

植物源农产品产地溯源技术的特征及应用进展

吴限鑫, 彭天舒, 李丽娜, 林秋君, 郭春景, 王建忠*

(辽宁省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 辽宁沈阳 110161)

摘要: 植物源农产品品质与产地环境关系密切, 极易受到原产地的土壤、气候、水源等特殊地理因素的影响。我国农业区划多样, 区域特色农产品资源丰富, 但由于特征标志参数不清晰、理化等指标阈值匮乏、身份化及标识化基础工作薄弱等原因, 目前许多特色、优质农产品产业化发展水平有待提高, 产业链和价值链延伸不充分。产地溯源已成为产区分类分级并保护优质特色农产品的重要技术支撑之一。该文阐述了农产品产地溯源的概念和意义, 归纳分析了近红外光谱法、有机组分分析法、矿物元素指纹图谱法、稳定同位素分析法、智能感官系统、分子生物学及代谢组学分析等产地溯源技术的优缺点, 总结了产地溯源中常用的化学计量学手段, 并综述了近年来这些溯源技术在农产品产地识别方面的应用进展, 以期为助推区域农产品的优质向好发展提供一定的借鉴。

关键词: 产地溯源; 农产品; 溯源技术; 特征标志物; 判别模型

文章编号: 1673-9078(2025)09-400-411

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0764

Characteristics and Application Progress of Traceability Technologies for Plant-based Agricultural Products

WU Xianxin, PENG Tianshu, LI Lina, LIN Qiujuan, GUO Chunjing, WANG Jianzhong*

(Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract: The quality of plant-based agricultural products is closely related to the production environment, which is highly susceptible to special geographical factors such as soil, climate, and water sources in the production area. China has diverse agricultural divisions and abundant regionally characteristic agricultural resources. However, due to reasons such as unclear characteristic markers, lack of thresholds for physicochemical indicators, and weak foundation work on product identification and identity, the industrialization development level of many characteristic and high-quality agricultural products is generally not high, and the extension of the industrial chain and value chain is insufficient. Origin tracing has become one of the important technical supports for classifying and grading production areas and protecting high-quality and characteristic agricultural products. This article elaborates the concept and significance of origin traceability for agricultural products, and summarizes and analyzes the advantages and disadvantages of origin traceability technologies such as near-infrared spectroscopy, organic component analysis, mineral element fingerprinting, stable isotope analysis, intelligent

引文格式:

吴限鑫, 彭天舒, 李丽娜, 等. 植物源农产品产地溯源技术的特征及应用进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(9): 400-411.

WU Xianxin, PENG Tianshu, LI Lina, et al. Characteristics and application progress of traceability technologies for plant-based agricultural products [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(9): 400-411.

收稿日期: 2024-05-31; 修回日期: 2024-07-24; 接受日期: 2024-07-26

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2024-BS-293); 辽宁省农业科学院院长基金项目(2024BS1003); 中国博士后科学基金面上项目(2024M751276)

作者简介: 吴限鑫(1990-), 女, 博士研究生, 助理研究员, 研究方向: 农产品质量安全, E-mail: wuxianxin1225@163.com

通讯作者: 王建忠(1972-), 男, 研究员, 研究方向: 农产品质量安全, E-mail: zbswjz72@163.com

sensory systems, molecular biology, and metabolomics analysis, as well as the commonly used chemometric methods in origin tracing. The recent application progress of these origin traceability technologies in identifying the origin of agricultural products is also reviewed, in order to provide some references for promoting the high-quality development of regional agricultural products.

Key words: origin traceability; agricultural products; traceability technology; characteristic markers; discriminant model

农产品的品质形成与土壤、气候、水源等具有区域特色的地理因素密切相关。我国是历史悠久的农业大国，自然资源丰富，农业区划多样，长期以来形成了众多具有浓厚地域特色的农产品，这些产品潜藏着巨大的经济价值和文化价值^[1]。为了保护地域特色产品，提升地域特色产品的国际知名度和竞争力，以欧盟为代表的许多国家开始通过制定法规条文等形式对地域特色产品进行保护^[2]。我国早在 2005 年便颁布了《地理标志产品保护规定》，正式开启以地理标志产品为代表的特色农产品保护工作。由于各种产地特定的优质农产品常以高于常规产品的价格出售，一些不法商贩为了获取更高的经济利益，往往利用普通或劣质农产品添加或取代优质农产品，在市场上进行欺诈销售，特别是那些具有受保护的地理标志的品牌农产品上，尤其容易发生假冒欺诈销售事件^[3]。这种经济动机的欺诈事件频繁发生给食品质量安全造成了严重威胁，不仅极大地扰乱了市场秩序，还损害了生产农户和消费者的权利和利益^[4]。

然而，目前在农产品品质评价方面，现有品质评价手段及相关标准已跟不上我国消费习惯及膳食模式的需求，尚缺乏对食味品质、安全品质、加工品质、营养品质和功效品质的全面综合评价，多维“时空”品质综合表征工作进展缓慢。加之特色农产品的特征标志参数不明确、理化指标的有效阈值缺乏、身份化和标识化基础工作薄弱等原因，许多特色、优质农产品产业化发展水平有待提高，产业链和价值链延伸程度欠佳。因此，如何有效识别农产品产地的真实性已成为地理标志保护的技术难点^[5]。近年来，产地溯源技术已成为产地分类分级并保护区域优质特色农产品的重要技术支撑之一，

特别是在人们对食品质量的担忧持续增加的情况下，产地溯源已成为时下热门的研究课题^[5]。鉴于此，文章对产地溯源的概念与意义进行了阐述，并归纳了常用农产品产地溯源的技术与应用，以期为推动特色农产品的优质向好发展和产业链延伸提供一定的借鉴。

1 产地溯源的内涵与意义

产地溯源的整体研究思路是分析不同地域来源产品间多项指标的差异，探寻农产品中能够表征不同地域来源的特异性指标，结合各类化学计量学方法，筛选出有效的“指纹”特征，建立判别模型，并进一步通过盲样对模型的稳定性进行验证，从而实现农产品的原产地识别^[6]。农产品产地溯源的基本流程见图 1。

开展农产品产地溯源对农产品全产业链的健康稳健发展至关重要。在生产者层面，开展产地溯源有助于维护诚信生产者利益，保障优质特色农产品的有效输出，杜绝掺杂掺假，维护市场公平；在消费者层面，开展产地溯源有助于消费者了解不同细分产区农产品的质量安全情况和产品基本特征，促进形成细分产区的品牌记忆，快速找准需求契合点，保障知情权和消费信心；在经销者层面，开展产地溯源有助于企业和产业管理者准确把握细分产区农产品的特点，理清定位并挖掘潜力，把握产业发展机遇；在管理者层面，开展产地溯源有助于定制化开展区域发展决策，打破地域局限，拓宽产业视野。总之，农产品产地溯源技术的研究与应用对整顿市场秩序、保护地方名特优产品、提升区域农产品的品牌影响力和附加值，促进品质数字化、助力乡村振兴和推动农业高质量发展具有重要意义。

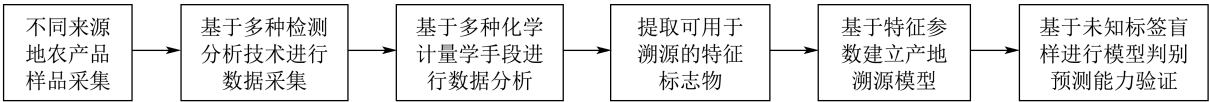


图 1 农产品产地溯源基本流程

Fig.1 Basic process of agricultural product origin traceability

2 产地溯源技术的类别及特点

2.1 产地溯源的检测技术

目前，国内外研究者基于感官特性、有机组分、微量元素含量、稳定同位素比率、挥发性成分等特异性指标，已经开发了基于大量检测技术的溯源方法来识别食品的真实性^[7]，典型的溯源技术有近红外光谱技术、有机组分指纹图谱分析技术、矿物元素指纹图

谱分析技术、稳定同位素分析技术、智能感官系统分析技术、分子生物学及代谢组学溯源技术等^[8]。不同产地溯源检测技术的优缺点对比分析见表 1。

2.2 产地溯源的数据分析技术

随着计算机技术的不断发展，目前应用于农产品产地溯源的化学计量学分析手段种类多样^[16]，一般包括无监督学习分析技术和有监督学习分析技术两大类^[7]，具体见表 2。

表 1 不同产地溯源检测技术特点的对比分析

Table 1 Comparative analysis of the characteristics of different origin traceability technology				
类别	特征标志物	优点	缺点	文献
近红外光谱技术	特征波长	稳定性和重现性好，高效无损、无污染，低成本，前处理简单，可实现无接触测量	数据维度过高、数据处理烦琐，易受光谱仪器内部环境和样品外部环境干扰，对低含量成分的检测灵敏度低	[9,10]
有机组分分析技术	特征氨基酸、有机酸、黄酮类等	检测灵敏度高、参数多样	易受到外界环境影响，准确度可控性低	[11,12]
矿物元素分析技术	特征元素	候选参数多样、高通量	易受农药、化肥等农业投入品的影响	[7,13]
稳定同位素分析技术	同位素比例	高准确度、高灵敏度、污染少	检测参数较少、对仪器设备要求高	[14]
智能感官分析技术	传感器响应特征	识别便捷快速、数据容量大	评价依赖于预设的传感器和数据处理单元，对于非常规或复杂的风味变化可能不够灵活	[7]
分子生物学技术	特征基因片段	易分型、重复性好、稳定性高、不易受环境干扰	检测过程繁琐、周期长、成本高、规模化和批量化难度大	[12,15]
代谢组学分析技术	小分子差异代谢物	适用范围广、化学参数丰富、高通量	定性过程复杂、成本高	[7]

表 2 农产品产地溯源中常用化学计量学分析及特点

Table 2 Common chemometric analysis techniques and their characteristics in the traceability of agricultural product origins				
类别	名称	英文名称	缩写	特点
无监督学习分析技术	主成分分析	Principal component analysis	PCA	除传统常用方差分析外，可细分为降维和分类两种，具有简单的算法结构，计算机背景依赖度低，软件易获得，操作便捷化等
	层次聚类分析	Hierarchical cluster analysis	HCA	
	线性判别分析	Linear discriminant analysis	LDA	
有监督学习分析技术	支持向量机	Support vector machine	SVM	能够解决非线性重叠问题，算法结构复杂、有时需依赖于编程技术、软件要求高、拟合能力强等
	决策树法	Decision tree	DT	
	随机森林法	Random forest	RF	
	人工神经网络	Artificial neural network	ANN	
	k-最近邻法	k nearest neighbor algorithm,	k-NN	
	偏最小二乘法判别分析	Partial least squares discriminant analysis	PLS-DA	
	正交偏最小二乘法判别分析	Orthogonal partial least squares discriminant analysis	OPLS-DA	

3 产地溯源技术的研究与应用

3.1 近红外光谱溯源分析技术

近红外光 (Near-infrared, NIR) 是一种电磁波, 位于吸收光谱中首个非可见光区, 其波长范围为 780~2 526 nm, 介于可见光与中红外光之间, 该光谱区富含的物质信息可有效用于物体化学成分的鉴定及物理性质解析。NIR 光谱技术因具有高效、快速、无损、无污染及低成本检测的特点, 而被广泛应用于食品产地溯源的研究中^[9]。Eisenstecken 等^[17]将 NIR 技术与化学计量学相结合, 开展了对来自不同海拔高度苹果的鉴别。陈明明等^[18]采用 NIR 技术结合偏最小二乘判别分析法实现了对来自泰来、白城、泗水、杜尔伯特蒙古族自治县四个绿豆原产地的快速识别。Jin 等^[19]采用傅立叶变换近红外光谱法对安徽省黄山市距离较近地理来源 (黄山区、新明镇、龙门镇和三口镇) 的太平猴魁绿茶进行了快速鉴定, 基于四个不同产区茶叶的光谱信息建立了极限学习模型, 经测试验证, 分类准确率达 95.35%。Kabir 等^[20]将 NIR 与机器学习技术相结合, 对中国不同原产区的 16 个小米品种进行了鉴别, 结果表明近红外光谱结合 SVM、RF 或 LDA 分析的判别准确率可高达 99.50%。

NIR 技术在众多溯源技术中属于快速分析技术中的一种, 主要依赖于化学键振动、转动倍频及合频信号, 尽管具有样品制备要求低、无损检测、操作简单、便于实现批量化或现场化检测等优势, 但由于其谱带强度仅为基频吸收的十万分之一, 该技术偶尔存在检测灵敏度低、谱图吸收峰叠加等问题, 并且外界环境的温湿度和样品粒度所造成的多变性和非线性也往往给光谱数据分析造成困扰^[21]。因此, 必须尽可能保障用于建模样本的代表性和数据量, 以更好地提高光谱溯源技术的准确度和稳定性。

3.2 有机组分溯源分析技术

有机组分指纹图谱分析过去常应用于中草药的质量控制研究中, 将中药及其制剂中的有效化学成分类别及含量汇集形成有机组分的指纹图谱, 进而实现对中药质量的有效分级和评价, 具有系统性、特征性和稳定性等特点^[22]。随着“中药鉴别指纹图谱”的研究思路和技术不断向食品产地溯源研究中引入, 有机组分指纹图谱方法已经应用到多种农产品的产地识别中^[23]。例如 Liu 等^[24]采用液相色谱-

串联质谱法、PCA 和 PLS-DA 分析法对云南、安徽和湖南三大不同产地来源的茯苓中有机组分进行了评价, 筛选到了三种碳水化合物、四种氨基酸和四种三萜类化合物作为茯苓起源追踪的生物标志物。Latti 等^[25]分析了越橘中的花青素含量, 依据花青素含量建立了芬兰南部和北部的越橘的识别方法。Barbosa-Pereira 等^[26]将高效液相色谱-光电二极管阵列质谱联用以及分光光度测定-多变量分析相结合评估了不同品种及委内瑞拉不同区域获得的可可豆壳的化学指纹, 研究结果提供了 39 种化合物的全面指纹图谱和定量数据, 其中可可碱、表儿茶素、槲皮素-3-O-葡萄糖苷等关键有机组分可作为标记物支撑不同品种和来源的可可豆壳分类。李红等^[27]利用优化的索氏提取/气相色谱-串联质谱法对不同产地大米中的角鲨烯进行定性及定量分析, 结果表明基于该方法测定角鲨烯含量可作为区分大米不同种属、产地和品质的有效方法。何婉琳等^[28]利用气相色谱-离子迁移谱对不同产区 (河北魏县、赵县, 河南虞城县、宁陵县, 山东垦利区和江苏滨海县) 秋月梨的挥发性香气成分进行了测定, 结果共筛选到 76 种挥发性成分, 其中异戊醛、丁酸甲酯和乙酸异丁酯可作为河北魏县秋月梨的溯源指标。

植物体有机组分十分复杂, 许多成分因标准品匮乏、检测方法不成体系等原因, 无法做到快速精准定量, 大大限制了该技术的应用效率和效力。随着近年来代谢组学技术的兴起, 基于各种化合物的相对值定性分析模式, 为有机组分指纹图谱分析技术提供了有力的补充。

3.3 矿物元素溯源分析技术

由于农产品中矿质元素的含量与其产地环境密切相关, 多元素指纹技术已被广泛应用多种农产品的地理来源鉴定^[29]。研究者将电感耦合等离子体质谱与数据驱动的簇类独立软模式法 (dd-SIMCA) 和 k-NN 模型相结合, 对印度、越南和中国大米样品进行地理来源鉴定, 确定了 14 个用于区分三个国家大米样品产地溯源的标志性元素, 其中与印度和越南大米样品相比, 中国大米样品的 Ca、Al 和 Mn 浓度更高; 与中国和印度大米样品相比, 越南大米样品的 Zn 含量较高, 而 Ge 的含量较低; 与中国和越南大米样品相比, 印度大米样品中 B、Sr、Se、Cu、Mo、Co、W、Fe 和 Ti 的含量较高^[30]。Ca、Fe、Na、Zn 和 Mo 在小麦中的含量与产地关系密切, 可作为小麦产地溯源的有效元素^[31]。Ren 等^[32]采用

电感耦合等离子体质谱技术绘制了来自其红茶核心产区（祁门）和传统产区（贵池和东至）的 104 个祁门红茶样品的 27 种矿物元素的元素指纹图谱，并基于筛选出的 21 种特征元素，结合机器学习算法对不同产区的祁门红茶进行了产地识别，结果表明 LDA 和 SVM 模型的判别能力最优，预测准确度高达 100.00%。李涛等^[33]通过对不同产区的苹果中 30 种矿物元素进行测定，筛选出 K、Na、Ca、V、Cr、Ni、Sr 和 Mn 等元素可作为区分甘肃静宁、陕西洛川和山东烟台三个地区苹果的特征指标，其判别准确率在 95.00% 以上。

相较于其它溯源技术，基于矿物元素指纹图谱的溯源技术在农产品溯源中的应用较为广泛（表 3），因为基于电感耦合等离子体－质谱等检测技术，可批量化实现多种元素的定量分析，广泛的元素参数基础有利于特征成分的挖掘。综合该技术在多种农产品溯源中的应用情况来看，Ca、Cu、Mn 三种元素在产地来源识别的特征标志性元素中出现频率较高。但整体而言，不同农产品类型、不同产地来源之间的特征标志物并无明显规律，因此，需要因地制宜地针对具体地区的特定农产品进行定制化特征身份化元素挖掘，才能有效建立科学可靠的溯源模型。

表 3 矿物元素溯源技术在农产品产地溯源中的应用
Table 3 Application of mineral element traceability technology in agricultural product origin traceability

类别	特征标志性元素	地理来源	化学计量学手段	参考文献
大米	Ca、Al、Mn、Zn、Ge、B、Sr、Se、Cu、Mo、Co、W、Fe、Ti	中国、越南、印度	dd-SIMCA、k-NN	[30]
小麦	Na、Ca、Fe、Zn、Mo	河北赵县、河南辉县、陕西杨凌	ANOVA、LDA	[31]
祁门红茶	As、V、Pb、Be、Cd、Cr、Co、Sr、Ni、Rb、Ba、Zn、Cu、P、Mn、Sb、Mg、K、C、Ca、Mo	祁门、贵池、东至	LDA、SVM	[32]
苹果	K、Na、Ca、V、Cr、Ni、Sr、Mn	甘肃静宁、陕西洛川、山东烟台	LDA	[33]
青稞	Ca、Cu、Zn、Mg、P、Mn、K	西藏不同地区（阿里、昌都、拉萨、林芝、山南）	PLS-DA	[34]
花生	P、K、Ca、Mn、Zn、Sr、Rh、Cd、Tb、Pt、Ti	吉林不同地区（白城、松原、四平）、江苏（南通、宿迁、台州）、山东（临沂、烟台、青岛）	k-NN、LDA、SVM	[35]
鸭梨	Ge、Ba、Pb、Pd、Ni、Ti	河北不同地区（魏县、晋州、辛集、赵县、深州、泊头、肃宁和固安）	LDA	[36]
蓝莓	Ca、Cr、Cs、Mg、Mn、P、Rb、Sb、Th、Y	贵州不同地区（马江、黄平、紫云）	LDA	[37]
绿茶	Mg、Sr、Na、Ga、Ni、Cd、Ba、Rb、K、Zn	浙江、山东、四川、重庆、贵州、广东、广西、福建	ANOVA、PCA、LDA	[38]
普洱生茶	Cu、Fe、Mn、Ca、Mg、Zn、Al、S、Kr、Ce	云南不同地区（双江拉祜族佤族布朗族傣族自治县、临翔区、澜沧拉祜族自治县、勐海县、勐腊县）	OPLS-DA	[39]
枸杞	Al、As、B、Co、Cu、Dy、Mo、Nb、Ni、Sb、Se、Tl、U、Y、Fe、Zn、P、Ca、Ir、Hf	宁夏、新疆、青海、甘肃	LDA、OPLS-DA	[40]
红枣	Mn、Sr、Sn、Pd、Hg、Cu、As、B、Ba、Co	宁夏不同地区（灵武、中宁、同心）	OPLS-DA	[41]

表 4 稳定同位素溯源技术在农产品产地溯源中的应用

Table 4 Application of stable isotope traceability technology in agricultural product traceability				
农产品类别	稳定同位素参数	地理来源	化学计量学法	参考文献
蓝莓	$\delta^{87}\text{Sr}$	贵州不同地区（马江、黄平、紫云）	LDA	[34]
大米	$\delta^{11}\text{B}$ 、 $\delta^{87}\text{Sr}$	澳大利亚、美国、日本、中国	—	[44,45]
糙米	$\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$	中国、巴基斯坦、马来西亚、孟加拉国、泰国、菲律宾、日本	PLS-DA、LDA	[46]
苹果	$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$	意大利不同地区（费拉拉、特伦托）	LDA	[47]
小麦	$\delta^{13}\text{C}$	美国、加拿大、欧洲	正向逐步判别分析	[48]
花生	$\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$	山东、江苏、吉林	ANOVA、PCA、k-NN、LDA、SVM	[49]
桃	$\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$	辽宁普兰店、山东莱阳、北京会城、河北顺平、河南西化、山东沂水	LDA、OPLS-DA	[50]
大麦	$\delta^{87}\text{Sr}$	澳大利亚、法国、加拿大、美国	ANOVA	[51]
祁门红茶	$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$	安徽省不同地区（东芝、贵池、祁门）	k-NN	[52]
葡萄	$\delta^2\text{H}$	中国不同地区（上海、新疆、陕西）	PLS-DA、RF	[53]
洋葱	$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$	韩国不同产区	PCA、LDA	[54]
西红柿	$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$	意大利不同地区（皮埃蒙特、埃米莉亚·罗曼尼亚、阿普利亚）	LDA	[55]
马铃薯	$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$	意大利不同地区（西西里、阿普利亚和托斯卡纳）	判别因子分析（Discriminant Factorial Analysis, DFA）	[56]
茶	$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^2\text{H}$	中国、印度、斯里兰卡	LDA	[57]
板栗	$\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$	河北迁西、北京怀柔、天津蓟县、陕西镇安、福建建瓯、安徽泾县、山东泰安、辽宁丹东、湖南祁阳、湖北罗田	ANOVA、PCA、OPLS-DA	[58]

3.4 稳定同位素溯源分析技术

稳定同位素组成是生物体的自然属性，与作物生长环境密切相关，因此根据生物体内某些特定同位素组成及丰度所呈现的地域特征，可作为生物体产地来源识别的重要依据^[10]。例如植物的 C 同位素（ $\delta^{13}\text{C}$ ）受遗传类型和气候因素（特别是光合作用相关的因素）的影响；作物的 N 同位素（ $\delta^{15}\text{N}$ ）主要与耕作方式、地质和土壤特性有关；植物的 H 同位素（ $\delta^2\text{H}$ ）和 O 同位素（ $\delta^{18}\text{O}$ ）与蒸腾能力等物理因素有关，也受当地降水和灌溉水的影响^[42]。目前在农产品产地溯源中常用的同位素主要包括 H、O、C、N、S、B、Sr 等^[43]。有研究发现澳大利亚、美国和日本三个国家的糙米中 $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值范围不同，可利用这几种稳定同位素比的不同阈值区分三个国家产地的糙米^[44,45]。Zhi 等^[46]连续四年对来自亚洲 7 个国家 8 个主产区的 115 批次大米样品的稳定同位素比值分析，结合 ANOVA 分析和多种多元建模方法进行来源判别，最终确定 PLS-DA 和 LDA 的产地判别效果最佳，交叉验证准确率分别

接近 85.00% 和 90.90%，并揭示 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 、和 $\delta^{18}\text{O}$ 是水稻原产地溯源的重要变量。Brombin 等^[47]测定了来自意大利费拉拉和特伦托两个地区苹果的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 值，经分析发现 S 是追踪苹果样品来源区域的最佳标记物，这与土壤中硫酸盐和硫化物的存在有关。Branch 等^[48]发现仅需要 $\delta^{13}\text{C}$ 一项指标就可以完全区分美国、加拿大和欧洲产区的小麦样品。Wadood 等^[49]基于稳定同位素溯源分析技术证实 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 可用来辨别来自山东、江苏和吉林产区的花生。稳定同位素溯源技术在农产品产地溯源中的具体应用见表 4。

总体而言，目前稳定同位素在农产品产地溯源中的应用十分广泛，涉及农产品品类多样，涉及地理来源丰富，可用稳定同位素参数包括 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $\delta^{11}\text{B}$ 、 $\delta^{87}\text{Sr}$ 等，其中 $\delta^{13}\text{C}$ 不论在国际间，还是在国内不同区域农产品的溯源中都表现出了很好的优势^[59]。然而，尽管稳定同位素溯源法获得的稳定同位素比值不易受外界因素（如贮存条件、贮存时间等）影响，且检测结果可直接通过

质谱图直观分析获得,但在实际应用过程中,同一地理来源样品中稳定同位素的丰度往往因不同年份间的气候、土壤、生物学等因素的变化而存在差异。因此,稳定同位素溯源技术对农产品产地的判别准确率和预测能力需依赖于海量数据及多元模型。此外,该技术与多元素指纹图谱分析技术联合应用可有利于溯源能力的提高。

3.5 智能感官系统溯源分析技术

智能感官系统一般由人类感官仿生传感器阵列、数据处理单元和模式识别系统组成的智能检测系统,常用的电子鼻和电子舌等已广泛应用于农产品的风味品质评价、真实性鉴别及产地溯源分析等方面^[60]。黄汇惠等^[61]将电子鼻技术与 PCA、典型判别分析及多层神经网络分析等化学计量学分析方法相结合,开展了湄潭春茶的产地溯源研究,结果发现电子鼻与多层神经网络模型相结合对湄潭春茶的产地来源判别效果最佳。田晓静等^[62]基于电子鼻检测结果发现结合典则判别分析可有效区分青海柴达木、甘肃瓜州和宁夏中宁三个产区的枸杞子,基于 BP 神经网络建立产地溯源模型的预测准确率为 96.00%。陈立同等^[63]基于电子舌技术对来自黑龙江绥化、内蒙呼伦贝尔、江苏宿迁、山东聊城、湖南衡阳多个不同地区大豆的指纹图谱信息进行了采集,通过卷积神经网络模型实现了大豆地理来源的识别,模型测试准确率达 93.60%。

基于电子鼻、电子舌等智能感官系统能够检测出农产品的整体风味,但评价的准确性、模型的可靠性等尚待进一步完善。未来应着力加强智能感官传感器评价与人工感官评价及风味成分定量检测的综合利用,通过优势互补的方式,确保各类风味相关数据的客观性和准确性,以建立最佳的产地溯源模型^[64]。

3.6 分子生物学溯源分析技术

分子生物学溯源技术主要是从基因水平上运用脱氧核糖核酸(Deoxyribonucleic Acid, DNA)在机体的稳定性开展溯源。DNA 作为生物体的特有属性,具有种间的特异性和进化上的保守性,因此通过基于农产品的特征 DNA 挖掘可建立有效的分子层面的农产品真实性识别^[65]及产地溯源技术^[66]。在分子生物学溯源技术中,基于分子标记的方法已经相对成熟,而一些创新的方法如基于等温扩增的方法和 DNA 元编码法直到近年来才在农产品溯源中得到应用^[67]。Pinczinger 等^[68]利用 16 个简单序列重

复(Simple Sequence Repeats, SSR)标记的指纹图谱测试了德国 6 个不同来源的树莓品种的类型真实性,成功识别到在 33 个样本中有 9 个不符合产地来源的样品。Pasqualone 等^[69]开发一种基于 DNA 微卫星的分析方法,实现了三个意大利受保护原产地保护鲜食橄榄的可追溯性,该技术采用 16 对引物进行分析,平均每对引物可检测到 5 个不同的等位基因,区分力为 0.56~0.90。但基于分子生物学的溯源技术整体上开发周期长、研究成本高、执行难度大,因此近年来在农产品产地溯源方面的应用有限。

3.7 代谢组学溯源分析技术

近年来,组学技术已成为现代食品安全评价标准的有力补充^[70]。当植源性食品的质量受到地理环境、生长条件和栽培方法的影响时,代谢组学作为研究生物介质中复杂分子组成的重要工具,具有高通量、高精度、全阵列分析特点^[71],为解决食品安全风险监测中的难点提供了新的思路和技术方法,在食品的掺假鉴别和来源监控方面发挥着巨大潜力^[72,73]。例如 Rivera-Pérez 等^[74]利用基于气相色谱-轨道离子阱-高分辨率质谱(Gas Chromatography-Orbitrap-High Resolution Mass Spectrometry, GC-Orbitrap-HRMS)的非靶向代谢组分析方法,对来自巴西、越南和斯里兰卡这三个不同地理来源的黑胡椒样品的代谢产物进行了表征,结果筛选到 12 个关键代谢标志物,基于 OPLS-DA 分析模型对黑胡椒地理来源的判别准确率达 100%。Li 等^[75]采用基于超高效液相色谱-串联质谱仪(Ultra High Performance Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometer, UPLC-MS/MS)的非靶代谢组学手段,对黑龙江省和江苏省的稻米样品,即稻花香、淮稻 5 号、松京和长粒香进行了跟踪分析,结果表明 PLS-DA 分析模型的判别准确率高达 100%。Zhao 等^[76]基于 UPLC-MS/MS 的广泛靶向代谢组学方法,结合多元统计分析,对北京平谷桃及其周边两个地区的产地进行了区分,最终发现基于 159 个已鉴定代谢物的 OPLS-DA 分析模型可实现对来自平谷桃子与其他邻近地区桃子的有效识别。王世成等^[77]借助高效液相色谱-高分辨质谱(High Performance Liquid Chromatography High-Resolution Mass Spectrometry, HPLC-HRMS)的非靶代谢组分析法,从中国 5 个地区总计 105 份番茄样品中筛选到了 875 个化合物,并进一步利用 OPLS-DA 分析构建了产地溯源模型,判别正确率达 99.05%。

表 5 代谢组学在农产品地理来源识别中的应用

Table 5 Application of metabolomics in geographical source identification of agricultural products				
农产品	组学技术	地理来源	化学计量学手段	参考文献
芦笋	核磁共振氢谱 (Nuclear Magnetic Resonance Hydrogen Spectrum, ¹ H NMR)	荷兰、西班牙、希腊、 秘鲁	PCA、SVM	[78]
胡萝卜	高效液相色谱飞行时间质谱仪 (High Performance Liquid Chromatography Time-of-Flight Mass Spectrometer, UPLC-QTOF-MS)	奥地利的五个联邦州	PCA、SIMCA、DD-SIMCA、 PLS-DA、OPLS-DA	[79]
玉米	超高效液相色谱串联四极杆飞行时间质谱 (Ultra High Performance Liquid Chromatography Tandem Quadrupole Time-of-Flight Mass Spectrometry, UHPLC-QTOF-MS)	乌克兰、法国、匈牙利、 斯洛伐克、西班牙、 秘鲁、美国	PCA、变化向量分析、 ANOVA	[80]
稻米	顶空固相微萃取气相色谱质谱 (Headspace Solid-Phase Microextraction Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS)	中国、越南、印度	PLS-DA、HCA、DD- SIMCA、k-NN	[81]
绿茶	超高效液相色谱高分辨率质谱 (Ultra High Performance Liquid Chromatography High-Resolution Mass Spectrometry, UHPLC-HRMS)	中国、日本、韩国	PCA、OPLS-DA、PLS-DA	[82]
榛子	高效液相色谱-电喷雾离子化-四极杆 串联飞行时间质谱 (High Performance Liquid Chromatography Electrospray Ionization Quadrupole Tandem Time-of-Flight Mass Spectrometry, UHPLC-ESI-QTOF-MS)	土耳其、格鲁吉亚、 智利、意大利	OPLS-DA、HCA	[83]
油菜籽	UPLC-QTOF-MS	中国、加拿大、蒙古	PCA、OPLS-DA	[84]
大蒜	HS-SPME-GC-MS、UHPLC-QTOF-MS	廊坊、济宁、 开封、大理	PCA、PLS-DA	[85]
花椒	¹ H NMR	四川、甘肃、陕西、 山东	PCA、HCA、LDA、 PLS-DA、RF、SVM	[86]
芹菜	¹ H NMR	澳大利亚、中国	PCA、PLS-DA、Heatmap	[87]
百里香	UHPLC-QTOF-HRMS	西班牙、波兰、 摩洛哥	HCA、Heatmap、PLS-DA、 OPLS-DA	[88]

随着现代技术手段的不断发展，用于开展代谢组学研究的支撑技术层出不穷，因具有海量数据量优势，基于代谢组学的溯源技术已成为近年来农产品产地溯源的重要新兴手段之一（表 5）^[71]。此外，代谢组学技术的广泛使用也为有机组分指纹图谱分析技术提供了有力的补充。然而由于支撑代谢组分析的仪器设备昂贵，许多代谢物挖掘类研究多采取送去第三方公司的方式，测定结果的准确度和实用度往往受公司数据库容量、从业人员专业度等的影响。研究人员无法做到适时跟进，这就可能导致某些特征的代谢物被当做异常值而漏掉，这将是未来基于代谢组开展农产品产地溯源过程中需要解决的问题。

3.8 多种溯源手段联合分析技术

近年来，多种溯源技术开始联合应用于识别农产品的地理来源。例如稳定同位素、多元素和非靶向代谢组学与化学计量学相结合的方法已经有效用

于生姜的地理来源鉴别，即基于 4 种同位素（ $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ ）、12 种矿物元素（Rb、Mn、V、Na、Sm、K、Ga、Cd、Al、Ti、Mg 和 Li）、1 种生物元素（%C）和 143 种代谢物的特征标志参数，SVM 和 RF 两种模型对来源于四川、江西、云南、湖北、湖南、山东和河南的生姜的判别准确率均达到了 100.00%^[89]。稳定同位素与多元素溯源法联合应用可有效识别桃的地理来源，Li 等^[50]基于特征参数 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、Na、Cd、V、Al、Be、K、Co、Cu 和 Ag，利用 LDA 和 OPLS-DA 分析法构建的判别分析模型对桃地理来源（辽宁普兰店、山东莱阳、山东沂水、北京平谷、河北顺平、河南西华）的判别准确率达 95.30%。康露等^[90]基于特征参数 $\delta^{87}\text{Sr}$ 、Ca、K、Na、Ni、Cr、V、Rb 和 As 建立的判别模型对产自新疆哈密、巴州、吐鲁番和阿克苏的甜瓜的识别准确率达 100.00%。Li 等^[37]将多元

素与稳定同位素溯源技术相结合,借助 LDA 分析法,建立了基于 Ca、Cr、Cs、Mg、Mn、P、Rb、Sb、Th、Y 和 $\delta^{87}\text{Sr}$ 这 11 种特征参数的蓝莓产地溯源模型,其判别准确率为 95.80%,远高于仅基于特征元素所建模型和单一基于特征稳定同位素所建模型的判别准确率 89.40% 和 81.30%。张欣昕等^[91]基于多元素与稳定同位素溯源分析技术的联合应用,结合 LDA 分析建立了以在 Na、Al、P、Mn、Co、Ni、Cu、Cd、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 为特征指纹的溯源模型,对不同产地(广东、内蒙古、新疆、黑龙江和四川)马铃薯的判别正确率达 94.7%。王宇童等^[92]将有机组分和矿物元素溯源技术相结合,筛选出了特征标志有机成分为氟化物、茶红素、游离氨基酸和茶褐素,鉴定出的特征元素为 Cu、Na、Fe、Mg、Zn、P、B、Ba、Dy、Ho、Gd、Yb、Cr、Tm、Kr、Er、Sr、Nd、Pr、Eu、Sm、Ce 和 Lu,基于这 27 中特征标志物与多层感知器分析技术联合,建立了能够有效实现普洱茶产地(西双版纳傣族自治州勐海县、临沧市凤庆县、大理白族自治州南涧彝族自治县、普洱市思茅区、文山壮族苗族自治州麻栗坡县)识别的模型,测试集的判别准确率为 95.50%。

整体来看,将多种溯源分析技术联合使用所构建的溯源模型判别准确率要优于基于单一溯源技术所建立的模型,目前常联合应用于农产品产地溯源中的分析技术多为稳定同位素溯源技术和多元素溯源技术,二者相结合所建立溯源模型的判别准确率能达到 94.00% 以上。而将同位素、矿物元素、生物元素和代谢物联合分析所建立的 SVM 和 RF 溯源模型的判别准确率均达到了 100.00%。可见多种溯源技术的综合利用对提高农产品产地溯源的准确性具有重要的意义,也是农产品溯源的主流趋势,但如何在不增加时间和经济成本的前提下,综合实现各种溯源分析技术优势的最大集成,仍是未来要解决的关键问题。

4 展望

食品贸易全球化给食品安全和人类健康带来了严重威胁,消费者越来越意识到食品安全对健康的重要性,并开始关注食品的地理来源。为了满足消费者日益增长的透明度要求,食品行业的激烈竞争已从“营销”转向“原产地”控制^[4]。随着检测技术的不断发展以及农产品内部成分的复杂化,依靠单一的技术已无法实现有效的产地溯源。未来,随

着贸易的自由化和市场的多元化,迫切需要建立起能够有效实现产地真实性精准溯源的技术体系,而该技术体系只有具备便捷性、时效性、低成本、批量化、高灵敏度等多方面技术特征,才能真正在产品贸易及政府监管等方面得到切实应用。因此,迫切需要综合利用每一种溯源技术及模型的优点,针对不同农产品的属性特征和地理来源实际,定制化优化各类技术的互补组合方式,促进溯源成效最大化和成本最小化,积极探索并建立能够尽可能减少时间和经济成本的最优溯源检测及分析技术的联合使用策略。通过“特征因子挖掘-产区分级-产地溯源”模式,因地制宜地建立农产品特征指纹产地溯源体系,已成为当下农产品产地来源识别的主流方向,未来在鉴定高价值农产品的真假和提高农产品产地溯源的准确性上也将有着更为广阔的应用前景。

此外,在农产品产地溯源研究中,仍存在许多现实问题亟待攻克,例如:(1)如何精准照顾到品种,栽培,气候变化,农产品成熟度,农药、化肥等化学投入品使用等因素对溯源结果的影响;(2)用于产地溯源体系建立的判别模型有限,通常需要联合多种方法共同分析,过程繁琐,分析效率低;(3)农产品产地溯源研究多存在单打独斗现象,未形成有效的特征性参数、品质数据的共享机制,导致现有的溯源体系仅限于某个研究团队、某些区域、某种农产品的研究,样品数量较少,工作冗余严重,无法真正实现普适有效的产地溯源机制。因此未来关于农产品产地溯源的研究方向还应聚焦影响因素、模型开发、资源共享等众多方面,在实际工作开展过程中,应注重扩大样本量,聚焦多项检测技术所得指纹信息的科学融合,强调溯源体系的实用性、便捷性和普适性,探索地理来源较为狭窄的小区域的精准溯源模型,从而从多角度切实促进农产品产地溯源的商业化和标准化,真正做到为保护区域特色农产品和助推农业高质量发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 夏立娅.大米产地特征因子及溯源方法研究[D].保定:河北大学,2013.
- [2] DIAS C, MENDES L. Protected designation of origin (PDO), protected geographical Indication (PGI) and traditional speciality guaranteed (TSG): A bibliometric analysis [J]. Food Research International, 2018, 103: 492-508.
- [3] LI Y, LIANG L, XU C. UPLC-Q-TOF/MS-based untargeted metabolomics for discrimination of navel oranges from

- different geographical origins of China [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 137: 110382.
- [4] ZHAO S, ZHAO Y. Application and preparation progress of stable isotope reference materials in traceability of agricultural products [J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2021, 51(8): 742-753.
- [5] DOU X, ZHANG L, YANG R, et al. Mass spectrometry in food authentication and origin traceability [J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 2022, 42(5): 1772-1807.
- [6] 魏益民,郭波莉,魏帅,等.食品产地溯源及确证技术研究和应用方法探析[J].*中国农业科学*,2012,45(24):5073-5081.
- [7] 陈坡,曹进,李梦怡,等.食品产地溯源技术及结合化学计量学应用进展[J].*食品安全质量检测学报*,2023,14(22):116-125.
- [8] KATERINA K, ACHILLEAS K, CONSTANTIONS E S, et al. Geographical origin authentication of agri-food products: a review [J]. *Foods*, 2020, 9(4): 489.
- [9] FENG L, WU B, ZHU S, et al. Application of visible/infrared spectroscopy and hyperspectral imaging with machine learning techniques for identifying food varieties and geographical origins [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 680357.
- [10] 马永杰,郭俊先,郭志明,等.基于近红外透射光谱及多种数据降维方法的红富士苹果产地溯源[J].*现代食品科技*,2020,36(6):303-309.
- [11] 孙淑敏,郭波莉,魏益民,等.动物源性食品产地溯源技术研究进展[J].*食品科学*,2010,31(3):288-292.
- [12] 申兆栋,黄冬梅,蔡友琼,等.氨基酸与脂肪酸指纹分析技术在农产品产地溯源中的应用研究[J].*农产品质量与安全*,2020,5:80-85.
- [13] 林滢,林秀,谢婷婷,等.基于矿物质元素指纹分析技术的浦城大米产地溯源研究[J].*食品与生物技术学报*,2024,43(5):91-100.
- [14] 孙学丽.基于稳定同位素技术的食品检验应用研究进展[J].*食品安全导刊*,2024,1:154-157.
- [15] 吴潇,吕贝贝,王金斌,等.SNP标记用于猪肉产品DNA溯源[J].*食品科学*,2017,38(24):278-282.
- [16] 田甜,郭自国,周天明,等.柑橘属产品真实性溯源技术研究现状及展望[J].*现代食品科技*,2023,39(12):364-374.
- [17] EISENSTECKEN D, STÜRZ B, ROBATSCHER P, et al. The potential of near infrared spectroscopy (NIRS) to trace apple origin: Study on different cultivars and orchard elevations [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 123-131.
- [18] 陈明明,邱彦超,宋妍,等.基于近红外光谱技术对绿豆产地溯源的研究[J].*黑龙江八一农垦大学学报*,2024,36(1):49-54.
- [19] JIN G, XU Y, CUI C, et al. Rapid identification of the geographic origin of Taiping Houkui green tea using near-infrared spectroscopy combined with a variable selection method [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(13): 6123-6130.
- [20] KABIR MH, GUINDO ML, CHEN R, et al. Geographic origin discrimination of millet using Vis-NIR spectroscopy combined with machine learning techniques [J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2767.
- [21] 王静,刘超子,王铭,等.同位素质谱及近红外光谱技术在棉花产地溯源中应用进展[J].*中国农学通报*,2023,50(12):42-46.
- [22] 罗国安,梁琼麟,王义明.中药指纹图谱-质量评价、质量控制与新药研发[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [23] 张晓焱,苏学素,焦必宁.农产品产地溯源技术研究进展[J].*食品科学*,2010,31(3):271-278.
- [24] LIU X, ZHONG C, XIE J, et al. Geographical region traceability of *Poria cocos* and correlation between environmental factors and biomarkers based on a metabolomic approach [J]. *Food Chemistry*, 2023, 417: 135817.
- [25] LATI AK, RIIHINEN KR, KAINULAINEN PS. Analysis of anthocyanin variation in wild populations of Bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) in Finland [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(1): 190-196.
- [26] BARBOSA-PEREIRA L, BELVISO S, FERROCINO I, et al. Characterization and classification of cocoa bean shells from different regions of venezuela using HPLC-PDA-MS/MS and spectrophotometric techniques coupled to chemometric analysis [J]. *Foods*, 2021, 10(8): 1791.
- [27] 李红,田福林,刘成雁,等.气相色谱-串联质谱法测定不同产地大米中的角鲨烯[J].*分析测试学报*,2011,30(10): 1179-1182.
- [28] 何婉琳,施露,林梦桦,等.基于气相色谱-离子迁移谱分析不同产地秋月梨品质差异[J].*食品科学*,2024,45(5):118-125.
- [29] 田玲,周海超,张昂,等.咖啡豆产地溯源研究进展[J].*现代食品科技*,2022,38(7):327-337.
- [30] QUINN B, MCCARRON P, HONG Y, et al. Elementomics combined with dd-SIMCA and K-NN to identify the geographical origin of rice samples from China, India, and Vietnam [J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132738.
- [31] ZHAO HY, GUO BL, WEI YM, et al. Effects of wheat origin, genotype, and their interaction on multielement fingerprints for geographical traceability [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(12): 10957-10962.
- [32] REN Y, FENG C, YE Z, et al. Keemun black tea: Tracing its narrow-geographic origins using comprehensive elemental fingerprinting and chemometrics [J]. *Food Control*, 2022, 133: 108614.
- [33] 李涛,谭椰子,王玉,等.基于矿物元素分析的静宁苹果产地溯源[J].*农产品质量与安全*,2023,5:43-49.
- [34] ZHANG T, WANG Q, LI J, et al. Study on the origin traceability of Tibet highland barley (*Hordeum vulgare* L.) based on its nutrients and mineral elements [J]. *Food Chemistry*, 2021, 346: 128928.
- [35] ZHAO H, WANG F, YANG Q. Origin traceability of peanut

- kernels based on multi-element fingerprinting combined with multivariate data analysis [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(10): 4040-4048.
- [36] 李丽梅,李红艳,郑振山,等.基于矿质元素分析的河北鸭梨产地溯源[J].*食品安全质量检测学报*,2022,13(6):2004-2011.
- [37] LI Q, LI C, XIAO S, et al. Tracing the origins of blueberries by their mineral element contents and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios [J]. *Biological Trace Element Research*, 2022, 200(2): 920-930.
- [38] LIU Z, YUAN Y, ZHANG Y, et al. Geographical traceability of Chinese green tea using stable isotope and multi-element chemometrics [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2019, 33(8): 778-788.
- [39] 王宇童,唐卿雁,邵金良,等.基于稳定同位素与矿质元素的普洱生茶产地溯源研究[J].*农产品质量与安全*,2023,6:43-50.
- [40] 王彩艳,开建荣,李彩虹,等.基于矿物元素指纹技术的西北地区枸杞产地判别分析[J].*经济林研究*,2023,41(3):187-196.
- [41] 赵子丹,开建荣,王彩艳,等.基于矿物元素技术的宁夏不同产地红枣的判别分析[J].*经济林研究*,2022,40(4):133-142.
- [42] ZHANG M, LI C, LIU Y, et al. Effects of water isotope composition on stable isotope distribution and fractionation of rice and plant tissues [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 38581384.
- [43] ZHAO Y, ZHANG B, CHEN G, et al. Recent developments in application of stable isotope analysis on agro-product authenticity and traceability [J]. *Food Chemistry*, 2014, 145: 300-305.
- [44] ODA H, KAWASAKI A, HIRATA T. Determination of the geographic origin of brown-rice with isotope ratios of $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. *Analytical Sciences*, 2001, 17(1): i1627-i1630.
- [45] KAWASAKI A, ODA H, HIRATA T. Determination of the geographic origin of brown-rice with isotope ratios of $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2002, 48: 635-640.
- [46] 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.
- [47] BROMBIN V, MISTRI E, BIANCHINI G. Multi stable isotope ratio analysis for the traceability of northern Italian apples [J]. *Food Chemistry X*, 2022, 16: 100514.
- [48] BRANCH S, BURKE S, EVANS P, et al. A preliminary study in determining the geographical origin of wheat using isotope ratio inductively coupled plasma mass spectrometry with ^{13}C , ^{15}N mass spectrometry [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2003, 18(1): 17-22.
- [49] SYED AW, NIE J, LI C, et al. Geographical origin classification of peanuts and processed fractions using stable isotopes [J]. *Food Chemistry X*, 2022, 16: 100456.
- [50] LI A, ZHAO J, XI J, et al. Geographical authentication of peach in China based on stable isotope combined with multielement analysis of peach juice [J]. *Food Control*, 2021, 127: 1-10.
- [51] 李锦花,冯睿,殷居易,等.锶稳定同位素比质谱在进口大麦原产地溯源中的应用研究[J].*化学研究*,2023,34(1):25-30.
- [52] PENG CY, ZHANG YL, SONG W, et al. Using stable isotope signatures to delineate the geographic point-of-origin of Keemun black tea [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(5): 2596-2601.
- [53] ZENG G, HAO X, 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.
- [54] PARK J H, CHOI S, BONG Y. Geographical origin authentication of onions using stable isotope ratio and compositions of C, H, O, N, and S [J]. *Food Control*, 2019, 101: 121-125.
- [55] LUANA B, FEDERICA C, LARA M, et al. Traceability along the production chain of Italian tomato products on the basis of stable isotopes and mineral composition [J]. *Rapid Communication Mass Spectrom*, 2011, 25: 899-909.
- [56] LONGOBARDI F, CASIELLO G, SACCO D, et al. Characterisation of the geographical origin of Italian potatoes, based on stable isotope and volatile compound analyses [J]. *Food Chemistry*, 2011, 124: 1708-1713.
- [57] PILGRIM T S, WATLING R J, GRICE K. Application of trace element and stable isotope signatures to determine the provenance of tea (*Camellia sinensis*) samples [J]. *Food Chemistry*, 2010, 118: 921-926.
- [58] 邓诗意,殷萍,张强,等.基于稳定同位素和矿物元素的板栗产地判别分析[J].*食品科学*,2023,44(12):351-359.
- [59] SUZUKI Y. Achieving food authenticity and traceability using an analytical method focusing on stable isotope analysis [J]. *Analytical Sciences*, 2021, 37(1): 189-199.
- [60] 王铁龙,许凌云,杨冠山,等.智能感官分析技术在食品风味中的研究进展[J].*食品安全质量检测学报*,2023, 14(8):37-43.
- [61] 黄汇惠,闫莎莎,靳冬武,等.基于电子鼻技术的湄潭春茶产地溯源研究[J].*传感技术学报*,2023,36(5):825-832.
- [62] 田晓静,龙鸣,王俊,等.基于电子鼻气味信息和多元统计分析的枸杞子产地溯源研究[J].*浙江农业学报*,2018, 30(9):1604-1611.
- [63] 陈立同,高文,金鑫宁,等.基于电子舌与MAML-CNN模型的大豆产地溯源快速检测[J].*国外电子测量技术*,2022,41(12):140-147.
- [64] 蓬桂华,陈菊,殷勇,等.基于电子鼻技术的不同种植区域地理标志辣椒风味变化研究[J].*蔬菜*,2022,9:10-15.
- [65] TIAN X R, LYU S X, TIAN H L. Development of an accurate and reliable DNA method for botanical origin authentication of ginseng food products [J]. *Journal of Food Composition and*

- Analysis, 2020, 87: 103419.
- [66] GIUSEPPE M, CARLA G, MASSIMO E M. Chemical partitioning and DNA fingerprinting of some pistachio (*Pistaciavera* L.) varieties of different geographical origin [J]. Phytochemistry, 2019, 160: 40-47.
- [67] VALENTINA F, ISABELLA M, MONICA M M, et al. Molecular approaches to agri-food traceability and authentication: an updated review [J]. Foods, 2021, 10(7): 1644.
- [68] PINCZINGER D, VON RETH M, HANKE M V, et al. SSR fingerprinting of raspberry cultivars traded in Germany clearly showed that certainty about the genotype authenticity is a prerequisite for any horticultural experiment [J]. European Journal of Horticultural Science, 2020, 85: 79-85.
- [69] ANTONELLA P, VALENTINA D R, RAFFAELLA N, et al. Traceability of Italian protected designation of origin (PDO) table olives by means of microsatellite molecular markers [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(12): 3068-3073.
- [70] 李林,邓娜,张博,等.多组学技术及其在食品研究中的应用[J].食品与机械,2023,39(2):17-24.
- [71] LIANG L, LI Y, MAO X, et al. Metabolomics applications for plant-based foods origin tracing, cultivars identification and processing: feasibility and future aspects [J]. Food Chemistry, 2024, 449: 139227.
- [72] 李政,赵燕,鄧梦洁,等.植源性农产品产地溯源技术研究进展[J].农产品质量与安全,2020,1:61-67,84.
- [73] 沈央红,方金玉,朱军莉,等.代谢组学在食品质量安全领域的应用进展[J].食品科学,2023,44(5):282-289.
- [74] RIVERA-PEREZ A, ROMERO-GONZALEZ R, GARRIDO F A. Feasibility of applying untargeted metabolomics with GC-Orbitrap-HRMS and chemometrics for authentication of black pepper (*Piper nigrum* L.) and identification of geographical and processing markers [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(19): 5547-5558.
- [75] LI Z, TAN M, DENG H, et al. Geographical origin differentiation of rice by LC-MS-based non-targeted metabolomics [J]. Foods, 2022, 11(21): 3318.
- [76] ZHAO J, LI A, JIN X, et al. Discrimination of geographical origin of agricultural products from small-scale districts by widely targeted metabolomics with a case study on pinggu peach [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 891302.
- [77] 王世成,明旻,张炜,等.基于高效液相色谱-高分辨质谱法的非靶标代谢组学方法分析鉴别不同产地番茄[J].食品安全质量检测学报,2023,14(20):26-32.
- [78] JULIANE K, MARC R, ERIC R, et al. Determination of the geographical origin of *Asparagus officinalis* L. by ¹H NMR spectroscopy [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(49): 14353-14363.
- [79] ZORA J, ANASTASSIYA T, ANDREAS Z, et al. Multivariate modelling techniques applied to metabolomic, elemental and isotopic fingerprints for the verification of regional geographical origin of Austrian carrots [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127924.
- [80] DAVID S, ELISABETH A, MARINA C, et al. Non-targeted LC-MS metabolomics approach towards an authentication of the geographical origin of grain maize (*Zea mays* L.) samples [J]. Foods, 2021, 10(9): 2160.
- [81] RATNASEKHAR C, OLIVIER C, PHILIP M, et al. Metabolomic fingerprinting of volatile organic compounds for the geographical discrimination of rice samples from China, Vietnam and India [J]. Food Chemistry, 2021, 334: 127553.
- [82] NAVRATILOVA K., HRBEK V, KRATKY F, et al. Green tea: Authentication of geographic origin based on UHPLC- HRMS fingerprints [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2019, 78: 121-128.
- [83] SILVIA G, LUIGI L, GABRIELE R, et al. Untargeted metabolomics with multivariate analysis to discriminate hazelnut (*Corylus avellana* L.) cultivars and their geographical origin [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(2): 500-508.
- [84] YANG R, DENG L, ZHANG L, et al. Comparative metabolomic analysis of rapeseeds from three countries [J]. Metabolites, 2019, 9(8): 161.
- [85] MI S, ZHANG X, WANG Y, et al. Geographical discrimination and authentication of Chinese garlic based on multi-element, volatile and metabolomics profiling combined with chemometrics [J]. Food Control, 2021, 130: 108328.
- [86] CUI C, XIA M, WEI Z, et al. ¹H NMR-based metabolomic approach combined with machine learning algorithm to distinguish the geographic origin of huajiao (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.) [J]. Food Control, 2023, 145: 109476.
- [87] HAZEL L, ANNA K C L, SAM F Y L. ¹H NMR-based metabolomics for the discrimination of celery (*Apium graveolens* L. var. dulce) from different geographical origins [J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127424.
- [88] RIVERA-PÉREZ A, GARCÍA-PÉREZ P, ROMERO-GONZÁLEZ R, et al. UHPLC-QTOF-HRMS metabolomics insight on the origin and processing authentication of thyme by comprehensive fingerprinting and chemometrics [J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135123.
- [89] YU D, GUO S, ZHANG X, et al. Combining stable isotope, multielement and untargeted metabolomics with chemometrics to discriminate the geographical origins of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136577.
- [90] 康露,王贤,赵多勇,等.新疆甜瓜锶同位素、矿质元素特征及产地溯源[J].食品与生物技术学报,2021,40(11):70-76.
- [91] 张欣昕,张福金,刘广华,等.基于矿质元素和稳定同位素的马铃薯产地溯源技术[J].食品科学,2020,41(18):296-302.
- [92] 王宇童,王磊,包媛媛,等.基于多元分类判别方法对普洱生茶进行产地溯源研究[J].食品安全质量检测学报, 2023,14(3):293-302.