

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250102001

引用格式: 王珊. 国内大米产地溯源与真实性鉴定研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 200–206.

WANG S. Research progress on the origin tracing and authenticity identification of domestic *Oryza sativa* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 200–206. (in Chinese with English abstract).

# 国内大米产地溯源与真实性鉴定研究进展

王 珊\*

(新疆生产建设兵团质量技术评价中心, 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:** 粮食产地溯源和真实性鉴定问题越来越受到消费者的关注。近年来大米产地溯源与真实性鉴定研究取得了显著进展, 涵盖了稳定同位素技术、矿物元素分析技术、光谱技术、挥发性物质分析技术、DNA 技术、代谢组学分析等多种技术手段。本文综述了各种技术与多变量分析方法结合在大米产地溯源与真实性鉴定中的研究进展, 并探讨不同技术的原理、应用范围、应用效果及其优缺点。结合大米的地理、品种和有机特性, 总结了大米产地溯源系统的最新发展。本文旨在为大米质量控制和粮食安全提供参考依据, 推动溯源数据库的建立, 对于大米的安全监管、权益保障和品牌保护有着重要意义。

**关键词:** 大米; 产地溯源; 真实性鉴定; 稳定同位素技术; 光谱技术; 多变量分析方法

## Research progress on the origin tracing and authenticity identification of domestic *Oryza sativa*

WANG Shan\*

(Quality and Technical Evaluation Center of Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 830000, China)

**ABSTRACT:** The traceability of grain origins and authenticity identification have garnered increasing attention from consumers. In recent years, significant progress has been made in research on *Oryza sativa* origin traceability and authenticity identification, encompassing technologies such as stable isotope analysis, mineral element profiling, spectroscopy, volatile compound analysis, DNA-based methods and metabolomics. This paper reviewed the research progress on the integration of various technologies with multivariate analytical methods in the traceability of origin tracing and authenticity identification of *Oryza sativa*, while discussed the principles, application scope, effectiveness and advantages/disadvantages of different techniques. By incorporating the geographical, varietal and organic characteristics of *Oryza sativa*, it summarized the latest developments in *Oryza sativa* origin traceability systems. The study aimed to provide reference foundations for *Oryza sativa* quality control and food safety, promote the establishment of traceability databases, and highlights its critical implications for safety regulation, rights protection and brand safeguarding in the *Oryza sativa* industry.

**KEY WORDS:** *Oryza sativa*; origin tracing; authenticity identification; stable isotope technology; spectroscopy technology; multivariate analysis methods

收稿日期: 2025-01-02

第一作者/\*通信作者: 王珊(1992—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为市场监管质量技术评价。E-mail: 937031943@qq.com

## 0 引 言

大米是我国重要的食物来源, 中国人口的 65% 以大米为主食, 在我国人民膳食结构中占有突出的地位, 产量和消费居世界首位, 保障我国 14 亿人口的粮食安全和国民营养健康具有重要意义<sup>[1]</sup>。五常大米、东北大米等产地造假, 引起社会普遍关注<sup>[2]</sup>。地理标志农产品掺假不仅影响其品质和价格, 还涉及粮食安全和消费者信任。这些行为不仅破坏了市场的公平竞争环境, 扰乱了正常的市场秩序, 还可能对消费者的健康造成直接威胁, 增加其摄入有害物质的风险, 进而损害其健康权益。因此, 开发快速、准确且可靠的分析技术来提取大米的地域特征因子, 并建立大米产地追溯系统, 对于确保大米的质量与安全尤为重要<sup>[3]</sup>。本文系统性地概述了大米的地理来源、植物学真实性的最新进展, 为大米质量控制和粮食安全提供理论支持。

## 1 分析技术研究现状

### 1.1 稳定同位素技术

稳定同位素技术是一种利用稳定同位素的示踪和分析方法, 用于研究物质的来源、转化过程 and 环境影响等。稳定性同位素与放射性同位素不同, 是指不发生放射性衰变的同位素, 没有辐射风险。稳定同位素技术常用到的元素有 C、N、H、O 等<sup>[4]</sup>, 为不同来源的大米提供了有效的地理信息识别方法, 并为地理标志农产品的真实性鉴定提供了可靠的手段<sup>[5]</sup>。邵圣枝等<sup>[6]</sup>采用稳定同位素质谱和等离子发射光谱质谱法, 并结合主成分分析-线性判别分析法(principal component analysis-linear discriminant analysis, PCA-LDA), 对黑龙江省、江苏省和辽宁省的稻米进行产地溯源判定, 各地产的稻米中稳定同位素  $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  数值范围不同, 通过对 23 个样本进行判别验证, 正确率为 91%。该研究在多指标联用与算法创新上表现突出, 为农产品溯源提供了高精度方案, 但受限于样本规模、时间维度及成本控制, 仍需进一步扩大验证范围并简化技术流程<sup>[7-8]</sup>。公维民等<sup>[9]</sup>分析比较了我国由北到南 6 个省的 10 种大米的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值。结果显示, 我国大米的  $\delta^{13}\text{C}$  值以  $-27.9\%$ ~ $-26.3\%$  出现的频率为主。 $\delta^{15}\text{N}$  值以  $1.7\%$ ~ $3.4\%$  出现的频率为主。我国北方大米  $\delta^{13}\text{C}$  值高于南方大米, 但南北方大米的  $\delta^{15}\text{N}$  均值基本相同, 符合施化肥大米的特征。该文献地理覆盖范围广, 揭示了我国大米  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值的南北方区域分布特征, 但在样本信息透明度及机制解释深度有限, 未来可结合多指标、多年度数据, 进一步挖掘稳定同位素在农产品溯源中的潜力<sup>[10]</sup>。LIU 等<sup>[11]</sup>收集了来自 3 种施肥系统 108 个大米及相关土壤样本, 测定了大米和土壤样本的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  以及 27 种元素含量, 发

现  $\delta^{15}\text{N}$  值在作物轮作期间可以作为有机大米认证的有效指标, 通过偏最小二乘判别分析法(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)模型对 2014—2017 年 4 年间准确度达 100%。该文献通过跨年份指标分析, 验证了  $\delta^{15}\text{N}$  值在有机大米认证中的有效性, 并利用 PLS-DA 模型实现了高精度分类, 未来可深入挖掘在  $\delta^{13}\text{C}$  应用, 推动该技术在有机农产品监管中的实际应用<sup>[12-13]</sup>。王济世等<sup>[14]</sup>共采集了 134 份真实稻米样本, 涵盖黑龙江、吉林、江苏、浙江、湖南以及贵州 6 个省份。通过 PCA 发现  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  是区分稻米产地的关键同位素指标, 识别精度超过 85%。该文献样本覆盖 6 个地理环境差异显著的省份, 涵盖不同气候带和土壤类型, 筛选出  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  作为稻米产地溯源的关键指标, 并实现了较高的跨省识别精度, 但未涵盖西北(如新疆)、华南(如广东)等典型稻米产区, 可进一步提升方法的普适性<sup>[15-17]</sup>。

### 1.2 矿物元素分析技术

矿物元素分析技术是一种用于测定和分析矿物样品中各种元素含量的方法。通过测定不同产地大米中的矿物质成分, 构建具有地域特色的矿物元素指纹图谱。基于矿物元素含量数据, 利用化学计量学方法建立判别模型, 用于区分不同产地的大米<sup>[18-19]</sup>。林杰等<sup>[20]</sup>通过湿法消解结合火焰原子吸收光谱法, 对云南省紫米、红米和白米中的 Ca、Fe、Mn、Zn 和 Cu 金属元素含量进行了测定, 结合单一元素可耐受最高摄入量及靶标危害商值(target hazard quotient, THQ)进行大米膳食风险分析。此研究中湿法消解的消解温度较低, 易挥发元素不易损失, 为快速、精准测定不同色泽大米中金属元素含量提供了一种有效的检测方法。黄小龙等<sup>[21]</sup>对 3 种地理标志产品的大米中 27 种元素进行了系统研究。结果显示大米中 Al、Fe、Cu、Zn、Rb 含量都在 1000  $\mu\text{g}/\text{kg}$  以上。通过多元素分析揭示了地理标志大米中元素含量的特征, 明确指出大米中元素含量受土壤及环境因素影响, 为利用元素指纹进行产地溯源提供了理论依据, 直接服务于地理标志农产品保护<sup>[22]</sup>。石春红等<sup>[23]</sup>采用电感耦合等离子体质谱并结合多元统计方法, 分析 180 件松江大米与非松江大米样本中 40 种矿物元素, 研究分析显示, 基于 B、Na、Fe、Co、Ni、Zn、As 和 Se 这 8 种矿物元素指标构建的溯源模型, 在大米产地的整体判别中达到了 93.0% 的准确率。该文献筛选出 8 种关键矿物元素, 兼顾差异性和代表性, 针对性解决区域性农产品溯源问题, 并构建了高精度的产地判别模型<sup>[24]</sup>。黎永乐等<sup>[25]</sup>研究了鉴别五常大米的方法, 通过测定大米中无机元素含量并结合 PCA、人工神经网络(artificial neural network, ANN)等方法, 发现 PCA 法对样品的分类效果较差, ANN 准确识别率为 96.4%, 说明采用 ANN 可准确区分五常地区的大米样品和其他地区的大米。该文献研究对象明确, 聚焦五常

大米, 结合多元统计与机器学习, 方法创新, 但测定多种无机元素含量的成本较高, 将来简化检测指标以降低实际应用成本<sup>[26]</sup>。

### 1.3 光谱技术

光谱技术利用大米中不同成分在特定波长下表现出独特的光谱特征, 通过分析这些光谱特征, 获取其化学和物理信息。近红外光谱技术通过分析大米在近红外波段的吸收光谱, 可以快速无损地检测其产地<sup>[27]</sup>。夏立娅等<sup>[28]</sup>利用近红外光谱法通过前 3 个主成分的载荷图确定了与产地相关性较大的特征波段 6700~7700  $\text{cm}^{-1}$  与 4300~5700  $\text{cm}^{-1}$ , 可以 100% 正确的鉴别响水大米和非响水大米。将特征波段筛选与模式识别算法的有效结合, 通过确定与产地相关性较大的特征波段, 避免了全波段分析的复杂性, 提升了模型的效率和可解释性<sup>[29-30]</sup>。XIAO 等<sup>[31]</sup>采用多向偏最小二乘法(multivariate partial least squares, MPLS)构建模型, 通过近红外光谱在 4000  $\text{cm}^{-1}$  至 12000  $\text{cm}^{-1}$  波长范围内的分析, 成功实现了有机大米与普通大米的区分。MPLS 法在光谱分析中具有较好的预测性, 能够从复杂的光谱数据中筛选出与有机成分相关性强的特征波长, 能有效提取与有机大米相关的关键信息。刘亚超等<sup>[32]</sup>选择以五常大米为研究对象, 选取难以用肉眼分辨的 6 种大米为掺入米, 分别制备 5%~50% 的不同掺和比例 140 个大米样品, 表明掺杂比例在 20% 及以上的样品鉴别正确率为 100%。此研究选择 6 种难以用肉眼分辨的掺入米, 模拟实际掺假场景, 提升了研究的实用性。样本设计科学, 覆盖多种掺假比例且梯度合理, 能够全面反映不同掺假程度下的光谱特征变化。但实际市场中, 轻微掺假(如 5%~10%)更为常见, 可以尝试结合机器学习算法[如支持向量机(support vector machine, SVM)], 提升低掺假比例的鉴别性能。拉曼光谱是通过测量光吸收来得到光谱数据。田芳明<sup>[33]</sup>选取 14 种东北大米, 对于地域相距近的样品采用拉曼光谱技术再结合偏最小二乘法(partial least squares, PLS)识别模型, 对 400~1700  $\text{cm}^{-1}$  波段数据进行处理, 大米产地鉴别准确率为 97.14%。该文献为相近产地大米鉴别提供了高效的无损检测方案, 尤其在数据预处理和 PLS 建模方面具有创新性。但其样本范围和技术单一性可能限制实际应用, 未来可通过扩大样本多样性、融合多光谱技术及优化预处理方法进一步提升模型性能。栾鑫鑫等<sup>[34]</sup>利用拉曼光谱技术结合 PCA、层次聚类分析法(hierarchical clustering, HC)、PLS-DA 建立品种鉴别模型, 不同品种的大米鉴别准确率为 100%<sup>[35]</sup>。该研究从不同角度挖掘光谱数据的特征, 基于自适应滑动排列熵算法可进一步降低判别误差, 提升特征波长的特异性, 增加了模型的科学性和可靠性。LI 等<sup>[35]</sup>采用拉曼光谱分析来自安徽、江西、宁夏、吉林、江苏 5 个省份大米样品的数据, 并利用 PCA 和 SVM 等方法对大米

样品进行产地判别, 5 个产地的分类准确率最高达 100%<sup>[36-38]</sup>。表明 SVM 在处理高维数据和非线性分类问题时表现优异<sup>[39]</sup>。MO 等<sup>[40]</sup>通过对中国等国家的大米样品 400~1000 nm 波段的高光谱, 建立 PLS-DA 模型, 高光谱图像的像素维数为 3.0 mm×3.0 mm 时, 识别精度达到 99.99% 以上。高光谱成像技术以其卓越的光谱分辨率见长, 然而, 其昂贵的设备成本以及处理海量原始图像数据的复杂性, 限制了该技术的广泛应用<sup>[41]</sup>。未来研发微型化光谱检测设备, 降低成本并缩短检测时间。

### 1.4 挥发性物质分析技术

挥发性物质分析技术通过检测大米中挥发性化合物的组成和含量, 识别不同产地的特征。这些化合物包括醛类、酮类、醇类等, 其分布受环境、土壤及种植方式影响显著。不同种类或产地的大米, 在受到外界环境、生物来源及加工处理等多重因素的影响后, 会形成各自特有的挥发性成分。邱彦超等<sup>[42]</sup>运用电子鼻 PEN3 技术对哈阳、五常和建三江 3 个不同地区的大米进行了检测分析。研究以 LDA 为主要方法, 辅以 PCA, 成功实现了大米产地的精准鉴别, 鉴别准确率达到 100%。通过以上研究可以看出, 电子鼻技术利用传感器阵列模拟人类嗅觉系统, 检测大米挥发性气味物质。结合 PCA-LDA 分析, 该技术能区分不同基因型和不同收获年份的大米。刘敏等<sup>[43]</sup>以 4 种不同品种大米为研究对象, 采用固相微萃取-气相色谱-质谱法(solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)测定不同品种大米的挥发性物质, 主要成分为烷烃、醛类、酯类, 且相对含量均以烷烃类最高。此研究揭示了不同品种大米挥发性物质的差异及其对香气品质的影响, 其中 SPME 技术具有无溶剂、快速和高选择性的优势, 适合复杂样品的分析。孙学景等<sup>[44]</sup>以五优稻 4 号大米为研究对象, 提出一种基于顶空固相微萃取气相色谱-质谱法(headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)的大米智能鉴别方法。利用 PCA 提取出 18 种主要特征挥发性组分, 并建立五优稻 4 号标准指纹图谱, 表明此方法可在一定程度上鉴别掺入五优稻 4 号中不同比例的其他品种大米。该研究针对五优稻 4 号这一优质大米品种进行研究, 直接服务于高端农产品的真伪鉴别, HS-SPME-GC-MS 能够高效提取大米中的挥发性组分, 通过关键指标筛选(如特定挥发性组分), 开发低成本检测组合, 结合便携式色谱仪, 探索快速检测方案<sup>[45]</sup>。

### 1.5 DNA 技术

DNA 技术建立在 DNA 分子标记基础上, 是一种基于个体间遗传物质内核苷酸序列变异的遗传标记技术。李小华等<sup>[46]</sup>对浙江省 46 个粳稻新品种进行遗传多样性分析, 品种间遗传相似系数在 0.735~1.000 之间, 平均为

0.879, 说明浙江省粳稻品种遗传背景窄、亲缘关系较近。SSR 引物数据实用, 结果可靠, 符合行业标准。多态性频率低(0.192), 说明引物区分度有限。研究用 SSR 标记, 未结合其他分子标记或农艺性状数据, 缺乏对遗传基础狭窄原因的深入分析, 未来可以增加引物数量, 使用更多高多态性引物, 结合 SNP 或表型分析, 整合表型数据。陈羽红<sup>[47]</sup>利用 SSR 标记多态性分析 12 对引物共检测到 40 个等位基因, 平均每对引物扩增到 3.3 个等位基因, 表明选用的引物具有高多态性, 能良好地反映出 50 份水稻品种的基因型多样性。通过以上研究可以看出, DNA 指纹技术利用大米基因组中特定序列的多态性, 通过聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)、随机扩增多态性 DNA (random amplified polymorphic DNA, RAPD)、扩增片段长度多态性(amplified fragment length polymorphism, AFLP)等方法生成独特的 DNA 指纹图谱, 这些图谱能够反映不同产地大米的遗传差异。通过高多态性 SSR 标记和多种分子技术结合弥补了单一技术的局限性, 更全面地反映基因型差异。但受限于 SSR 标记的开发成本和样本规模, 未来研究可结合转录组数据开发新型标记。

## 1.6 代谢组学技术

代谢组学是一门研究生物体内所有小分子代谢物的科学领域。研究对象大都是相对分子量 1000 以内的小分子物质, 包括代谢产生的中间产物和终产物, 如糖类、脂

质、氨基酸等。冯雪等<sup>[48]</sup>对黑龙江省 4 个地区的 29 个绥粳 4 号稻米样品, 采用气相色谱-串联四极杆飞行时间质谱(gas chromatography-tandem quadrupole time-of-flight mass spectrometry, GC/Q-TOF MS), 以 PCA 对变化显著的差异性代谢物进行鉴定, 确定了 11 种特征标记物, 为稻米产地溯源提供了明确的代谢物依据。本研究其优势在于方法稳定性和标记物筛选的有效性。但受限于气相色谱技术特性(气相色谱通常适合挥发性和热稳定的化合物), 可能漏掉一些极性大或难挥发的代谢物。未来可结合液相色谱技术以扩大代谢物覆盖范围。XIAO 等<sup>[49]</sup>应用 PCA、PLS-DA、HC 和正交偏最小二乘判别分析法(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)等多种多元统计分析方法, 对来自黑龙江省的 20 份有机大米和 20 份普通大米的代谢物进行了系统研究。通过分析, 筛选出 30 个具有鉴别意义的代谢组分, 其中 8 个次级代谢产物被鉴定为区分有机大米与普通大米的潜在特征标志物。本研究结合无监督学习(PCA、HC)与有监督学习(PLS-DA、OPLS-DA), 既能探索数据自然分布, 又能聚焦组间差异。OPLS-DA 的应用有效分离了组间变异与组内变异, 降低了噪声干扰, 提升了标志物筛选的特异性。8 个次级代谢产物与有机种植的关联机制未深入探讨, 可结合田间管理数据(如肥料/农药使用记录)建立代谢物与种植方式的因果关联。如表 1 所示, 6 种分析技术在大米产地溯源与真实性鉴定中的应用范围。

表 1 6 种分析技术在大米产地溯源与真实性鉴定中的应用范围

Table 1 Application scope of 6 kinds of analytical techniques in *Oryza sativa* origin traceability and authenticity identification

分析技术	应用范围	参考文献
稳定同位素技术	鉴别大米真伪和产地来源、评估大米营养价值、监测大米污染和安全性	[6-17]
矿物元素分析技术	大米营养成分分析、大米中有害元素检测、大米原料质量控制、大米添加剂和农药残留检测、大米产地溯源和地理标志产品保护、大米品质评价和风味分析	[20-26]
光谱技术	大米成分检测、大米污染物检测、大米致病菌检测、大米产地溯源	[28-40]
挥发性物质分析技术	大米新鲜度检测、大米成分分析、大米安全监测、大米品质鉴定、大米溯源	[42-44]
DNA 技术	大米品种鉴别	[46-47]
代谢组学技术	溯源大米的产地和鉴别有机大米	[48-49]

## 2 结束语

随着全球粮食安全问题的日益严峻, 大米产地溯源与真实性研究与应用正变得愈发重要。稳定同位素技术为地理识别、品种鉴别以及(有机 vs 传统)真实性提供了有效信息<sup>[50]</sup>。同样, 光谱法、矿物元素分析法、挥发性组分分析、代谢组学分析、DNA 技术在检测掺假和品种鉴别方面提供了有价值的见解。最常用的监督方法包括: ANN、PLS-DA、SVM、OPLS-DA 等, 而 PCA、HC 是最常见的非监督技术, 用于处理从不同分析技术中获得的数据以进

行大米认证。

未来的研究方向应集中在以下几个方面: 构建高效的在线大米产地溯源系统, 选择合适的大米样品, 确保样品覆盖广泛的产地和品种, 利用人工智能(artificial intelligence, AI)与机器学习技术的融合, 为大米产地溯源与真伪鉴别开辟了崭新的研究路径<sup>[51]</sup>。借助对海量检测数据的深度学习与模式识别能力, AI 技术能够助力科研人员提升检测的精确度与专一性, 同时优化检测流程与结果解析的效率。通过对训练集数据进行学习, 模型能够识别不同产地和品种的大米特征。探索多模态数据(如光谱、稳

定同位素、矿物元素、DNA、代谢组学、挥发性物质分析数据)的融合应用,利用先进的地理信息系统(geographic information system, GIS)等手段,绘制大米的溯源地图<sup>[52]</sup>。将指纹图谱与非同质化通证结合,可为每批大米生成唯一数字身份,消费者扫码即可追溯全程环境数据,实现科技赋能农业信任经济。推动设备微型化与成本压缩,使技术下沉至市场监管一线。政策与市场联动,政府引导建立地理标志产品数据信息档案,企业则探索“溯源标签”增值模式(如高端大米品牌认证)等。

通过大米产地溯源和真实性鉴定,可以有效保护地理标志农产品的品牌价值和市场地位,防止其他地区的产品冒充或混淆视听,减少不法商家的欺诈行为,保护合法经营者的利益。消费者可以清楚地了解所购买大米的真实产地和品质,从而做出更加明智的购买决策。

### 参考文献

- ARISSETO-BRAGOTTO AP, FELTES MMC, BLOCK JM. Food quality and safety progress in the Brazilian food and beverage industry: Chemical hazards [J]. *Food Quality and Safety*, 2017, 1(2): 117–129.
- 胡圣英, 任红波, 张军, 等. 大米产地溯源方法研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(14): 148–155.  
HU SY, REN HB, ZHANG J, *et al.* Research progress on traceability methods of *oryza sativa* origin [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(14): 148–155.
- 王树婷, 刘成武, 张敏, 等. 黑龙江大米类国家地理标志产品保护的思考[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2010, 26(2): 218–221.  
WANG ST, LIU CW, ZHANG M, *et al.* Reflections on the protection of national geographical indication products of heilongjiang *Oryza sativa* [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2010, 26(2): 218–221.
- LIU Z, ZHANG WX, YUAN YW, *et al.* Assuring food safety and traceability of polished *Oryza sativa* from different production regions in China and Southeast Asia using chemometric models [J]. *Food Control*, 2019, 99(9): 1–10.
- SHENG ML, LI CL, ZHANG WX, *et al.* Predicting the geospatial distribution of Chinese *Oryza sativa* nutrient element in regional scale for the geographical origin—A case study on the traceability of Japonica *Oryza sativa* [J]. *Food Frontiers*, 2024, 5(1): 1–11.
- 邵圣枝, 陈元林, 张永志, 等. 稻米中同位素与多元素特征及其产地溯源 PCA-LDA 判别[J]. *核农学通报*, 2015, 29(1): 119–127.  
SHAO SZ, CHEN YL, ZHANG YZ, *et al.* Characteristics of isotopes and multi-elements in *Oryza sativa* and PCA-LDA discrimination for origin traceability [J]. *Bulletin of Nuclear Agriculture*, 2015, 29(1): 119–127.
- SHENG ML, ZHANG WX, YUAN YW, *et al.* Predicting isoscapes based on an environmental similarity model for the geographical origin of Chinese *Oryza sativa* [J]. *Food Chemistry*, 2022, 397: 133744.
- 赵哲, 王嘉瑜, 伍子豪, 等. 稳定同位素在农产品溯源中的研究进展[J]. *现代农业科技*, 2019(10): 213–217.
- ZHAO Z, WANG JY, WU ZH, *et al.* Research progress on the application of stable isotopes in agricultural product traceability [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(10): 213–217.
- 公维民, 马丽娜, 王飞, 等. 我国大米碳氮稳定同位素比率特征及溯源应用[J]. *农产品质量与安全*, 2019(4): 9–12, 40.  
GONG WM, MA LN, WANG F, *et al.* Characteristics of carbon and nitrogen stable isotope ratios in Chinese *Oryza sativa* and their application in origin traceability [J]. *Quality and Safety of Agro-products*, 2019(4): 9–12, 40.
- LAURSEN KH, MIHAILOVA A, KELLY SD, *et al.* Is it really organic—multi-isotopic analysis as a tool to discriminate between organic and conventional plants [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 2812–2820.
- LIU Z, YUAN YW, XIE TZ, *et al.* Long-Term agricultural effects on the authentication accuracy of organic, green, and conventional *Oryza sativa* using isotopic and elemental chemometric analyses [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(5): 1213–1225.
- LIU Z, ZHANG W, YUAN YW, *et al.* Assuring food safety and traceability of polished *Oryza sativa* from different production regions in China and Southeast Asia using chemometric models [J]. *Food Control*, 2019, 99(9): 1–10.
- YUAN YW, ZHANG WX, ZHANG YZ, *et al.* Differentiating organically farmed *Oryza sativa* from conventional and green *Oryza sativa* harvested from an experimental field trial using stable isotopes and multi-element chemometrics [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(11): 2607–2615.
- 王济世, 陈天金, 张卫星, 等. 稳定同位素与化学计量学相结合对稻米进行产地溯源(英文)[A]. 中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第七卷)—中国核学会 2021 年学术年会论文集第 7 册(同位素分卷、辐射研究与应用分卷、核技术工业应用分卷、核农学分卷、辐照效应分卷、放射性药物分卷)[C]. 中国核学会, 2021: 11.  
WANG JS, CHEN TJ, ZHANG WX, *et al.* Origin traceability of *oryza sativa* using stable isotopes combined with chemometrics [A]. In *Chinese Nuclear Society. Progress Report on China Nuclear Science and Technology (Volume 7)—Proceedings of the 2021 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society (Volume 7: Isotopes, Radiation Research and Applications, Industrial Applications of Nuclear Technology, Nuclear Agriculture, Radiation Effects, Radiopharmaceuticals)* [C]. Chinese Nuclear Society, 2021: 11.
- CHEAJESADAGUL P, ARNAUDGUILHEM C, SHIOWATANA J, *et al.* Discrimination of geographical origin of *Oryza sativa* based on multi-element fingerprinting by high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(4): 3504–3509.
- WANG JS, CHEN TJ, ZHANG WX, *et al.* Tracing the geographical origin of *Oryza sativa* by stable isotopic analyses combined with chemometrics [J]. *Food Chemistry*, 2020, 313: 126093.
- 赵燕, 吕军, 杨曙明. 稳定同位素技术在农产品溯源领域的研究进展与应用[J]. *农产品质量与安全*, 2015(6): 35–40.  
ZHAO Y, LV J, YANG SM. Research progress and application of stable isotope technology in agricultural product traceability [J]. *Quality and*

- Safety of Agro-products, 2015(6): 35–40.
- [18] 王朝辉, 张亚婷, 闵伟红, 等. 水稻品种对大米产地溯源判别正确性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(1): 113–119.  
WANG ZH, ZHANG YT, MIN HW, *et al.* Influence of *Oryza sativa* varieties on the accuracy of oryza sativa origin traceability [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2017, 39(1): 113–119.
- [19] 杨辰, 黄建立, 林滢, 等. 稻米中矿物质元素的检测及其在产地溯源中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(20): 1–8.  
YANG C, HUANG JL, LIN H, *et al.* Research progress on detection of mineral elements in *Oryza sativa* and their application in origin traceability [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(20): 1–8.
- [20] 林杰, 郭昱娇, 郭俊明. 不同色泽大米中 5 种金属元素检测及膳食风险分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(21): 287–293.  
LIN J, GUO YJ, GUO JM. Detection and dietary risk assessment of 5 kinds of metallic elements in different color *Oryza sativa* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(21): 287–293.
- [21] 黄小龙, 何小青, 张念, 等. ICP-MS 法测定多种微量元素用于地理标志产品大米鉴定研究初探[J]. 现代科学仪器, 2010(1): 80–82.  
HUANG XL, HE XQ, ZHANG N, *et al.* Preliminary study on the identification of geographical indication *Oryza sativa* by ICP-MS determination of multiple trace elements [J]. Modern Scientific Instruments, 2010(1): 80–82.
- [22] ZHANG Y, WANG X, JI XH, *et al.* Effect of a novel Ca-Si composite mineral on Cd bioavailability, transport and accumulation in paddy soil-*Oryza sativa* system [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 10: 802–811.
- [23] 石春红, 曹美萍, 胡桂霞. 基于矿物元素指纹图谱技术的松江大米产地溯源[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 300–306.  
SHI CH, CAO MP, HU GX. Origin traceability of songjiang *Oryza sativa* based on mineral element fingerprinting technology [J]. Food Science, 2020, 41(16): 300–306.
- [24] LI L, WEN B, ZHANG X, *et al.* Geographical origin traceability of tea based on multi-element spatial distribution and the relationship with soil in district scale [J]. Food Control, 2018, 90(8): 18–28.
- [25] 黎永乐, 郑彦婕, 汤璐, 等. 基于无机元素分析对地理标志五常大米鉴别技术的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3): 834–837.  
LI YL, ZHEN YJ, TANG L, *et al.* Research on the identification technology of geographical indication Wuchang *oryza sativa* based on inorganic element analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(3): 834–837.
- [26] LI G, NUNES L, WANG Y, *et al.* Profiling the ionome of *Oryza sativa* and its use in discriminating geographical origins at the regional scale, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(1): 144–154.
- [27] 杜梦佳, 毛波, 沈飞, 等. 基于红外光谱指纹和挥发性组分信息融合模型鉴别大米产地来源[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 243–248.  
DU MJ, MAO B, SHEN F, *et al.* Discrimination of *Oryza sativa* origin based on the fusion model of infrared spectral fingerprints and volatile component information [J]. Food Science, 2018, 39(8): 243–248.
- [28] 夏立娅, 申世刚, 刘峥颢, 等. 基于近红外光谱和模式识别技术鉴别大米产地的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 102–105.  
XIA LY, SHEN SG, LIU ZH, *et al.* Identification of *oryza sativa* origin based on near-infrared spectroscopy and pattern recognition technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(1): 102–105.
- [29] 钱丽丽, 宋雪健, 赵海燕, 等. 基于傅里叶变换近红外光谱法鉴别五常大米[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 231–236.  
QIAN LL, SONG XJ, ZHAO HY, *et al.* Identification of Wuchang *Oryza sativa* based on Fourier transform near-infrared spectroscopy [J]. Food Science, 2018, 39(8): 231–236.
- [30] 杨森, 王振民, 宋文龙, 等. 基于近红外光谱法的精品品种判别优化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(7): 1988–1992.  
YANG S, WANG ZM, SONG WL, *et al.* Optimization of varietal discrimination of polished *oryza sativa* based on near-infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(7): 1988–1992.
- [31] XIAO R, LIU L, ZHANG DJ, *et al.* Discrimination of organic and conventional *Oryza sativa* by chemometric analysis of NIR spectra: A pilot study [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(1): 238–249.
- [32] 刘亚超, 李永玉, 彭彦昆, 等. 近红外二维相关光谱的掺和大米判别[J]. 光谱学与光谱分析, 2020(40): 1559–1564.  
LIU YC, LI YY, PENG YK, *et al.* Discrimination of adulterated *Oryza sativa* using two-dimensional near-infrared correlation spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020(40): 1559–1564.
- [33] 田芳明. 基于拉曼光谱与有机成分分析的大米身份识别[D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
TIAN FM. *Oryza sativa* identity recognition based on raman spectroscopy and organic component analysis [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [34] 栾鑫鑫, 翟晨, 安焕炯, 等. 应用分子光谱信息融合判别不同产地大米[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(9): 2818–2824.  
LUAN XX, ZHAI C, AN HJ, *et al.* Discrimination of *Oryza sativa* from different origins using molecular spectral information fusion [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(9): 2818–2824.
- [35] LI F, WANG JH, XU L, *et al.* Rapid screening of cadmium in *Oryza sativa* and identification of geographical origins by spectral method [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(2): 1–12.
- [36] WADOOD SA, NIE J, LI CL, *et al.* *Oryza sativa* authentication: An overview of different analytical techniques combined with multivariate analysis [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 112: 104677.
- [37] 孙娟, 张晖, 王立, 等. 基于拉曼光谱的大米快速分类判别方法[J]. 食品与机械, 2016(1): 41–45.  
SUN J, ZHANG H, WANG L, *et al.* Rapid classification and discrimination method of *Oryza sativa* based on Raman spectroscopy [J]. Food and Machinery, 2016(1): 41–45.
- [38] ZHU L, SUN J, WU GC, *et al.* Identification of *oryza sativa* varieties and determination of their geographical origin in China using Raman spectroscopy [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 82: 175–182.

- [39] 时君. 拉曼光谱技术在食品质量安全检测中的应用[J]. 检验检疫学刊, 2020, 30(2): 143–144.  
SHI J. Application of Raman spectroscopy in food quality and safety detection [J]. Journal of Inspection and Quarantine, 2020, 30(2): 143–144.
- [40] MO C, LIM J, KWON SW, *et al.* Hyperspectral imaging and partial least square discriminant analysis for geographical origin discrimination of white *Oryza sativa* [J]. Journal of Biosystems Engineering, 2017, 42(4): 293–300.
- [41] 王平. 高光谱成像技术在食品安全检测与控制中的应用[J]. 现代食品, 2020(12): 226–228.  
WANG P. Application of hyperspectral imaging technology in food safety detection and control [J]. Modern Food, 2020(12): 226–228.
- [42] 邱彦超, 赵玉川, 陈欢, 等. 基于大米挥发性成分的产地溯源研究[J]. 农产品加工, 2018(2): 40–43.  
QIU YC, ZHAO YC, CHEN H, *et al.* Study on origin traceability of *Oryza sativa* based on volatile components [J]. Farm Products Processing, 2018(2): 40–43.
- [43] 刘敏, 王健健, 刘芳宏, 等. 基于 SPME-GC-MS 对不同品种大米挥发性物质分析[J]. 中国酿造, 2017, 36(6): 170–174.  
LIU M, WANG JJ, LIU FH, *et al.* Analysis of volatile compounds in different *Oryza sativa* varieties using SPME-GC-MS [J]. China Brewing, 2017, 36(6): 170–174.
- [44] 孙学景, 卜文华. 基于指纹图谱的大米智能鉴别研究[J]. 粮食与饲料工业, 2023, 6(13): 60–64.  
SUN XJ, PU WH. Intelligent discrimination of *Oryza sativa* based on fingerprint technology [J]. Cereal & Feed Industry, 2023, 6(13): 60–64.
- [45] 彭凯雄, 唐群勇, 郑钰涵, 等. 大米中挥发性风味物质的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 4794–4801.  
PENG KX, TANG QY, ZHENG YH, *et al.* Research progress on volatile flavor compounds in *Oryza sativa* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(15): 4794–4801.
- [46] 李小花, 叶胜海, 赵小燕, 等. 浙江省 46 个粳稻新品种 SSR 指纹图谱构建及遗传多样性分析[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(5): 1158–1163.  
LI XH, YE SH, ZHAO XY, *et al.* Construction of SSR fingerprints and genetic diversity analysis of 46 new japonica *oryza sativa* varieties in Zhejiang Province [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2014, 26(5): 1158–1163.
- [47] 陈羽红. 黑龙江省主栽粳稻 DNA 指纹图谱溯源体系构建与应用[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.  
CHEN YH. Construction and application of DNA fingerprinting traceability system for main japonica *Oryza sativa* varieties in Heilongjiang Province [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018.
- [48] 冯雪, 柳艳霞, 贺泽英, 等. 稻米代谢组学分析方法的建立及在产地溯源中的应用[J]. 分析测试学报, 2016, 35(5): 514–519.  
FENG X, LIU YX, HE ZY, *et al.* Establishment of metabolomics analysis method for *Oryza sativa* and its application in origin traceability [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2016, 35(5): 514–519.
- [49] XIAO R, MA Y, ZHANG DJ, *et al.* Discrimination of conventional and organic *Oryza sativa* using untargeted LC-MS based metabolomics [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 82: 73–81.
- [50] WADOOD SA, JIANG YZ, NIE J, *et al.* Effects of light shading, fertilization, and cultivar type on the stable isotope distribution of hybrid *Oryza sativa* [J]. Foods, 2023, 12(10): 1832.
- [51] ZATSU V, SHINE AE, THARAKAN JM, *et al.* Revolutionizing the food industry: The transformative power of artificial intelligence—a review [J]. Food Chemistry, 2024, 437: 101867.
- [52] LI CL, NIE J, YUAN YW, *et al.* Geographical origin modeling of Chinese *Oryza sativa* using stable isotopes and trace elements [J]. Food Control, 2022, 138: 108997.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)