

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80694

基于电子鼻和电子舌的电子束辐照对浓香型白酒的催陈效果

郑琦^{1,2} 田文慧^{1,2} 岳玲^{1,2} 颜伟强^{1,2} 陈志军^{1,2} 张艳艳³ 孔秋莲^{1,2}

(1. 上海市农业科学院作物育种栽培研究所, 上海 201106; 2. 上海束能辐照技术有限公司, 上海 201401; 3. 上海商学院, 上海 200235)

摘要: [目的] 明确电子束辐照对浓香型白酒的催陈效果。[方法] 通过电子鼻和电子舌技术研究 0~8 kGy 电子束辐照对浓香型白酒新酒气味和滋味的影响, 并以 1~3 年陈酒为对照, 分析最优辐照剂量处理后白酒气味和滋味的变化。[结果] 不同剂量电子束辐照后浓香型白酒新酒在电子鼻和电子舌检测的主成分分析 (PCA) 均能很好地分离, 表明辐照后样品气味和滋味有较大差异, 2 kGy 电子束辐照为浓香型白酒新酒的最优辐照剂量。贮藏过程中辐照白酒的气味和滋味逐渐向陈酒靠近, 贮藏 75 d 时电子舌 PCA 分布辐照白酒与 3 年陈酒重叠, 表明其滋味与 3 年陈酒相似。[结论] 电子束辐照对浓香型白酒具有催陈效果。

关键词: 浓香型白酒; 电子束辐照; 电子鼻; 电子舌; 陈化

Aging acceleration effect of electron beam irradiation on Luzhou-flavor Baijiu using electronic nose and electronic tongue

ZHENG Qi^{1,2} TIAN Wenhui^{1,2} YUE Ling^{1,2} YAN Weiqiang^{1,2} CHEN Zhijun^{1,2}
ZHANG Yanyan³ KONG Qiulian^{1,2}

(1. Crop Breeding & Cultivation Research Institute, Shanghai Academy of Agriculture Sciences, Shanghai 201106, China; 2. Shanghai Shuneng Irradiation Technology Co., Ltd., Shanghai 201401, China; 3. Shanghai Business School, Shanghai 200235, China)

Abstract: [Objective] To clarify the aging acceleration effect of electron beam irradiation on Luzhou-flavor Baijiu. [Methods] The effects of 0~8 kGy electron beam irradiation on the aroma and taste of newly produced Luzhou-flavor Baijiu were studied using electronic nose and electronic tongue technologies. Aged Baijiu (1~3 years) served as a control to analyze the changes in aroma and taste characteristics after treatment with the optimal irradiation dose. [Results] Principal component analysis (PCA) of the electronic nose and electronic tongue revealed clear separation of newly produced Luzhou-flavor Baijiu after irradiation with various doses of electron beams, indicating significant differences in aroma and taste profiles. A dose of 2 kGy was identified as the optimal irradiation dose for new Luzhou-flavor Baijiu. During storage, the aroma and taste profiles of the irradiated Baijiu gradually approached those of aged Baijiu. After 75 days of storage, the PCA distribution of the electronic tongue showed overlap between the irradiated Baijiu and the 3-year-old aged Baijiu, indicating similar taste profiles. [Conclusion] Electron beam irradiation exhibits an aging acceleration effect on Luzhou-flavor Baijiu.

Keywords: Luzhou-flavor Baijiu; electron beam irradiation; electronic nose; electronic tongue; aging

基金项目: 上海市农业科技创新项目 (编号: 沪农科 T2023322); 上海市农产品保鲜加工专业技术服务平台 (编号: 21DZ2292200); 上海农产品保鲜加工工程技术研究中心 (编号: 19DZ2251600)

通信作者: 孔秋莲 (1971—), 女, 上海市农业科学院研究员, 博士。E-mail: qjuliank@aliyun.com

收稿日期: 2024-07-19 改回日期: 2025-02-13

引用格式: 郑琦, 田文慧, 岳玲, 等. 基于电子鼻和电子舌的电子束辐照对浓香型白酒的催陈效果[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 36-41.

Citation: ZHENG Qi, TIAN Wenhui, YUE Ling, et al. Aging acceleration effect of electron beam irradiation on Luzhou-flavor Baijiu using electronic nose and electronic tongue[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 36-41.

中国白酒历史悠久,可追溯至西汉时期,是世界上六大蒸馏酒之一^[1-2]。根据风味特征,中国白酒可分为浓香型、酱香型、清香型、米香型等12种香型,其中浓香型白酒销售额占白酒行业的50%以上^[3]。白酒的酿造是以谷物为原料,通过固态发酵而成。与其他蒸馏酒相比,其传统生产工艺最为复杂,包括原料研磨、酒曲制备、发酵、蒸馏、陈化和勾兑6个主要步骤^[4]。陈化是白酒酿造的重要步骤,陈化过程中,白酒中的醇、醛、酸和酯通过化学反应达到平衡,使酒体变得芳香纯正,回味悠长^[5]。通常来说,为确保白酒陈化质量,国家优级白酒贮藏期为3年,优质酒为1年,普通酒至少3~5个月,但过长的贮藏时间会增加白酒的生产成本。

食品辐照技术是一种绿色、环保、安全的物理冷杀菌技术,可以延长食品的货架期,保障食品安全^[6-9]。辐照技术加速白酒陈化的原理是通过辐解水分子产生的自由基加速白酒中的氧化还原反应,从而缩短白酒陈化时间^[10-11]。Jia等^[1]研究了钴源辐照对凤香型白酒的催陈效果,发现辐照可以明显缩短白酒的陈化时间;张苗苗等^[12]利用500~1500 Gy电子束辐照对1~8年浓香型白酒进行辐照催陈,白酒贮藏时间越长,达到最佳催陈效果所需的辐照剂量越低;郑琦等^[13]比较了未辐照和2 kGy电子束辐照浓香型白酒基酒中主要呈香物质的差异,并以1年陈酒作为对照,辐照白酒中7种主要呈香物质含量与1年陈酒的较为相似。然而,大部分白酒辐照催陈研究都侧重于白酒中的香味物质或乙醇-水分子间的氢键缔合作用,有关辐照白酒的感官研究较少。电子鼻可以模拟人体的嗅觉系统,检测食物中的气味和挥发性化合物,电子舌则模拟人体的味觉系统,检测和识别食品中的味道和成分,电子鼻和电子舌技术是通过食品行业认证的可以快速、非破坏性和低成本的检测技术,成为传统实验室技术的替代品^[14-16]。研究拟以浓香型白酒新酿基酒为研究对象,以1, 2, 3年陈酒为对照,对浓香型白酒基酒进行0~8 kGy电子束辐照,利用电子鼻和电子舌分析不同贮藏时间白酒新酒和陈酒的差异,分析电子束辐照对浓香型白酒基酒的催陈效果,为浓香型白酒的辐照催陈提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 试验材料

浓香型白酒新酒与1, 2, 3年陈酒样品采集于上海神仙酒厂,将采集的白酒样品放入干净的白酒瓶中,转移至实验室进行分装,每个样品瓶装10 mL。

1.1.2 试剂与设备

氯化钾、酒石酸、氢氧化钾、乙醇、盐酸等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

电子直线加速器:IS1020型,10 MeV、20 kW,同方威视技术股份有限公司;

电子鼻: PEN3型,德国AIRSENSE公司;

电子舌: SA402B型,日本Insent公司;

电子天平: BSA3202S-CW型,德国Sartorius公司。

1.2 方法

1.2.1 电子束辐照 分装好的白酒分别设定0, 2, 4, 6, 8 kGy 5个剂量,每个剂量3个生物学重复。白酒样品单层摆放于不锈钢托盘中,用透明胶带固定样品瓶防止移动,进行单面电子束辐照。使用重铬酸钾(银)液体化学剂量计进行检测,剂量计校准参照JJG 1028—1991和GB/T 16640—2008。辐照后新酒以及对照样品存放于25 °C,每15 d检测一次相关指标,30 d时确定最优辐照剂量。

1.2.2 电子鼻分析 取1 mL样品于15 mL顶空进样瓶中,封口,采用顶空吸气法进行检测分析,每个样品重复3次。检测条件:样品测定间隔1 s,清洗时间120 s,归零时间10 s,样品准备时间5 s,分析采样时间90 s。电子鼻各传感器性能见表1。

表1 电子鼻传感器性能

Table 1 Electronic nose sensor performance

| 传感器名称 | 传感器敏感性能描述 |
|-------|---------------|
| W1C | 对苯等芳香类成分敏感 |
| W5S | 灵敏度大,对氮氧化物很灵敏 |
| W3C | 氨水,对芳香成分灵敏 |
| W6S | 主要对氢气有选择性 |
| W5C | 对烷烃类芳香成分敏感 |
| W1S | 对甲烷等短链烷烃灵敏 |
| W1W | 对无机硫化物灵敏 |
| W2S | 对醇醚醛酮类灵敏 |
| W2W | 芳香成分,对有机硫化物灵敏 |
| W3S | 对长链烷烃类成分灵敏 |

1.2.3 电子舌分析 使用味觉分析系统对酒样进行测定,CA0、C00、CT0、AAE和AE1用于检测酸味、苦味、咸味、鲜味和涩味。将白酒样品稀释100倍,稀释酒样倒入电子舌专用杯中,每杯约30 mL。按仪器要求放入参比溶液(30 mmol氯化钾,0.3 mmol酒石酸)、正极清洗液(10 mmol氢氧化钾,100 mmol氯化钾,30%体积乙醇)和负极清洗液(100 mmol盐酸,30%体积乙醇)。检测条件:清洗液1(90 s),清洗液2(120 s),清洗液3(120 s),调理液(30 s),样品液(30 s),清洗液4(3 s),清洗液5(3 s),CPA溶液(30 s),每个处理剂量重复4次,其中第1次为3个生物学重复混合样品,选取后3次独立生物学重复样品数据进行分析。

1.3 数据处理

采用Origin pro软件进行雷达图分析,欧易云在线分析工具(<https://cloud.oebiotech.com>)进行主成分分析

(PCA)。

2 结果与分析

2.1 辐照剂量对白酒气味和滋味的影响

PCA 是一种无监督分析统计方法,在分析图上显示最重要的 2 个指标形成二维图,可以最大程度体现不同样品之间的差异^[17]。由图 1 可知,贮藏 15,30 d 时 PC1 对应的第 1 主成分贡献率分别为 88.04%,78.42%,PC2 对应的第 2 主成分贡献率分别为 8.42%,20.77%,2 个主成分累计方差贡献率均 >95%,说明 PC1 和 PC2 包含了 PCA 转换中绝大部分的贡献率,可反映样品嗅觉的整体信息。

由图 1 可知,贮藏 15 d 时不同白酒样品在 PCA 图上无重叠,能很好地分离,表明其气味存在差异,不同辐照剂量对白酒气味影响显著,尤其是 6 kGy 辐照后,与未辐照白酒距离最远。此外,经 2,4,8 kGy 电子束辐照后,距离与 1,2,3 年陈酒更近,表明其气味与 1,2,3 年陈酒更为相似。贮藏 30 d 时,6,8 kGy 辐照后白酒样品与其他白酒样品无重叠,能很好地区分开,未辐照白酒与 1,2 年陈酒气味较为相似,2 kGy 辐照白酒与 1,3 年陈酒气味较为相似,4 kGy 辐照白酒与 1 年和 2 kGy 辐照白酒距离最近。

由图 2 可知,贮藏 15,30 d 时,电子舌 PCA 分析的 PC1

和 PC2 总贡献率均 >89%,表明 PC1 和 PC2 覆盖了样本的主要滋味信息特征。与气味检测结果相似,贮藏 15 d 时各处理样品在 PCA 图上无重叠,未辐照白酒与 3 年陈酒在滋味上更为相似。贮藏 30 d 时,2,4 kGy 辐照白酒距离最近,表明其滋味较相似,与电子鼻分析结果一致。相较于其他处理,2 kGy 辐照白酒与 3 年陈酒距离较近。综上,确定 2 kGy 为浓香型白酒新酒的最优辐照剂量。

2.2 贮藏过程中白酒气味的变化

由图 3 可知,贮藏 45 d 时,5 个白酒样品不能较好地地区分,其中未辐照白酒与 3 年陈酒样品重叠,2 kGy 辐照白酒与 1 年陈酒重叠,说明气味上该两组样品差异较小。由电子鼻雷达图可知,未辐照白酒在多个探头上的响应值更接近于 3 年陈酒,2 kGy 辐照白酒更接近于 1 年陈酒,与 PCA 结果一致。

由图 4 可知,贮藏 60 d 时,5 个白酒样品仍不能较好地地区分,但样品信息与贮藏 45 d 的相反,未辐照白酒样品与 1 年陈酒重叠,2 kGy 辐照白酒与 3 年陈酒重叠。由雷达图可知,所有样品在 W6S 探头上出现重合,在 W3S、W1C、W1W、W1S 探头上 2 kGy 处理的白酒与 3 年陈酒有较大重合,在 W3C 探头上未辐照白酒与 1 年陈酒有较大的重合,与 PCA 结果一致。

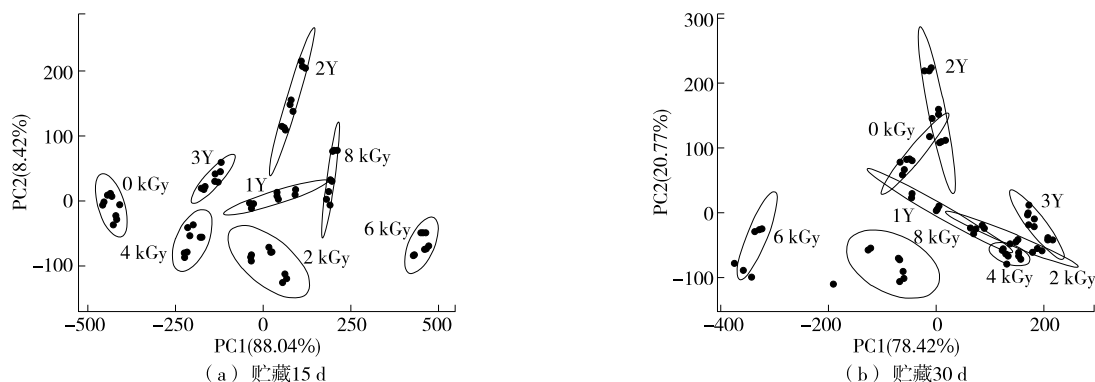


图 1 不同剂量电子束辐照后浓香型白酒基酒电子鼻 PCA 分析

Figure 1 PCA of electronic nose for Luzhou-flavor Baijiu after different doses of electron beam irradiation

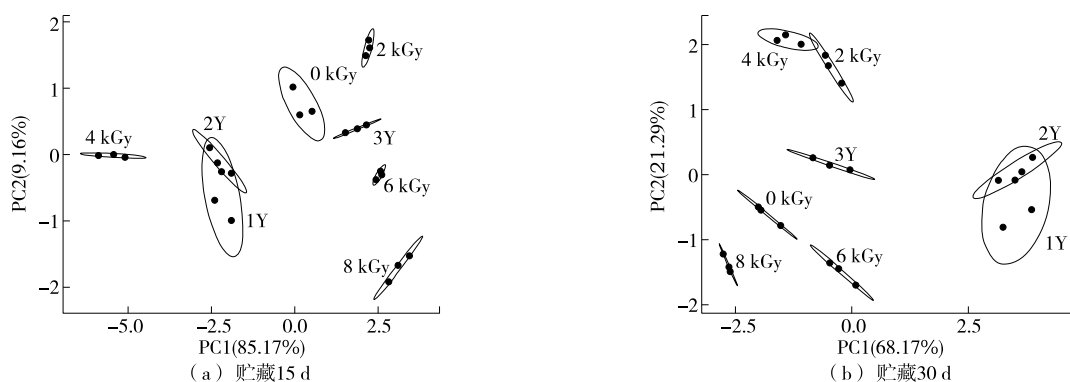


图 2 不同剂量电子束辐照后浓香型白酒基酒电子舌 PCA 分析

Figure 2 PCA of electronic tongue for Luzhou-flavor Baijiu after different doses of electron beam irradiation

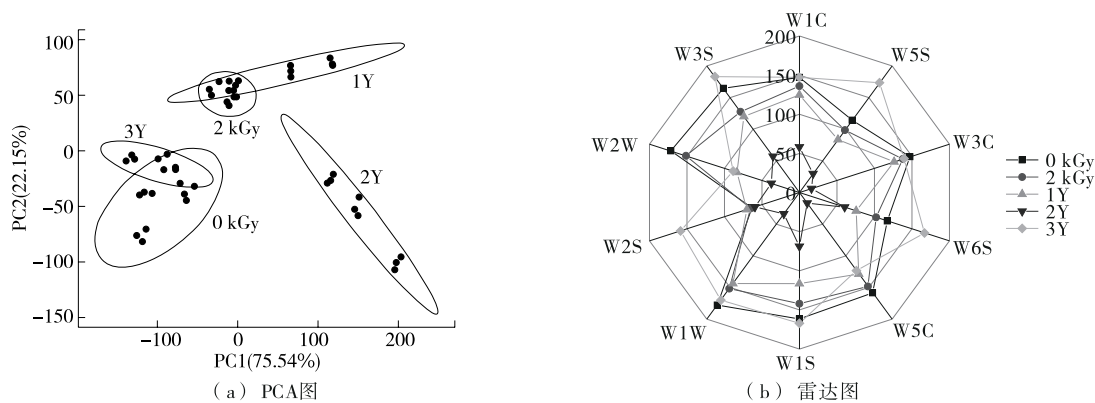


图3 贮藏45 d白酒样品电子鼻PCA分析与雷达图

Figure 3 PCA and radar chart of electronic nose for Baijiu sample after 45 days of storage

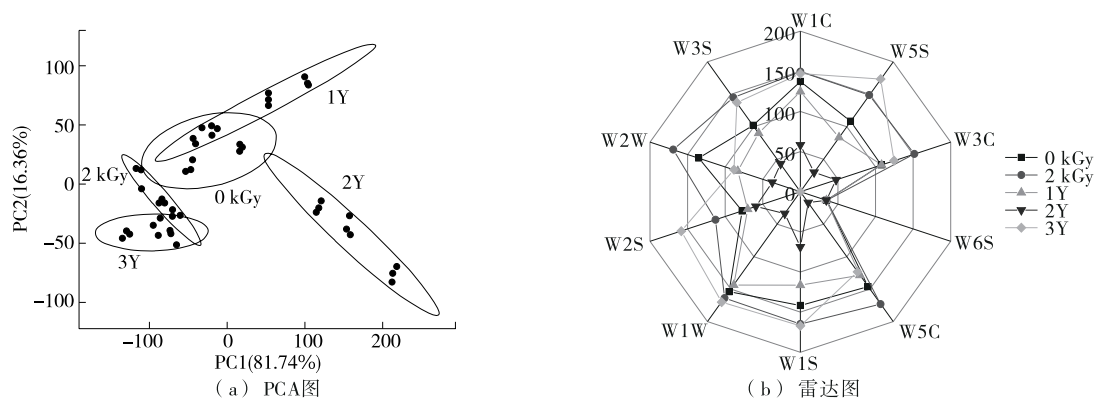


图4 贮藏60 d白酒样品电子鼻PCA分析与雷达图

Figure 4 PCA and radar chart of electronic nose for Baijiu sample after 60 days of storage

由图5可知,贮藏75 d时,电子鼻对5个白酒样品有较好的区分,相较于未辐照白酒,2 kGy辐照白酒与1,3年陈酒距离较近。W5C、W2W、W2S、W5S、W3C、W6S探头的响应值上2 kGy辐照白酒与3年陈酒虽存在差异,但其响应值较未辐照白酒更接近陈酒样品,其他探头与3年陈酒几乎重叠,说明辐照白酒气味与陈酒相近,但在烷烃

类、有机硫化物、醇醚醛酮类、氮氧化合物等物质上存在差异。

2.3 贮藏过程中白酒滋味的变化

由图6可知,贮藏45 d时,电子舌PCA第一主成分贡献率为74.8%,第二主成分方差贡献率为16.7%,累计方差贡献率为91.5%,较好地提取了样品信息。相较于贮藏

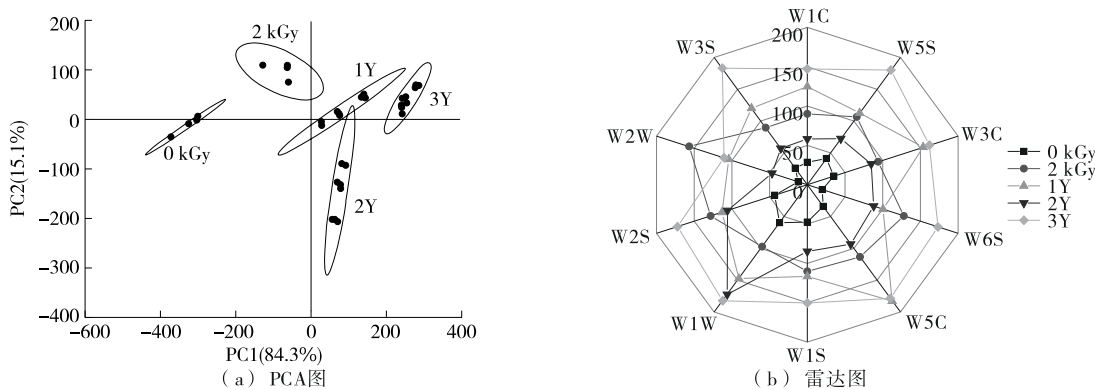


图5 贮藏75 d白酒样品电子鼻PCA分析与雷达图

Figure 5 PCA and radar chart of electronic nose for Baijiu sample after 75 days of storage

15, 30 d, 未辐照白酒、2 kGy 辐照白酒与 1, 2 年陈酒较近, 说明其滋味逐渐与 1, 2 年陈酒相似。但各处理在酸味和涩味探头上的响应值有明显差异。

由图 7 可知, 贮藏 60 d 时, 电子舌 PCA 分析未辐照和 2 kGy 辐照白酒与 3 年陈酒距离相近, 相较于未辐照白酒, 2 kGy 辐照与 3 年陈酒距离更近。雷达图表明白酒样品在鲜味和咸味上响应值差异较大, 在苦味上与 3 年陈酒样品基本重合。

由图 8 可知, 贮藏 75 d 时, 2 kGy 辐照白酒与 3 年陈酒重叠, 说明在滋味上两个样品非常相似。未辐照白酒与 1, 2, 3 年陈酒仍相距较远。此外, 2 kGy 辐照白酒在苦味、酸味和鲜味上与 3 年陈酒重叠。

3 结论

浓香型白酒经 0~8 kGy 电子束辐照后, 电子鼻和电子舌分析表明不同白酒样品在气味和滋味上有较大差异,

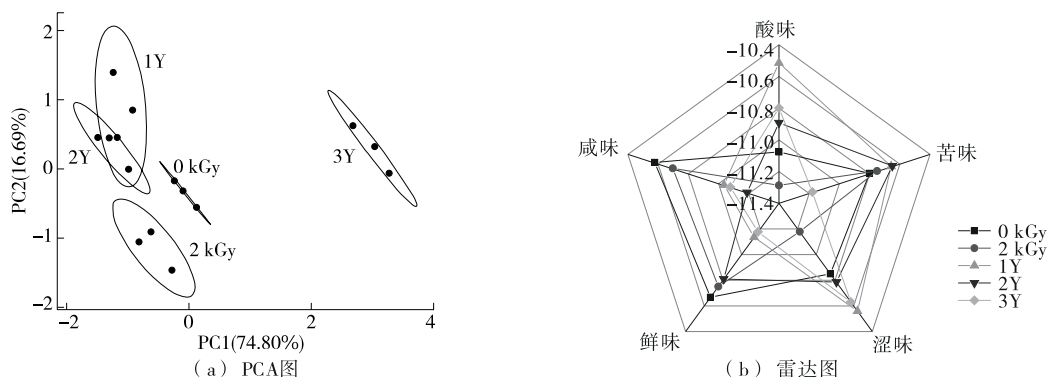


图 6 贮藏 45 d 白酒样品电子舌 PCA 分析与雷达图

Figure 6 PCA and radar chart of electronic tongue for Baijiu sample after 45 days of storage

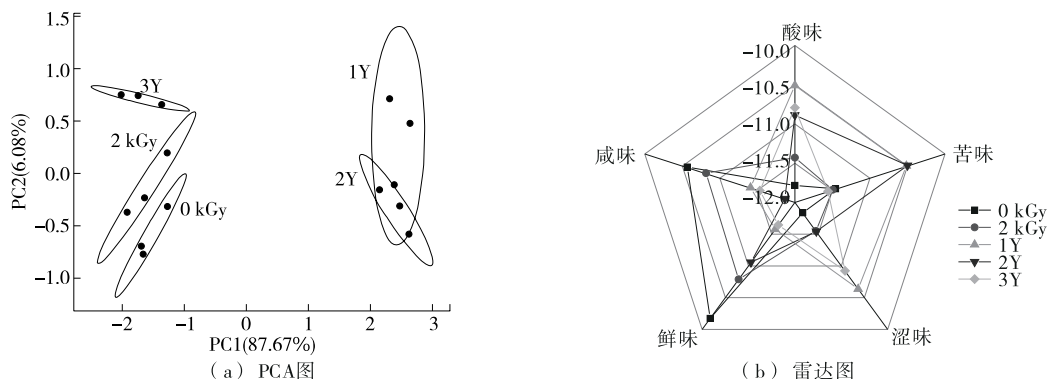


图 7 贮藏 60 d 白酒样品电子舌 PCA 分析与雷达图

Figure 7 PCA and radar chart of electronic tongue for Baijiu sample after 60 days of storage

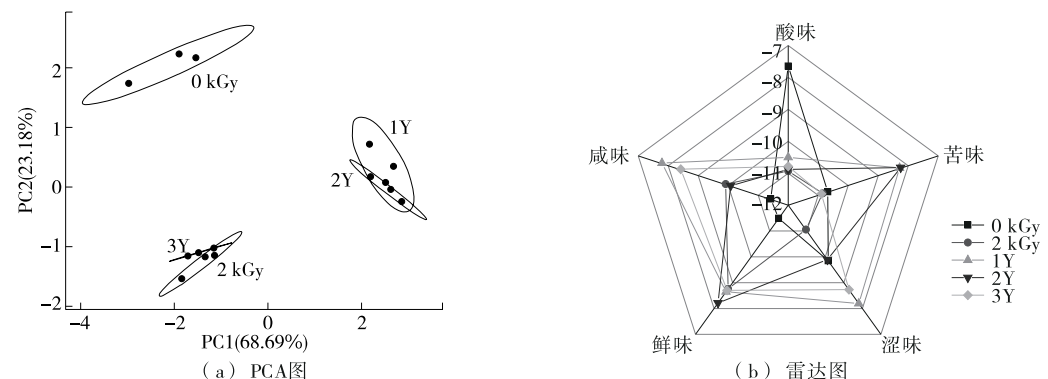


图 8 贮藏 75 d 白酒样品电子舌 PCA 分析与雷达图

Figure 8 PCA and radar chart of electronic tongue for Baijiu sample after 75 days of storage

贮藏30 d后,2 kGy电子束辐照后白酒基酒样品在气味和滋味上相对优于其他辐照剂量,确定2 kGy为浓香型白酒基酒的最佳辐照剂量。贮藏过程中,2 kGy辐照白酒电子鼻和电子舌PCA显示其在气味和滋味上逐渐靠近陈酒样品,贮藏75 d时滋味与3年陈酒重叠,而未辐照白酒与1,2,3年陈酒仍存在较大差异,从电子感官研究上证明了电子束辐照对浓香型白酒具有催陈效果。后续可进一步通过气相色谱—质谱等手段研究白酒中风味化合物的变化,并邀请有资质的品酒师对不同辐照处理白酒进行感官评价,从理论效果和实际效果两个方面确定电子束辐照对浓香型白酒的影响。

参考文献

- [1] JIA W, LI Y L, DU A, et al. Foodomics analysis of natural aging and gamma irradiation maturation in Chinese distilled Baijiu by UPLC-Orbitrap-MS/MS[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126308.
- [2] LIU H L, SUN B G. Effect of fermentation processing on the flavor of Baijiu[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(22): 5 425-5 432.
- [3] DU J, LI Y, XU J, et al. Characterization of key odorants in Langyatai Baijiu with Jian flavour by sensory-directed analysis [J]. *Food Chemistry*, 2021, 352: 129363.
- [4] ZHENG X W, HAN B Z. Baijiu(白酒), Chinese liquor: history, classification and manufacture[J]. *Journal of Ethnic Foods*, 2016, 3(1): 19-25.
- [5] FANG C, DU H, JIA W, et al. Compositional differences and similarities between typical Chinese Baijiu and western liquor as revealed by mass spectrometry-based metabolomics[J]. *Metabolites*, 2018, 9(1): 2.
- [6] ZHENG Q, WANG H H, YUE L, et al. Effect of irradiation on volatile compound profiles and lipid oxidation in chicken powder seasoning[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2022, 191: 109851.
- [7] GAUTAM R K, VENUGOPAL V. Electron beam irradiation to control biohazards in seafood[J]. *Food Control*, 2021, 130: 108320.
- [8] WEI Q, MEI J, XIE J. Application of electron beam irradiation as a non-thermal technology in seafood preservation[J]. *LWT*, 2022, 169: 113994.
- [9] BISHT B, BHATNAGAR P, GURURANI P, et al. Food irradiation: effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables - a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 372-385.
- [10] HE J, CHEN Q, JIA X, et al. The effects of gamma irradiation and natural aging on the composition of Nongxiangxing Baijiu [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46 (12): e17146.
- [11] ZHENG Q, TIAN W H, YUE L, et al. Effect of gamma irradiation on sensory and aroma compounds of soaked bayberry Jiu[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2024, 224: 111990.
- [12] 张苗苗, 陆栋, 曹国珍, 等. 电子束辐照浓香型白酒催陈效果的研究[J]. *原子核物理评论*, 2014, 31(2): 218-223.
- ZHANG M M, LU D, CAO G Z, et al. Improvement of aging effect on Luzhou-flavor liquor by electron beam-irradiated[J]. *Nuclear Physics Review*, 2014, 31(2): 218-223.
- [13] 郑琦, 颜伟强, 孔秋莲, 等. 电子束辐照对浓香型白酒主要呈香物质的影响研究[J]. *农产品加工*, 2022(23): 1-4, 10.
- ZHENG Q, YAN W Q, KONG Q L, et al. Effect of electron beam irradiation on aroma compounds of strong-flavor Baijiu [J]. *Farm Products Processing*, 2022(23): 1-4, 10.
- [14] MAHANTI N K, SHIVASHANKAR S, CHHETRI K B, et al. Enhancing food authentication through E-nose and E-tongue technologies: current trends and future directions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 150: 104574.
- [15] TITOVA T, NACHEV V. "Electronic tongue" in the food industry[J]. *Food Science and Applied Biotechnology*, 2020, 3(1): 71.
- [16] MUNEKATA P E S, FINARDI S, DE SOUZA C K, et al. Applications of electronic nose, electronic eye and electronic tongue in quality, safety and shelf life of meat and meat products: a review[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(2): 672.
- [17] 乔羽, 王艳艳, 曾红艳, 等. 基于电子鼻和电子舌技术对山西老陈醋和老陈醋的风味检测[J]. *食品与发酵科技*, 2024, 60 (2): 115-122.
- QIAO Y, WANG Y Y, ZENG H Y, et al. Flavor detection of shanxi aged vinegar and aged vinegar based on electronic nose and electronic tongue technology[J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2024, 60(2): 115-122.