

基于电子鼻技术的不同辐照方式后农产品特征风味分析

岳玲^{1,2}, 王海宏^{1,2}, 颜伟强^{1,2}, 郑琦^{1,2}, 孔秋莲^{1,2*}, 戚文元^{1,2}, 陈志军^{1,2}, 徐赞²

(1. 上海市农业科学院, 上海 201403; 2. 上海束能辐照技术有限公司, 上海 201403)

摘要: **目的** 利用电子鼻检测技术, 研究农产品经不同方式辐照后特征风味的变化。**方法** 采用电子束和⁶⁰Co γ -射线对红枣、核桃和可可粉进行辐照处理, 应用电子鼻对辐照后样品气味进行检测, 通过传感器响应值和主成分分析(principal components analysis, PCA)探索农产品特征气味的变化规律。**结果** 辐照对3种农产品特征气味变化主要集中在传感器响应值较高的硫化物、甲基类、醇类、醛酮类和氮氧化合物。核桃的特征气味响应值最高的硫化物对辐照最为敏感, 红枣次之, 可可粉相对不敏感。不同辐照剂量下, 采用电子束辐照处理的红枣, 传感器W5S、W1S、W1W、W2S、W2W的响应值无显著差异($P>0.05$), 而用⁶⁰Co γ -射线辐照, 除了W2S以外, 其他传感器的响应值都存在显著性差异($P<0.05$)。不同辐照剂量处理的核桃, 除了W2S以外, 其余传感器的响应值与红枣结果一致; 在相同辐照剂量下, 采用电子束辐照处理与⁶⁰Co γ -射线辐照的可可粉, 除了W2S和W5S以外, 其他传感器的响应值都无明显差异($P>0.05$)。**结论** 辐照方式及辐照剂量直接影响着农产品特征气味, 为了保证产品的初始风味, 以控制虫害为目的时, 可以采用电子束或⁶⁰Co γ -射线辐照红枣和核桃, 剂量不超过1 kGy, 而以杀菌为目的时, 建议采用电子束辐照, 剂量不超过4 kGy; 可可粉采用电子束和⁶⁰Co γ -射线辐照均可, 剂量最好不超过7 kGy。

关键词: 电子鼻; 主成分分析; 农产品; 辐照; 特征气味

Analysis of characteristics flavors of agricultural products under different irradiation methods based on electronic nose technology

YUE Ling^{1,2}, WANG Hai-Hong^{1,2}, YAN Wei-Qiang^{1,2}, ZHENG Qi^{1,2}, KONG Qiu-Lian^{1,2*},
QI Wen-Yuan^{1,2}, CHEN Zhi-Jun^{1,2}, XU Yun²

(1. Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China;
2. Shanghai Shuneng Irradiation Technology Co., Ltd., Shanghai 201403, China)

ABSTRACT: Objective To study the change of characteristic flavors of agricultural products irradiated by different ways by electronic nose technology. **Methods** Jujube, walnut and cocoa powder were irradiated by electron beam and ⁶⁰Co γ -ray. The flavor of the irradiated sample was detected by the electronic nose, variation regularity of characteristic odour of agricultural products was explored by the sensor response value and principal components analysis (PCA). **Results** The changes of characteristic flavors of the 3 kinds of agricultural products by

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字 2016 第 6-3-4 号)

Fund: Supported by the Shanghai Municipal Agricultural Commission, P. R. China (2016 Hu Nong Ke Gong Zi No.6-3-4)

*通信作者: 孔秋莲, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品保鲜加工。E-mail: sunny0123@vip.163.com

*Corresponding author: KONG Qiu-Lian, Ph.D, Professor, Shanghai Academy of Agricultural Science, No.1000, Jingqi Road, Fengxiang District, Shanghai 201403, China. E-mail: sunny0123@vip.163.com

irradiation were mainly concentrated in the sulfides, methyls, alcohols, aldehydes and ketones, and nitrogen oxides with higher sensor response values. The sulfide with the highest characteristic flavor response value of walnut was the most sensitive to irradiation, followed by jujube, and cocoa powder was relatively insensitive. Under different irradiation doses, the response values of W5S, W1S, W1W, W2S and W2W sensors of jujube irradiated by electron beam had no significant difference ($P>0.05$), but except for W2S, the response values of other sensors irradiated by ^{60}Co γ -ray were significantly different ($P<0.05$). For walnuts treated with different irradiation doses, except W2S, the response values of other sensors were consistent with the results of jujube. Under the same irradiation dose, there was no significant difference in the response values of other sensors except for W2S and W5S for cocoa powder irradiated by electron beam irradiation and ^{60}Co γ -ray irradiation ($P>0.05$). **Conclusion** Irradiation mode and dose directly affect the characteristic flavor of agricultural products. In order to ensure the original flavor of the product, electron beam or ^{60}Co γ -ray can be used to irradiate jujube and walnuts for the purpose of insect pest control, and the dose should not exceed 1 kGy. For the purpose of sterilization, electron beam irradiation is recommended, and the dose is not more than 4 kGy. Cocoa powder can be irradiated by electron beam or ^{60}Co γ -ray, and the dose should not exceed 7 kGy.

KEY WORDS: electronic nose; principal component analysis; agricultural products; irradiation; characteristic flavor

0 引言

农产品保鲜加工中通常采用辐照技术进行杀虫、灭菌或抑制其他生理代谢,从而实现延长农产品贮藏或保鲜期的目的^[1-2]。目前商业化辐照通常是采用 ^{60}Co 产生的 γ -射线或电子加速器产生的电子束(electron beam, EB)进行辐射。与传统熏蒸、杀虫剂等化学方法或高温高压等物理方法相比,辐照具有高效节省、无化学污染或残留等突出优点^[3-5]。

食品辐照因目的不同,其辐照剂量也不相同^[6-7],国际上统一分为 3 种:为了杀虫、抑制发芽等不超过 1 kGy 的是低剂量;为了灭菌,范围在 1~10 kGy 的是中剂量;为了达到无菌水平高于 10 kGy 的是高剂量^[8]。辐照技术在农产品保鲜加工中的研究与应用已有大量报道,研究表明,食品或农产品辐照后,均会在一定程度上导致产品特征气味变化^[9-10],因此在辐照加工中,辐照剂量是辐照加工关键控制点。辐照剂量的确定除了参考食品或农产品污染菌数量之外,辐照后感官品质的变化也是重要的依据之一^[11-13]。感官品质的主要评价指标是辐照后产品特征气味变化,现有关于农产品辐照后气味变化的研究主要是特征气味具体成分的变化,通常是采用气相色谱-联用质谱法进行测定^[14-15],而采用电子鼻检测技术开展农产品辐照后特征气味变化的研究相对较少。电子鼻是一种根据仿生学原理模拟人类嗅觉系统的人工智能电子仪器,由气敏传感器阵列和模式识别系统组成,能够进行气味的整体特征信息的化学计量学分析。电子鼻技术与人类嗅觉判别相比,它的测定很客观,不受主观因

素影响,并且还具有响应时间短、检测速度快、且不用复杂的预处理过程等特点,已在饮料、食品、包装材料、化妆品、环境保护、医药等许多领域得到应用^[16-18]。本研究拟利用电子鼻检测技术,研究农产品辐照后特征气味的变化,以具有代表性农产品红枣、核桃和可可粉为试材,采用电子束和 ^{60}Co γ -射线进行辐照处理,应用电子鼻对辐照后样品气味进行检测,检测数据通过传感器响应值和主成分分析(principal component analysis, PCA)探索辐照对农产品特征气味的变化规律,以期为农产品辐照加工方式及剂量选择提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

红枣干:从某电商平台上购得的标注产地为阿克苏的一级红枣干(本研究以下简称为“红枣”);核桃:从某电商平台上购得的标注产地为阿克苏的薄皮核桃(本研究以下简称为“核桃”);可可粉:从某电商平台上购得的标注产地为天津的天然低脂可可粉(本研究以下简称为“可可粉”)。

1.2 仪器与设备

PEN3 型电子鼻(德国 AIRSENSE 公司); γ -射线和电子束辐照设施(γ -射线 ^{60}Co γ -射线源强 2.22×10^{15} bq,上海束能辐照技术有限公司); IS1020 型电子加速器(额定能量 10 MeV,同方威视技术股份有限公司); 8011s 组织捣碎机(美国 Waring 公司); BSA224S-CW 电子天平[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]。

1.3 实验方法

1.3.1 样品辐照

实验设计空白未辐照为对照组, 红枣和核桃分别采用电子束辐照和 γ 射线辐照(剂量率 2.2 kGy/h), 每个辐照方式的剂量各为 1 kGy 和 4 kGy, 可可粉每个辐照方式的剂量各为 4 kGy 和 7 kGy, 每个样品各处理 3 次重复, 每个样品的质量约 200 g。

1.3.2 电子鼻检测方法

参照相关文献^[19]方法但略有修改, 室温: 25.1 °C, 准确称取样品 3.0 g, 放入 20 mL 顶空瓶中, 静置 10 min 后, 使用 PEN 3 电子鼻检测。检测条件: 样品测定间隔 1 s, 清洗时间 120 s, 归零时间 5 s, 样品准备时间 5 s, 测定时间 100 s, 载气流量 400 mL/min, 进样流量 400 mL/min。传感器信号在 50 s 后基本稳定, 选定采集信号时间为 80 s。不同辐照处理样品测定 3 次重复, 测定时保持室温 25 °C。每个电子鼻传感器所对应的特征气味物质如表 1 所示。

表 1 电子鼻传感器性能描述
Table 1 Performance descriptions of electronic nose sensor

阵列序号	传感器名称	特征物质性能描述
S1	W1C	芳香成分, 苯类
S2	W5S	灵敏度高, 对氮氧化合物很灵敏
S3	W3C	芳香成分灵敏, 氨类
S4	W6S	主要对氯化物有选择性
S5	W5C	短链烷烃芳香成分
S6	W1S	对甲基类灵敏
S7	W1W	对硫化物灵敏
S8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
S9	W2W	芳香成分, 对有机硫化物灵敏
S10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.3.3 数据分析

采用 SPSS 13.0 统计分析软件, 数据显著性分析采用 S-N-K 多重比较法, 采用 Origin pro 2018 软件进行协方差矩阵模式的主成分分析, 雷达图等其它图像均采用 Origin pro 2018 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 电子鼻对农产品挥发性物质的响应

电子鼻 10 个传感器对不同辐照处理红枣、核桃及可可粉的挥发性气味物质的响应值(G/G_0)如图 1~3 所示。从图 1~3 可知, 红枣、核桃及可可粉经 ^{60}Co 及电子束辐照前后, 传感器 W1C、W3C、W6S、W5C 和 W3S 对其气味物质的响应值大致处于 0.5~1.0 范围, 说明电子鼻对这 3 种农

产品的苯类、氨类、氯化物、烷烃类气味不敏感, 也表明 3 种农产品的挥发性气味物质中这些类物质含量较低。相对而言, 电子鼻传感器 W5S、W1S、W1W、W2S、W2W 对不同辐照处理后产品的气味物质的响应值为 2~10, 说明这些传感器对 3 种农产品的氮氧化合物、甲基类、硫化物、醇类、醛酮类等气味较为敏感, 从雷达图中可以清晰地看出, 其中以对硫化物敏感的传感器 W1W 响应值最高, 其次是对有机硫化物敏感的 W2W, 该结果与相关咖啡的电子鼻检测研究报导基本一致^[20]。

图 1 结果显示, 红枣挥发性气味物质中, 采用 ^{60}Co γ -射线辐照 4 kGy 对硫化物敏感的 W1W 和 W2W 的响应值变化比较明显($P<0.05$), 而 ^{60}Co γ -射线辐照 1 kGy 和电子束辐照 1 kGy 与 4 kGy, 其响应值基本无显著性变化($P>0.05$); 辐照处理后 W1S 和 W2S 的响应值显著低于未辐照的响应值($P<0.05$), 即红枣辐照后挥发性物质中甲基类、醇类和醛酮类物质显著降低; 辐照处理后的 W5S 响应值, 除了 ^{60}Co γ -射线辐照 4 kGy 外, 其他的响应值都明显比未辐照小($P<0.05$)。不同辐照剂量下, 采用电子束辐照处理的红枣, 传感器 W5S、W1S、W1W、W2S、W2W 的响应值无显著差异($P>0.05$), 而用 ^{60}Co γ -射线辐照, 除了 W2S 以外, 其他传感器的响应值都存在显著性差异。

由图 2 看出在核桃中, 辐照后其传感器 W5S、W1W 和 W2W 的响应值都显著高于未辐照的响应值($P<0.05$)。采用 ^{60}Co γ -射线辐照, 响应值随辐照剂量的增加而增加, 1 kGy 与 4 kGy 响应值变化存在显著性差异($P<0.05$), 而采用电子束辐照不同剂量的响应值无显著差异($P>0.05$); 除了采用 ^{60}Co γ -射线辐照 4 kGy 处理的核桃, 其他处理的传感器 W1S 的响应值与未辐照均无明显变化($P>0.05$); 传感器 W2S 的响应值除了电子束 4 kGy 处理, 其他处理组与未辐照也无显著性差异($P>0.05$)。不同辐照剂量下, 采用电子束与 ^{60}Co γ -射线处理的核桃, 除了 W2S, 其他不同传感器对特征气味的变化规律与红枣一致。

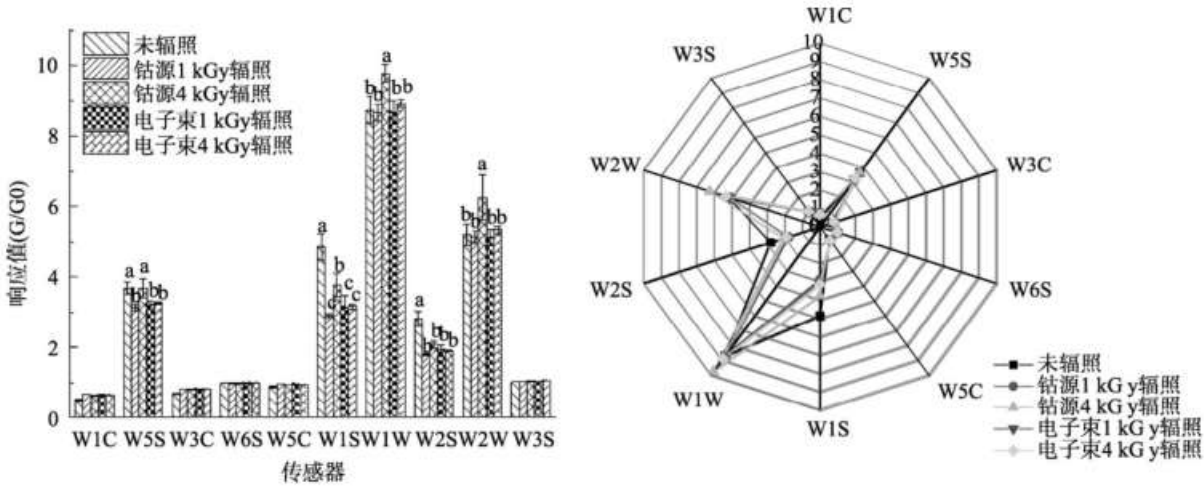
图 3 结果表明, 4 kGy 处理的可可粉其传感器 W1W 的响应值与未辐照的无明显差异($P>0.05$), 而 7 kGy 处理后的响应值显著降低($P<0.05$); 辐照后 W2W 的响应值明显低于未辐照组($P<0.05$), 不同辐照方式和不同剂量处理之间无显著差异($P>0.05$); 除了采用 ^{60}Co γ -射线辐照 7 kGy 处理的核桃, 其他处理的传感器 W5S、W2S 的响应值与未辐照组相比均无明显变化($P>0.05$); 辐照后 W1S 的响应值明显高于未辐照组($P<0.05$)。相同辐照剂量下, 采用电子束辐照处理与 ^{60}Co γ -射线辐照的可可粉, 除了 W2S 和 W5S 以外, 其他传感器的响应值都无明显差异($P>0.05$)。

辐照对红枣、核桃及可可粉的挥发性特征气味物质变化的影响并不一致。辐照显著降低了红枣挥发性特征气味中的甲基类、醇类和醛酮类物质, 对传感器响应值比较高的硫化物只有 ^{60}Co γ -射线高剂量辐照有显著增加。对于核桃

来说,辐照极显著增加了核桃挥发性气味中的硫化物和氮氧化物。辐照只增加了可可粉特征气味中的甲基类物质,而响应值最高的硫化物只有 7 kGy 辐照时有显著差异。由此可知,3 种农产品特征气味变化对辐照响应最为敏感的是核桃,其次为红枣,而可可粉相对不敏感。辐照对 3 种农产品的特征气味影响不同,主要是因为它们所含的特征气味组分不同。其中辐照对核桃中传感器响应值最高的硫化物影响极显著,是由于核桃含有大量油酸、亚油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸^[21]。不饱和脂肪酸因含有油双键,易氧化生成醛、醇、酸等多种小分子物质或聚合成聚合物,大量研究表明,辐照会产生自由基,新的自由基会与脂肪分子发生反应,从而加速脂肪的氧化速度^[22-23]。此外,在 4 kGy 辐照剂量下,电子束辐照对红枣和核桃挥发性特征气味影响较小,而 ⁶⁰Co γ-射线辐照影响较大,可能是由于电子束辐照剂量率高,辐照时间短,而 ⁶⁰Co γ-射线辐照的

剂量率低,产品辐照时间长,需要数小时处理,本研究中核桃经 ⁶⁰Co γ-射线辐照之后,特征气味变化极为显著,主要是因为核桃中脂质物在射线的长时间作用下,会促使其脂质物质的迅速氧化^[24],类似的结果在火腿^[25]、猪油^[26]等高脂肪食品辐照研究中均有报导。

不同辐照剂量下,采用电子束辐照处理的红枣,传感器 W5S、W1S、W1W、W2S、W2W 的响应值无显著差异 ($P>0.05$),而采用 ⁶⁰Co γ-射线辐照,除了 W2S 以外,其他传感器的响应值都存在显著性差异 ($P<0.05$)。不同辐照剂量处理的核桃,除了 W2S 以外,其余传感器的响应值与红枣结果一致,说明一定辐照剂量范围内,辐照方式对红枣和核桃影响比较大。而在相同辐照剂量下,采用电子束辐照处理与 ⁶⁰Co γ-射线辐照的可可粉,除了 W2S 和 W5S 以外,其他传感器的响应值都无明显差异 ($P>0.05$),说明辐照方式对可可粉没有明显差异,而辐照剂量对可可粉影响较大。



注:不同字母表示组间差异显著($P<0.05$),下同。

图 1 不同辐照处理红枣特征气味电子鼻传感器响应值($n=3$)

Fig.1 Response values of electronic nose sensors to jujube characteristic flavors with different irradiated ($n=3$)

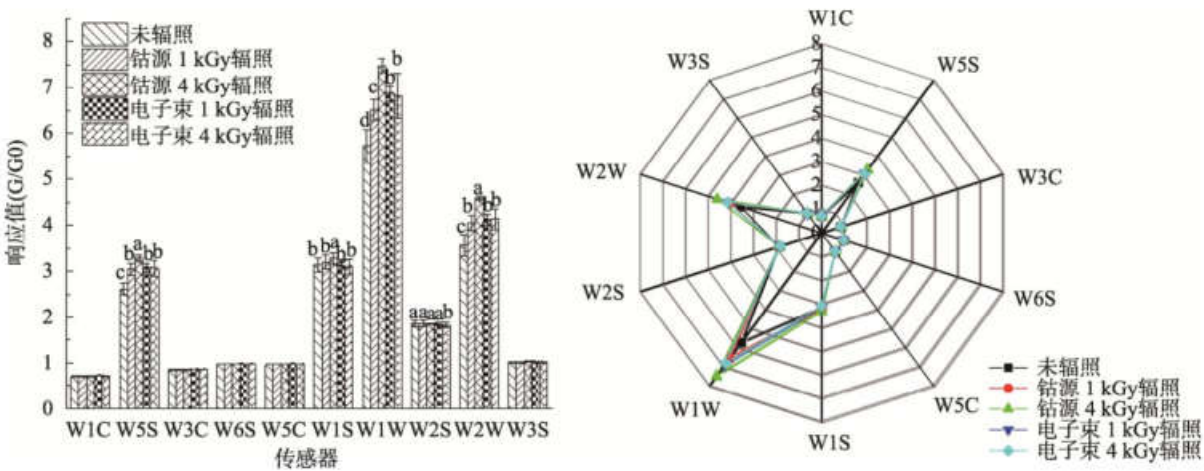


图 2 不同辐照处理核桃特征气味电子鼻传感器响应值($n=3$)

Fig.2 Response values of electronic nose sensors to walnut characteristic flavors with different irradiated ($n=3$)

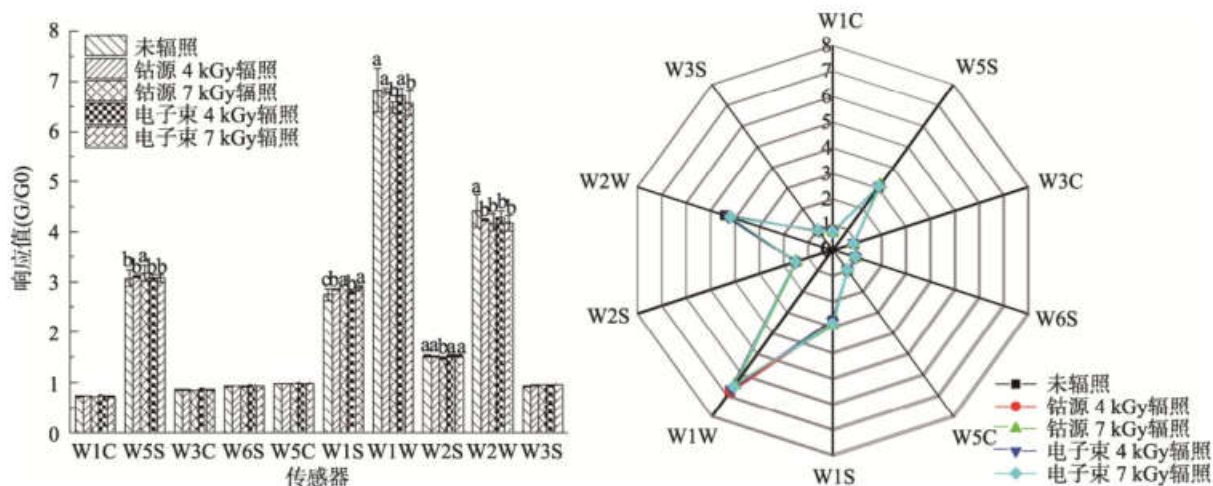


图 3 不同辐照处理可可粉特征气味电子鼻传感器响应值(n=3)

Fig.3 Response values of electronic nose sensors to cocoa powder characteristic flavors with different irradiated (n=3)

2.2 电子鼻对不同辐照处理农产品特征气味变化的主成分分析

本研究通过 10 个电子鼻传感器检测获得辐照之后产品气味成分的感应值, 不同传感器的感应值代表不同特征气味类别, 这些不同气味物质对电子鼻传感器的感应值反映出样品辐照之后气味的变化情况, 该 10 个因素与气味变化结果的关系极为复杂, 因此需要简化这些因素。主成分分析法就是将多个因素或指标综合简化为新的因素或指标, 亦称为原来的主成分, 用来反映原来多个因素的大部分信息(通常要求大于 85%)^[27]。电子鼻检测结果分析目前通常是采用主成分分析法, 形成一个由于第一主成分和第二主成分组成的二维平面图谱^[28]。

图 4~6 是不同辐照处理的红枣、核桃及可可粉样品的 PCA 分析图。3 个样品的第一主成分(PC1)的贡献率分别为 64.1%、96.2%和 83.3%, 第二主成分(PC2)的贡献率分别为 33.8%、2.7%和 11.6%, 每个样品的 2 个主成分合计贡献率均高于 95%, 说明采用 PCA 分析法获得的 2 个主成分可代表产品特征气味。图 4a 显示未辐照红枣样品位于右下方, 电子束辐照与低剂量 1 kGy 的 ⁶⁰Co γ-射线辐照样品分布于原点的左边, 相互之间基本重叠, 说明该辐照条件处理对样品的气味第一主成分和第二主成分影响都比较大。4 kGy 的 ⁶⁰Co γ-射线辐照样品位于左上方, 与基本样本完全分开, 说明此辐照条件处理的样品只对主成分 2 有明显影响。图 4b 显示传感器 W1W、W2W 对第 1、2 主成分贡献率占主要部分, W5S、W2S 对第 1 主成分贡献大, 而对第 2 主成分的贡献率则较小, 其他传感器基本分布原点区域, 对主成分影响弱。图 5a 说明随着

核桃辐照处理方式的变化, 样品特征气味 PC1 方向增加, 而 ⁶⁰Co γ-射线辐照与未辐照比较在 PC2 方向基本处于同一水平。电子束辐照 1、4 kGy 的样品特征气味分布基本一致, 说明在 1~4 kGy 范围内辐照剂量对核桃气味变化影响基本一致。从图 5b 可以看出感应器 W1W、W2W 对 PC1 的贡献率大, W1S 对 PC2 的贡献率大, 这些与传感器对样品特征气味物质的感应值是相对应。图 6a 表明电子鼻检测对可可粉辐照处理的特征气味变化主要在于 PC2 方向的变化, 随着辐照剂量的增加, 样品特征气味沿 PC2 轴向上移动, 电子束和 ⁶⁰Co γ-射线辐照在 4 kGy 时, 其气味分布基本重叠, 当辐照剂量为 7 kGy 时, 出现向上移动并逐渐分离, 其中 ⁶⁰Co γ-射线辐照气味变化较大。图 6b 的载荷图显示感应器 W1W、W2W 对 PC1 的贡献率大, W1S、W5S 对 PC2 的贡献率大, 该结果与前面的传感器对样品特征气味物质的感应值亦相符。

比较红枣、核桃及可可粉辐照处理后的电子鼻检测结果的 PCA 分析, 可以看出核桃辐照后特征气味分布区域最多, 即不同辐照方式和辐照剂量对其特征气味变化均有影响, 说明核桃对辐照的敏感度最强, 而辐照后的可可粉特征气味分布主要沿 PC2 轴移动, 在较高剂量下其气味分布变化区域小, 说明辐照对可可粉特征气味变化影响小, 红枣对辐照的敏感度处于两者之间。从主成分分析图谱的得分图中可以看出, 任何辐照处理均会使样品特征气味产生变化, 仅仅依靠感官评价是无法辨别本实验中样品辐照后香气是如何变化的, 因此, 采用电子鼻检测技术对辐照后样品进行特征气味的 PCA 分析, 可以作为确定产品辐照方式和辐照剂量的一个补充, 可以更客观分析出辐照后产品特征气味的变化。

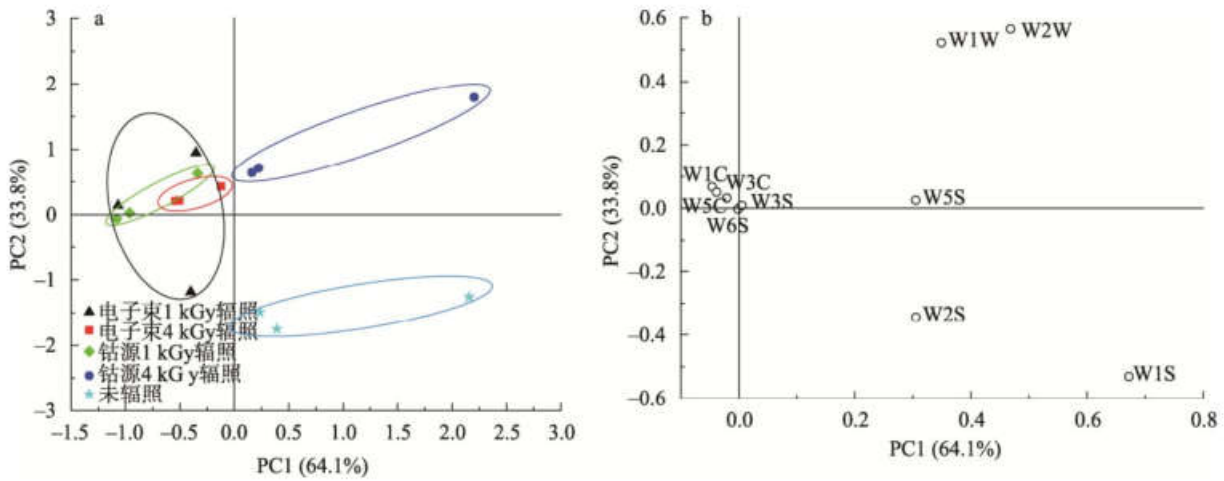


图 4 不同辐照处理红枣特征气味电子鼻响应值的主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of electronic nose response value for jujube characteristic flavors with different irradiated

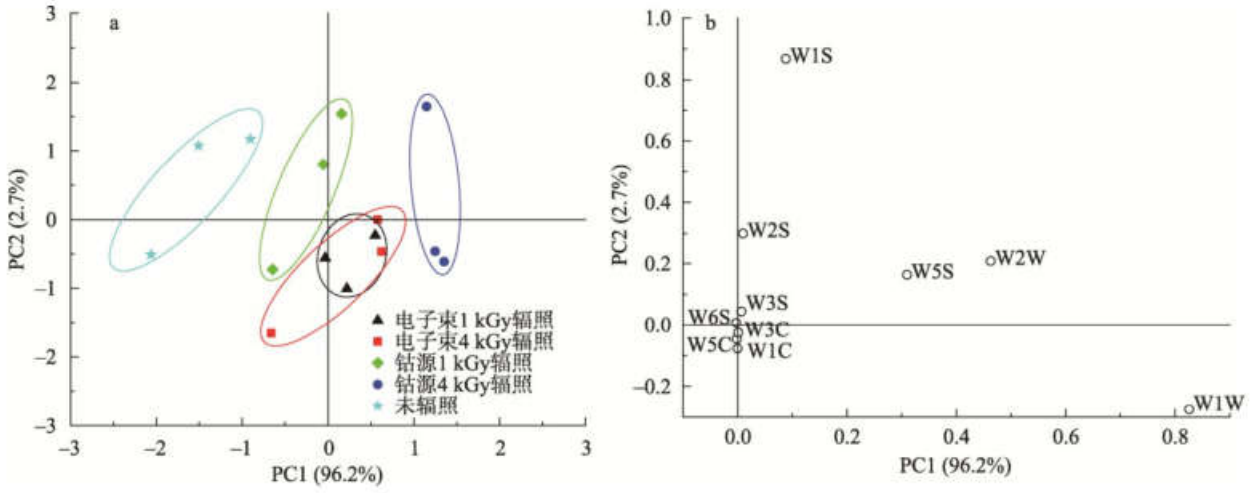


图 5 不同辐照处理核桃特征气味电子鼻响应值的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of electronic nose response value for walnut characteristic flavors with different irradiated

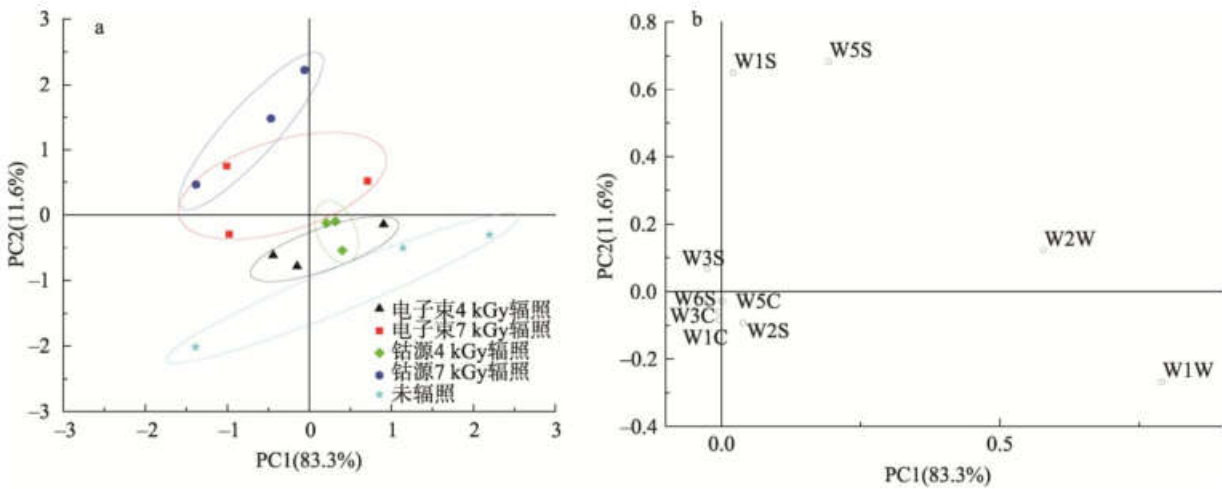


图 6 不同辐照处理可可粉特征气味电子鼻响应值的主成分分析

Fig.6 Principal component analysis of electronic nose response value for cocoa powder characteristic flavors with different irradiated

3 结 论

本研究选取红枣、核桃和可可粉为原料,对原料进行电子束和⁶⁰Co的 γ -射线辐照处理,应用电子鼻技术检测不同剂量辐照处理农产品的特征气味。结果显示特征气味响应值的变化主要集中于W5S、W1S、W1W、W2S、W2W这5个传感器。相同辐照剂量下,采用⁶⁰Co的 γ -射线辐照相对于电子束辐照其响应值变化更为明显,特征气味响应值最高的硫化物对辐照响应最为敏感是核桃,其次为红枣,可可粉不太敏感;不同辐照剂量下,采用电子束辐照处理的红枣,传感器W5S、W1S、W1W、W2S、W2W的响应值无显著差异($P>0.05$),而用⁶⁰Co γ -射线辐照,除了W2S以外,其他传感器的响应值都存在显著性差异。不同辐照剂量处理的核桃,除了W2S以外,其余传感器的响应值与红枣结果一致,说明一定辐照剂量范围内,辐照方式对红枣和核桃影响比较大。而在相同辐照剂量下,采用电子束辐照处理与⁶⁰Co γ -射线辐照的可可粉,除了W2S和W5S以外,其他传感器的响应值都无明显差异($P>0.05$),说明辐照方式对可可粉没有明显差异,而辐照剂量对可可粉影响较大。采用PCA分析能够有效识别出辐照后的样品特征气味产生变化,通过PCA分析图谱可以判断出3种产品辐照后的特征气味变化趋势。辐照是农产品杀虫、灭菌较为常用保鲜加工技术之一,在实际生产应用中,比较辐照后农产品特征气味变化是选择其最佳辐照方式与辐照剂量的重要依据。本研究采用电子鼻检测技术对辐照后样品进行特征气味传感器响应值和PCA分析,结果表明,为了保证产品的初始风味,红枣和核桃以控制虫害为目的时,可以采用电子束或⁶⁰Co γ -射线辐照,剂量不超过1kGy,而以杀菌为目的时,建议采用电子束辐照,剂量不超过4kGy;可可粉采用电子束和⁶⁰Co γ -射线辐照均可,剂量最好不要超过7kGy。

参考文献

- [1] 张愨,刘倩.国内外果蔬保鲜技术及其发展趋势[J].食品与生物技术学报,2014,33(8):785-792.
ZHANG M, LIU Q. Study on present situation and development trends of fruit & vegetable preservation in the world [J]. J Food Sci Biotechnol, 2014, 33(8): 785-792.
- [2] 程瑜,张瑞峰,杨菲,等.植物检疫辐照处理的研究进展[J].山西农业科学,2013,41(2):197-200.
CHENG Y, ZHANG RF, YANG F, et al. Study advance of irradiation treatment in plant quarantine [J]. J Shanxi Agric Sci, 2013, 41(2): 197-200.
- [3] 徐浪,王林聪,焦懿,等.辐照处理在农产品加工中的应用研究进展[J].安徽农业科学,2020,48(7):14-19.
XU L, WANG LC, JIAO Y, et al. Research progress of irradiation treatment in agro-product processing [J]. J Anhui Agric Sci, 2020, 48(7): 14-19.
- [4] 张军凯,包青平,孙志锋,等.食品加工新型杀菌技术研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8(8):3099-3103.
ZHANG JK, BAO QP, SUN ZF, et al. Research progress on new sterilization technology in food processing [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(8): 3099-3103.
- [5] 李斌,杨秦,肖洪,等.辐照对食品品质的影响及辐照食品的研究进展[J].粮食与油脂,2019,32(4):4-6.
LI B, YANG Q, XIAO H, et al. Research progress on the effects of irradiation on food quality and irradiated food [J]. J Cere Oil, 2019, 32(4): 4-6.
- [6] 石彬,李咏富,龙明秀,等.辐照处理对薏仁米中脂肪酸的影响[J].食品安全质量检测学报,2020,11(21):197-203.
SHI B, LI YF, LONG MX, et al. Effect of irradiation on fatty acids in coix seed [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(21): 197-203.
- [7] 代守鑫.不同剂量电子束辐照处理对甜樱桃的保鲜效果[J].食品与发酵工业,2019,45(20):232-236.
DAI SX. Effects of different electron beam irradiation doses on sweet cherry preservation [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(20): 232-236.
- [8] International Atomic Energy Agency. Nuclear technology review [M]. Vienna: Vienna International Centre, 2008.
- [9] 胡桂仙,王俊,海铮,等.不同储藏时间柑橘电子鼻检测研究[J].浙江农业学报,2006,(6):458-461.
HU GX, WANG J, HAI Z, et al. Electronic nose monitoring the oranges stored for different times [J]. Zhejiang Acta Agric, 2006, (6): 458-461.
- [10] 哈益明.控制辐照食品安全的HACCP质量管理体系[J].核农学报,2004,(1):22-25.
HA YM. HACCP system for quality control of food irradiation [J]. J Nucl Agric Sci, 2004, (1): 22-25.
- [11] 李官丽,聂辉,苏可珍,等.基于感官评价和电子鼻分析不同蒸煮时间荸荠挥发性风味物质[J].食品工业科技,2020,41(15):1-7,14.
LI GL, NIE H, SU KZ, et al. Analysis of volatile flavor substances of Chinese water chestnut in different steaming and boiling time based on sensory evaluation and e-nose [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(15): 1-7, 14.
- [12] 郑秀艳,黄道梅,孟繁博,等.基于电子鼻技术的蓝莓果实品质变化研究[J].食品安全质量检测学报,2016,7(9):3642-3649.
ZHENG XY, HUANG DM, MENG FB, et al. Quality changes analysis of blueberry fruits based on the electronic nose technology [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(9): 3642-3649.
- [13] 钭晓艳,王伟琼,熊光权.模糊数学评价和主成分分析电子束辐照处理后的鲈鱼品质[J].食品科学,2017,38(15):38-42.
ZU XY, WANG WQ, XIONG GQ. Fuzzy mathematic evaluation and principal component analysis for quality evaluation of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) irradiated by electron beam [J]. Food Sci, 2017, 38(15): 38-42.
- [14] 王俊,崔绍庆,陈新伟,等.电子鼻传感技术与应用研究进展[J].农业机械学报,2013,44(11):160-167,179.
WANG J, CUI SQ, CHEN XW, et al. Advanced technology and new application in electronic nose [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2013, 44(11): 160-167, 179.
- [15] 白娟,张瑶,汪雪瑞,等.基于电子舌和电子鼻的鲜肉粉风味分析[J].食品与发酵工业,2019,45(3):270-274.
BAI J, ZHANG Y, WANG XR, et al. Flavor analysis of fermented meat rice based on e-tongue and e-nose [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(3): 270-274.

- [16] JIA WS, LIANG G, WANG YL, *et al.* Electronic noses as a powerful tool for assessing meat quality: A mini review [J]. *Food Anal Method*, 2018, 11(10): 2916–2924.
- [17] SONG SQ, LI F, XU XD, *et al.* Aroma patterns characterization of braised pork obtained from a novel ingredient by sensory-guided analysis and gas-chromatography-olfactometry [J]. *Foods*, 2019, 8(3): 87–105.
- [18] PINHEIRO C, SCHAFFER T, CRESPO JG. Direct integration of pervaporation as a sample preparation method for a dedicated “electronic nose” [J]. *Anal Chem*, 2005, 77: 4927–4935.
- [19] 周元, 傅虹飞, 胡亚云. 基于电子鼻和 GC-MS 的酶解猕猴桃汁香气成分动态解析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 101–109.
ZHOU Y, FU HF, HU YY. Evolution analysis of enzymatically released volatiles from kiwifruit juices using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry analysis [J]. *J North A F Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 49(3): 101–109.
- [20] 何余勤, 胡荣锁, 张海德, 等. 基于电子鼻技术检测不同焙烤程度咖啡的特征性香气[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 247–255.
HE YQ, HU RS, ZHANG HD, *et al.* Characteristic aroma detection of coffee at different roasting degree based on electronic nose [J]. *Trans Chin Soci Agric Eng*, 2015, 31(18): 247–255.
- [21] 张文涛, 徐华, 蒋林惠, 等. 核桃仁氧化酸败及其延缓措施研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(3): 272–276.
ZHANG WT, XU H, JIANG LH, *et al.* Research progress in oxidative rancidity of walnut and delay measures [J]. *Food Sci*, 2012, 33(3): 272–276.
- [22] ARNOLD NO. Small reactive carbonyl compounds as tissue lipid oxidation products; and the mechanisms of their formation thereby [J]. *Chem Phys Lipid*, 2012, 165(7): 777–786.
- [23] MEDINA-MEZA IG, BARNABA C, BARBOSA-CANOVAS GV. Effects of high pressure processing on lipid oxidation: A review [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2014, 22(4): 1–10.
- [24] MEXIS SF, KONTOMINAS MG. Effect of irradiation on the physicochemical and sensory properties of cashew nuts (*Anacardium occidentale* L.) [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2009, 42: 1501–1507.
- [25] 吴庆, 孔秋莲, 戚文元, 等. γ 射线和电子束辐照对意式风干火腿色泽和脂质氧化的影响[J]. 上海农业学报, 2013, 29(2): 38–42.
WU Q, KONG QL, QI WY, *et al.* Effects of γ -ray/electron beam irradiation and lipid oxidation of prosciutto on color [J]. *Acta Shanghai Agric*, 2013, 29(2): 38–42.
- [26] 汪昌保, 赵永富, 王志东, 等. 电子束和 γ 射线辐照对猪油脂肪氧化的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(10): 1924–1930.
WANG CB, ZHAO YF, WANG ZD, *et al.* Comparative effects of electron beam and gamma ray irradiation on lipid oxidation of lard [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2015, 29(10): 1924–1930.
- [27] MIGUEL P, LAURA EG. 21st century technique for food control: Electronic noses [J]. *Northern Fruit*, 2015, (6): 11–12.
- [28] ZHAO ZZ, TIAN FC, LIAO HL, *et al.* A novel spectrum analysis technique for odor sensing in optical electronic noses [J]. *Sensor Actuat B Chem*, 2016, 222: 769–779.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



岳玲, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品保鲜加工和辐照技术应用。
E-mail: yueling312@sina.com



孔秋莲, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品保鲜加工。
E-mail: sunny0123@vip.163.com