刘恩岐, 巫永华, 等. 市售谷物中 Pb 和 Cd 含量测定与风险评估[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(6): 74-77.
- LIU Hui, LIU En-qi, WU Yong-hua, et al. Determination and risk assessment of Pb and Cd in commercially available grains[J]. Cereals, Oils and Foodstuffs Technology, 2014, 22(6): 74-77.
- [46] 龚地萍, 王军. 重庆市万州区居民膳食结构与重金属摄入水平研究[J]. 中国初级卫生保健, 2020, 34(12): 14-15, 25.
- GONG Di-ping, WANG Jun. Study on the dietary structure and heavy metal intake level of residents in Wanzhou District of

- Chongqing[J]. Chinese Primary Health Care, 2020, 34(12): 14-15, 25.
- [47] 范楷, 祭芳, 徐剑宏, 等. 长三角地区市场常见农产品中 40 种真菌毒素的污染状况和特征分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(13): 2 870-2 884.
- FAN Kai, JI Fang, XU Jian-hong, et al. Pollution status and characteristics of 40 mycotoxins in common agricultural products in the Yangtze River Delta market[J]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021, 54(13): 2 870-2 884.
- [48] 唐占敏. 长三角地区谷物中典型真菌毒素识别及污染研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 15-35.
- TANG Zhan-min. Study on identification and pollution of typical mycotoxins in grains in Yangtze River Delta [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020: 15-35.
- [49] 王燕, 董燕婕, 岳晖, 等. 山东省玉米真菌毒素污染状况调查及分析[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(3): 69-73.
- WANG Yan, DONG Yan-jie, YUE Hui, et al. Investigation and analysis of mycotoxin contamination in maize in Shandong province[J]. Cereals, Oils and Foodstuffs Science and Technology, 2016, 24(3): 69-73.
- [50] 韩小敏, 李凤琴, 徐文静, 等. 我国五省(市)小麦粉中重要镰刀菌毒素的污染调查[J]. 中国猪业, 2017, 12(6): 33-39, 45.
- HAN Xiao-min, LI Feng-qin, XU Wen-jing, et al. Investigation on the contamination of important Fusarium toxin in wheat flour in five provinces (cities) of China[J]. China Pig Industry, 2017, 12(6): 33-39, 45.
- [51] 董峰光, 阎西革, 宫春波, 等. 2012—2019 年烟台市食品中玉米赤霉烯酮污染状况及暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(1): 376-381.
- DONG Feng-guang, YAN Xi-ge, GONG Chun-bo, et al. Contamination and exposure assessment of zearalenone in food in Yantai from 2012 to 2019[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2021, 12(1): 376-381.
- [52] 诸寅, 毛伟峰, 季申, 等. 上海市售薏苡仁中玉米赤霉烯酮的污染状况及暴露评估[J]. 卫生研究, 2020, 49(5): 840-843, 872.
- ZHU Yin, MAO Wei-feng, JI Shen, et al. Contamination and exposure assessment of zearalenone in coix seed sold in Shanghai[J]. Health Research, 2020, 49(5): 840-843, 872.
- [53] 李丹迪, 赵丽, 季静, 等. 济南部分地区谷物制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及玉米赤霉烯酮的污染状况[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(23): 8 081-8 086.
- LI Dan-di, ZHAO Li, JI Jing, et al. Contamination of deoxynivalenol and zearalenone in grain products in some areas of Jinan[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2019, 10(23): 8 081-8 086.
- [54] 张梦妍, 郭爱静, 马辉, 等. 河北省市售玉米面中玉米赤霉烯酮和伏马菌毒素 B₁、B₂污染状况调查[J]. 医学动物防制, 2018, 34(5): 490-491.
- ZHANG Meng-yan, GUO Ai-jing, MA Hui, et al. Investigation on the contamination of zearalenone and fumonisins B₁ and B₂ in corn flour sold in Hebei province[J]. Medical Animal Control, 2018, 34(5): 490-491.
- [55] 郭萍, 薛生辉, 谢恺, 等. 福建省市售食品玉米赤霉烯酮污染状况与暴露评估[J]. 海峡预防医学杂志, 2020, 26(4): 80-82.
- GUO Ping, XUE Sheng-hui, XIE Kai, et al. Contamination and exposure assessment of zearalenone in food sold in Fujian province[J]. Journal of Straits Preventive Medicine, 2020, 26(4): 80-82.
- [56] 许嘉, 林楠, 王志, 等. 北京市市售谷物及制品中真菌毒素污染状况的调查[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(3): 28-30.
- XU Jia, LIN Nan, WANG Zhi, et al. Investigation of mycotoxin contamination in cereals and products sold in Beijing[J]. China Food and Nutrition, 2019, 25(3): 28-30.
- [57] 赵巍, 王兰惠, 甄玉国, 等. 2020 年国内玉米青贮霉菌毒素普查报告[J]. 中国乳业, 2021(8): 56-59.
- ZHAO Wei, WANG Lan-hui, ZHEN Yu-guo, et al. General survey report of mycotoxin of corn silage in China in 2020[J]. China Dairy, 2021(8): 56-59.
- [58] 王苏楠, 胡寅瑞, 梁栗源. 2018—2019 年洛阳市玉米制品中玉米赤霉烯酮监测结果分析[J]. 应用预防医学, 2021, 27(1): 42-43.
- WANG Su-nan, HU Yin-rui, LIANG Li-yuan. Analysis of monitoring results of zearalenone in corn products in Luoyang from 2018 to 2019[J]. Applied Preventive Medicine, 2021, 27(1): 42-43.
- [59] 王丽英, 任贝贝, 刘印平, 等. 河北地区面制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其衍生物和玉米赤霉烯酮污染水平调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 4 023-4 028.
- WANG Li-ying, REN Bei-bei, LIU Yin-ping, et al. Investigation and analysis on the contamination level of deoxynivalenol and its derivatives and zearalenone in flour products in Hebei[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2020, 11(12): 4 023-4 028.
- [60] 潘红艳. 玉米赤霉烯酮在稻谷中的污染调查及毒理实验研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012: 15-27.
- PAN Hong-yan. Investigation on the contamination of zearalenone in rice and experimental study on toxicology[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012: 15-27.
- [61] 赵一鹏, 惠秋芳, 张系忠, 等. 2016—2017 年陕西省部分食品中玉米赤霉烯酮监测分析[J]. 医学动物防制, 2019, 35(3): 248-251.
- ZHAO Yi-peng, HUI Qiu-fang, ZHANG Xi-zhong, et al. Monitoring and analysis of zearalenone in some foods in Shaanxi Province from 2016 to 2017[J]. Medical Animal Control, 2019, 35(3): 248-251.
- [62] 蒋玉寒. 我国三北和西南地区玉米霉菌毒素调查报告[D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 13-40.
- JIANG Yu-han. Investigation report of corn mycotoxin in the three north and southwest regions of China[D]. Nanjing Agricultural University, 2015: 13-40.
- [63] LI Qiang, LIU Wen, SUN Ai-lan, et al. Study on the risk grading evaluation of processed food[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(9): 220-224.