

基于 HPLC 指纹图谱与电子鼻技术的海珠肉不同加工工艺品质评价

周改莲^{1,2}, 潘红梅^{1#}, 蔡泽炼¹, 李 龙⁴, 罗雨浙⁴, 邓家刚^{2,3*}, 侯小涛^{1,2,3*}

1. 广西中医药大学药学院, 广西 南宁 530200

2. 广西中药药效研究重点实验室, 广西 南宁 530200

3. 广西中医药大学 中药资源循环利用广西高校工程研究中心, 广西 南宁 530200

4. 温州大学电气与工程学院, 浙江 温州 325035

摘要:目的 建立海珠肉 *Pteria fucata* 的 HPLC 指纹图谱及多指标成分含量测定方法, 结合化学计量学与电子鼻技术, 系统评价不同加工方式与品质状态对其主要化学成分及气味特征的影响, 并通过相关性分析揭示化学标志物与电子鼻响应之间的关联, 从而多维度综合评价海珠肉的质量。方法 采用 HPLC 法建立海珠肉的化学指纹图谱, 并定量测定谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸及丙氨酸的含量。运用聚类分析 (cluster analysis, CA) 与主成分分析 (principal component analysis, PCA) 等化学计量学方法, 综合评价不同样品间的化学差异。利用电子鼻采集样品的嗅觉信息, 并通过 Pearson 相关性分析, 构建化学成分与气味响应之间的关联模型, 系统比较不同加工方式和品质状态样品的差异。结果 建立了海珠肉 HPLC 指纹图谱, 共指认出 4 个共有峰, 分别为牛磺酸、谷氨酸、甘氨酸与丙氨酸。其中, 1、9、11、12 号峰可用于区别鲜品微波 (XW) 和腐败品微波 (FW) 2 种不同加工工艺; 48 个不同加工工艺及品质状态海珠肉样品的化学指纹图谱相似度在 0.793~1.000, 所建立的指纹图谱方法专属性良好, 可区分不同品质海珠肉加工方式样品, 用于海珠肉质量控制与评价。CA 和 PCA 结果显示, 不同品质加工工艺海珠肉样品有一定差异。含量测定表明, 鲜品烘干 (XH) 工艺对多指标成分保留最优; 电子鼻检测能有效区分不同品质及各加工方式样品, 相关性分析揭示了谷氨酸与检测烷烃类及有机挥发物敏感的电子鼻传感器 (通道) 1、2、4 呈显著正相关 ($P<0.05$), 可作为与电子鼻响应信号关联的核心特征成分。结论 首次将 HPLC 指纹图谱、多指标含量测定与电子鼻技术联用, 成功建立了一套稳定、可靠的综合品质评价方法体系。该方法体系具有良好的重复性与区分能力, 能够从化学组成与挥发性气味 2 方面, 实现对海珠肉品质特别是其新鲜与腐败状态的有效鉴别与综合评价。“鲜品烘干”工艺能最大程度保留谷氨酸等特征氨基酸成分, 并维持良好的气味稳定性, 是兼顾成分保留与品质控制的较优加工方式。

关键词: 海珠肉; HPLC; 指纹图谱; 电子鼻; 化学计量学; 加工方式; 品质评价; 牛磺酸; 谷氨酸; 甘氨酸; 丙氨酸

中图分类号: R283.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2026)14-5442-17

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.14.007

Quality evaluation of *Pteria fucata* with different processing techniques based on HPLC fingerprint and electronic nose technology

ZHOU Gailian^{1,2}, PAN Hongmei¹, CAI Zelian¹, LI Long⁴, LUO Yuxi⁴, DENG Jiagang^{2,3}, HOU Xiaotao^{1,2,3}

1. School of Pharmacy, Guangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanning 530200, China

2. Guangxi Key Laboratory of Pharmacodynamics of Traditional Chinese Medicine, Nanning 530200, China

3. Guangxi University Engineering Research Center for Recycling Resources of Traditional Chinese Medicine, Guangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanning 530200, China

4. School of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China

Abstract: Objective To establish an HPLC fingerprint profile and multi-indicator component quantification method for *Pteria fucata*

收稿日期: 2026-04-02

基金项目: “尖峰”行动计划 (广西重大专项计划) 项目 (桂科 JF2503980037); 广西高峰学科中医学 (中药学) (桂教科研 [2026] 2 号); 广西中药药效研究重点实验室项目 (桂科计字 [2005] 6 号); 广西壮族自治区高校黄大年式教师团队 “中药学传承创新教师团队” (桂教教师[2023]31 号)

作者简介: 周改莲 (1981—), 女, 教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为中药质量标准与炮制机制研究。E-mail: zhglhw@126.com

#共同第一作者: 潘红梅 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药炮制与饮片质量标准研究。E-mail: 1841433119@qq.com

***通信作者:** 邓家刚 (1953—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为中医药理论与中药药效研究。E-mail: dengjg53@126.com

侯小涛 (1969—), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为中药药效物质基础及其质量控制。E-mail: xthou@126.com

(PF), and systematically evaluate the effects of different processing methods by combining chemometrics and electronic nose technology, and quality states on its main chemical components and odor characteristics. Additionally, correlation analysis was conducted to reveal the relationships between chemical markers and electronic nose responses, enabling a multidimensional comprehensive evaluation of PF quality. **Methods** HPLC was used to establish the chemical fingerprint profile of PF, and the contents of glutamic acid, glycine, taurine, and alanine were quantitatively determined. Chemometric methods, including cluster analysis (CA) and principal component analysis (PCA), were applied to evaluate chemical differences among different samples. An electronic nose was employed to capture olfactory information, and Pearson correlation analysis was used to construct a model linking chemical components with odor responses. Differences among samples processed by various methods and quality states were systematically compared. **Results** An HPLC fingerprint profile of PF was established, identifying four common peaks corresponding to taurine, glutamic acid, glycine, and alanine. Peaks 1, 9, 11, and 12 could distinguish between fresh PF microwave (XW) and spoiled PF microwave (FW) processing methods. The similarity of chemical fingerprints among 48 samples with different processing methods and quality states ranged from 0.793 to 1.000. The established fingerprint method demonstrated good specificity and could differentiate samples of varying quality and processing methods, providing a reliable tool for quality control and evaluation. CA and PCA results indicated certain differences among PF samples of varying quality and processing methods. Quantitative analysis showed that the fresh PF drying (XH) process best preserved multiple indicator components. Electronic nose detection effectively distinguished samples of different quality and processing methods. Correlation analysis revealed that glutamic acid was significantly positively correlated ($P < 0.05$) with electronic nose channels 1, 2, and 4, which are sensitive to alkanes and organic volatile compounds, indicating its potential as a core feature component linked to electronic nose responses. **Conclusion** This study is the first to combine HPLC fingerprinting, multi-indicator component quantification, and electronic nose technology to establish a stable and reliable comprehensive quality evaluation system for PF. The method exhibits good repeatability and discriminative ability, enabling effective assessment of PF quality in terms of chemical composition and volatile odor characteristics, particularly distinguishing fresh from spoiled states. The fresh PF drying (XH) process maximizes the retention of key amino acids such as glutamic acid while maintaining odor stability, making it a superior processing method balancing component preservation and quality control.

Key words: *Pteria fucata* (Dunker); HPLC; fingerprint; electronic nose; chemometrics; processing method; quality evaluation; taurine; glutamic acid; glycine; alanine

合浦珠母贝 *Pteria fucata* (Dunker), 亦称珍珠贝, 是我国海水珍珠养殖的主要贝类, 也是《中国药典》2025 年版所载珍珠的法定来源之一^[1]。海珠肉 (亦称珍珠贝肉), 为珍珠贝科珠母贝属动物合浦珠母贝 *P. fucata* (Dunker) 的软体部。作为传统的海洋中药, 已被收载于《广西海洋中药材标准》^[2]和《广西中药材标准第二册》^[3], 海珠肉性凉, 味甘、咸, 归肝肾经, 具有清热、明目、滋阴、安神、解毒的功效。现代研究证实, 其富含大量蛋白质及营养物质^[4], 具有较高的药用与保健价值。然而, 目前海珠肉大多仅作饲料使用^[5], 利用率较低, 造成大量的蛋白质资源浪费和污染, 也限制了其产业转化。海珠肉目前多以晒干或烘干为主, 缺乏统一的工艺规范与质量控制标准。市场存在以腐败品经加工后冒充鲜品产品的现象, 严重影响临床疗效与用药安全, 也制约了海洋中药的规范化与品牌化发展。当前研究虽已采用 HPLC 法测定海珠肉牛磺酸含量^[6]、利用 GC-MS 分析其挥发性风味变化^[7], 并对其烘干工艺进行初步优化^[8], 但多局限于单一工艺与少数指标, 缺乏对不同加工方式及原料新鲜度

的系统比较, 未能建立适用于快速鉴别鲜品与腐败品的质量评价方法。电子鼻技术可通过多元传感阵列实现复杂挥发性成分的快速检测, 在肉制品^[9]与水产品^[10]的新鲜度分级、产地鉴别中具备快速客观的优势, 能有效区分鲍鱼熟制前后气味轮廓^[11]、小龙虾新鲜度^[12]、阿胶不同炮制品^[13], 为海洋动物药的挥发性成分研究与智能质控提供了参考。

因此, 本研究通过 HPLC 与电子鼻技术相结合, 建立海珠肉 HPLC 指纹图谱以及氨基酸含量测定方法, 并结合电子鼻技术获取嗅觉信息, 多维度评价不同加工工艺与品质状态对海珠肉质量的影响, 推进海洋中药海珠肉的开发利用, 以期海珠肉的质量控制与加工工艺优化提供科学依据。

1 仪器与材料

1.1 仪器

CPA2P-F 型电子分析天平, 赛多利科学仪器(北京)有限公司; 岛津 LC-2030 Plus 型高效液相色谱仪 (Prominence-I 系列一体机液相), 日本岛津制作所; XM-P06H 型无极调功率超声波清洗机, 小美超声仪器(昆山)有限公司; Welch Ultimate LP-C₁₈ 色

谱柱(300 mm×4.6 mm, 5 μm), 月旭科技(上海)股份有限公司; H1650-W 型微量台式高速离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; DFY-500C 型摇摆式高速粉碎机, 温岭市林大机械有限公司; DGG-9626A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海齐欣科学仪器有限公司; G80F23CN3L-C2K (G2) 型微波炉, 广东格兰仕微波生活电器制造有限公司; 电子鼻测试仪(自制)。

1.2 试药与药材

甲醇、乙腈, 色谱级, 购自赛默飞世尔科技(中国)有限公司; 三水合乙酸钠(批号 20241118)、三乙胺(批号 20241225)、正己烷(批号 20241214)、冰醋酸(批号 20250103), 分析纯, 购自广东光华科技有限公司; 盐酸, 批号 2025040802, 购自成都市科隆化学品有限公司; 水为超纯水; 异硫氰酸苯酯, 批号 C17188020, 购自山东科源生化有限公司。

对照品谷氨酸(批号 140690-201604)、甘氨酸(批号 1440689-202308)、丙氨酸(批号 140680-202005), 购自中国食品药品检定研究院; 对照品牛磺酸, 批号 MUST-24071620, 购自曼思特有限公司; 各质量分数均≥99.0%。海珠肉药材购自广东湛江、广西防城港, 经广西中医药大学药学院黄勇教授鉴定, 海珠肉为珍珠贝科珠母贝属动物合浦珠母贝 *P. fucata* (Dunker) 的软体部。

2 方法与结果

2.1 样品加工方法

将采集的 8 批海珠肉, 每批分为 2 组, 每批覆盖新鲜与腐败(常温静置 48 h 腐败) 2 种品质状态, 每组分别采用晒干、烘干和微波干燥 3 种加工方式, 得到 6 组不同加工工艺品质的海珠肉样本, 分别为鲜品烘干(XH)、腐败品烘干(FH)、鲜品微波干燥(XW)、腐败品微波干燥(FW)、鲜品晒干(XS)、腐败品晒干(FS)。

2.1.1 烘干 取海珠肉, 去除杂质, 清洗, 沥干黏液水分, 置于 80 °C 烘箱中烘干。

2.1.2 微波干燥 取海珠肉, 去除杂质, 清洗, 沥干黏液水分, 置于微波炉内烘干。

2.1.3 晒干 取海珠肉, 去除杂质, 清洗, 沥干黏液水分, 置于阳光下晒干。

2.2 HPLC 指纹图谱建立

2.2.1 色谱条件 使用岛津 LC-2030 型高效液相色谱仪, Welch Ultimate LP-C₁₈ 色谱柱(300 mm×4.6 mm, 5 μm) 对各海珠肉样品进行分析, 流动相为乙

腈-0.1 mol/L 醋酸钠溶液(用醋酸调节 pH 值至 6.5)(7:93, A), 乙腈-水(4:1, B), 梯度洗脱: 0~10 min, 100% A; 10~16 min, 100%~85% A; 16~25 min, 85%~70% A; 25~28 min, 70%~40% A; 28~32 min, 40%~100% A; 柱温 40 °C; 进样量 10 μL; 体积流量 0.7 mL/min; 检测波长 254 nm。

2.2.2 对照品溶液的制备 取牛磺酸、丙氨酸、甘氨酸、谷氨酸对照品适量, 精密称定, 各加 0.1 mol/L 盐酸溶液制成每 1 mL 各含 1 mg 的储备溶液, 分别取适量储备溶液, 置于同一量瓶中, 定容, 即得 0.16 mg/mL 谷氨酸、0.16 mg/mL 甘氨酸、0.54 mg/mL 牛磺酸、0.54 mg/mL 丙氨酸混合对照品溶液。

2.2.3 供试品溶液的制备 取海珠肉粉末约 0.5 g, 精密称定, 置于具塞锥形瓶中, 精密加水 10 mL, 称定质量, 超声处理(功率 250 W、频率 100 kHz) 60 min, 放冷, 再称定质量, 用水补足减失的质量, 摇匀, 离心 10 min, 精密量取上清液 2 mL, 置于 5 mL 量瓶中, 加 0.1 mol/L 盐酸溶液至刻度, 摇匀, 即得供试品溶液。

2.2.4 衍生化 精密量取“2.2.2”项下对照品溶液、“2.2.3”项下供试品溶液各 200 μL, 分别加入 0.1 mol/L 异硫氰酸苯酯的乙腈溶液和 1 mol/L 三乙胺的乙腈溶液各 100 μL, 摇匀, 室温放置 1 h 后, 加正己烷 400 μL, 振摇, 放置 10 min, 取下层溶液 100 μL, 加水 1 mL, 摇匀, 即得衍生化后供试品溶液。

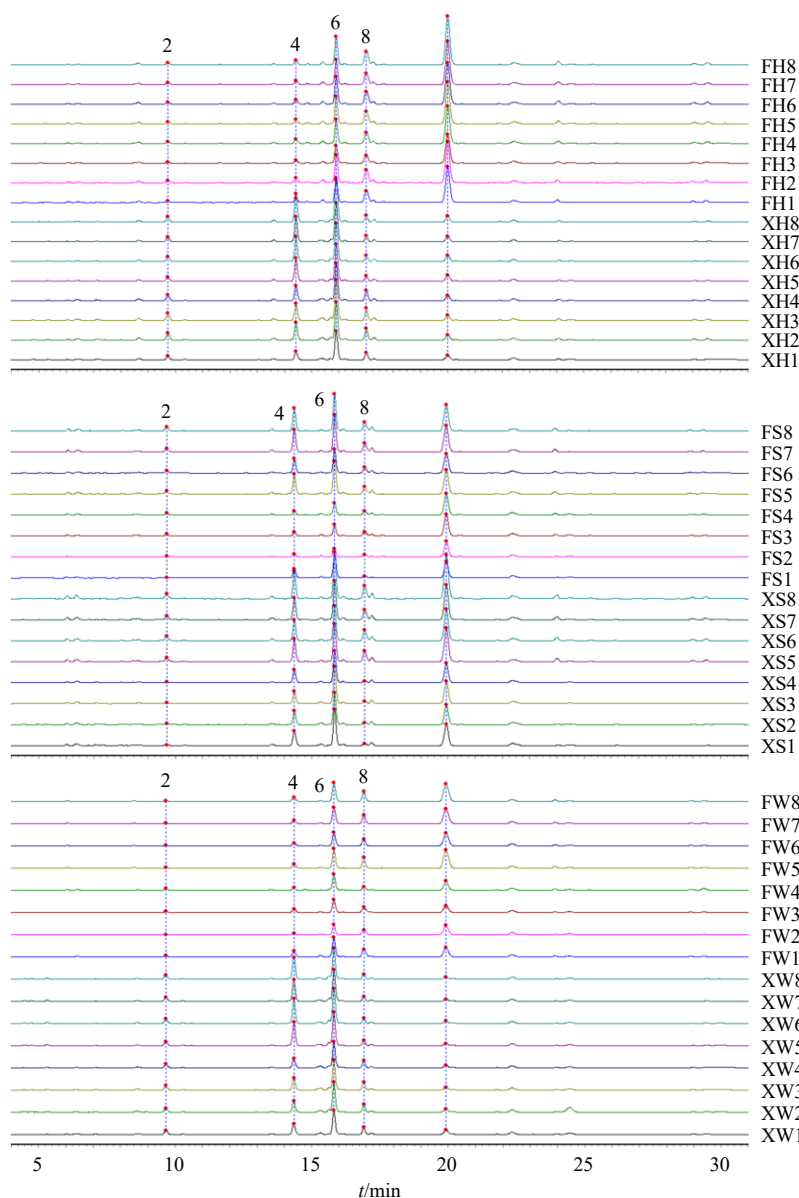
2.2.5 精密度试验 取海珠肉粉末(编号 XH1) 约 0.5 g, 精密称定, 按照“2.2.3”“2.2.4”项下方法制备供试品溶液并衍生化, 按照“2.2.1”项下色谱条件进行测定, 连续进样 6 次, 记录峰面积, 并计算 RSD, 以峰 4(甘氨酸)为参照峰, 计算得到谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸、峰 10 相对保留时间的 RSD 分别为 0.06%、0.05%、0.06%、0.05%、0.20%, 相对峰面积的 RSD 分别为 1.20%、0.80%、1.71%、1.25%、2.59%, 结果表明该仪器精密度良好。

2.2.6 稳定性试验 取同一份(编号 XH1) 海珠肉供试品溶液并衍生化, 分别在制备后 0、2、4、8、12、24 h, 按照“2.2.1”项下色谱条件进行测定, 记录峰面积, 并计算 RSD 值, 以峰 4(甘氨酸)为参照峰, 计算得到谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸、峰 10 相对保留时间的 RSD 分别为 0.20%、0.16%、0.13%、0.14%、0.33%, 相对峰面积的 RSD 分别为 1.44%、0.45%、1.24%、2.08%、2.13%, 结果表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.2.7 重复性试验 取海珠肉粉末（编号 XH1）适量，按照“2.2.3”“2.2.4”项下方法平行制备 6 份供试品溶液并衍生化，分别进样测定，以峰 4（甘氨酸）为参照峰，计算得到谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸、峰 10 相对保留时间的 RSD 分别为 0.12%、0.07%、0.07%、0.05%、1.21%，相对峰面积的 RSD 分别为 1.10%、1.64%、1.80%、1.59%、2.26%，结果表明该方法重复性良好。

2.2.8 指纹图谱建立及相似度评价 将 48 批海珠肉样品，按照“2.2.3”“2.2.4”项下方法制备供试品

溶液并衍生化，按照“2.2.1”项下色谱条件进样分析，得到不同加工工艺品质的海珠肉 HPLC 色谱图，将色谱图导入“中药色谱指纹图谱相似度评价软件（2012 版）”。采用中位数法，时间宽度设置为 0.1 min，进行多点校正和标记（mark）峰匹配，建立 48 批海珠肉样品指纹图谱叠加图和对照指纹图谱（R），结果见图 1。不同加工工艺品质的海珠肉样本共标定 5 个共有峰，并指认出 4 个共有峰，其中 2 号峰为谷氨酸，4 号峰为甘氨酸（参照峰 S），6 号峰为牛磺酸，8 号峰为丙氨酸。



FH、XH、FW、XW、FS、XS 分别为腐败品和鲜品烘干、微波干燥、晒干；2-谷氨酸；4-甘氨酸；6-牛磺酸；8-丙氨酸；下图、表同。
FH, XH, FW, XW, FS, XS are respectively oven-drying, microwave drying, sun-drying of rotten products and fresh products. 2-glutamic acid; 4-glycine; 6-taurine; 8-alanine; Same as below figures and tables.

图 1 海珠肉不同加工工艺叠加指纹图谱

Fig. 1 Superimposed HPLC fingerprint profiles of *P. fucata*

8 批鲜品烘干海珠肉样本 (S1~S8)、8 批腐败品烘干海珠肉样本 (S9~S16)、8 批鲜品微波海珠肉样本 (S17~S24)、8 批腐败品微波海珠肉样本 (S25~S32)、8 批鲜肉晒干海珠肉样本 (S33~S40)、8 批腐败品晒干海珠肉样本 (S41~S48) 与其对照指纹图谱的相似度分别为 0.956~1.000、0.997~1.000、0.960~1.000、0.943~1.000、0.962~1.000、0.886~1.000, 鲜品烘干 (8 批) 生成对照图谱与鲜品微波 (8 批) 生成对照图谱的相似度为 0.997、鲜品烘干 (8 批) 生成对照图谱与鲜品晒干 (8 批) 生成对照图谱的相似度为 0.833、鲜品微波 (8 批) 生成对照图谱与鲜品晒干 (8 批) 生成对照图谱的相

似度为 0.793、腐败品烘干 (8 批) 生成对照图谱与腐败品微波 (8 批) 生成对照图谱的相似度为 0.966、腐败品烘干 (8 批) 生成对照图谱与腐败品晒干 (8 批) 生成对照图谱的相似度为 0.947、腐败品微波 (8 批) 生成对照图谱与腐败品晒干 (8 批) 生成对照图谱的相似度为 0.976。以上结果表明所建立的海珠肉指纹图谱方法精密度、稳定性、重复性良好, 可用于海珠肉的品质评价和质量控制。

2.2.9 各加工工艺海珠肉特征峰分析 不同加工工艺品质各 8 批海珠肉分别生成对照图谱与混合对照图谱比对, 结果见图 2。

(1) 2 种品质差异分析: 鲜品烘干生成对照图

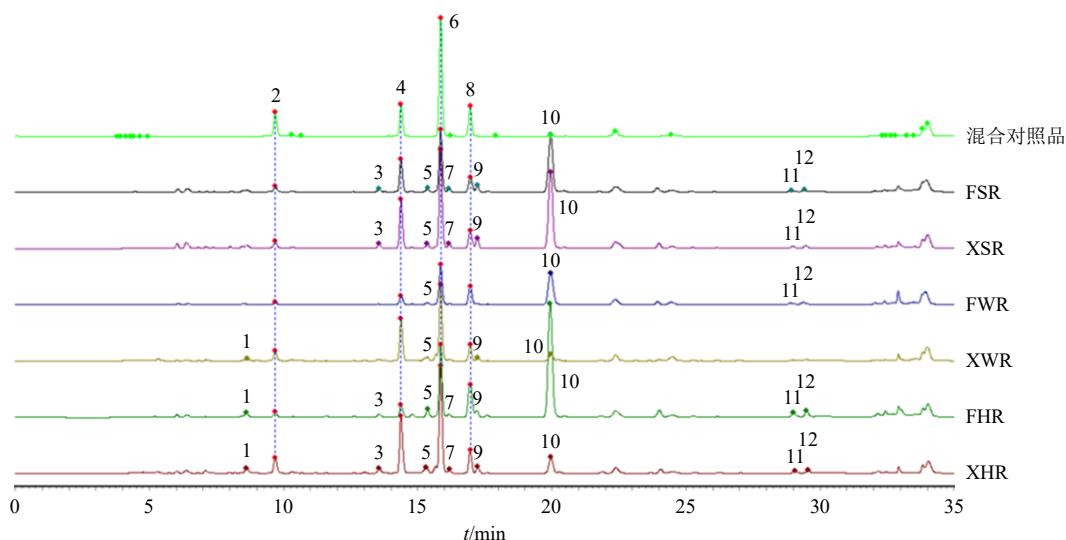


图 2 海珠肉各加工工艺生成对照指纹图谱 (XHR、FHR、XWR、FWR、XSR、FSR) 及混合对照品色谱图

Fig. 2 Comparison fingerprint chromatograms of *P. fucata* with different processing technologies (XHR, FHR, XWR, FWR, XSR, FSR) and mixed reference substances chromatogram

谱 (XHR)、生成对照图谱腐败品烘干 (FHR) 共标定出 12 个共有峰 (峰 1~12), 2 种不同品质加工工艺未体现出区别, 但氨基酸含量存在差异; 鲜品微波生成对照图谱 (XWR) 标定出 8 个共有峰 (峰 1、2、4~6、8~10), 腐败品微波生成对照图谱 (FWR) 标定出 8 个共有峰 (峰 2、4~6、8、10~12), 其中, 1、9、11、12 号峰可用于区别鲜品微波和腐败品微波 2 种不同加工工艺; 鲜品晒干生成对照图谱 (XSR) 与腐败品晒干生成对照图谱 (FSR) 共标定出 11 个共有峰 (峰 2~12), 2 种不同品质状态未体现出区别。

(2) 不同加工工艺差异分析: ①鲜品组: 峰 3、7、11、12 可用于区别鲜品烘干 (XHR) 和鲜品微波 (XWR) 工艺; 峰 1 可用于区别鲜品烘干 (XHR) 和鲜品晒干 (XSR) 工艺; 峰 1、3、7、11、12 可

用于区别鲜品微波 (XWR) 和鲜品晒干 (XSR) 工艺。②腐败品组: 峰 1、3、7、9 可用于区别腐败品烘干 (FHR) 和腐败品微波 (FWR) 工艺; 峰 1 可用于区别腐败品烘干 (FHR) 和腐败品晒干 (FSR) 工艺; 峰 3、7、9 可用于区别腐败品微波 (FWR) 和腐败品晒干 (FSR) 工艺。

(3) 不同干燥方式差异分析: 烘干干燥加工工艺 (鲜品 XHR、腐败品 FHR) 共标定出 12 个共有峰 (峰 1~12); 微波干燥加工工艺 (鲜品 XWR、腐败品 FWR) 共标定出 6 个共有峰 (峰 2、4~6、8、10), 其中鲜品 XWR 较腐败品 FWR 检测出峰 1、9, 腐败品较鲜品检测出峰 11、12; 晒干干燥加工工艺 (XSR、FSR) 共标定出 11 个共有峰 (峰 2~12); 微波干燥加工工艺 (XWR、FWR) 中未检出 3、7 号峰, 可用于区分与其他 2 种加工工艺 (烘干

干燥加工工艺、晒干干燥加工工艺);晒干工艺未检出 1 号峰,可用于区分与其他 2 种加工工艺(烘干干燥加工工艺、微波干燥加工工艺)。

2.3 化学计量学分析

为了明确不同加工工艺品质海珠肉化学成分差异,在指纹图谱分析的基础上,采用聚类分析(cluster analysis, CA)、主成分分析(principal component analysis, PCA)和正交偏最小二乘法-判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)等化学计量学方法,对 48 批不同加工工艺品质的海珠肉的化学成分进行了分析与比较。

2.3.1 CA 以 48 个海珠肉样本中 5 个共有峰(峰 2: 谷氨酸;峰 4: 甘氨酸;峰 6: 牛磺酸;峰 8: 丙氨酸;峰 10: 未知峰,图 1)的峰面积作为变量,导入 SPSS 23.0 软件,经过标准化处理后,采用组间连接,平方欧式距离法进行系统聚类分析,结果如图 3 所示。由此可知,当欧氏距离为 5 时,48 个样本可分为 4 类,FW 分为 I 类,XH 和 XW 为 II 类,FS 和 XS 为 III 类,FH 为 IV 类。以上结果表明,不同品质状态下各加工方式海珠肉样品所含化学成分具有一定的差异性。

2.3.2 PCA 将 5 个共有峰(峰 2: 谷氨酸;峰 4: 甘氨酸;峰 6: 牛磺酸;峰 8: 丙氨酸;峰 10: 未知峰)的峰面积为自变量,48 个海珠肉样品为因变量,导入 SIMCA 14.1 软件进行 PCA,主成分 1(PC1)与主成分 2(PC2)的贡献率分别为 47.7%和 35.8%,方差累积解释能力参数 R^2 和预测能力参数 Q^2 分别为 0.992 和 0.927,说明 PCA 模型的区分度和预测能力较好,2 个主成分(PC1 和 PC2)可综合反映海珠肉样品的差异情况,绘制 PCA 得分散点图,结果见图 4。PCA 结果表明,不同加工工艺品质海珠肉化学成分间存在差异,各主成分 P 值均 <0.05 ,说明组间差异具有统计学显著性,本研究的 PCA 结果可靠,可有效支撑后续品质评价结论。

2.3.3 OPLS-DA 为进一步寻找不同批次加工工艺品质状态的海珠肉样品的差异性标志物,通过 SIMCA 14.1 软件对 5 个共有峰(峰 2: 谷氨酸;峰 4: 甘氨酸;峰 6: 牛磺酸;峰 8: 丙氨酸;峰 10: 未知)构建 OPLS-DA 模型,结果见图 5,发现拟合优度参数 $R^2_{cum}=0.992$,预测能力指标 $Q^2_{cum}=0.543$,均超过 0.5,表明模型具有良好的稳定性和可靠性;再通过 200 次随机置换检验来验证该模型的

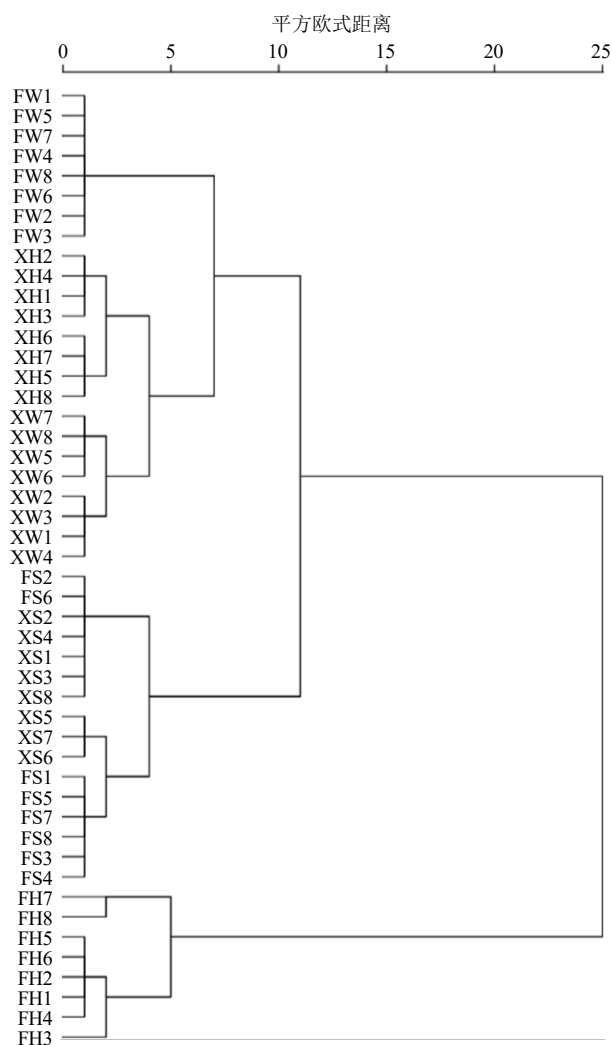


图 3 海珠肉各加工工艺 CA 结果

Fig. 3 CA results of *P. fucata* samples subjected to various processing technologies

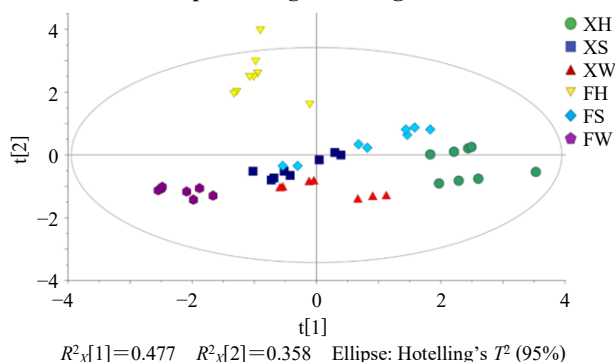


图 4 海珠肉样品 PCA 结果

Fig. 4 PCA result of *P. fucata* samples

有效性,结果见图 6,可知 R^2 回归线 Y 轴截距为 -0.0049 , Q^2 回归线 Y 轴截距为 -0.135 ,证明模型未出现过拟合。

变量重要性投影(variable importance projection, VIP)值见图 7, VIP 值越大,表明对样品分类贡献

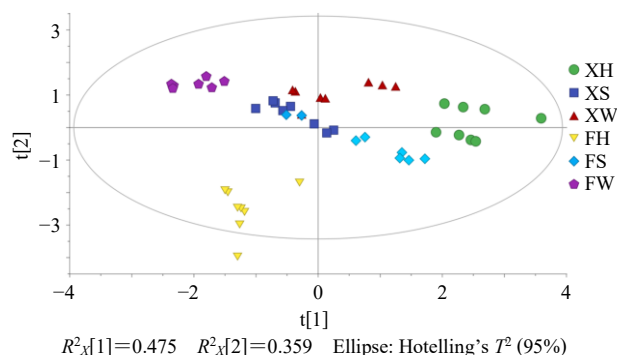


图 5 OPLS-DA 得分图

Fig. 5 OPLS-DA score plot

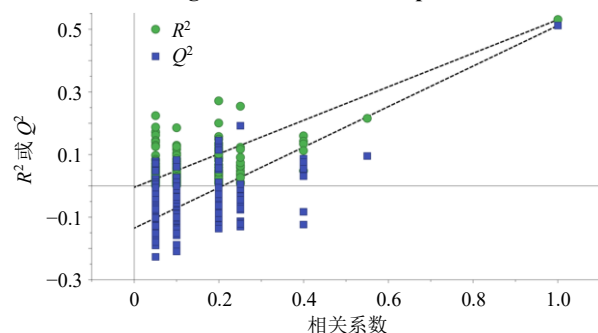


图 6 OPLS-DA 模型置换检验

Fig. 6 OPLS-DA model permutation test

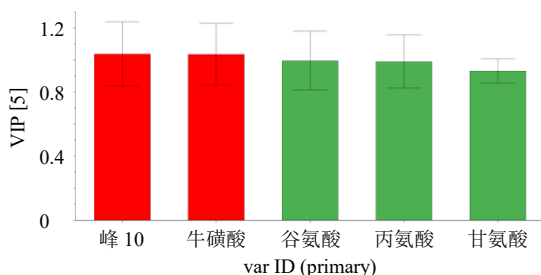


图 7 共有峰 VIP 值

Fig. 7 VIP values of common peaks

值越大。可知在 95%置信区间内,以 VIP 值 >1.0 、 $P<0.05$ 为标准时,共筛选得到 2 个差异性标志物,即 6、10 号峰,表明这 2 个峰对区分 6 类不同加工工艺品质海珠肉具有较大贡献。

2.4 多指标含量测定

通过上述研究,建立了不同加工工艺品质海珠肉的化学指纹图谱,一共有 5 个共有峰,并指出 4 个峰,分别为峰 2 (谷氨酸)、峰 4 (甘氨酸)、峰 6 (牛磺酸)、峰 8 (丙氨酸),并采用 CA 和 PCA 等化学计量学方法,对不同品质状态及加工方式海珠肉化学成分进行了比较,结果表明,不同品质状态及加工方式海珠肉样品中 5 个共有峰的峰面积有差异,提示不同加工工艺品质状态海珠肉样品中标志性化学成分的含量有区别。为进一步明确其化学成

分含量差异,为海珠肉的质量评价提供方法。采用 HPLC 法对 48 个不同加工工艺品质海珠肉样品中谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸 4 个成分的含量进行了测定和比较。

2.4.1 色谱条件 同“2.2.1”项。

2.4.2 对照品溶液的制备 同“2.2.2”项。

2.4.3 供试品溶液的制备 同“2.2.3”项。

2.4.4 线性关系考察 精密称取谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸适量,按照“2.2.2”项下方法制备成 5 个不同质量浓度梯度的混合对照品溶液,按照“2.2.1”项下色谱条件进行测定,以对照品质量浓度为横坐标 (X),对照品峰面积为纵坐标 (Y),进行线性回归分析,得到 4 种成分的线性回归方程分别为谷氨酸 $Y=2\times 10^6 X+4\,385.1$, $r=0.999\,7$,线性范围 $0.01\sim 0.16\text{ mg/mL}$;甘氨酸 $Y=7\times 10^6 X-7\,479.2$, $r=0.999\,9$,线性范围 $0.01\sim 0.16\text{ mg/mL}$;牛磺酸 $Y=4\times 10^6 X-33\,382.0$, $r=0.999\,0$,线性范围 $0.01\sim 0.54\text{ mg/mL}$;丙氨酸 $Y=6\times 10^6 X-36\,059.0$, $r=0.999\,7$,线性范围 $0.01\sim 0.54\text{ mg/mL}$;可知,4 个成分在相应线性范围内呈良好的线性关系。

2.4.5 精密度试验 精密吸取“2.4.4”项下的混合对照品溶液,按照“2.2.1”项下色谱条件进行测定,连续进样测定 6 次,记录峰面积,并计算 RSD 值。结果计算得到谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸峰面积的 RSD 分别为 1.94%、0.20%、0.87%、1.91%,结果表明该仪器精密度良好。

2.4.6 稳定性试验 取同一份(编号 XH1)海珠肉供试品溶液,分别在制备后 0、2、4、8、12、24 h,按照“2.2.1”项下色谱条件进行测定,记录峰面积,并计算 RSD 值,结果计算得到谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸峰面积的 RSD 分别为 1.98%、1.21%、1.91%、1.91%,结果表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.4.7 重复性试验 取海珠肉粉末(编号 XH1)适量,按照“2.2.3”项下方法平行制备 6 份供试品溶液,分别进样测定,记录峰面积并计算其质量分数,结果计算得到谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸质量分数的 RSD 分别为 1.65%、0.90%、0.54%、0.89%,结果表明该方法重复性良好。

2.4.8 加样回收率试验 称取海珠肉粉末(编号 XH1)约 0.25 g,精密称定,平行称取 6 份,按照相当于样品中含量 100%的比例加入对照品溶液,按照“2.2.3”项下方法制备供试品溶液,按照“2.2.1”

项下色谱条件分别进样测定。结果谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸的平均加样回收率分别为 99.6%、103.3%、105.1%、100.0%，RSD 分别为 2.99%、1.03%、0.55%、2.86%，结果表明该方法准确度良好。

2.4.9 含量测定结果 取 48 批海珠肉粉末各约 0.5 g，精密称定，按照“2.2.3”项下方法制备供试品溶液，按照“2.2.1”项下色谱条件，采用标准曲线法进行含量测定。结果见表 1。对 4 种氨基酸进行分指标组间差异分析可知，(1) 谷氨酸：①鲜品组，XH 谷氨酸含量最高 (5.01~8.07 mg/g)，是所有组别中谷氨酸富集最显著的一组；XW 次之 (2.79~4.57 mg/g)；XS 谷氨酸最低，XS1~XS4 谷氨酸不足 1.1 mg/g，该工艺会大幅损耗谷氨酸。②腐败品组，FH 谷氨酸仅 2.17~3.01 mg/g，相比 XH 大幅下降；FS 随样品序号升高谷氨酸明显上升 (1.20~5.80 mg/g)，后期含量反超同源 XS 组；FW 组整体谷氨酸偏低，多数样品 <2 mg/g，远低于同源 XW

组。可知 XH 最利于谷氨酸保留；腐败会普遍造成谷氨酸分解流失。(2) 甘氨酸：①鲜品组，XH 甘氨酸随编号递增持续升高 (4.27~7.42 mg/g)，是全样本甘氨酸含量最高组别；XW 后半段样品甘氨酸大幅提升 (5.64~6.19 mg/g)；XS 甘氨酸稳定在 2.88~5.74 mg/g，整体低于 XH、XW。②腐败品组，FH、FW 甘氨酸显著低于对应新鲜组，多数 <2 mg/g；FS 后期样品甘氨酸急剧升高 (6.13~6.67 mg/g)，成为腐败组内甘氨酸最高组别。可知 XH 工艺对甘氨酸保留效果最优；腐败环境下大部分组别甘氨酸发生降解。(3) 牛磺酸为海珠肉标志性功效成分，各组基线含量整体最高。①鲜品组，XH 牛磺酸 14.01~21.03 mg/g，为全组最高；XS、XW 牛磺酸整体偏低。②腐败品组，FH 牛磺酸与 XH 接近，降解幅度极小；FS3、FS4 牛磺酸断崖式下跌 (5.92~6.79 mg/g)，损耗超 50%；FW 组牛磺酸普遍 9~11 mg/g，相比 XW 明显下降。可知 XH 可最大程度锁

表 1 海珠肉 48 个样本含量测定结果 ($\bar{x} \pm s, n=3$)
Table 1 Assay results of 48 *P. fucata* samples ($\bar{x} \pm s, n=3$)

编号	质量分数/(mg·g ⁻¹)				编号	质量分数/(mg·g ⁻¹)			
	谷氨酸	甘氨酸	牛磺酸	丙氨酸		谷氨酸	甘氨酸	牛磺酸	丙氨酸
XH1	6.46±0.53	4.27±0.50	14.01±0.51	2.38±0.09	FH1	2.71±0.51	1.51±0.12	14.17±0.60	5.08±1.50
XH2	7.53±0.31	5.01±0.12	19.12±0.34	3.89±0.18	FH2	2.75±0.83	1.69±0.51	14.89±4.47	5.58±0.14
XH3	8.07±0.36	5.11±0.08	21.03±0.73	4.20±0.27	FH3	2.17±0.31	1.31±0.06	12.33±0.15	3.93±1.43
XH4	7.15±0.40	4.51±0.10	19.41±0.74	3.74±0.25	FH4	2.44±0.06	1.35±0.15	12.56±1.88	4.68±1.24
XH5	5.06±0.34	6.66±0.25	18.48±0.21	1.99±0.14	FH5	3.01±0.40	1.70±0.17	15.44±1.43	5.53±1.88
XH6	6.14±0.99	7.11±0.35	19.06±0.55	2.21±0.05	FH6	2.61±0.06	1.41±0.08	13.08±0.34	5.11±1.46
XH7	5.01±0.76	6.72±0.91	18.15±2.06	2.04±0.19	FH7	2.55±0.45	1.41±0.18	12.96±1.79	4.96±2.22
XH8	6.58±1.72	7.42±1.02	19.93±2.33	2.27±0.23	FH8	2.75±0.40	1.52±0.28	13.51±1.79	5.55±0.19
XS1	1.03±1.26	3.79±0.28	15.79±1.42	1.24±0.09	FS1	1.20±0.40	2.79±0.28	13.31±1.79	0.94±0.19
XS2	1.03±1.25	3.68±0.07	14.35±0.85	1.23±0.07	FS2	1.75±0.36	1.06±0.33	5.92±2.17	1.04±0.18
XS3	0.79±0.17	2.88±0.79	14.32±4.11	1.20±0.26	FS3	2.46±0.31	1.32±0.18	6.74±1.18	1.55±0.42
XS4	0.77±0.05	3.08±0.70	13.02±2.87	1.03±0.21	FS4	2.53±0.18	1.32±0.10	6.79±0.68	1.59±0.48
XS5	3.84±2.74	4.95±1.65	14.38±4.46	1.60±0.01	FS5	4.67±0.56	6.13±1.17	17.87±2.58	2.47±0.71
XS6	3.64±2.35	4.60±1.19	13.83±3.70	1.62±0.15	FS6	4.07±0.78	4.84±1.35	14.83±4.23	2.06±0.44
XS7	3.29±2.32	4.72±1.47	14.72±4.69	1.66±0.03	FS7	5.16±0.06	6.37±0.49	18.85±1.15	2.84±0.99
XS8	4.36±3.51	5.74±2.41	17.30±6.77	1.79±0.24	FS8	5.80±0.36	6.67±0.69	19.23±1.43	2.95±1.04
XW1	2.79±1.44	2.64±0.16	10.40±0.49	2.17±0.16	FW1	1.80±0.23	1.74±0.16	9.05±0.21	2.68±0.95
XW2	3.35±1.79	3.07±0.06	13.96±0.46	2.58±0.13	FW2	0.47±0.21	0.48±0.14	5.98±1.66	2.13±0.19
XW3	3.28±1.70	3.05±0.29	13.78±0.79	2.57±0.26	FW3	1.39±0.30	1.36±0.30	7.36±1.76	2.01±0.43
XW4	3.21±0.39	2.62±0.40	12.56±0.78	2.37±0.19	FW4	2.29±0.19	0.85±0.02	8.53±0.31	1.58±0.07
XW5	4.57±0.69	6.13±0.74	15.86±2.01	1.89±0.16	FW5	1.08±0.20	1.41±0.22	10.59±1.72	2.59±1.47
XW6	3.99±0.50	5.64±0.69	14.71±0.80	1.69±0.21	FW6	1.00±0.53	1.18±0.53	9.02±3.18	1.82±0.83
XW7	4.29±0.62	5.89±1.02	15.19±1.52	1.78±0.26	FW7	1.05±0.30	1.25±0.28	9.39±1.82	2.21±1.20
XW8	4.43±0.05	6.19±0.13	15.52±1.78	1.82±1.16	FW8	1.19±0.31	1.48±0.23	10.80±1.60	2.69±1.51

住牛磺酸；FH 腐败后牛磺酸稳定性最强，FS 腐败后牛磺酸极易分解损失。(4) 丙氨酸：FH 丙氨酸显著积累；XS、FS 丙氨酸含量最低；XW 与 FW 丙氨酸差异最小，前后波动幅度最平缓。综上可知，XH 加工工艺最优，可高效保留谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸等特征游离氨基酸；XS 氨基酸损耗最严重，加工损耗最大；XW 居中，组分稳定性突出。FH 腐败后牛磺酸抗分解能力最强；FW 整体氨基酸受腐败干扰最小，贮藏过程品质更稳定；FS 氨基酸体系破坏最明显，极易出现劣变。整体可见加工工艺与腐败变质均会显著改变海珠肉游离氨基酸组成与含量。

不同加工工艺品质状态海珠肉样品，在 HPLC 指纹图谱及所含化学成分含量具有差异，为进一步验证不同加工工艺与品质状态，对海珠肉质量的影响，本实验将通过电子鼻技术获取其嗅觉信息，从挥发性特征维度探究海珠肉样品差异。

2.5 电子鼻测定

2.5.1 电子鼻测定条件 取“2.1”项下加工后海珠肉样品干制品，置于打粉机打碎，过 3 号筛，精密称取粉末 10.0 g，置于 20 mL 广口瓶中，保鲜膜密封瓶口，室温 $[(25 \pm 2) ^\circ\text{C}]$ 静置平衡 30 min，样品现制现用。仪器参数设置：基线采集时间 30 s，样品采集时间 30 s，总测时长 5 min。

传感器配置：8 个传感器（表 2）按照规则的模式排列在基底上，形成传感器阵列。传感器之间的间距经过优化，以确保合适的感测性能。

表 2 电子鼻传感器阵列

Table 2 Sensor array of electronic nose

传感器类型	目标气体	来源
TGS2610	甲烷等可燃气体	费加罗
TGS2602	挥发性有机化合物	费加罗
WSP1110	甲醛	费加罗
TGS2611	甲烷、丁烷	费加罗
WSP2110	挥发性有机化合物和可燃性气体	费加罗
TGS2620	乙醇、有机溶剂蒸气	费加罗
MP-5	一氧化碳	费加罗
MP503	挥发性有机化合物（如乙醇、甲醛）	费加罗

2.5.2 电子鼻数据预处理与分析 将每个样本在 8 个传感器上的电阻响应值分别取均值，得到平均响应曲线用于后续定性分析，未进行其他预处理。电子鼻传感器阵列对每个样本响应曲线如图 8 所示。

如图 9 所示，各工艺类别曲线趋势一致，但响应幅值和稳定电阻水平存在差异，表明电子鼻可有

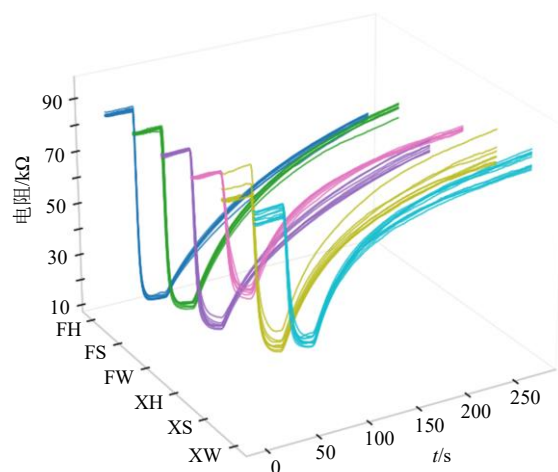


图 8 电子鼻传感器阵列平均响应曲线

Fig. 8 Average response curves of electronic nose sensor array

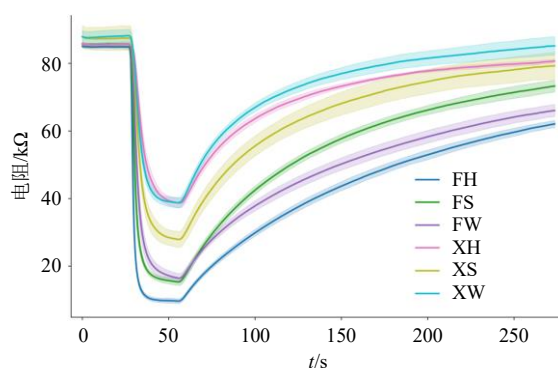


图 9 6 类海珠肉样本的平均响应曲线 ($\bar{x} \pm s$)

Fig. 9 Average response curves of six types of *P. fucata* samples ($\bar{x} \pm s$)

效区分不同新鲜度和处理方式的样本。腐败品类样本响应曲线位于较低电阻区间，鲜品类样本则更高。在相同新鲜度下，不同处理工艺也影响传感器响应：鲜品组中，烘干与微波处理的电阻最高，晒干处理明显较低；腐败品组中，晒干与微波处理的电阻高于烘干处理。标准差阴影带显示，鲜品烘干样本内部差异较小，而腐败品微波样本的个体差异略大。

2.5.3 数据分布可视化 为直观展示海珠肉样本的分布特征，采用 PCA 方法将数据降至二维，并绘制了散点图。图 10 展示了 6 类海珠肉样本在二维空间中的分布情况，其中，PCA 前 2 个主成分的累积方差贡献率超过 99%，说明该二维投影能够有效代表原始数据的主要差异特征。

结果可见，6 个类别在 PCA 空间中区分良好，类间聚类明显，进一步表明响应信号中蕴含着区分新鲜度及处理方式的重要特征信息。鲜品与腐败品

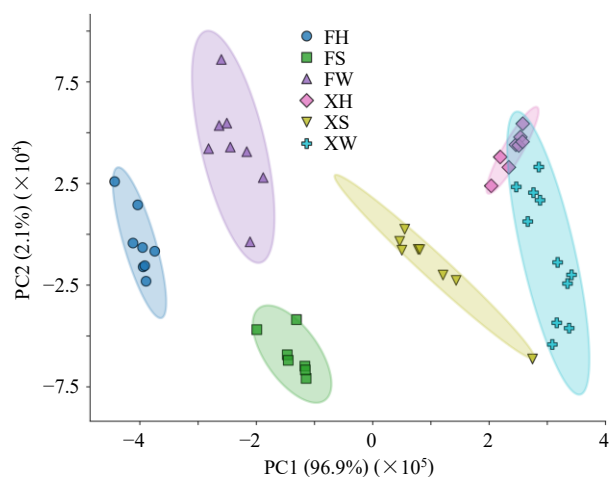


图 10 二维 PCA 数据分布

Fig. 10 2D PCA data distribution

的分离最为显著，整体主要沿 PC1 方向分布，鲜品类样本均位于右侧区域，腐败品类样本则集中于左侧区域，说明 PC1 主要表达由新鲜度引起的挥发性物质差异。相同新鲜度下，不同处理方式的样本也呈现出良好的可分性。鲜品微波与鲜品烘干、鲜品晒干样本之间虽位置相对接近，但仍形成相对独立的聚类区域。腐败品组中的 3 类样本间差异更为明显，腐败品微波、腐败品烘干和腐败品晒干样本分别占据不同位置，提示腐败过程中加工方式对气味成分释放特征的影响更为显著。

图 11 为电子鼻传感器阵列在 20、50、80、120 s 4 个时间点采集的 6 类海珠肉样本电阻响应的散点矩阵图，对角线上的图为每个特征的核密度估计

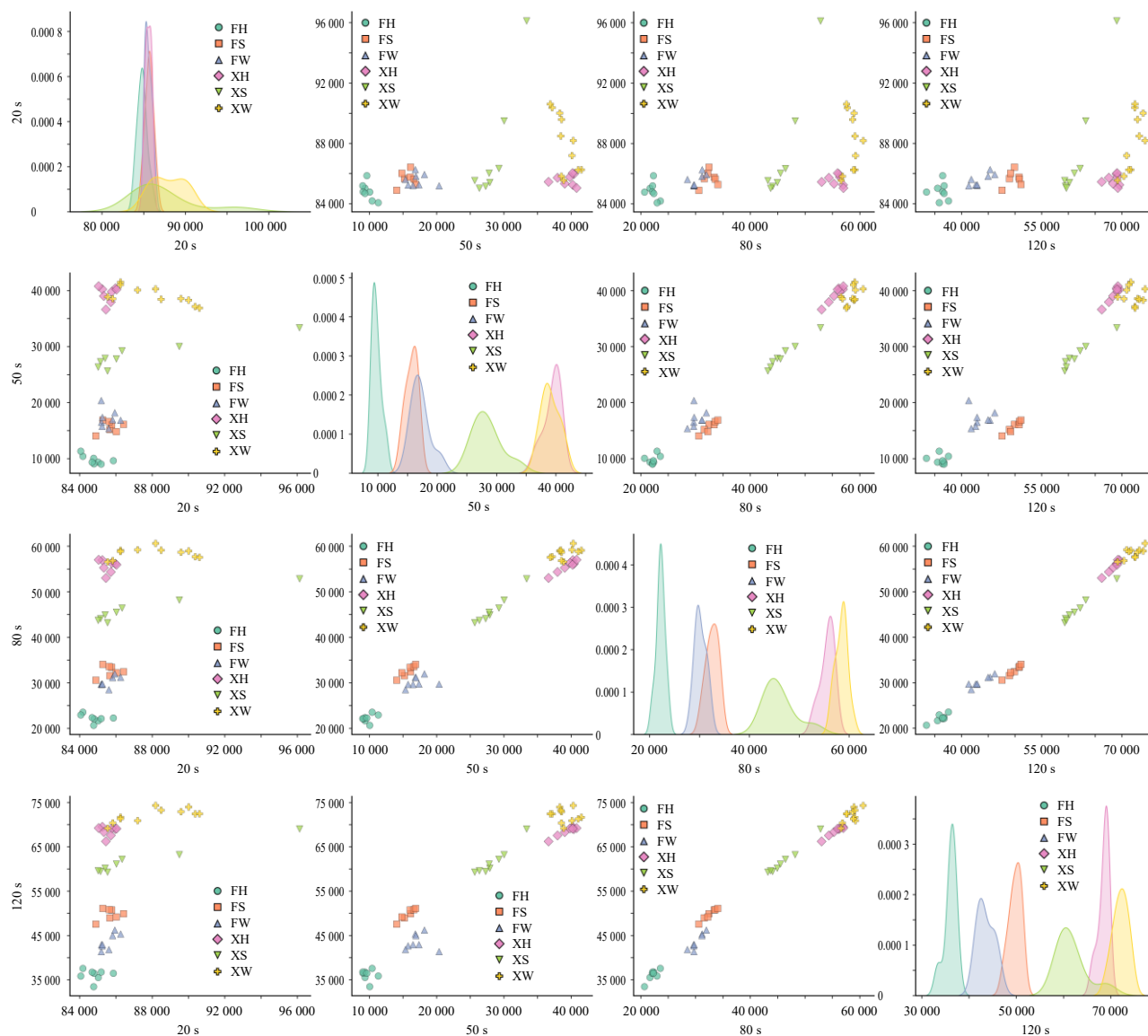


图 11 散点矩阵图

Fig. 11 Scatter matrix plot

曲线,非对角线上的图为不同特征之间的散点图。从整体趋势来看,各类别样本随时间呈一致性的电阻下降后稳步回升的响应行为,不同类别在多个时间点均呈现出明显差异,表明电子鼻能够提取具有判别能力的气味信息。从时间维度看,20 s 时各类别聚类初步形成但分离度较弱,鲜品与腐败品部分重叠。50 s 和 80 s 阶段,样本分布差异迅速放大,聚类边界逐渐清晰。120 s 时,6 类样本响应差异达到最明显水平,类内聚集性增强,类间距离增大,鲜品与腐败品可良好区分,相同新鲜度下不同加工工艺也表现出稳定可分性。

2.5.4 数据集划分 采用 Duplex 算法^[14]按 7:3 的比例将原数据集划分为训练集和测试集。算法首先选取距离数据均值最近的样本作为第 1 个代表点,随后逐步选取与当前已选样本集合最不相似的样本,通过最大化候选样本到最近已选样本的距离,实现对整个数据空间的均匀覆盖。这样得到的训练集能够同时包含中心样本和边缘样本,减少数据偏置,提高模型泛化能力。海珠肉电子鼻数据集的具体划分情况如表 3 所示。

表 3 海珠肉电子鼻数据集划分

Table 3 Division of *P. fucata* electronic nose dataset

类别	原数据集	训练集	测试集	类别	原数据集	训练集	测试集
FH	8	5	3	XH	8	6	2
FS	7	5	2	XS	8	6	2
FW	8	5	3	XW	11	8	3

2.5.5 分类结果及可视化分析 采用表格先验数据拟合网络 (tabular prior-data fitted network, TabPFN) 算法^[15]对海珠肉电子鼻样本进行分类。该算法非针对单一任务训练,而是预先在海量合成表格数据上学习,掌握了线性、非线性、干扰变量、缺失值、噪声及不平衡类别等多种数据规律。因此,在预测时无需重新建模,仅通过一次前向推理便能完成分类。TabPFN 借助 Transformer 的上下文学习能力,可自动理解训练与预测样本间的结构关系,直接输出概率分布,具有运行快速、适应性强和鲁棒性好等优点,尤其适用于本研究中的海珠肉小样本电子鼻数据。相较于支持向量机 (support vector machine, SVM) 和随机森林 (random forest, RF) 传统等机器学习方法,本研究选用 TabPFN 主要基于以下原因:第一,TabPFN 专为小样本表格数据设计,其通过在海量合成数据上的预训练,已内化了丰富的数

据分布先验知识,在样本量有限的条件下,仍能保持优异的泛化能力,而传统机器学习方法在小样本场景下易出现过拟合或泛化不足的问题。第二,TabPFN 无需手动调参,直接通过一次前向推理即可完成分类预测,避免了 SVM 中核函数与惩罚系数、RF 中树的数量与深度等超参数的选择与调优过程,减少了人为因素对结果的影响,提升了方法的客观性与可复现性。第三,TabPFN 基于 Transformer 的上下文学习机制,能够自动捕捉训练样本与预测样本之间的复杂结构关系,无需人工特征提取即可适应数据的非线性、交互效应及类别不平衡等特征,而传统方法往往需要针对特定数据集进行特征选择与参数调整。因此,TabPFN 相较于 SVM、RF 等传统机器学习方法,更适用于本研究中样本量小、类别结构复杂且对结果客观性要求高的海珠肉电子鼻分类任务。

表 4 为 TabPFN 算法在海珠肉电子鼻 6 分类任务中的混淆矩阵结果。从表中可以看出,所有测试样本均精准分类至对应类别,对角线元素均为正确预测数量,且无任何错误分类,表明模型对 6 类海珠肉样本具有出色且稳定的判别能力。具体而言,FH、FS、FW 3 类腐败品样本均被完全识别,XH、XS、XW 3 类鲜品样本同样实现了 100% 正确分类。这说明 TabPFN 不仅能够有效区分鲜品与腐败品 2 大类样本,还具备识别不同加工方式特征差异的能力。结果进一步验证了 TabPFN 在小样本条件下仍能充分挖掘电子鼻挥发性气体响应中的代表性模式,对高相似度组别的边界识别同样可靠。

表 5 是 TabPFN 算法对海珠肉电子鼻测试集样本的预测概率结果,展示了这 15 个测试样本的预测概率分布情况。

从整体上看,绝大多数样本的主预测类别概率均超过 0.80,模型输出呈现高度集中的单峰分布,

表 4 海珠肉电子鼻样本的 6 分类混淆矩阵

Table 4 Six class confusion matrix of *P. fucata* electronic nose samples

样品	FH	FS	FW	XH	XS	XW
FH	3	0	0	0	0	0
FS	0	2	0	0	0	0
FW	0	0	3	0	0	0
XH	0	0	0	2	0	0
XS	0	0	0	0	2	0
XW	0	0	0	0	0	3

表 5 预测概率结果
Table 5 Predictive probability results

测试集 样品	预测概率					
	FH	FS	FW	XH	XS	XW
1	0.99	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.97	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
3	0.99	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.97	0.01	0.00	0.01	0.00
5	0.00	0.99	0.01	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.06	0.93	0.00	0.01	0.00
7	0.04	0.03	0.93	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.96	0.01	0.02
10	0.00	0.00	0.00	0.97	0.01	0.02
11	0.00	0.01	0.00	0.01	0.97	0.01
12	0.00	0.01	0.01	0.07	0.88	0.03
13	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.94
14	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.80
15	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.99

说明 TabPFN 在分类决策上具有强烈的置信度。各类别样本均显示出鲜明的类别归属，腐败品烘干、腐败品晒干、腐败品微波和鲜品烘干等类别的样本均获得了非常明确的判别。少量个例存在轻微概率分散，例如 FW 样本 6、7 虽已正确识别，但同时腐败品烘干和腐败品晒干类别赋予了较小概率，这反映其挥发性气体特征存在部分重叠。同样的，XS 样本 12 与 XW 样本 14 对鲜品烘干类别产生了少量

混淆，可能源于相似加工方式导致的气味特征接近。总体而言，TabPFN 模型在所有测试样本上均实现了正确分类，同时保持高置信度预测，进一步印证了 TabPFN 在小样本电子鼻分类任务中的强泛化性能，概率分布的细节还揭示了不同加工方式间的类间相似性。

2.5.6 不同传感器对分类结果的影响 为评估电子鼻传感器阵列中 8 个传感器各自对海珠肉样本分类结果的贡献度，在保持训练集与测试集不变的情况下，继续采用 TabPFN 算法进行分类，并据此分析各传感器的相对重要性。表 6 为分别采用单一传感器电阻响应曲线作为输入时，TabPFN 模型在 6 类海珠肉样本分类任务中的混淆矩阵结果。整体来看，8 个传感器均具备一定的判别能力，对腐败品烘干、腐败品晒干与腐败品微波类别的识别结果稳定且准确率较高，表明这些传感器能够有效捕捉腐败过程中的挥发性气体特征差异。其中，传感器 1~3、5~8 在所有类别的预测中均无错误分类，实现了 100% 正确识别，说明这些传感器在不同加工方式下的气味响应差异明显，对类别区分具有充分的信息表达能力。而传感器 4 在鲜品烘干和鲜品微波样本分类中出现了混淆，导致一个样本被错误识别，表明该传感器在这 2 类样本中的响应特征存在相似性。表 6 的结果说明多数传感器对分类贡献显著，单独使用即可实现较高精度，个别传感器在特定类别间存在特征重叠，判别力相对不足。这表明

表 6 8 个传感器的 6 分类混淆矩阵
Table 6 Six class confusion matrix for eight sensors

样品	传感器1						传感器2						传感器3						传感器4					
	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW
FH	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
FS	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
FW	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0
XH	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	1
XS	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0
XW	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3

样品	传感器5						传感器6						传感器7						传感器8					
	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW
FH	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
FS	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
FW	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0
XH	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	1
XS	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0
XW	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3

电子鼻阵列中的多传感器融合策略具备必要性，可提高整体鲁棒性与区分能力。

表 7 是基于 8 个传感器的海珠肉测试样本分类预测概率结果，展示了单独使用 8 个传感器的电阻响应作为输入时，TabPFN 算法对 15 个海珠肉测试样本的预测概率分布情况。整体来看，传感器 1~3、5~8 的多数测试样本均呈现高置信度的单一类别概率输出，主预测概率通常大于 0.90，对应的热力块高亮集中在正确类别上，表明这些传感器具备良好的气味特征区分能力。尤其是针对腐败品和鲜

品的晒干类样本，所有传感器均表现稳定且判别性强。而在传感器 4 中，多个样本的分类置信度明显低于其他传感器，展现出概率分散的现象。例如传感器 4 对鲜品烘干样本 10 在鲜品烘干中的类别概率为 0.44，而在鲜品微波中的类别概率为 0.54，说明该传感器对这 2 类鲜品样本的特征识别能力较弱。值得注意的是，部分样本在特定传感器上的分类置信度显著偏低，例如腐败品烘干样本 2 在传感器 3 上，腐败品微波样本 7 在传感器 6 上，鲜品烘干样本 10 在传感器 1、3~5 上，以及鲜品微波样

表 7 8 个传感器的预测概率结果

Table 7 Predicted probability results of eight sensors

测试集 样品	传感器1预测概率						传感器2预测概率						传感器3预测概率						传感器4预测概率					
	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW
1	0.97	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.95	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.17	0.00	0.01	0.00	0.00
2	0.98	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.91	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.54	0.43	0.01	0.01	0.01	0.00	0.85	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00
3	0.99	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.89	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.06	0.00	0.00	0.00	0.04	0.77	0.17	0.01	0.01	0.00	0.01	0.85	0.03	0.11	0.01	0.00
5	0.02	0.90	0.08	0.00	0.00	0.00	0.02	0.97	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.87	0.05	0.01	0.01	0.00	0.02	0.85	0.01	0.11	0.01	0.00
6	0.00	0.03	0.93	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.87	0.00	0.09	0.02	0.00	0.01	0.92	0.06	0.00	0.01	0.10	0.01	0.82	0.02	0.03	0.02
7	0.01	0.26	0.72	0.00	0.00	0.00	0.02	0.13	0.83	0.00	0.01	0.01	0.02	0.08	0.86	0.03	0.00	0.00	0.12	0.03	0.83	0.01	0.01	0.00
8	0.00	0.05	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.97	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.96	0.03	0.00	0.00	0.12	0.01	0.86	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.97	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.97	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.95	0.00	0.04
10	0.00	0.00	0.01	0.61	0.01	0.37	0.00	0.00	0.00	0.95	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.70	0.02	0.27	0.00	0.00	0.00	0.44	0.01	0.54
11	0.00	0.01	0.04	0.01	0.93	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.96	0.01	0.00	0.01	0.02	0.04	0.92	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.96	0.01
12	0.00	0.01	0.02	0.09	0.87	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.94	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.95	0.04	0.00	0.01	0.01	0.02	0.89	0.07
13	0.00	0.00	0.09	0.02	0.02	0.87	0.00	0.01	0.03	0.09	0.04	0.84	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.97
14	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.87	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.93	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.93
15	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.92	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.94	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.98
测试集 样品	传感器5预测概率						传感器6预测概率						传感器7预测概率						传感器8预测概率					
	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW	FH	FS	FW	XH	XS	XW
1	0.99	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
2	0.83	0.16	0.01	0.00	0.00	0.00	0.93	0.05	0.01	0.00	0.01	0.00	0.98	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.97	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
3	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
4	0.01	0.97	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.97	0.01	0.00	0.01	0.00
5	0.03	0.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.96	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.01	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.01	0.98	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.92	0.00	0.04	0.01	0.00	0.10	0.88	0.00	0.01	0.00	0.01	0.10	0.86	0.00	0.02	0.01
7	0.03	0.03	0.92	0.00	0.01	0.00	0.03	0.46	0.48	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.95	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.94	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.97	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.97	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.94	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.95	0.02	0.02
10	0.00	0.00	0.00	0.60	0.02	0.38	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.96	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.91	0.06	0.02
11	0.00	0.00	0.01	0.01	0.97	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.97	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.96	0.01
12	0.00	0.00	0.02	0.03	0.91	0.04	0.01	0.01	0.01	0.02	0.94	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.96	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.95	0.01
13	0.00	0.00	0.09	0.03	0.03	0.84	0.00	0.00	0.01	0.05	0.03	0.90	0.00	0.00	0.01	0.03	0.06	0.90	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.93
14	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.96	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00	0.52
15	0.00	0.00	0.07	0.01	0.01	0.91	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.96	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.99

本 14 在传感器 7 和 8 上。这说明寻求一个通用的最优传感器组合并非最优策略, 根据样本特性动态选择高敏感性的传感器组合能够有效提升分类性能。8 个传感器对 15 个测试样本的预测概率说明多传感器信息冗余有利于增强鲁棒性。腐败挥发物对多个传感器具有强响应差异性, 可稳定识别, 而鲜品不同干燥方式挥发特征较为相近, 使某些传感器难以分辨。传感器 4 对特定加工方式下的气味特征区分能力相对不足。整体而言, 单传感器仍可实现较好分类, 但各传感器的贡献并不均衡, 多传感器融合能够补强单一传感器的局限性, 使模型表现更稳定、更具通用性。

基于电子鼻技术对海珠肉在不同新鲜度与加工方式下的挥发性气体进行了表征与分类。首先, 通过对 8 通道传感器阵列信号的可视化分析发现, 鲜品与腐败品的动态响应曲线、电阻幅值及稳态特征均存在显著差异, 即便在相同新鲜度下, 不同加工工艺也诱发了可区分的气味特征。PCA 进一步表

明, 6 类样本在二维空间中聚类良好, 证实电子鼻能有效捕捉具有判别力的气味信息。在分类任务中, 本研究引入了适用于小样本表格数据分析的 TabPFN 模型。该模型在 6 分类任务中实现了 100% 的准确率, 且预测概率分布集中, 置信度高, 展现出优异的泛化能力与稳定性。此外, 通过单传感器分类对比, 明确了各传感器判别能力的差异, 凸显了多通道信息融合对提升分类性能的关键作用, 并且根据样本特性动态选择高敏感性的传感器阵列能够提升分类性能。综上所述, 海珠肉电子鼻响应信号区分度良好, 结合 TabPFN 模型, 可在小样本条件下实现高精度、高置信度的识别。

2.6 Pearson 相关性分析

对 48 个海珠肉样品中 4 种特征成分含量与 8 个电子鼻传感器响应值进行 Pearson 相关性分析, 结果如图 12 所示, 谷氨酸含量与传感器 (通道) 1、传感器 (通道) 2、传感器 (通道) 4 响应值呈显著中等正相关 ($r=0.325$ 、 0.313 、 0.324 , $P<0.05$),

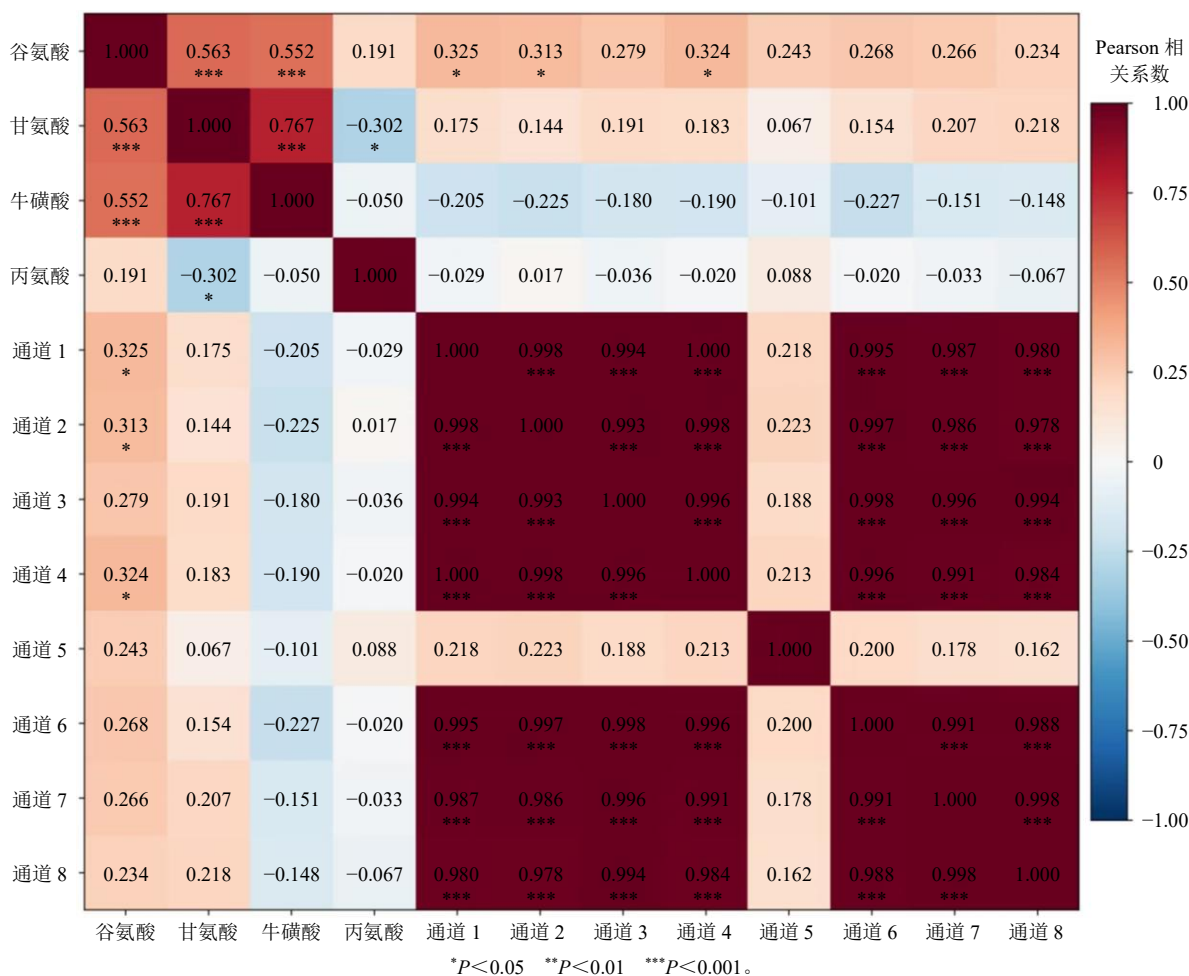


图 12 Pearson 相关性分析热图

Fig. 12 Pearson correlation analysis heatmap

表明谷氨酸含量越高,上述传感器的电阻响应值越大;甘氨酸、牛磺酸、丙氨酸与各传感器响应值均未达到显著相关水平($P>0.05$)。电子鼻传感器之间整体呈极强正相关($r>0.97$, $P<0.001$),其中传感器(通道)1、2、4、6~8 相关性尤为显著,说明多数传感器对海珠肉挥发性物质的响应模式具有高度一致性,仅传感器(通道)5 与其他传感器相关性较弱,体现出一定的特异性响应。此外,成分间相关性分析表明,甘氨酸与牛磺酸呈极显著正相关($r=0.767$, $P<0.001$),谷氨酸与甘氨酸、牛磺酸亦呈显著正相关($r=0.552$ 、 0.563 , $P<0.001$),反映出不同风味氨基酸在海珠肉中的积累具有协同性。综上,谷氨酸可作为与电子鼻响应信号关联的核心特征成分,为基于电子鼻快速评价海珠肉品质提供了一定的理论依据。

2.7 HPLC 与电子鼻联用技术综合评价不同加工工艺对海珠肉品质的影响

2.7.1 品质状态与干燥方式对特征成分含量的影响 HPLC 定量分析表明,品质状态(鲜/腐)与干燥方式共同影响了海珠肉中特征氨基酸的保留。在鲜品组中, XH 对谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸的保留效果最佳,而 XS 的上述成分流失最为严重。在腐败品组中,受蛋白降解与微生物作用影响,成分发生明显异变: FH 的丙氨酸含量显著富集; FW 中的 4 种氨基酸含量均降至最低; FS 虽保留了相对较多成分,但其伴随的异味生成也最为突出。

2.7.2 电子鼻气味响应与化学成分的关联分析 电子鼻检测结果从气味维度印证了上述化学差异。鲜品组的整体电阻响应值显著高于腐败品组,表明其挥发性腐败物质较少、气味更纯净。其中, XW 样品的气味稳定性与纯净度表现最优,而 XH 样品在气味表现上虽属适中,但结合 HPLC 结果,其实现了化学成分保留与气味稳定的较优平衡。在腐败品组中, FW 在腐败样品中气味相对纯净; FH 的最终电阻值最低,气味残留最强,这与 HPLC 检测到的丙氨酸显著富集相呼应。

Pearson 相关性分析进一步揭示了化学与气味指标间的内在联系。谷氨酸与对烷烃及挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)敏感的电子鼻传感器(通道)1、2、4 呈显著正相关($P<0.05$),表明其是关联化学成分与气味特征的关键物质。综上,鲜品组中高含量的鲜味氨基酸(如谷氨酸)对应了纯净的气味轮廓;而腐败品组中氨基酸的异变

与腐败代谢共同导致了复杂异味,其中烘干工艺加剧了该过程,而微波工艺则在一定程度上抑制了异味的释放。

2.7.3 综合分析结果 综合特征成分保留与气味品质分析如表 8 所示。

表 8 海珠肉不同加工工艺品质状态评价

Table 8 Quality state evaluation of *P. fucata* with different processing technologies

组别	品质状态
XH	指标成分保留最完整, 气味稳定性良好, 综合品质突出
FH	丙氨酸异常富集, 气味最复杂、残留最久, 综合品质最差
XW	较好保留指标性成分, 气味最纯净、残留最少
FW	腐败样品中气味控制最优, 可作为脱臭预处理工艺
XS/FS	成分流失与异味生成并存, 整体品质中等

3 讨论

本研究采用 HPLC 建立海珠肉指纹图谱结合多指标成分定量分析,并与电子鼻技术联用,系统探究了不同加工工艺(烘干、微波、晒干)及品质状态(鲜品、腐败品)对海珠肉特征化学成分与挥发性气味的影响,旨在为海珠肉科学加工与品质调控提供理论依据。

3.1 加工工艺与品质状态对特征成分的差异性影响

HPLC 指纹图谱成功指认了谷氨酸、甘氨酸、牛磺酸及丙氨酸这 4 个共有峰,明确了海珠肉的特征性化学物质基础。指纹图谱与化学计量学分析表明,1、9、11、12 号峰可用于区别微波组(鲜品与腐败品)2 种不同加工工艺;这为基于化学指纹的质量鉴别提供了直接依据。值得注意的是,晒干工艺组(鲜品与腐败品)未体现出显著差异,推测可能是由于该工艺长时间暴露于光照、高温及氧气环境中,导致特征成分与非特征成分均发生大量降解或转化,整体化学轮廓趋同,致使基于现有指标的差异不再显著。

CA 结果显示, XH 与 XW 组在欧氏距离为 5 时聚为一类,当欧氏距离 <5 时各聚为一类,其中前 4 批样品(广西防城港)与后 4 批样品(广东湛江)分开聚类,说明其可能存在产地差异。含量测定结果进一步揭示,品质状态(鲜品/腐败品)是决定特征成分保留的核心因素,而干燥方式则会调制这一差异。XH 被证实为保留谷氨酸、甘氨酸等氨基酸的最佳工艺;相反,在腐败品组中, FH 引发了丙氨酸的异常富集。这一现象推测与烘干温度激活或加速了内源性蛋白酶及微生物的蛋白水解活性有关,

导致特定肽段或蛋白质降解,释放出大量丙氨酸;或样品腐败过程中丙氨酸前体物质积累等多重因素有关。

微波工艺虽能抑制微生物,但可能因其快速加热特性,加速了已降解小分子物质的挥发或进一步热解,导致成分流失加剧。此结果与文献报道^[7]中关于温和干燥条件利于贝类成分保留的观点相符。

3.2 电子鼻对品质与工艺差异的灵敏响应

电子鼻技术从气味特征层面有效印证并补充了化学分析的结果。分析表明,鲜品与腐败品样品在传感器动态响应曲线、响应幅值及稳态信号上均存在本质差异,这直接反映了二者 VOCs 组成与浓度的巨大不同。更重要的是,在相同新鲜度下,不同加工工艺也诱发了具有区分度的气味指纹。这表明,加工方式不仅影响化学成分,也显著改变产物的挥发性特征。本研究结果与电子鼻在传统肉制品^[8]及水产品^[9]新鲜度评价中的应用效果一致,证实了该技术用于海珠肉等海洋动物药品质快速、无损区分的巨大潜力。

在分类模型选择方面,本研究采用 TabPFN 替代 SVM、RF 等传统机器学习方法,主要考虑到电子鼻数据集样本量小的特点。传统机器学习方法在此类小样本场景下,分类性能高度依赖参数调优与特征提取,且不同研究间可比性较差。TabPFN 作为一种预训练的表格基础模型,无需调参即可在小样本条件下实现高精度分类,为电子鼻数据的模式识别提供了一种更为客观、高效的解决方案。

3.3 关联性分析与整体评价

本研究通过相关性分析,初步构建了化学指标与气味信号的联系,海珠肉中含有丰富的氨基酸、蛋白质和脂质,在烘干、微波、晒干等热加工处理条件下,易发生美拉德反应。该反应主要分为3个阶段:首先还原糖活性羰基部分与氨基化合物(如氨基酸、蛋白质或肽)的氨基发生缩合反应^[16],脱去1分子水,生成 Schiff 碱,进一步发生 Amadori 重排和 Heyns 重排,再降解^[17]、聚合,形成高分子的类黑精,这些褐色大分子物质赋予食品特有的色泽^[18]。脂质氧化产生的醛类化合物(如丙烯醛、己醛等)可以与美拉德反应中的还原糖或氨基酸发生反应,形成棕色的聚合物,同时可能产生特殊的风味^[19]。电子鼻依靠特异性传感器阵列对各类挥发性有机化合物进行广谱识别与信号响应,可精准捕捉美拉德反应生成的系列风味产物浓度变化,产生对

应的特征响应信号。样品中谷氨酸含量越高,美拉德反应底物越充足,热处理后生成的特征挥发性风味产物越丰富,电子鼻传感器检测到的响应信号强度越显著,最终使得谷氨酸含量与电子鼻气味响应信号呈现出显著的正相关关系。这提示,谷氨酸或其降解、反应产物(如美拉德反应产物)可能是构成海珠肉特征气味的重要物质基础之一。

综合化学与气味分析结果可知, XH 在最大程度上保留特征氨基酸的同时,保持了相对稳定的气味特征,体现出较好的综合品质;而腐败品经烘干后,伴随丙氨酸的富集,产生了强烈且持久的异味,推测可能与氨基酸在热处理下发生 Strecker 降解等美拉德反应,产生大量异味物质有关。微波处理在鲜品中展现出优异的气味稳定性,在腐败品中则表现出一定的异味抑制效果,但其成分流失问题需予以关注。

3.4 研究意义与展望

当前海珠肉加工规范缺失,品质评价手段单一。本研究的意义在于:第一,为解决海珠肉鲜/腐鉴别这一关键质控难题提供了稳定、可靠的综合性方法(HPLC+电子鼻);第二,为加工工艺的优选与优化(如确立鲜品烘干为较优工艺)提供了科学数据支撑;第三,为建立其系统性的质量评价标准奠定了方法学基础。未来工作可结合 GC-MS 等深入阐明挥发性物质组成,并优化工艺参数,构建更完善的“化学-气味-品质”关联模型,推动海珠肉资源的深度开发与价值提升。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 1021.
- [2] 广西海洋中药材标准 [S]. 2025: 26.
- [3] 广西壮族自治区卫生厅. 广西中药材标准第二册 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1996: 170-171.
- [4] 吴燕燕, 李来好, 陈培基, 等. 马氏珍珠贝肉营养液的研制及营养评价 [J]. 上海水产大学学报, 2000, 9(4): 313-318.
- [5] 曹占旺. 两个南珠养殖区马氏珠母贝养殖容量及环境状况的研究分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- [6] 高加龙, 章超桦, 刘书成, 等. 邻苯二甲酸柱前衍生高效液相色谱法测定马氏珠母贝中牛磺酸含量 [J]. 广东海洋大学学报, 2007, 27(1): 55-58.
- [7] 田淑琳, 周文红, 刘小玲, 等. 基于 GC-O-MS 和 ROAV 法的马氏珍珠贝挥发性风味成分及腥味特征物质分析 [J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 573-579.

- [8] 刁石强, 李来好, 陈培基, 等. 马氏珍珠贝肉风味食品开发研究 [J]. 湛江海洋大学学报, 1999, 19(2): 34-39.
- [9] 程介虹. 基于高光谱成像及电子鼻技术的冻藏猪肉品质检测方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2024.
- [10] 汤楚涵. 基于电子鼻和组学技术的小龙虾新鲜度研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [11] 吴靖娜, 路海霞, 刘智禹, 等. 用电子鼻和 SPME-GC-MS 分析鲍鱼熟制前后挥发性风味物质的变化 [J]. 大连海洋大学学报, 2016(4): 431-437.
- [12] 陈尊旭, 肖雯丽, 梁浩斌, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 分析不同干燥方式香蕉果干的风味品质差异及判别预测模型建立 [J]. 现代食品科技, 2026, 42(5): 322-335.
- [13] 付莉, 王小燕, 夏杰, 等. 基于电子鼻和 HS-GC-MS 技术分析不同炮制程度阿胶珠挥发性成分差异 [J]. 中草药, 2025, 56(22): 8102-8112.
- [14] Daszykowski M, Walczak B, Massart D L. Representative subset selection [J]. *Anal Chim Acta*, 2002, 468(1): 91-103.
- [15] Hollmann N, Müller S, Purucker L, *et al.* Accurate predictions on small data with a tabular foundation model [J]. *Nature*, 2025, 637(8045): 319-326.
- [16] Liu P L, Lu X M, Li N Y, *et al.* Effects and mechanism of free amino acids on browning in the processing of black garlic [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(10): 4670-4676.
- [17] Mottram D S. *Flavours and Fragrances: Chemistry, Bioprocessing and Sustainability* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 269-283.
- [18] 方帆. 大米蛋白肽美拉德反应中间体制备及肉香风味形成研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
- [19] 吴娜, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 动物源食品中脂质氧化降解产物检测的研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(10): 3042-3046.

[责任编辑 郑礼胜]