

基于电子鼻和BP神经网络对‘黑珍珠’鲜食玉米产地的区分和识别

马洪江, 郝曦煜, 高铭, 于有强, 杨书恒, 刘士伟, 马喜山, 王文鑫, 段盛林, 王雪

Distinction and Recognition of the 'Black Pearl' Fresh Corn Origin Based on Electronic Nose and BP Neural Network

MA Hongjiang, HAO Xiyu, GAO Ming, YU Youqiang, YANG Shuheng, LIU Shiwei, MA Xishan, WANG Wenxin, DUAN Shenglin, and WANG Xue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070135>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于主成分分析和人工神经网络的近红外光谱大豆产地识别

Soybean Origin Identification Based by Near-Infrared Spectrum Based on Principal Component Analysis and Artificial Neural Network Model

食品工业科技. 2021, 42(9): 270-274 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060271>

基于BP神经网络的微波辅助提取无花果黄酮工艺优化

Process parameter optimization of microwave assisted extraction of flavonoids from Ficus carica Linn based on BP neural network

食品工业科技. 2017(19): 197-202 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.19.036>

GA-BP神经网络及其在液体乳安全评价中的应用

GA-BP neural network and its application in safety evaluation of liquid milk

食品工业科技. 2017(05): 289-292 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.05.046>

自制电子鼻检测霉变大米

Detection of Moldy Rice by Self-made Electronic Nose

食品工业科技. 2021, 42(12): 218-224 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090092>

基于BP神经网络的牡蛎 α 葡萄糖苷酶抑制剂活性肽制备工艺优化

Optimization of enzymatic processing for α -glucosidase inhibitor active peptides from oyster based on BP neural network

食品工业科技. 2017(09): 206-211 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.09.031>

基于电子鼻和ATD-GC-MS技术分析茉莉花茶香气成分的产地差异

Origin Difference Analysis of Aroma Components in Jasmine Tea Based on Electronic Nose and ATD-GC-MS

食品工业科技. 2021, 42(15): 234-239 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080064>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

马洪江, 郝曦煜, 高铭, 等. 基于电子鼻和 BP 神经网络对‘黑珍珠’鲜食玉米产地的区分和识别 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 239–245. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070135

MA Hongjiang, HAO Xiyu, GAO Ming, et al. Distinction and Recognition of the 'Black Pearl' Fresh Corn Origin Based on Electronic Nose and BP Neural Network[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 239–245. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070135

· 分析检测 ·

基于电子鼻和 BP 神经网络对‘黑珍珠’鲜食玉米产地的区分和识别

马洪江^{1,2}, 郝曦煜^{1,2}, 高 铭³, 于有强³, 杨书恒³, 刘士伟³, 马喜山³, 王文鑫³, 段盛林³, 王 雪^{1,2,*}

(1. 黑龙江北纬四十七绿色有机食品有限公司, 黑龙江齐齐哈尔 161532;

2. 黑龙江飞鹤乳业有限公司, 北京 100016;

3. 中国食品发酵工业研究院有限公司, 北京 100015)

摘要: 以‘黑珍珠’鲜食玉米为研究对象, 采用电子鼻技术分别测定了黑龙江、陕西两大产区共计 200 个鲜食玉米样品的气味传感器响应值原始数据, 通过主成分分析 (Principal component analysis, PCA)、判别因子分析 (Discriminant function analysis, DFA) 对不同产地鲜食玉米的挥发性风味进行了区分, 采用软独立建模分析 (Soft independent modeling class analogy, SIMCA) 建立了黑龙江‘黑珍珠’鲜食玉米的判定模型, 并通过 Pytorch 软件建立了反向传播神经网络 (Back propagation neural network, BP 神经网络) 模型, 对不同产地的‘黑珍珠’鲜食玉米进行鉴别区分。结果表明, 不同产地的‘黑珍珠’鲜食玉米的挥发性风味虽有相似之处但具有明显的产地特征, SIMCA 模型可实现对未知样品是否来自黑龙江产区的有效识别 (正确率为 97%), BP 神经网络模型则可对未知产地的‘黑珍珠’鲜食玉米样品进行产地预测及鉴别, 平均正确率达 99.44%。采用电子鼻技术结合 BP 神经网络模型可以准确的区分和识别‘黑珍珠’鲜食玉米产地。

关键词: 鲜食玉米, 电子鼻, 主成分分析, 软独立建模, BP 神经网络, 产地鉴别

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)13-0239-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070135

本文网刊:



Distinction and Recognition of the 'Black Pearl' Fresh Corn Origin Based on Electronic Nose and BP Neural Network

MA Hongjiang^{1,2}, HAO Xiyu^{1,2}, GAO Ming³, YU Youqiang³, YANG Shuheng³, LIU Shiwei³, MA Xishan³,
WANG Wenxin³, DUAN Shenglin³, WANG Xue^{1,2,*}

(1. Heilongjiang Beiwei 47 Green Organic Food Co., Ltd., Qiqihar 161532, China;

2. Heilongjiang Feihe Dairy Co., Ltd., Beijing 100016, China;

3. China National Research Institute of Food & Fermentation Industries Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: 'Black pearl' fresh corns from different regions were analyzed using an electronic nose to capture the aroma profile. Principal component analysis (PCA) and discriminant function analysis (DFA) were used for multivariate statistical analysis of 200 data from two regions. Based on this, the judgment model of samples from Heilongjiang production area was built using a soft independent modeling class analysis (SIMCA) algorithm, and a back propagation neural network model was established by Pytorch software to identify and differentiate samples from different regions. The results illustrated that, although the volatile flavor of 'black pearl' fresh corns from different origins were similar, it also showed obvious origin characteristics. SIMCA model could effectively distinguish whether unknown samples come from

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 北京市科技计划项目 (Z221100007122004)。

作者简介: 马洪江 (1982-), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: matianyi0707@163.com。

* 通信作者: 王雪 (1985-), 女, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 功能食品开发, E-mail: wangxue1@feihe.com。

Heilongjiang (the accuracy rate was 97%), while BP neural network model could predict and identify the origin of 'black pearl' fresh corns from unknown production areas, and the average accuracy rate was 99.44%. The combination of electronic nose technology and BP neural network model could accurately distinguish and identify the origin of 'black pearl' fresh corns.

Key words: fresh corn; electronic nose; principal component analysis (PCA); soft independent modeling analysis (SIMCA); back propagation neural network; origin identification

鲜食玉米,是指在乳熟后期至蜡熟初期采摘^[1],具有特殊风味和品质的幼嫩玉米。鲜食玉米营养丰富^[2],风味独特、适口性好、易于食用,同时生长期短、种植成本低、经济效益高,因此深受消费者和种植户的欢迎^[3-4]。目前,我国鲜食玉米种植面积达1800万亩,是全球鲜食玉米种植、加工及消费最大的国家^[5]。紫黑甜糯玉米是目前鲜食玉米行业的发展重点之一,其中消费者较为熟知的品种是黑珍珠鲜食玉米(以下简称‘黑珍珠’),其种植区域主要包括黑龙江省齐齐哈尔市依安县和陕西省安康市宁陕县。紫黑甜糯玉米营养价值高,富含维生素C和膳食纤维,蛋白质、脂肪和硒的含量约为普通玉米的1.23倍、1.3倍和8倍^[6-7],且花青素含量尤为突出^[8-9]。黑珍珠作为紫黑甜糯玉米中的优秀品种,花青素含量较同类玉米含量更高^[10]。

随着我国人民生活水平的逐渐提高,消费者们在选购农产品时除了考虑其安全性及营养性,感官品质也是大家关注的重点。产地是影响农产品感官品质的重要因素^[11],不同地域的土壤环境、当地气候、地形地貌以及水源品质等自然因素会间接或直接影响植物的生长发育情况,其中包括对农产品风味、色泽、口感等感官品质的影响^[12]。许多地理标志性农产品(如平谷大桃、延安小米、烟台苹果等)也因得益于产地优势而广受消费者青睐。鲜食玉米除了质地软糯、口味鲜甜外,其独特的香味是体现其感官品质的重要指标^[13]。针对来自不同产地的鲜食玉米的香味展开研究,从而鉴别鲜食玉米的产地真实性,将有助于避免未来市场中鱼龙混杂。目前,尚未出现有关鲜食玉米产地鉴别方法的相关研究,而传统的产地鉴别方法主要以化学分析方法(如稳定同位素、矿物质元素分析等)为主,这些方法虽然准确度高,但测试复杂且费用昂贵。

电子鼻是电子仿生评价手段的重要工具,通过不同类型的气敏传感器与样品气味分子相互作用来模拟人的嗅觉功能,对复杂气味和挥发性成分进行检测、分析和识别,进而实现对样品的鉴别、分级和质控等分析工作^[14-16]。与传统的产地鉴别方法相比,电子鼻前处理简单、检测周期短,更适合大样本测试,目前已在食品、农业、化工、医疗、中医药等领域得到了广泛的应用^[14-19]。

近年来,随着人工智能领域的快速发展,以电子鼻响应值为基础,结合人工智能算法对目标样品进行统计分析的案例屡见不鲜^[20-21]。与主成分分析

(Principal component analysis, PCA)、判别因子分析(Discriminant function analysis, DFA)以及软独立建模分析(Soft independent modeling class analogy, SIMCA)等常规的与电子鼻结合的数据处理方法相比,反向传播神经网络(Back propagation neural network, BP神经网络)对复杂模式具有更好的分类识别能力,作为一种具有高度非线性映射能力的人工智能算法,与电子鼻结合已广泛应用于农产品、中药材及食品饮料等领域的产物鉴别、分类及产地识别中^[22-25]。针对鲜食玉米,目前电子鼻主要应用于贮藏期品质变化的相关研究中,而对于产地相关的风味研究则未见报道^[26-27]。本研究采集了不同产地‘黑珍珠’的电子鼻指纹图谱,运用PCA、DFA对不同产地‘黑珍珠’的挥发性风味进行了区分,采用SIMCA建立了黑龙江黑珍珠的判定模型,并通过BP神经网络建立甄别不同产地黑珍珠的特征数据模型,为鉴别市售黑珍珠的真实产地提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

玉米 在调研过鲜食玉米市场及黑珍珠玉米种业公司(荆州区恒丰种业发展中心)后,发现市售‘黑珍珠’主要来自黑龙江省齐齐哈尔市依安县(以FH表示)和陕西省安康市宁陕县(以SX表示),通过现场采样方式,选取了FH、SX当地种植的玉米。

FOX 4000型电子鼻 配MOS传感器,其名称及性能见表1,配HS-100型自动进样器、AG 2301型高纯空气发生器、Alpha Soft 12.45版软件,法国Alpha MOS公司;20 mL顶空瓶 上海安谱实验科技股份有限公司;ARB120型电子天平 美国OHAUS公司;L18-P510型高速破壁调理机 九阳股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品采集 本次试验于2022年在FH、SX两地各采收了100个‘黑珍珠’样品,共计200个玉米样品;于2023年在FH、SX两地各采收了5个‘黑珍珠’样品,共计10个玉米样品。

1.2.2 样品前处理 样品通过手工剥离,取得整个玉米样品的玉米粒,以1:1.5的比例加水后,放入高速破壁调理机,破壁粉碎搅拌5 min,制得玉米糊,备用。

1.2.3 电子鼻检测参数设置 采集时间120 s;数据采集延迟1080 s;进样量5000 μ L;进样速度500 μ L/s。自动进样仪参数:孵化器250 s;孵化温度85 $^{\circ}$ C;注射器温度95 $^{\circ}$ C;每个样品做4组平行。

表 1 传感器性能及其对应的香气类型

Table 1 Sensors performance and the corresponding aroma types

传感器室序号	传感器名称	性能	参考物质
1	LY2/LG	对氧化性较强的气体灵敏	氯、氟、氮、氧化合物
	LY2/G	对有毒气体灵敏	氨、胺类化合物、碳氧化合物
	LY2/AA	对有机化合物灵敏	乙醇
	LY2/gCT	对易燃气体灵敏	丙烷、丁烷
	LY2/gCTL	对有毒气体灵敏	硫化氢
	P10/1	对可燃气体灵敏	碳氢化合物
2	P10/2	对易燃气体灵敏	甲烷
	PA/2	对有机化合物、有毒气体灵敏	乙醇、氨水、胺类化合物
	P40/1	对氧化能力较强的气体灵敏	氟
	P40/2	对氧化能力较强的气体灵敏	氯
	P30/1	对可燃气体、有机化合物灵敏	碳氢化合物燃烧产物
	P30/2	对有机化合物灵敏	乙醇、燃烧产物
3	T30/1	对有机化合物灵敏	有机化合物
	T70/2	对芳香族化合物灵敏	甲苯、二甲苯
	T40/1	对氧化能力较强的气体灵敏	氟
	T40/2	对氧化能力较强的气体灵敏	氯、氟、氮、氧化合物
	TA/2	对有机化合物灵敏	乙醇

1.2.4 BP 神经网络模型建立 以 2022 年产的‘黑珍珠’样品的电子鼻气味指纹图谱作为样本数据, 随机选取 70% 作为训练集, 剩余的样本数据作为测试集, 采用交叉熵损失函数(Cross-entropy loss function)作为网络的损失函数, 构建具有 1 个输入层、1 个隐藏层、1 个输出层的神经网络。

为了建立更准确的数据模型, 输入层神经元对应了每个样品的 17 个有效传感器数据; 输出层的神经元个数是目标分类的个数, 即目标产地数量 2; 选择隐含层神经元的个数可参考以下公式:

$$1 = \log_2 n \quad \text{式 (1)}$$

$$1 < n - 1 \quad \text{式 (2)}$$

$$1 \leq \sqrt{(m + n)} + a \quad \text{式 (3)}$$

式中, n 是输入层神经元个数, 1 是隐含层神经元个数, m 是输出层神经元个数, a 为 0~10 之间的常数, 对计算结果四舍五入取整。参考公式确定大致范围后, 通过试凑法确定最佳神经元个数。初步设置隐藏层神经元个数(Hidden_size)及迭代轮次(Epoch)、学习率(LR)、批量大小(Batch size)等参数后开始训练数据, 训练过程进行微调, 直至所得混淆矩阵中准确率(ACC)接近 100% 时停止训练。

1.2.5 模型评估 混淆矩阵是评价 BP 神经网络性能的重要手段, 混淆矩阵中横坐标表示目标类别, 纵坐标表示输出类别, 如图 1 所示。

正确率(%)=分类正确的样本量(目标类别=输出类别)/总样本量×100;

查全率(%)=每一列中分类正确的样本量/该列的总样本量, 即能识别出该类样品的概率×100;

查准率(%)=每一行中分类正确的样本量/该行的总样本量, 即能正确识别该类样本的概率×100。

	FH	SX
预测 FH	来自 FH 的玉米样品中被预测为 FH 的玉米数量	来自 SX 的玉米样品中被预测为 FH 的玉米数量
预测 SX	来自 FH 的玉米样品中被预测为 SX 的玉米数量	来自 SX 的玉米样品中被预测为 SX 的玉米数量

图 1 ‘黑珍珠’玉米产地鉴别模型混淆矩阵解析
Fig.1 Explanation of the confusion matrix for the origin identification model of ‘black pearl’ corn

1.3 数据处理

使用 Alpha Soft 12.45 版数据处理软件对 2022 年采收的 FH 和 SX 两个产地的‘黑珍珠’样品的传感器响应值数据进行 PCA 分析(主成分分析)和 DFA 分析(判别因子分析), 并采用软独立建模分析(Soft independent modeling class analysis, SIMCA)算法建立了黑珍珠目标产地快速鉴定模型, 判别其他黑珍珠样品是否来自 FH。通过 PyTorch 软件构建 BP 神经网络模型, 并进行模型评估。

2 结果与分析

2.1 电子鼻指纹图谱分析结果

2.1.1 传感器原始响应特性 样品气体通过与电子鼻传感器相互作用产生响应值, 组成了样品的气味指纹图谱。样品在顶空温度为 85 °C, 振荡转速 500 r/min 的条件下孵化 250 s 后, 经进样器采集 5000 μL 气体进入传感器, 传感器与气体相互作用产生了响应信号, 每个传感器的响应曲线的最大值最终组成了样品不同维度的气味指纹图谱, 如图 2 所示。

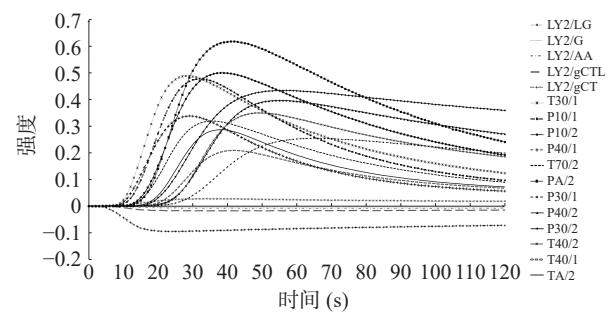


图 2 FH‘黑珍珠’样品的电子鼻原始信号响应曲线图
Fig.2 Original response curves of ‘black pearl’ sample from FH by electronic nose

通过对电子鼻传感器原始响应值的分析, 建立各产地‘黑珍珠’样品的气味指纹图谱数据库, 进而通过 PCA、DFA、SIMCA 三种分析方法来评价不同产地‘黑珍珠’风味的相似性和差异性。

2.1.2 PCA 分析 PCA 是在对样品特性一无所知的

前提下,通过对原始数据向量进行线性变换,在保留主要信息的基础上,进行简化和降维的一种算法,分别以第一主成分和第二主成分为横纵坐标作图,可直观地了解到到每个样本的特征信息^[28]。

如图 3 所示,两片气味区域分别代表了来自 FH 和 SX 的‘黑珍珠’样品的风味特征。SX 样品区域与 FH 样品区域出现了小面积的重合,但大部分区域并未重叠,这说明两个产地的‘黑珍珠’玉米虽然存在较明显的差异,但风味上仍有些许相似之处。

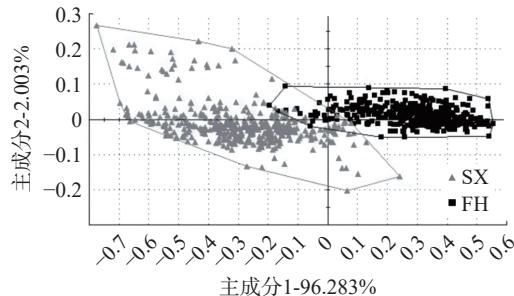


图 3 ‘黑珍珠’样品电子鼻 PCA 分析图

Fig.3 PCA plot of electronic nose response curves of 'black pearl' samples

2.1.3 DFA 分析 DFA 是在已知各样品所属类别的情况下,对原始数据向量进行线性变换,使得各类样品能够更好地区分。DFA 可以通过重新组合传感器数据来优化区分性,使组间距离最大的同时保证组内差异最小。DFA 和 PCA 的区别在于,PCA 能更加全面客观地呈现样品特征,而 DFA 则是重点展现了组别之间的差异性^[29]。‘黑珍珠’样品的 DFA 分析如图 4 所示,两个产地样品形成的区域被完全分开,无重合区域,这说明 FH 和 SX 的‘黑珍珠’的挥发性风味存在明显的产地特征,可以通过这种风味差异来区分其产地来源。

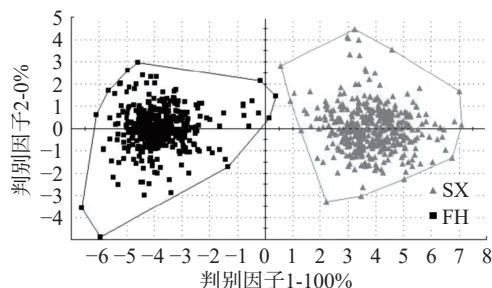


图 4 两种不同产地‘黑珍珠’的判别因子(DFA)分析图

Fig.4 DFA plot of electronic nose response curves of 'black pearl' samples

2.2 ‘黑珍珠’SIMCA 模型的建立

SIMCA 模型是一种建立在 PCA 分析基础上的模式识别方法,常与 PCA 分析方法联合使用^[30- 31],其建模及鉴别过程方便快捷,首先用标准样本建立鉴定模型,然后利用建立好的模型对待测样品进行二值鉴定,判断该样品是否属于目标类别^[32-34],并通过逐个验证样本的交叉有效性来计算识别百分比。

本研究将 FH 玉米定义为标准样品,判定结果如图 5 所示,阴影区域为“是(FH)”,其余空白区域定义为“不是(FH)”。绝大多数的 SX 被定义为“不是”,只有少数数据被定义为“是”。模型识别率为 97%,说明该模型可以有效地判定一款‘黑珍珠’“属于/不属于”FH 产地。

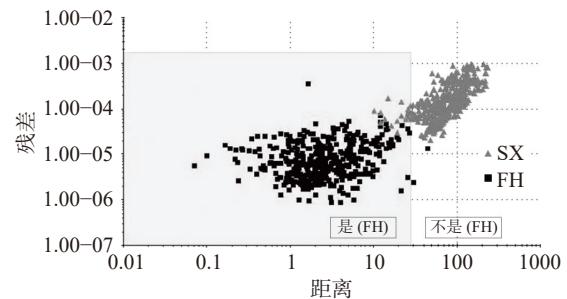


图 5 黑龙江产地‘黑珍珠’的 SIMCA 软独立判别模型

Fig.5 SIMCA of 'black pearl' samples from Heilongjiang production area

以 SX 为标准样品,建立 SX‘黑珍珠’判别模型,计算得到模型识别率为 51%,识别率较低。分析其原因,可能由于 SX 样品间差异较大,所建立的模型对于未知样品的可接受范围较广,因此识别错误的几率也更大;而 FH 样品间差异较小,所建立模型对于未知样品的可接受范围较小,能够更加准确地做出判定。

由此可见, SIMCA 模型受到组间差异性的影响较大,不适用于 SX 的鉴别。为了建立识别率更高且可同时鉴别 FH 和 SX 的模型,后续引入了 BP 神经网络算法。

2.3 ‘黑珍珠’BP 神经网络模型的建立

2.3.1 模型参数及性能 通过 PyTorch 软件建立了具有 1 个输入层、1 个隐藏层、1 个输出层的神经网络,输入层对应 17 个电子鼻传感器数据,隐藏层包含 10 个神经元,输出层包含 2 个神经元。

如图 6 所示,当神经网络训练迭代 500 轮次(Epoch)时,交叉熵接近于 0(0.027562),说明预测值与实际值基本一致;此时,模型精确度接近 1 且保持

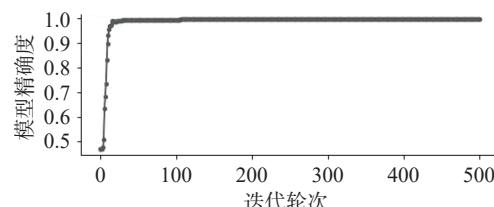
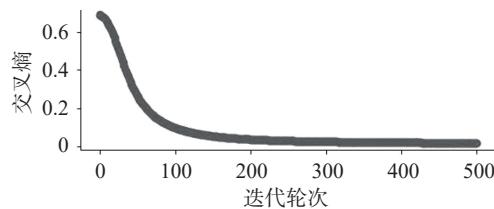


图 6 BP 神经网络性能图

Fig.6 Performance graph of BP neural network

稳定, 说明此时预测模型鉴定未知‘黑珍珠’样品的产地的正确率接近 100%, 符合试验要求。因此, 确定本模型的网络参数为: Epoch=500、hidden_size = 10、LR = 0.001、batchsize = 20, 网络构建完成。

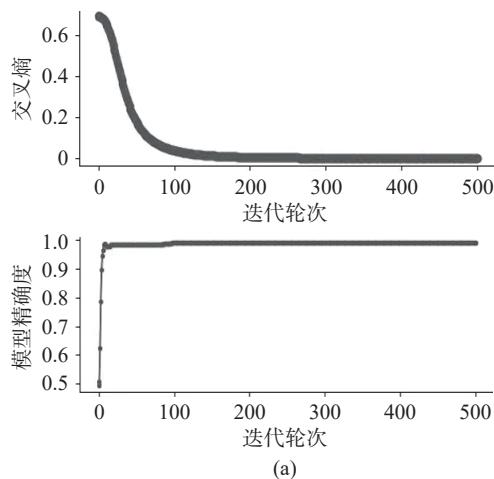
2.3.2 模型评估 将预留的 30% 的样品作为测试集对所建网络进行评估, 其预测结果以混淆矩阵的形式呈现, 如图 7 所示。通过计算得出, FH 玉米样品的总体查全率为 99.12%, 查准率为 100%, SX 玉米的总体查全率为 100%, 查准率为 99.22%。测试样本的正确率为 99.58%, 表明该神经网络可以有效区分产自不同产地的‘黑珍珠’样品, 利用训练好的网络可以对未知产地的‘黑珍珠’样品进行分类、评估和预测。

	FH	SX
预测FH	112	0
预测SX	1	127

图 7 测试集的模型性能混淆矩阵

Fig.7 Confusion matrix of model performance on test set

为了进一步验证模型有效性, 通过电子鼻检测了 2023 年采收的 5 个 FH 玉米、5 个 SX 玉米的挥发性风味, 采集到共计 40 个电子鼻响应值数据, 带入到已建立的 BP 神经网络模型中, 其预测结果以混淆矩阵的形式呈现, 如图 8 所示。通过计算得出, FH 玉米样品的总体查全率为 90%, 查准率为 94.74%, SX 玉米的总体查全率为 95%, 查准率为 90.48%。



	FH	SX
预测FH	120	1
预测SX	1	118

图 7 测试集的模型性能混淆矩阵

Fig.7 Confusion matrix of model performance on test set

测试样本的正确率为 92.5%。表明该模型对新一年采收的玉米样品仍可有效地进行区分。考虑到不同年份的农产品在种植过程中的气候和种植条件不尽相同, 可能对感官品质造成影响, 后期研究将采集更多的 2023 年的样品数据加入训练集, 优化 BP 神经网络模型。

	FH	SX
预测FH	18	1
预测SX	2	19

图 8 新数据的模型性能混淆矩阵

Fig.8 Confusion matrix of model performance on new data

2.3.3 模型稳定性评估 为确保模型具有较高的预测精度及稳定性, 从 2022 年‘黑珍珠’样品的电子鼻响应信号中, 随机 2 次抽取样本, 以组成 2 组不同的训练集和测试集, 进行平行验证。在模型结构及参数不变的前提下, 分别用这 2 组训练集与测试集对 BP 神经网络进行训练和测试, 结果如图 9 所示。

第一次验证实验, 如图 9(a)所示, 迭代 500 轮次时, 交叉熵接近于 0(0.007177), 说明此时预测模型的正确率接近 100%, 符合试验要求。通过图 9(b)所示的混淆矩阵计算得出, FH 样品的总体查全率为 99.17%, 查准率为 99.17%; SX 的总体查全率为 99.16%, 查准率为 99.16%。模型预测正确率为 99.17%。

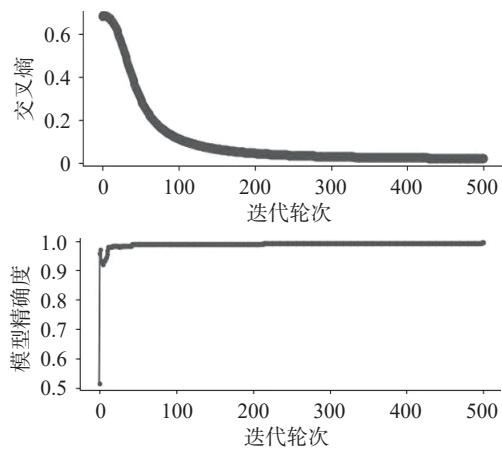


图 9 神经网络模型稳定性评估

Fig.9 Stability evaluation of neural network models

第二次验证实验,迭代 500 轮次,如图 9(c)所示,交叉熵接近于 0(0.006401),说明此时预测模型的正确率接近 100%,符合试验要求。通过图 9(d)所示的混淆矩阵计算得出,FH 样品的总体查全率为 99.19%,查准率为 100%;SX 的总体查全率为 100%,查准率为 99.15%。模型预测正确率为 99.58%。

通过两次平行验证,得到三次测试样本正确率均在 99% 以上,平均正确率是 99.44%,说明此模型稳定可靠,能够很好地鉴定两个产地的玉米样本。

3 结论

本实验通过电子鼻对不同产地的‘黑珍珠’鲜食玉米的感官风味进行了检测,根据 PCA、DFA 分析可知,来自不同产地的‘黑珍珠’玉米的挥发性风味虽有相似之处,但同时也具有明显的产地特征,说明不同产地‘黑珍珠’的香味确有不同。通过建立 SIMCA 模型,可以准确的判定,未知产地的‘黑珍珠’样品是否属于黑龙江产区,但无法有效判别其是否属于陕西产地。为了建立更准确的识别模型,通过 BP 神经网络建立了基于电子鼻气味信号的‘黑珍珠’产地预测模型,平均预测准确率为 99.44%,可准确预测未知‘黑珍珠’样品的产地。

本试验建立了针对鲜食玉米产地溯源的计算模型,与稳定同位素、矿物元素分析、质谱技术等传统溯源技术相比,本研究结合了电子鼻与人工智能技术,模型建立过程操作简单,成本可控,实际应用方便快捷,且准确率高。这为未来的农产品溯源、产地农产品真假鉴别等工作提供了检测及分析思路。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 王浩, 刘景圣, 郑明珠, 等. 鲜食糯玉米贮藏过程中淀粉含量及相关酶活性变化的研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(3): 6–10. [WANG Hao, LIU Jingsheng, ZHENG Mingzhu, et al. Changes of starch content and related enzyme activities in fresh waxy corn during storage[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(3): 6–10.]
- [2] 李水琴. 不同类型鲜食玉米主要品质形成规律的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2017: 1–3. [LI Shuiqin. Studu on the formation regulation of main quality of different types of fresh corn[D]. Kunming: Yunnan University, 2017: 1–3.]
- [3] 史亚兴, 徐丽, 赵久然, 等. 中国糯玉米产业优势及在“一带一路”发展中的机遇[J]. 作物杂志, 2019(2): 15–19. [SHI Yaxing, XU Li, ZHAO Jiuran, LU Baishan, FAN Yanli, et al. Waxy maize industry advantages in china and opportunities in the development of the belt and road[J]. *Crops*, 2019(2): 15–19.]
- [4] 赵久然, 卢柏山, 史亚兴, 等. 我国糯玉米育种及产业发展动态[J]. 玉米科学, 2016, 24(4): 67–71. [ZHAO Jiuran, LU Baishan, SHI Yaxing, et al. Development trends of waxy corn breeding and industry in China[J]. *Journal of Maize Science*, 2016, 24(4): 67–71.]
- [5] 苏曼宇. 鲜食玉米产业现状及发展前景[J]. 中国粮食经济, 2022(3): 45–48. [SU Manyu. Current situation and development prospect of fresh corn industry[J]. *China Grain Economy*, 2022(3): 45–48.]
- [6] 李靖元, 柳青, 王国良, 等. 黑玉米的营养优势及开发应用[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(5): 214–218. [LI Jingyuan, LIU Qing, WANG Guoliang, et al. Nutritional advantage and development of black maize[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(5): 214–218.]
- [7] 王俊生. 鲜食甜糯玉米的营养价值及优质栽培技术[J]. 吉林蔬菜, 2018(3): 27–28. [WANG Junsheng. Nutritional value and high quality cultivation techniques of fresh sweet waxy corn[J]. *Jilin Vegetable*, 2018(3): 27–28.]
- [8] 刘炬. 东北黑玉米花青素含量的测定[J]. 广东化工, 2018, 45(6): 207, 220. [LIU Ju. Determination of anthocyanin content in black corn in northeast China [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(6): 207, 220.]
- [9] 史振声, 贾森. 紫玉米不同组配方式的花青素含量及产量比较[J]. *种子*, 2012, 31(7): 13–17. [SHI Zhensheng, JIA Sen. Comparison of yield and content of anthocyanin of purple corn of different combining types[J]. *Seed*, 2012, 31(7): 13–17.]
- [10] 卢柏山, 董会, 史亚兴, 等. 不同品种鲜食玉米体外抗氧化能力综合评价[J]. *华北农学报*, 2021, 36(S01): 101–110. [LU Baishan, DONG Hui, SHI Yaxing, et al. Comprehensive evaluation of antioxidant capacity *in vitro* of different varieties of fresh corn[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(S01): 101–110.]
- [11] 丁文雅. 农产品质量与产地环境的关系研究[J]. 科技信息, 2008(10): 177, 182. [DING Wenya. Research on the relationship between agricultural product quality and origin environment[J]. *Science & Technology Information*, 2008(10): 177, 182.]
- [12] 王轩. 不同产地红富士苹果品质评价及加工适宜性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. [WANG Xuan. Research on quality evaluation and processing suitability of fuji apple from different Chinese origins[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.]
- [13] 李水琴, 罗吉, 朱志妍, 等. 不同鲜食玉米灌浆期子粒主要营养成分的积累动态[J]. 玉米科学, 2019, 27(2): 77–85. [LI Shuiqin, LUO Ji, ZHU Zhiyan, et al. Dynamic of the main nutrient ingredients accumulated in different fresh corn grains during filling stage[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(2): 77–85.]
- [14] NIE X, LIU Z, ZHANG S, et al. Electronic nose and its application in food field[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, 23(10): 1–3.
- [15] PENZA M, CASSANO G, TORTORELLA F, et al. Classification of food, beverages and perfumes by WO3 thin-film sensors array and pattern recognition techniques[J]. *Sensors and Actuators*, 2001, 73(1): 76–87.
- [16] OSHITA S, SHIMA K, HARUTA T, et al. Discrimination of odors emanating from 'La France' pear by semi-conducting polymer sensors[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 26(6): 209–216.
- [17] ZHOU B, WANG J, QI J F. Identification of different wheat seeds by electronic nose[J]. *International Agrophysics*, 2012, 26(4): 413–418.
- [18] LEUNIS N, BOUMANS M, KREMER B, et al. Application of an electronic nose in the diagnosis of head and neck cancer[J]. *Laryngoscope*, 2014, 124(6): 1377–1381.
- [19] LI S, LI X, WANG G, et al. Rapid discrimination of Chinese red ginseng and Korean ginseng using an electronic nose coupled with chemometrics[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical*

- Analysis, 2012, 70(1): 605–608.
- [20] DUTTA R, MINES E L, GARDNER J W, et al. Tea quality prediction using a tin oxide-based electronic nose: An artificial intelligence approach[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2003, 94(2): 228–237.
- [21] SIMONA B, SAVERIO M, GLORIA S A, et al. Electronic nose and neural network use for the classification of honey[J]. *Apidologie*, 2004, 35(4): 397–402.
- [22] 付奥, 赵利, 袁美兰, 等. 基于电子鼻和人工神经网络对鱼露产地的区分与识别[J]. *中国调味品*, 2017, 42(3): 40–44. [FU Ao, ZHAO Li, YUAN Meilan, et al. Distinction and recognition of the fish sauce origin based on electronic nose and artificial neural network [J]. *China Condiment*, 2017, 42(3): 40–44.]
- [23] LI A, DUAN S, DANG Y, et al. Origin identification of Chinese Maca using electronic nose coupled with GC-MS[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 12216–12225.
- [24] LEGGIERI M C, MAZZONI M, FODIL S, et al. An electronic nose supported by an artificial neural network for the rapid detection of aflatoxin B-1 and fumonisins in maize[J]. Food Control, 2021, 123(1): 107722–107729.
- [25] YU H, WANG Y, WANG J. Identification of tea storage times by linear discrimination analysis and back-propagation neural network techniques based on the eigenvalues of principal components analysis of e-nose sensor signals[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2009, 9(10): 8073–8082.
- [26] 崔丽静, 周显青, 林家永, 等. 电子鼻快速判别玉米霉变技术研究[J]. *中国粮油学报*, 2011, 26(10): 103–107. [CUI Lijing, ZHOU Xianqing, LIN Jiayong, et al. Study on rapid identification technology of moldy corn by electronic nose [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2011, 26(10): 103–107.]
- [27] 钱佳成, 宋伟. 不同储藏条件下玉米挥发性成分研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 252–258, 265. [QIAN Jiacheng, SONG Wei. Analysis of volatile components of corn under different storage conditions [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(16): 252–258, 265.]
- [28] 武文奇, 毛怡宁, 李虹, 等. Heracles II 超快速气相电子鼻对金银花粉末质量的鉴别研究[J]. *中国中药杂志*, 2019, 44(23): 5129–5133. [WU Wenqi, MAO Yining, LI Hong, et al. Identification of honeysuckle powder quality by Heracles II ultra-fast gas phase electronic nose [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2019, 44(23): 5129–5133.]
- [29] 刘立轩, 冷晓红, 郭鸿雁, 等. 基于电子鼻技术的秦艽药材产地鉴别[J]. *时珍国医国药*, 2020, 31(3): 617–619. [LIU Lixuan, LENG Xiaohong, GUO Hongyan, et al. Origin identification of *Gentiana macrophylla* based on electronic nose technology [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica*, 2020, 31(3): 617–619.]
- [30] COTRIM A R, FERRAZ A, GONCALVES A R, et al. Identifying the origin of lignins and monitoring their structural changes by means of FTIR-PCA and -SIMCA[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 68(1): 29–34.
- [31] 黄月华, 范璐, 李娟. 气相色谱法 SIMCA 模式识别 9 种植物油脂的可行性研究[J]. *河南工业大学学报: 自然科学版*, 2009, 30(5): 13–17. [HUANG Yuehua, FAN Lu, LI Juan. Simca analysis of 9 kinds of vegetable oils and fats in a feasibility study by gas chromatography [J]. *Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition*, 2009, 30(5): 13–17.]
- [32] 史波林, 赵镭, 支瑞聪, 等. 应用电子鼻判别西湖龙井茶香气品质[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(14): 302–306. [SHI Bolin, ZHAO Lei, ZHI Ruicong, et al. Aroma quality discrimination of Xi-hu-Longjing tea by electronic nose [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(14): 302–306.]
- [33] LIU J, WANG W, YANG Y, et al. A rapid discrimination of authentic and unauthentic radix *Angelicae sinensis* growth regions by electronic nose coupled with multivariate statistical analyses[J]. 2014, 14(11): 20134–20148.
- [34] DONG D, ZHENG W, WANG W, et al. Analysis and discrimination of grape spoilage via volatiles: A comparison between long optical path Fourier-transform-infrared spectroscopy and sensor arrays[J]. *Analyst*, 2014, 139(19): 5028–5034.