DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251107007
引用格式: 邱继善, 张今君, 金佳倩, 等. 基于矿物元素和有机成分融合指纹技术的杨梅产地溯源研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 307–315.
QIU JS, ZHANG JJ, JIN JQ, *et al*. Geographical origin traceability of *Myrica rubra* based on data fusion of mineral elements and organic components fingerprints [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 307–315. (in Chinese with English abstract).

基于矿物元素和有机成分融合指纹技术的杨梅产地溯源研究

邱继善, 张今君, 金佳倩, 程文聪, 夏慧丽*

(台州市食品药品检验研究院, 台州市特色农产品质量安全与品质提升重点实验室, 台州 318000)

摘 要: 目的 建立一种基于元素与有机成分融合指纹技术的分析方法, 实现对我国浙江、福建及云南等主要产区东魁杨梅的精准产地溯源。**方法** 采集浙江(台州、金华、温州)、福建和云南 5 个主产区的东魁杨梅样本, 综合应用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)、分光光度法、酸碱滴定法及离子色谱法, 系统测定其矿物元素含量及总花色苷、可滴定酸、糖酸比、固酸比等有机成分指标, 结合主成分分析(principal component analysis, PCA)、Fisher 判别分析和方差分析等化学计量学方法构建产地判别模型。**结果** 不同产区杨梅在 Al、Ti、Fe、Ni、Cu、Zn、Ga、Sr、Cd、Sn、Sb、Pb 等 12 种元素含量上具有明显差异, 其中云南产区在 Al、Ti、Fe、Cu、Zn、Ga、Cd、Sn 等元素含量上最高, 福建产区的 Ni、Cd、Pb 含量最低。有机成分中, 总花色苷、可滴定酸、糖酸比与固酸比亦呈现显著产地差异(P<0.05)。基于融合数据建立的判别模型, 在 PCA 图中 3 个产地的样本点区分明显, 云南与福建、浙江无重叠, 福建与浙江仅个别重叠。初始判别准确率达 97.3%, 交叉验证判别率为 94.7%, 显著优于单一成分分析方法。**结论** 元素与有机成分融合指纹技术结合化学计量学分析, 能够有效实现东魁杨梅的产地精准判别, 为农产品产地溯源与地理标志保护提供了可靠的多技术联用策略。

关键词: 杨梅; 产地溯源; 矿物元素; 有机成分; 化学计量学

Geographical origin traceability of *Myrica rubra* based on data fusion of mineral elements and organic components fingerprints

QIU Ji-Shan, ZHANG Jin-Jun, JIN Jia-Qian, CHENG Wen-Cong, XIA Hui-Li*

(*Taizhou Institute for Food and Drug Control*, *Taizhou Key Laboratory for Safety and Quality Enhancement of Characteristic Agricultural Products*, *Taizhou* 318000, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish an analytical method based on the fusion fingerprint technology of elements

收稿日期: 2025-11-07
基金项目: 浙江省市场监督管理局青年科技基金资助项目(QN2023454)
第一作者: 邱继善(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品质量安全检测和分析。E-mail: jishanqiu@126.com
***通信作者:** 夏慧丽(1978—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为食品质量安全检测和分析。E-mail: 64463403@qq.com

and organic components, achieve precise origin tracing of *Myrica rubra* ‘Dongkui’ from major production areas such as Zhejiang, Fujian and Yunnan in China. **Methods** *Myrica rubra* ‘Dongkui’ samples were collected from 5 representative regions in Zhejiang (Taizhou, Jinhua, Wenzhou), Fujian and Yunnan. Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), spectrophotometry, acid–base titration and ion chromatography were employed to determine mineral elements and organic components, including total anthocyanins, titratable acidity, sugar-to-acid ratio, and solid-to-acid ratio. Chemometric methods such as principal component analysis (PCA), Fisher discriminant analysis, and analysis of variance were applied to construct a discriminant model for origin identification. **Results** There were significant differences in the content of 12 kinds of elements including Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Sr, Cd, Sn, Sb and Pb among different production areas of *Myrica rubra*. Among them, the content of Al, Ti, Fe, Cu, Zn, Ga, Cd and Sn in the Yunnan production area were the highest, while the content of Ni, Cd and Pb in the Fujian production area were the lowest. In terms of organic components, total anthocyanins, titratable acid, sugar-acid ratio and solid-acid ratio also showed significant differences among production areas (P<0.05). Based on the discriminant model established using fused data, the sample points from the three origins were clearly distinguished in the PCA plot, with no overlap between Yunnan and Fujian/Zhejiang, and only occasional overlap between Fujian and Zhejiang. The initial discriminant accuracy reached 97.3%, and the cross-validation discriminant rate was 94.7%, which was significantly superior to single-component analysis methods. **Conclusion** The integration of fingerprint technology for elemental and organic components combined with chemometric analysis can effectively achieve the accurate discrimination of the origin of *Myrica rubra* ‘Dongkui’, providing a reliable multi-technique combined strategy for the origin traceability and geographical indication protection of agricultural products.

KEY WORDS: *Myrica rubra*; geographical origin traceability; mineral elements; organic components; chemometrics

0 引 言

杨梅(*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.)作为中国特色的亚热带水果, 其果实色泽鲜艳、风味独特, 且富含花色苷、多酚与黄酮类等生物活性物质, 具有显著的抗氧化与保健价值, 在国内外市场上备受青睐[1–2]。其中, 东魁杨梅(*Myrica rubra* ‘Dongkui’)作为果型特大、品质优异的代表性栽培品种, 在产业发展中占据重要地位。我国杨梅产业规模庞大, 已形成以浙江、福建、云南等省份为核心的主产区布局, 其中浙江省杨梅栽培面积与产量都稳居全国前列, 产业经济价值显著[3–4]。然而, 随着部分产地杨梅品牌影响力的日益增强, 其市场认可度和经济附加值显著提升, 不同产区之间的产品价值差异逐渐凸显[5]。在此背景下, 市场上出现了冒用高声誉产地标识, 以品质不符的产品冒充优质杨梅的现象。此类行为不仅扰乱正常的市场秩序, 侵害消费者权益, 也对地方特色产业的长期健康发展与区域品牌信誉构成了潜在威胁。现行的地理标志等行政管理手段在应对精细化造假时存在局限, 因此, 发展一种科学、精准的杨梅产地溯源技术, 已成为保障杨梅产业健康发展、维护各方利益的迫切需求。

基于产品内在属性的“自然指纹”溯源技术应运而生, 并成为国内外研究的热点。矿物元素在植物源性农产品中的含量与所处环境中的矿物元素相关性较强, 是一项较为有效的植物源性农产品产地溯源指标[6–7]。利用矿物元素分析进行溯源的报道涉及茶叶[8–9]、谷物[10–11]、蔬果[12–13]、蜂蜜[14–15]、酒类[16–17]、乳品[18]、肉类[19–20]等多种农产品及其制品。周秀雯等[21]利用榴莲的 8 种矿物元素指标构建模型, 其初始与交叉验证准确率均在 90%以上。ZHANG 等[22]则通过苹果中 14 种元素的差异进行判别, 基于反向传播人工神经网络模型的正确识别率为 82.7%。这些研究通过筛选关键指标元素并建立相应的统计模型, 其判别正确率在 82.7%~97%, 印证了该技术路径在农产品产地溯源中的可行性与有效性。

另一方面, 果实中的风味物质(如可溶性固形物、可滴定酸、挥发性成分)及次生代谢产物(如花色苷)等有机成分, 其合成与积累受气候、栽培管理等因素影响, 构成了独特的“品质指纹”。研究表明, 不同产地杨梅在挥发性风味物质组成及糖酸含量上已显示出显著差异, 这为有机成分溯源提供了依据。有研究基于挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)的化学类别进行线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA), 在交叉验证中实现 97.53%的咖啡地理溯源准确率[23]。斯中发等[24]通过分析瓜蒌籽油的挥发性风味成分建立产地判别模型, 识别率在 83.33%以上。PINALLI 等[25]的研究也印证了挥发性成分在

蘑菇的产地判别中的有效性, 正确判别率为 85.1%。

尽管上述技术各自取得了进展, 但现有溯源模型在面对杨梅产地复杂性时仍存在显著瓶颈。其一, 信息维度单一导致判别力受限。当前研究多采用单一类型的指纹信息, 或侧重于元素, 或侧重于少数几种风味物质。然而, 杨梅的产地特征是其生长环境(决定元素谱)与果实代谢(决定风味物质)共同作用的结果。单一模型仅能揭示一个侧面的信息, 对于生态气候条件相近、地理位置毗邻的产区, 其判别分辨率往往不足。其二, 缺乏对核心溯源指标的深度挖掘。现有研究多停留在确认不同产地间存在显著差异, 但未能系统性地从众多变量中筛选出对产地差异具有强指示意义的核心指标组合, 导致模型变量冗余、解释性弱, 且在实际应用中稳健性较差。因此, 突破单一技术路线的局限, 实现多源指纹信息的有效融合与核心指标的精准筛选, 是提升产地溯源精度与可靠性的关键所在。胡桂仙等[26]的研究表明, 结合稳定同位素与矿物元素的主成分-线性判别分析(principal component analysis-linear discriminant analysis, PCA-LDA)模型, 能有效鉴别杨梅的浙江与福建产地(准确率大于 90%), 但对其余省份产地的区分能力有限。赵丹[27]以库尔勒香梨为试验材料, 测定分析了外观品质指标, 营养品质指标, 矿物元素及其抗氧化活性等多项品质指标, 借助多元统计分析筛选出的核心指标建立模型, 判别效果达到了 95%。张雨婷[28]以浙江、贵州、重庆和四川这四地产红心猕猴桃为研究对象, 结合矿物元素与有机成分构建融合模型, 原始判别率达 95.8%, 交叉验证判别率为 92.5%。邱继善等[29]基于矿物元素与傅里叶变换红外光谱法(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)测定并结合化学计量学分析的方法, 对 5 个中国沿海地市的大黄鱼样本进行产地溯源研究, 其交叉检验整体判别准确率达 97.3%。这些研究共同表明, 融合多维检测信息的溯源方法在多种农产品中均表现出较高的判别效力, 其溯源准确率通常优于单一维度的分析技术。

不同产地东魁杨梅中矿物元素与有机物含量存在差异, 为基于多维数据融合的产地判别分析提供了依据。本研究通过结合矿物元素与有机成分分析技术, 并借助单因素方差分析、主成分分析等方法, 从众多变量中筛选出具有显著判别力的核心指标, 构建“融合指纹”判别模型。本研究旨在为实现杨梅产品标准化溯源、赋能食品产业高质量发展提供可靠的技术工具, 同时也为其他特色农产品的多模态信息融合溯源研究提供可借鉴的范式。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

共采集我国 3 个省份 5 大主产区 75 份成熟东魁杨梅。产地分别为浙江(台州、金华、温州), 福建和云南。15 批次浙江台州东魁杨梅(产地为浙江省台州市仙居县), 15 批次浙江金华东魁杨梅(产地为浙江省金华市兰溪市), 15 批次浙江温州东魁杨梅(产地为浙江省温州市瑞安市), 15 批次福建漳州东魁杨梅(产地为福建省漳州市), 15 批次云南红河东魁杨梅(产地为云南省红河哈尼族彝族自治州)。每批次东魁杨梅 25 个。本研究采集的东魁杨梅样品均处于商业成熟期, 其成熟度均一性通过以下标准确认: 果实表面呈现均匀、富有光泽的深红色至紫黑色。样品经去核、匀浆后, 分装于无菌冻存罐中, 随即保存于–80 ℃超低温冰箱, 待后续分析使用。

元素混合标准溶液(GSB04-1767-2004)、Se (GSB04-1751-2004)、Sc (GSB04-1750-2004)、Ge (GSB04-1728-2004)、In (GSB04-1731-2004)、Rh (GSB04-1745-2004)标准品(质量浓度均为 1000 μg/mL, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 葡萄糖、果糖(纯度 99.9%)、蔗糖(纯度 99.8%)(中国食品药品检定研究院); 硝酸(优级纯, 德国 Meker 公司); 氢氧化钠、氯化钾、盐酸、无水醋酸钠、冰醋酸、无水乙醇、维生素 C(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2　仪器与设备

Thermo ICAP RQ 电感耦合等离子体质谱仪、ICS-6000 离子色谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); UltraCLAVE 超级微波消解仪(意大利 Milestone 公司); Abbemat 300 阿贝折光仪(德国 Anton Paar 公司); 万通 905 电位滴定仪(瑞士 Metrohm 公司); UV-2600 紫外-可见分光光度计(日本 Shimadzu 公司); Milli-Q Advantage A10 超纯水机(美国 Millipore 公司); MS204S 分析天平(精度 0.1 mg, 瑞士 Mettler Toledo 公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　样品前处理

新鲜的杨梅去核, 匀浆后经 400 目滤布过滤, 杨梅果汁于–80 ℃超低温冰箱存储备用。

1.3.2　矿质元素测定

参照 GB 5009.268—2025《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS), 测定杨梅矿物元素质量分数。准确称取匀浆后的杨梅样品 0.5 g(精确到 0.0001 g), 放入聚四氟乙烯消解罐, 加入 1.7 mL 硝酸和 1.3 mL 一级水, 使用超级微波消解。消解程序: a. 爬坡温度 80 ℃, 压力 100 bar, 爬坡时间 5 min; b. 爬坡温度 130 ℃, 压力 100 bar, 爬坡时间 8 min; c. 爬坡温度 180 ℃, 压力 160 bar, 爬坡时间 5 min; d. 爬坡温度 220 ℃, 压力 160 bar, 爬坡时间 7 min; e. 温度 220 ℃, 压力 160 bar, 保持时间 15 min; f. 20 min 内由 220 ℃降至室温。冷却后的消解液用一级水定容到 25 mL, 供 ICP-MS 检测。

ICP-MS 元素分析过程中, 在线加入 1 μg/mL 的 Sc、Ge、Rh 和 In 混合内标溶液。射频功率 1500 W, 载气流量 0.80 L/min, 样品提升速率 0.3 r/s, 驻留时间 0.02 s, 扫描次数 50 次, 测定次数 3 次。

1.3.3 总花色苷含量测定

总花色苷含量的测定采用 T/ZNZ 320—2025《植物源性食用农产品中总花色苷含量的测定 分光光度法》。称取杨梅试样 4.0 g(精确至 0.0001 g)于离心管中, 加入提取溶剂 40 mL 充分振荡混匀, 3500 r/min 离心 15 min, 重复提取 2 次, 合并上层提取液转移至 100 mL 容量瓶, 定容至刻度, 得到试样花色苷提取液, 待测。取 2 mL 提取液 2 份, 分别用 pH 1.0 和 pH 4.5 缓冲溶液定容至 10 mL, 静置 10 min, 分别记为比色液 A 和比色液 B。使用分光光度计在最大吸收峰波长下(516 nm)测定比色液 A 和比色液 B 的吸光度值 E_{Amax}、E_{Bmax}。然后测定比色液 A 和比色液 B 在 700 nm 处的吸光度值 E_{A700}、E_{B700}。

总花色苷(以矢车菊-3-葡萄糖苷计)含量 ω, 计算按式(1)进行。

$$\omega=\frac{\Delta E\times 449.2\times F\times V\times 100}{\varepsilon\times l\times m} \tag{1}$$

式中: ω 为试样中花色苷含量, mg/100 g; ΔE 为吸光度值差: $(E_{\mathrm{A516}}-E_{\mathrm{A700}})-(E_{\mathrm{B516}}-E_{\mathrm{B700}})$; 449.2 为矢车菊-3-葡萄糖苷的相对分子质量, g/mol; V 为最后定容体积, mL; F 为样品稀释倍数; m 为样品质量, g; ε 为矢车菊-3-葡萄糖苷的摩尔消光系数 26900, L/mol/cm; l 为比色皿的宽度, cm; E_{A516} 为比色液 A 在 516 nm 波长的吸光度值; E_{B516} 为比色液 B 在 516 nm 波长的吸光度值; E_{A700} 为比色液 A 在 700 nm 波长的吸光度值; E_{B700} 为比色液 B 在 700 nm 波长的吸光度值; 100 为换算系数。

1.3.4 可滴定酸含量测定

可滴定酸含量使用电位滴定法检测, 取 5 g 杨梅果汁样品, 用 0.03 mol/L 的氢氧化钠溶液滴定至终点 pH=8.2, 根据式(2)计算可滴定酸含量。

$$\mathrm{TA}/\%=100\times C_{\mathrm{NaOH}}\times V_{\mathrm{NaOH}}\times K/W\times 100\% \tag{2}$$

式中: C_{NaOH} 为氢氧化钠溶液浓度(0.03 mol/L); V_{NaOH} 为滴定所消耗的氢氧化纳溶液体积, mL; W 为所测杨梅样品质量, g; K 为柠檬酸折算系数, 0.064。

1.3.5 总糖含量测定

可溶性糖采用离子色谱交换法进行测定。分别量取 0.5 mL 杨梅果汁, 用超纯水稀释 5000 倍, 分别用 0.22 μm 微孔滤膜过滤稀释后溶液, 上机检测。总糖含量为葡萄糖、果糖和蔗糖含量之和。

1.3.6 可溶性固形物含量测定

可溶性固形物采用阿贝折光仪进行的测定。测量时用 1 mL 一次性塑料滴管取样品, 滴 2 滴样品于棱镜上进行测量(25 ℃)。每次测量后都用蒸馏水清洗, 每个样品平行测定 3 次。

1.4 数据处理

每个杨梅产地取 15 批次样品, 所有数据均基于 3 次独立平行实验测定, 以平均值±标准偏差表征, 以保证结果的重复性与可靠性, 为后续统计推断提供支持。采用标准正态变量变换(standard normal variate, SNV)对矿质元素数据集及有机成分实施标准化预处理。在化学计量学建模阶段, 采用 IBM SPPS 22 进行数据统计, 单因素方差分析, PCA 和 Fisher 判别分析, 最终通过 Origin 2021 完成实验数据的可视化呈现, 确保统计结果的科学表达。

2 结果与分析

2.1 矿物元素质量分数差异分析

杨梅样品中矿物元素质量分数见表 1。对 5 个产地杨梅样本间的矿物元素质量分数进行单因素方差分析, 如表 1 所示。Al、Ga、Sn 质量分数, 云南产地杨梅与其余 4 个产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Ti 质量分数, 浙江金华产地杨梅与浙江温州和云南产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Fe 质量分数, 福建、浙江仙居、浙江金华产地杨梅与云南、浙江温州产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Ni 质量分数, 浙江温州产地杨梅与福建、浙江仙居、浙江金华产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Cu 质量分数, 云南产地杨梅与福建、浙江仙居产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Zn 质量分数, 福建、云南产地杨梅与浙江仙居、浙江金华产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Sr 质量分数, 浙江金华产地杨梅与福建、云南、浙江温州产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Sr 质量分数, 浙江金华产地杨梅与福建、云南、浙江温州产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Sb 质量分数, 温州产地杨梅与其余 4 个产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Cd 质量分数, 云南产地杨梅与福建、浙江温州产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Sb 质量分数, 浙江温州产地杨梅与其余 4 个产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05); Pb 质量分数, 云南产地杨梅与福建、浙江仙居、浙江金华产地杨梅存在显著性差异性(P<0.05)。不存在显著性差异(P>0.05)的矿物元素有 Cr、Mn、Co、As、Se 和 Ba。对杨梅中有显著差异性的矿物元素比较分析发现: 福建杨梅中的 Ni、Cd 和 Pb 质量分数最低, 分别为(109.84±59.09)、(0.73±0.34)和(0.43±0.62) μg/kg, 云南杨梅中的 Al、Ti、Fe、Cu、Zn、Ga、Cd、Sn 质量分数最高, 分别为(1568.79±1072.21)、(141.49±46.65)、(2041.39±732.49)、(118.73±74.61)、(1114.54±272.88)、(1.10±0.57)、(2.61±1.49)、(2.60±1.80) μg/kg; 浙江仙居杨梅中的 Cu 质量分数最低, 为(54.31±25.68) μg/kg; 浙江金华杨梅中的 Sr 质量分数最高, 为(57.17±42.67) μg/kg, Al、Ti、Fe、Ga、Sn 元素质量分数最低, 分别为(204.37±167.45)、(65.36±8.60)、(993.89±99.71)、(0.15±0.15)、

表 1　不同产地杨梅中 18 种矿物元素的质量分数(n=15, μg/kg)

Table 1　Content of 18 kinds of mineral elements in *Myrica rubra* from different origins (n=15, μg/kg)

元素	福建	云南	浙江仙居	浙江金华	浙江温州
Al	751.01±398.76^{a}	1568.79±1072.21^{b}	669.00±422.49^{a}	204.37±167.45^{a}	603.36±440.01^{a}
Ti	77.00±19.76^{ab}	141.49±46.65^{b}	96.16±23.12^{ab}	65.36±8.60^{a}	140.80±137.32^{b}
Cr	1.99±1.28	4.37±1.81	4.56±3.15	5.11±8.12	6.01±4.77
Mn	5603.61±2156.10	9036.25±11726.56	5020.93±4067.94	4019.59±536.91	3766.28±479.75
Fe	1231.14±230.61^{a}	2041.39±732.49^{b}	1306.8±360.9^{a}	993.89±99.71^{a}	1825.28±792.62^{b}
Co	8.62±5.03	6.85±3.14	8.16±4.25	9.00±8.74	6.73±3.17
Ni	109.84±59.09^{a}	285.37±78.17^{ab}	140.31±50.07^{a}	150.46±93.82^{a}	336.67±374.00^{b}
Cu	58.00±22.03^{a}	118.73±74.61^{b}	54.31±25.68^{a}	71.88±52.51^{ab}	86.89±21.15^{ab}
Zn	971.47±291.73^{b}	1114.54±272.88^{b}	731.95±199.31^{a}	693.95±37.82^{a}	924.86±184.24^{ab}
Ga	0.46±0.37^{a}	1.10±0.57^{b}	0.44±0.24^{a}	0.15±0.15^{a}	0.43±0.12^{a}
As	0.07±0.13	1.65±0.82	0.63±1.25	13.63±21.91	4.38±9.80
Se	2.85±2.66	0.48±0.40	0.35±0.32	0.33±0.38	0.71±0.31
Sr	17.55±16.79^{a}	24.35±19.49^{a}	32.18±15.33^{ab}	57.17±42.67^{b}	16.66±5.56^{a}
Cd	0.73±0.34^{a}	2.61±1.49^{b}	1.77±1.57^{ab}	1.11±0.55^{ab}	0.80±0.23^{a}
Sn	0.41±0.41^{a}	2.60±1.80^{b}	0.63±0.87^{a}	0.05±0.15^{a}	0.18±0.37^{a}
Sb	0.91±0.58^{a}	0.00±0.00^{a}	0.00±0.00^{a}	0.35±0.60^{a}	3.05±4.68^{b}
Ba	20.25±19.70	40.38±20.53	122.87±251.81	34.65±12.94	24.55±6.86
Pb	0.43±0.62^{a}	2.76±1.26^{b}	1.72±2.76^{a}	1.28±0.93^{a}	1.83±1.46^{ab}

注: 同行不同上标字母表示组间差异显著(P<0.05)。表 2 同。

(0.05±0.15) μg/kg。浙江温州杨梅中的 Ni、Sb 质量分数最高, 分别为(336.67±374.00)、(3.05±4.68) μg/kg 且 Sr 元素的质量分数最低, 为(16.66±5.56) μg/kg。由此可得, 不同产地杨梅的矿物元素组成有各自特征, 具体表现为福建杨梅的 Ni、Cd、Pb 等金属含量更低, 而云南杨梅则富集了 Al、Ti、Fe、Cu、Zn、Ga、Cd、Sn 等矿物元素。

2.2　基于矿物元素的主成分分析

PCA 是一种常用的线性降维方法, 其核心思想是通过正交变换将一组可能存在相关性的原始变量, 转换为少数几个互不相关的主成分。这些主成分按方差贡献率大小依次排列, 其中第一主成分承载的方差最大, 后续的成分依次递减[30]。该方法能够在保留数据主要特征的前提下, 有效降低数据维度, 简化分析复杂度, 并便于数据的结构可视化。本研究应用 PCA 对杨梅样本的矿物元素数据进行处理, 旨在将高维的元素信息投影至低维空间, 以直观呈现其基于产地的分类规律, 并依据元素载荷筛选出用于产地判别的重要特征指标。对 5 个产地杨梅样品中矿物元素质量分数差异显著的 Al、Ti、Fe、Ni、Cu、Zn、Ga、Sr、Cd、Sb、Pb、Sn 进行取样适切性量数检验(kaiser-meyer-olkin measure of sampling adequacy, KMO), 检验值 0.531 (KMO>0.500), 说明各元素间的相关性显著, PCA 有意义。选取上述 12 种矿物元素作为变量进行主成分分析(图 1)。

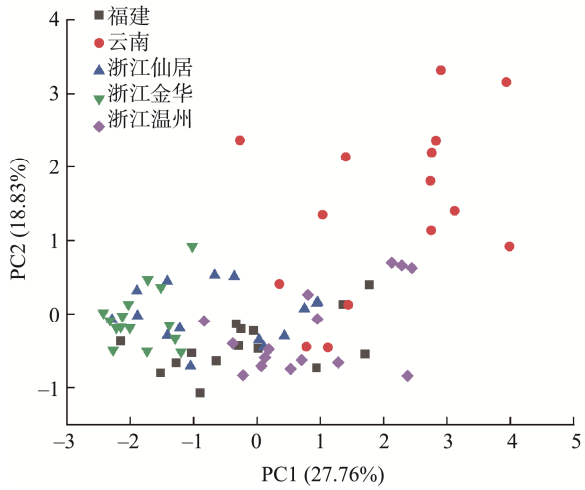


图 1　不同产地杨梅 PCA 中 PC1、PC2 得分散点图(n=15)

Fig.1　Dispersion point plots of PC1 and PC2 in the PCA of *Myrica rubra* from different origins (n=15)

主成分 1 占 27.76%, 主成分 2 占 18.83%。PCA 结果显示, 云南与金华产地的东魁杨梅样本在散点图中分布区隔明确, 表明基于矿物元素组成的 PCA 模型能够有效区分这两个产地。然而, 其他部分产地的样本点存在相互重叠, 仅凭矿物元素信息无法完全区分。该现象的产生可能与以下因素有关: 首先, 前两个主成分的累计方差贡献率为 46.59%, 这意味着当前 PCA 模型仅捕获了原始数据中不足一半的

变异信息，大量可能对产地判别有效的变异存在于未被可视化的更高主成分中，直接导致部分产地在二维投影上难以分辨。其次，部分产地可能具有相似的地质背景与土壤环境，致使杨梅吸收的矿物元素谱系趋同。此外，跨产区同质化的农业管理措施(如施肥方案)也可能削弱了产地间的固有元素差异。

2.3 有机物含量差异分析

不同产地东魁杨梅的主要有机品质指标测定结果如表 2 所示。由表 2 可知，福建、云南和浙江产地差异对杨梅果实的总花色苷、可滴定酸含量、糖酸比及固酸比均具有显著影响($P<0.05$)，而对总糖与可溶性固形物含量的影响未达显著水平($P>0.05$)。总花色苷含量以云南(10.91 mg/100 g)与浙江温州(11.69 mg/100 g)产地较高，并显著高于福建产地(6.98 mg/100 g)；福建产杨梅的可滴定酸含量最高(1.43%)，高于云南杨梅(0.93%)；而云南产杨梅的糖酸比(12.33)与固酸比(12.86)均为所有产地中最高，表明其口感可能更偏向甜润。相比之下，浙江金华杨梅在各项指标上多处于中间水平。综上，有机物指标中，以糖酸比和固酸比为代表的滋味平衡指标以及总花色苷这一外观与营养指标，对于区分不同产地杨梅具有更重要的指示意义。

表 2 不同产地杨梅中总花色苷、可滴定酸、总糖、可溶性固形物含量(n=15)

Table 2 Content of total anthocyanins, titratable acidity, total sugar and total soluble solids in *Myrica rubra* from different origins (n=15)

指标	福建	云南	浙江仙居	浙江金华	浙江温州
总花色苷/(mg/100 g)	6.98±1.09^{a}	10.91±2.49^{b}	8.60±3.63^{ab}	8.78±2.13^{ab}	11.69±2.42^{b}
可滴定酸含量/%	1.43±0.13^{c}	0.93±0.17^{a}	1.12±0.17^{ab}	1.22±0.20^{b}	1.11±0.15^{ab}
总糖含量/%	9.90±1.21	11.21±1.02	10.27±1.16	10.37±0.46	10.69±1.37
可溶性固形物含量/%	11.21±1.82	11.68±1.05	12.50±2.49	10.80±0.73	11.38±1.42
糖酸比	6.94±0.88^{a}	12.33±2.04^{c}	9.35±1.76^{b}	8.70±1.63^{b}	9.85±2.51^{b}
固酸比	7.84±1.14^{a}	12.86±2.20^{b}	11.39±2.86^{bc}	9.07±1.80^{ab}	10.49±2.70^{abc}

2.4 元素-有机物质数据融合的主成分分析

鉴于前述分析表明，单一依赖矿物元素特征对杨梅产地，特别是地理邻近区域的鉴别能力有限，本研究将 75 批次杨梅中所测得的多种矿物元素含量与有机品质指标进行融合，构建了“矿物元素-有机物质”融合的数据矩阵，以期通过更全面的多维度化学指纹信息提升判别模型的准确性。该融合数据矩阵由筛选出的关键指标组成，这些指标在产地间差异显著，且在主成分上具有较高载荷，具体包括 Al、Ti、Fe、Zn、Ga、Cd、Sb、Pb、Sn 等矿质元素，以及总花色苷、可滴定酸、糖酸比等有机参数。为验证融合数据对更大地理尺度产区的判别能力，本研究将数据特征较为接近的浙江仙居、金华与温州 3 个产地的样本归集为“浙江”产地。在此基础上，再次应用 PCA 对矿物元素-有机融合数据进行处理，以期在更为宏观的产区层面上(福建、云南、浙江)实现经济、快速、有效的区分。

在 PCA 之前对新的数据矩阵进行 KMO 检验，检验值 0.530 (KMO>0.500)，说明数据间的相关性显著，PCA 有意义。PCA 结果如图 2 所示，主成分 1 占 34.68%，主成分 2 占 20.22%，前两个主成分累计贡献率占 54.90%，说明所提取的前两个主成分因子能够代表元素-有机物质融合数据模型的综合信息。3 大产地的东魁杨梅彼此在主成分 1 和主成分 2 方向上区分较为明显。云南杨梅与福建、浙江产地杨梅没有区间重叠，福建与浙江仅个别重叠，说明基于元素-有机物质融合数据模型的东魁杨梅产地溯源有较高的可行性。

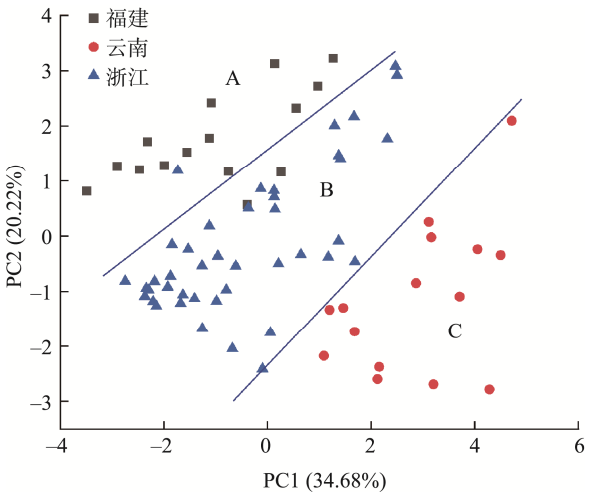


图 2 元素-有机物质联合数据 PCA

Fig.2 PCA of elemental and organic combined data

2.5 Fisher 判别分析

作为两种原理迥异的降维技术，PCA 与 Fisher 判别分析各有侧重：PCA 旨在捕获数据最大方差方向，而 Fisher 判别分析属于监督学习算法，通过最大化类间差异、最小化类内差异来获得最优分类投影。目前，Fisher 判别分析已在大米、乳制品、大黄鱼及梭子蟹等产品的产地溯源中得

到广泛应用, 其出色的区分效能已获实证研究充分验证。为深入探讨 Al、Ti、Fe、Zn、Ga、Cd、Sb、Pb、Sn 与总花色苷、可滴定酸、糖酸比数据的融合矩阵在东魁杨梅产地鉴别中的准确率, 本研究选取福建、云南和浙江这 3 个省份的东魁杨梅进行 Fisher 判别分析。从云南(15 批次)和福建(15 批次)的东魁杨梅中各随机选取 10 批样本, 浙江 45 批次中选取 30 批次样本, 构成训练集用于构建判别模型, 剩余 25 个样本作为独立测试集, 仅用于验证所构建判别模型的预测性能。针对 3 个不同省份东魁杨梅的判别函数计算如式(3)~(5)。

$$Y_{福建}= 2.951Al+3.351Ti-8.381Fe-0.445Zn-2.209Cd+1.677Sn-30.4Sb+5.456Ba-2.028Ga-5.701X_1-1.695X_2-1.633X_3-13.230 \quad (3)$$

$$Y_{云南}= 1.595Al+7.2Ti-2.266Fe+1.007Zn+3.550Cd-7.411Sn-24.498Sb+1.479Ba+4.161Ga+12.745X_1-5.579X_2+2.357X_3-13.513 \quad (4)$$

$$Y_{浙江}= -4.197Al-1.812Ti+1.959Fe+3.107Zn+0.831Cd+0.739Sn-23.062Sb-1.534Ba+2.218Ga-2.111X_1+0.262X_2-5.739X_3-5.249 \quad (5)$$

式中: 元素符号(Al、Ti、Fe、Zn、Ga、Cd、Sb、Pb、Sn)表示东魁杨梅样品中对应元素的质量分数; X_1 为总花色苷含量, mg/100 g; X_2 为可滴定酸含量, %; X_3 为糖酸比。

将测试集杨梅样品的元素质量分数与有机物质含量作为输入变量, 代入前述 3 个判别函数并分别计算其得分。最终, 依据函数得分最高的原则, 将样本判定为对应产地的归属。各产地杨梅整体预判准确率为 93.3%。为检验判别式的可靠性, 采用“留一法”交叉验证进行检验, 结果见表 3。初始分类结果显示, 整体判别率为 97.3%, 其中福建东魁杨梅准确判别率为 93.3%, 云南省东魁杨梅准确判别率为 100.0%, 浙江东魁杨梅准确判别率为 97.8%。“留一法”交叉验证结果显示, 整体判别率为 94.7%, 具体为福建东魁杨梅准确判别率为 86.7%, 云南省东魁杨梅准确判别率为 100.0%, 浙江东魁杨梅准确判别率为 95.6%。结果表明, 所建立的判别模型可对云南、福建和浙江 3 大产地的东魁杨梅进行正确分类, 效果较好。

表 3　杨梅 Fisher 判别分析分类结果

Table 3　Classification results of Fisher discriminant analysis of *Myrica rubra*

验证方法	参数	产地	预测组成员信息			总计
			福建	云南	浙江	
初始	计数	福建	14	0	1	15
		云南	0	15	0	15
		浙江	0	1	44	45
	判别率/%	福建	93.3	0.0	6.7	93.3
		云南	0.0	100.0	0.0	100.0
		浙江	0.0	2.2	97.8	97.8
交叉验证	计数	福建	13	0	2	15
		云南	0	15	0	15
		浙江	1	1	43	45
	判别率/%	福建	86.7	0.0	13.3	86.7
		云南	0.0	100.0	0.0	100.0
		浙江	2.2	2.2	95.6	95.6

3　讨　论

本研究通过融合矿物元素与有机成分, 构建了东魁杨梅产地的有效判别模型。模型成功的关键在于两类指标溯源机制的互补性: 矿物元素(如 Al、Ti、Fe 等)谱系主要反映了产地的地质背景与土壤环境, 构成了稳定的“地质指纹”[31]; 而有机成分(如总花色苷、糖酸比)的积累则更多地受气候条件与栽培管理调控, 形成了独特的“代谢指纹”[32]。研究结果证实, 单一依赖矿物元素信息(PCA 累计贡献率 46.59%)难以完全区分所有产地, 这与猕猴桃[33]、葡萄酒[34]等研究中的发现一致, 凸显了单一维度溯源技术的局限性。而将二者融合构建的模型(交叉验证准确率 94.7%)则显著提升了判别能力, 验证了多源信息融合策略在应对复杂产地溯源问题上的优越性[35]。与先前主要依赖单一类型指标的研究相比, 本研究系统整合矿物元素与品质有机成分, 为杨梅溯源提供了创新性的技术方案。通过严格的“差异显著性筛选”($P<0.05$)与“模型贡献度筛选”(PCA 高载荷值)相结合的两步法, 本研究确定了用于建模的核心指标组合(如 Al、Fe、Zn、Cd、总花色苷、糖酸比等)。该筛选逻辑不仅简化了模型、增强了可解释性, 也为未来开发针对性的快速检测技术奠定了明确的靶标基础。

模型整体判别性能优异, 但仍存在将个别福建产地杨梅误判为浙江产地的个案。此现象除与两省地理邻近有关外, 更深层的原因可能在于: 数据表明, Al、Ga 和 Sn 这

3 个关键元素在福建与浙江产区间未呈现显著差异(P>0.05), 这或许反映了两省部分产区具有相似的地球化学背景或接受了同质化的矿质养分管理, 导致其“地质指纹”部分趋同。此外, 本研究在每个主产省选取一个最具代表性的核心县市进行采样, 旨在获取该省产区的典型化学特征。虽然同一省内不同县域的样本(如浙江的仙居、金华、温州)在初步分析中已显示出一定的分布差异, 但当前以省域为目标的模型能够有效整合并识别出更大的省际差异。这同时也提示, 省内微环境变异是未来构建更精细尺度(如县级)判别模型时需要重点考察的因素。

在模型验证方面, 本研究采用了训练集-测试集独立验证与“留一法”交叉验证两种稳健的策略。测试集独立判别准确率达 93.3%, 交叉验证准确率达 94.7%, 充分表明所建模型具有良好的泛化能力与稳定性, 并非过拟合于训练数据。然而, 本研究也明确指出, 本模型目前适用于云南、福建及浙江(合并)这三大核心产区的判别。其他未参与建模产区的拓展适用性(跨产区适用性), 有待通过收集外部独立样本库进行进一步验证与校准, 这将是模型走向广泛应用的关键步骤。本研究为杨梅地理标志保护提供了客观、量化的技术工具, 未来研究可着眼于扩大样本库并探索快速检测技术, 以进一步提升模型的实用性与普适性。

4 结 论

本研究通过整合矿物元素与有机成分分析技术, 成功构建了多维数据融合的东魁杨梅产地判别模型, 首次实现了对云南、福建和浙江 3 大主产区的高精度判别。研究证实, 杨梅中 12 种矿物元素(Al、Ti、Fe、Ni、Cu、Zn、Ga、Sr、Cd、Sn、Sb 和 Pb)与总花色苷、可滴定酸、糖酸比等有机成分共同构成了表征产地特征的“化学指纹”, 其中矿物元素主要反映产地的地质背景, 而有机成分则更多体现气候与代谢信息, 二者的互补性是实现高精度溯源的基础。通过主成分分析(累计贡献率 54.90%)与 Fisher 判别分析(交叉验证准确率 94.7%)验证, 该融合模型的判别性能显著优于单一溯源技术。本研究建立的方法体系, 为杨梅地理标志认证与市场监管提供了可靠的技术支撑, 对规范市场秩序、保障产业健康发展具有重要实践价值, 后续研究可进一步扩大样本范围以增强模型的普适性。

参考文献

[1] 胡子聪, 雷琳, 周晨光, 等. 杨梅的营养功效及其应用研究进展[J]. 果树学报, 2023, 40(9): 1966–1979.
HU ZC, LEI L, ZHOU CG, *et al*. Research progress in nutritional benefit and application of Chinese bayberry fruit [J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(9): 1966–1979.

[2] 赵双, 黄颖宏, 郤红丽. 30 个杨梅品种果实品质分析与综合评价[J]. 果树学报, 2024, 41(3): 392–402.
ZHAO S, HUANG YH, QI HL. Fruit quality analysis and comprehensive evaluation of 30 bayberry varieties [J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(3): 392–402.

[3] 陈方永. 我国杨梅研究现状与发展趋势[J]. 中国南方果树, 2012, 41(5): 31–36.
CHEN FY. Current research and future development of Chinese bayberry in China [J]. South China Fruits, 2012, 41(5): 31–36.

[4] 张建斌, 应铮峥. 仙居县杨梅产业绿色化发展主要做法及成效[J]. 现代农业科技, 2020(22): 214–216.
ZHANG JB, YING ZZ. Main practices and achievements of the green development of *Myrica rubra* industry in Xianju County [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(22): 214–216.

[5] 泮燕媚, 管悦. 南方三省杨梅中甜蜜素和农药残留风险监测分析[J]. 中国南方果树, 2023, 52(4): 68–74.
PAN YM, GUAN Y. Risk monitoring analysis of sodium cyclamate and pesticides residues in bayberries from three provinces of southern China [J]. South China Fruits, 2023, 52(4): 68–74.

[6] 王剑, 杨洋, 王曦. 农产品产地溯源技术的研究进展[J]. 现代食品, 2025(5): 103–107.
WANG J, YANG Y, WANG X. Research progress in methods for tracing the geographical origin of agricultural products [J]. Modern Food, 2025(5): 103–107.

[7] DANEZIS GP, GEORGIOU CA. Elemental metabolomics: Food elemental assessment could reveal geographical origin [J]. Current Opinion in Food Science, 2022, 44: 100812.

[8] 黄锐敏, 李星, 何肖云, 等. 基于矿物元素指纹图谱技术的武夷岩茶产地溯源研究[J]. 福建农业科技, 2025, 56(6): 17–25.
HUANG RM, LI X, HE XY, *et al*. Study on the origin traceability of Wuyi rock tea based on mineral element fingerprinting technology [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2025, 56(6): 17–25.

[9] ZHANG J, YANG R, LI YC, *et al*. The role of soil mineral multi-elements in improving the geographical origin discrimination of tea (*Camellia sinensis*) [J]. Biological Trace Element Research, 2021, 199(11): 4330–4341.

[10] SHENG ML, LI CL, ZHANG WX, *et al*. Predicting the geospatial distribution of Chinese *Oryza sativa* nutrient elementin regional scale for the geographical origin-A case study on the traceability of *Japonica Oryza sativa* [J]. Food Frontiers, 2024, 5(1): 1–11

[11] ZHI L, YUAN W, YUDI H, *et al*. Multi-stable isotope and multi-element origin traceability of rice from the main producing regions in Asia: A long-term investigation during 2017—2020 [J]. Food Chemistry, 2023, 412: 135417.

[12] WANG S, CHEN P, LIU Y, *et al*. Geographical origin traceability of sweet cherry (*Prunus avium* L. Moench) in China using stable isotope and multi-element analysis with multivariate modeling [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101477.

[13] ZENG TT, FU TT, HUANG YC, *et al*. Preliminary study on the geographical origin of Chinese ‘Cuiguan’ pears using integrated stable isotope and multi-element analyses [J]. Heliyon, 2024, 10(17): 1–9.

[14] MARA A, MIGLIORINI M, CIULU M, *et al*. Elemental fingerprinting combined with machine learning techniques as a powerful tool for geographical discrimination of honeys from nearby regions [J]. Foods, 2024, 13(2): 243.

[15] TUAN NN, KHANH NK, BUI H, *et al*. Authentication of honey origin by

stable isotope method (δ13C) based on combination of elemental analysis and liquid chromatography hyphenated with isotope ratio mass spectrometry (EA-LC/IRMS) [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 143: 107642.

[16] SU Y, ZHANG J, WANG L, *et al*. Assessing geographical origin of Diqing wines based on their elemental and isotopic profiles [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 125: 105671.

[17] GAO F, HAO X, ZENG G, *et al*. Identification of the geographical origin of Ecolly (*Vitis vinifera* L.) grapes and wines from different Chinese regions by ICP-MS coupled with chemometrics [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 105: 104248.

[18] CARDIN M, CARDAZZO B, MOUNIER J, *et al*. Authenticity and typicity of traditional cheeses: A review on geographical origin authentication methods [J]. Foods, 2022, 11(21): 3379.

[19] BAI Y, LIU H, ZHANG B, *et al*. Research progress on traceability and authenticity of beef [J]. Food Reviews International, 2023, 39(3): 1645–1665.

[20] AN JM, HUR SH, KIM H, *et al*. Determination of the geographical origin of chicken (breast and drumstick) using ICP-OES and ICP-MS: Chemometric analysis [J]. Food Chemistry, 2024, 437: 137836.

[21] 周秀雯, 吴浩, 陈海泉, 等. 基于矿物元素指纹差异的榴莲产地甄别[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 255–262.
ZHOU XW, WU H, CHEN HQ, *et al*. Discrimination of durian from different geographical origins based on mineral element fingerprint characteristics [J]. Food Science, 2021, 42(14): 255–262.

[22] ZHANG J, NIE J, KUANG L, *et al*. Geographical origin of Chinese apples based on multiple element analysis [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(14): 6182–6190.

[23] DE VA, BALIVO A, SARGHINI F. Volatile compound analysis to authenticate the geographical origin of arabica and robusta espresso coffee [J]. Applied Sciences, 2023, 13(9): 5615.

[24] 斯中发, 王月, 黄金晶, 等. 基于气味指纹信息的瓜蒌籽油产地识别[J]. 食品工业, 2020, 41(2): 181–184.
SI ZF, WANG Y, HUANG JJ, *et al*. Recognition of production areas for trichosanthes kirilowii oils based on odor fingerprint information [J]. The Food Industry, 2020, 41(2): 181–184.

[25] PINALLI R, GHIDINI S, DALCANALE E, *et al*. Differentiation of mushroom from three different geographic origins by artificial olfactory system (AOS) [J]. Annali della Facoltà di Medicina Veterinaria di Parma, 2006, 26: 183–192.

[26] 胡桂仙, 邵圣枝, 张永志, 等. 杨梅中稳定同位素和多元素特征在其产地溯源中的应用[J]. 核农学报, 2017, 31(12): 2450–2459.
HU GX, SHAO SZ, ZHANG YZ, *et al*. Characterization of stable isotope and multi-elements in *myrica rubra* for its traceability of geographic origin [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(12): 2450–2459.

[27] 赵丹. 新疆库尔勒香梨品质评价及产地鉴别研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023.
ZHAO D. Quality evaluation and geographical origin identification of xinjiang korla fragrant pear [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023.

[28] 张雨婷. 基于矿物元素和有机成分指纹分析技术的红心猕猴桃产地溯源研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2025.
ZHANG YT. Geographical origin traceability of red heart kiwifruit based on mineral elements and organic component fingerprint analysis techniques [D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2025.

[29] 邱继善, 卢亭, 周俊, 等. 基于元素和 FTIR 融合指纹图谱技术的大黄鱼产地溯源研究[J/OL]. 食品工业科技, 1-14. [2025-10-29]. https://doi.org/10.13386/j. issn1002-0306.2025040101
QIU JS, LU T, ZHOU J, *et al*. Integrated elemental profiling and fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) fingerprinting for geographical origin discrimination of *Larimichthys crocea* with chemometrics [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-14. [2025-10-29]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040101

[30] QIAN Y, ZHANG L, SUN Y, *et al*. Differentiation and classification of Chinese Luzhou-flavor liquors with different geographical origins based on fingerprint and chemometric analysis [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(5): 1861–1877.

[31] ZENG GH, HAO XY, WANG H, *et al*. Effects of geographical origin, vintage, and soil on stable isotopes and mineral elements in Ecolly grape berries for traceability [J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137646.

[32] SONI K, FREW R, KEBEDE B. Multi-source data fusion for soybean origin traceability: Stable isotopes, elemental composition, & volatile organic compounds [J]. Food Chemistry, 2025: 144497. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2025.144497

[33] WANG HH, CHANG C, JING T, *et al*. Geographical origin traceability of kiwifruit products using stable isotope and multi-element analysis with multivariate modeling: Feature extraction, selection of model and variable, and discrimination [J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102231.

[34] RAPA M, FERRANTE M, RODUSHKIN I, *et al*. Venetian protected designation of origin wines traceability: Multi-elemental, isotopes and chemometric analysis [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134771.

[35] LI Y, ZHAO W, QIAN M, *et al*. Recent advances in the authentication (geographical origins, varieties and aging time) of tangerine peel (*Citri reticulatae pericarpium*): A review [J]. Food Chemistry, 2024, 442: 138531.

(责任编辑: 韩晓红　蔡世佳)