

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241014006

引用格式: 孙晓飞, 孙瑶, 杨爱馥, 等. 基于矿物质元素指纹特征的野米产地溯源研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 19-24.

SUN XF, SUN Y, YANG AIF, *et al.* Research on origin traceability of wild rice based on mineral element fingerprint characteristics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 19-24. (in Chinese with English abstract).

# 基于矿物质元素指纹特征的野米产地溯源研究

孙晓飞, 孙瑶, 杨爱馥\*, 黄姝, 董振霖, 万超

(大连海关技术中心, 大连 116001)

**摘要: 目的** 分析不同地区野米中矿物元素的差异, 建立基于矿物质元素指纹特征的野米产地溯源方法。**方法** 应用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)分析来源于美国、加拿大和中国3个地域40个野米样品中24种矿物质元素含量, 并对数据进行方差分析、多重分析、主成分分析和判别分析。探索矿物质元素指纹特征对野米产地溯源的可行性。**结果** 24种元素含量在产地间差异显著, 主成分分析得到3个主成分, 其累计方差贡献率达到93.1%。主成分分析可将产自美国和加拿大的野米区分开; 判别分析中有97.7%的野米被正确识别。**结论** 该研究对不同产地野米样品的分类具有可行性和准确性。

**关键词:** 野米; 矿物质元素; 指纹特征; 产地溯源; 主成分分析; 判别分析

## Research on origin traceability of wild rice based on mineral element fingerprint characteristics

SUN Xiao-Fei, SUN Yao, YANG Ai-Fu\*, HUANG Shu, DONG Zhen-Lin, WAN Chao

(Technology Center of Dalian Customs District, Dalian 116001, China)

**ABSTRACT: Objective** To analyze the differences in mineral elements in wild rice from different regions and establish a method for tracing the origin of wild rice based on mineral element fingerprint characteristics. **Methods** Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) was used to analyze the content of 24 kinds of mineral elements in 40 wild rice samples from the United States, Canada, and China. The data were subjected to variance analysis, multiple analysis, principal component analysis, and discriminant analysis to explore the feasibility of using mineral element fingerprint characteristics for tracing the origin of wild rice. **Results** The content of 24 kinds of elements showed significant differences among the regions. Principal component analysis extracted 3 principal components, with a cumulative variance contribution rate of 93.1%. Principal component analysis successfully distinguished wild rice from the United States and Canada. Discriminant analysis correctly identified 97.7% of the wild rice samples. **Conclusion** This study demonstrates the feasibility and accuracy of classifying wild rice samples from different origins.

收稿日期: 2024-10-14

基金项目: 海关总署科研项目(2021HK189, 2023HK134)

第一作者: 孙晓飞(1983—), 女, 高级兽医师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: xiaofei812521@163.com

\*通信作者: 杨爱馥(1978—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 109946825@qq.com

**KEY WORDS:** wild rice; mineral elements; fingerprint characteristics; origin traceability; principal component analysis; discriminant analysis

## 0 引言

随着生活水平的提高,公众健康养生意识的增强,对饮食的要求已经由一般性的满足传统的营养需求转向更加科学健康、营养均衡的膳食需求,尤其是天然健康的原料备受青睐。野米,又称为菰米,具有很高的营养价值,不仅含有丰富的蛋白质、必需氨基酸、脂肪酸、维生素以及多种微量元素<sup>[1-3]</sup>,还含有大量生物活性物质,用于预防消渴症和胃肠疾患<sup>[4]</sup>以及心血管疾病的发生<sup>[5-9]</sup>。野米主要产地在北美地区,尤其是生长在世界上最大淡水湖区域的冰湖野米,由于其生长环境无污染,并具有特殊的地质结构从而保证它奇特的营养成分及药效,被誉为“谷物中的鱼子酱”,价格高昂<sup>[10-12]</sup>。在经济利益的驱使下,市面上的野米产品鱼龙混杂,存在着以假乱真、以次充好的情况,严重损害消费者权益。因此,如何确定产品产地来源是亟需解决的问题。

近年来针对产地溯源的研究越来越深入,目前的研究技术主要是基于矿物元素指纹图谱和稳定同位素质谱检测的方法,同时结合以近红外光谱、电子舌等现代无损分析模式,可针对地理环境形成的矿物元素组成、同位素分布以及产品品质差异等特征性指标来判定产品的地理来源<sup>[13-14]</sup>。而野米作为植物源食品,其植物生长过程所需要的矿质养分主要是从其产地土壤中吸取<sup>[15]</sup>,所以某一产区的野米中矿质元素含量与其产地土壤的矿质元素含量存在极强的相关性,植物矿质元素的含量和种类可以作为一个重要的溯源指标。电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)由于具有线性范围宽、检出限低、快速的多元素检测能力以及能提供同位素比信息而得到了广泛应用<sup>[16-23]</sup>。主成分分析(principal component analysis, PCA)是通过原始变量的少数几个线性组合来解释原始变量的绝大部分信息,并寻求主成分来研究样本的一种方法,是通过综合的方式把样品中多种元素的信息直观地表达出来,目前在农产品溯源技术中被广泛应用<sup>[24-25]</sup>。为探讨矿物质元素对野米产地辨别的影响,以此建立辨别模型。PCA得分图可以将对照组和实验组样本区分。在PCA图中,如果样本数据聚集在一起,说明样本间差异性小,如果样本之间呈分散状,距离较远,说明样本之间差异性较大。因此,本研究利用ICP-MS测定不同产地野米种常量和微量元素<sup>[26]</sup>,并结合化学计量学中的方差分析(analysis of variance, ANOVA)及PCA,建立基于矿物元素指纹分析的加拿大冰湖野米产地溯源技术,并为野米进口监管提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

通过实验室留存样品、市场及其他购买渠道,收集国产野米(G#) 10份、加拿大冰湖野米(1#) 15份和美国产野米(3#) 15份,共计40份样品。

7900型电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦公司); TOPEX+型微波消解系统(PreeKEM 科学仪器有限公司); AE240电子天平(精度0.01 mg, 瑞士梅特勒-托利多公司)。

### 1.2 试剂

硝酸(优级纯, 国药集团化学试剂有限公司); 氩气(Ar, 纯度99.995%以上, 大连光明特别气体有限公司); 纯水(电阻率为18.2 MΩ·cm, sartorius arium pro VF-T实验室超纯水系统); 混合元素标准储备液、质谱调谐液标准混合溶液、混合内标储备溶液(质量浓度为10 μg/mL, 美国安捷伦公司)。

### 1.3 实验方法

#### (1)前处理方法

分别称取0.5 g(精确至0.001 g)样品置于微波消解管中,加入6 mL 65%硝酸,室温条件下预消解1 h,再加入2 mL 30%的过氧化氢预消解0.5 h,然后放入微波消解仪中进行消解。

用ICP-MS测定24种矿物元素浓度(B、Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Sr、Mo、Ag、Cd、Sn、Sb、Ba、Hg、Pb)。

#### (2)测定仪器条件

仪器参数设置为:射频率率为1550 W,氩气流速为4.35 mL/min,石英玻璃同心雾化器,采样时间为0.1 s。

温度先上升到120 °C,保持2 min;再上升至160 °C,保持5 min;再上升至180 °C,保持15 min。将消化后的溶液转移到塑料样品管中,并用超纯水定容至15 mL。每个样品进行两个平行实验。Rh、Re、In和Ge的内标溶液用于消除基质效应和仪器偏差。内标溶液为单元素标准溶液配制成为质量浓度为10 μg/L的混合溶液。采用外标法进行定量分析,标准曲线的线性回归系数大于0.99。

### 1.4 数据处理

实验至少重复测定3次,采用SPSS 26.0软件进行方差分析(analysis of variance, ANOVA)、多重比较分析和PCA。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同产地野米矿物元素含量差异及组成特征

通过对 40 份野米样品中 24 种矿质元素的含量进行多重比较分析, 结果表明(见表 1), 只有 K、Sn 元素在中国、美国和加拿大产的野米中含量无显著差异( $P>0.05$ )。Mg、Al、Ca 和 Ba 元素含量在中国与另外两个产地之间的差异显著( $P<0.05$ ), 而 Co 和 Ni 元素含量在美国与另外两个产地之间的差异显著( $P<0.05$ )。其余元素在 3 个不同产地野米中均存在显著的差异( $P<0.05$ ), 其中 B、Na、Cu、Cd 和 Hg 元素含量在 3 个产地中的大小顺序为美国>加拿大>中国; Cr、Fe、As 和 Ag 元素含量在 3 个产地中的大小顺序为美国>中国>加拿大; V、Mn 和 Mo 元素含量在 3 个产地中的大小顺序为中国>美国>加拿大; Zn 元素含量在 3 个产地中的大小顺序为加拿大>美国>中国; Sb 和 Pb 元素含量在 3 个产地中的大小顺序为加拿大>中国>美国。一般情况下, 土壤中的矿质元素种类及丰度具有地理性质特异性,

而土壤矿元素特性直接影响植物矿质元素含量, 即可以通过植物中的矿物元素对生长环境进行溯源。近年来, 利用不同产地来源的植物中矿质元素组成的差异性进行区域特色农产品或道地药材的产地溯源已被证明有广泛的应用价值。

### 2.2 矿物元素含量主成分分析

本研究对加拿大和美国野米中 24 种元素进行主成分分析, 结果显示前 3 个主成分的累计方差贡献率为 93.1%(表 2), 第一个主成分的特征值为 20.16, 特征贡献率为 84.0%, 主要影响因子为 Na、Co、Ni、Cu、As、Sr、Mo、Sb、Hg; 第二个主成分的特征值为 1.22, 特征贡献率为 5.1%, 主要影响因子为 Zn; 第三个主成分的特征值为 0.98, 特征贡献率为 4.1%, 主要影响因子为 Fe。在美国和加拿大野米矿物元素 PCA 分析图中(图 1), 不同颜色代表不同产地的样品, PCA 分析显示不同地区的矿物元素含量有明显区分, 可将产自不同地区的野米区分开。

表 1 不同产地野米矿物元素含量( $\mu\text{g/L}$ )

Table 1 Mineral element content of wild rice from different regions ( $\mu\text{g/L}$ )

元素	中国	加拿大	美国
B	751.56±84.20 <sup>c</sup>	1012.22±89.50 <sup>b</sup>	1634.88±145.28 <sup>a</sup>
Na	13567.08±1026.25 <sup>c</sup>	19140.46±1437.76 <sup>b</sup>	64468.60±1021.77 <sup>a</sup>
Mg	1125866.44±13303.83 <sup>a</sup>	870009.56±59098.34 <sup>b</sup>	949515.52±77980.02 <sup>b</sup>
Al	2830.70±195.20 <sup>a</sup>	1225.02±301.35 <sup>b</sup>	1236.12±123.53 <sup>b</sup>
K	2692211.95±31570.59 <sup>a</sup>	2641275.88±65447.05 <sup>a</sup>	2587587.21±114290.99 <sup>a</sup>
Ca	74391.76±1438.17 <sup>a</sup>	35585.19±1560.53 <sup>b</sup>	33531.58±3250.47 <sup>b</sup>
V	2.41±0.27 <sup>a</sup>	1.26±0.22 <sup>c</sup>	1.82±0.17 <sup>b</sup>
Cr	275.13±15.23 <sup>b</sup>	190.57±23.54 <sup>c</sup>	306.47±38.03 <sup>a</sup>
Mn	17508.79±184.60 <sup>a</sup>	10414.95±482.04 <sup>c</sup>	14381.81±645.66 <sup>b</sup>
Fe	13611.85±506.08 <sup>b</sup>	11447.88±376.37 <sup>c</sup>	14491.44±486.75 <sup>a</sup>
Co	9.46±0.13 <sup>b</sup>	3.24±0.31 <sup>b</sup>	273.64±15.05 <sup>a</sup>
Ni	401.30±29.86 <sup>b</sup>	331.33±52.15 <sup>b</sup>	1385.73±39.16 <sup>a</sup>
Cu	1039.19±23.86 <sup>c</sup>	4336.2±444.32 <sup>b</sup>	10318.02±456.13 <sup>a</sup>
Zn	33173.59±514.90 <sup>c</sup>	41340.39±3628.48 <sup>a</sup>	35439.13±7450.64 <sup>b</sup>
As	52.93±1.48 <sup>b</sup>	21.64±6.57 <sup>c</sup>	89.68±7.88 <sup>a</sup>
Sr	569.66±22.05 <sup>b</sup>	147.71±28.36 <sup>c</sup>	107.53±14.41 <sup>a</sup>
Mo	261.17±10.84 <sup>a</sup>	26.06±6.39 <sup>c</sup>	110.19±4.31 <sup>b</sup>
Ag	0.49±0.07 <sup>b</sup>	0.37±0.15 <sup>c</sup>	1.08±0.36 <sup>a</sup>
Cd	1.12±0.21 <sup>c</sup>	3.33±1.37 <sup>b</sup>	13.50±2.27 <sup>a</sup>
Sn	178.99±14.31 <sup>a</sup>	174.08±14.59 <sup>a</sup>	176.29±9.16 <sup>a</sup>
Sb	0.81±0.15 <sup>b</sup>	1.18±0.63 <sup>a</sup>	0.22±0.09 <sup>c</sup>
Ba	486.01±75.03 <sup>a</sup>	151.18±34.37 <sup>b</sup>	165.37±25.88 <sup>b</sup>
Hg	0.26±0.05 <sup>c</sup>	0.54±0.14 <sup>b</sup>	1.33±0.36 <sup>a</sup>
Pb	116.04±6.79 <sup>b</sup>	142.39±20.37 <sup>a</sup>	18.82±7.46 <sup>c</sup>

注: 同行不同的小写字母表示有显著性差异( $P<0.05$ )。

表 2 PCA 特征值及方差贡献率

Table 2 Eigenvalues and variance contribution rates of PCA

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	20.16	84.0	84.0
2	1.22	5.1	89.1
3	0.98	4.1	93.1

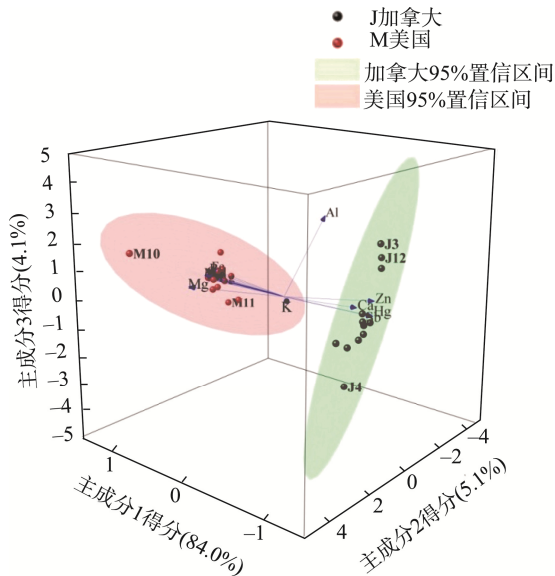


图 1 不同产地野米矿物元素 PCA 结果

Fig.1 PCA results of mineral elements in wild rice from different regions

### 2.3 不同产地野米中矿物元素指纹的判别分析

为进一步明确矿物质元素指标在野米产地判别中的作用及效果,利用逐步判别分析筛选重要的变量,选择那些能够鉴别产地的变量因素。其可利用各类样品之间的相关性建立判别模型而对未知样品进行分类,还可以采用交叉验证方法对剩余样品作为训练集,用建立的判别模型对其进行判别,从而极大地增加了判别模型的稳定性,本研究对在主成分分析中差异显著的 11 种元素进行分析<sup>[27]</sup>。如表 3 所示,在 0.05 的显著水平上,Na、Co、Ni、Cu、As、Sr、Mo、Sb、Hg、Zn、Fe 11 种对野米产地判别作用显著的元素建立判别模型:

$$Y_{\text{中国}} = -691.608 + 0.015 \times \text{Na} - 0.247 \times \text{Co} - 0.354 \times \text{Ni} + 0.007 \times \text{Cu} - 0.537 \times \text{As} + 1.874 \times \text{Sr} + 0.434 \times \text{Mo} - 66.612 \times \text{Sb} + 102.276 \times \text{Hg} + 0.007 \times \text{Zn} - 0.000 \times \text{Fe}$$

$$Y_{\text{加拿大}} = -332.504 + 0.019 \times \text{Na} - 0.408 \times \text{Co} - 0.455 \times \text{Ni} + 0.019 \times \text{Cu} + 0.484 \times \text{As} + 0.815 \times \text{Sr} + 0.122 \times \text{Mo} - 46.118 \times \text{Sb} + 117.343 \times \text{Hg} + 0.006 \times \text{Zn} - 0.003 \times \text{Fe}$$

$$Y_{\text{美国}} = -1176.937 + 0.034 \times \text{Na} - 0.367 \times \text{Co} - 0.637 \times \text{Ni} + 0.044 \times \text{Cu} + 3.421 \times \text{As} + 0.636 \times \text{Sr} + 0.387 \times \text{Mo} - 102.488 \times \text{Sb} + 162.549 \times \text{Hg} + 0.008 \times \text{Zn} - 0.007 \times \text{Fe}$$

表 3 判别模型系数

Table 3 Discriminating model coefficients

元素	地区		
	中国	加拿大	美国
常量	-691.608	-332.504	-1176.937
Na	0.015	0.019	0.034
Co	-0.247	-0.408	-0.367
Ni	-0.354	-0.455	-0.637
Cu	0.007	0.019	0.044
As	-0.537	0.484	3.421
Sr	1.874	0.815	0.636
Mo	0.434	0.122	0.387
Sb	-66.612	-46.118	-102.488
Hg	102.276	117.343	162.549
Zn	0.007	0.006	0.008
Fe	0.000	-0.003	-0.007

注:线性判别的判别函数,可以将数据代入其中,然后比较不同类别的判别函数值大小进行分类,最大的值即为被判断的种类。

该模型的交叉验证结果如表 4 所示,11 种元素分析的原始整体判别率为 100.0%;交叉验证的分类结果中,97.7%的野米被正确识别。所以,该模型的建立对野米的产地具有有效的判断力,为鉴别冰湖野米原产地指纹判别模型的构建提供理论基础。

表 4 不同产地野米的判别分析分类结果(%)

Table 4 Classification results of discriminant analysis from different regions (%)

验证方法	产地	预测结果			合计
		加拿大	美国	中国	
原始	加拿大	100.0	0	0	100.0
	美国	0	100.0	0	
	中国	0	0	100.0	
交叉验证	加拿大	93.3	6.7	0	97.7
	美国	0	100.0	0	
	中国	0	0	100.0	

### 3 结论与讨论

本研究基于目前的产地溯源技术<sup>[28-29]</sup>,以来源于美国、加拿大和中国 3 个地区的野米为研究对象,通过对样品中矿物质元素进行分析,探究来自于加拿大的冰湖野米与其他野米的微量元素含量的区别,从而可以有效区分不同产地的野米。研究结果显示,加拿大冰湖野米在 Zn、As、

Mo、Sb、Fe 等元素与美国产野米以及国内市场收集的样品有显著差异; PCA 结果明确了基于矿质元素含量可实现不同产地野米样品的分类。根据对野米产地判别作用显著的 11 种元素建立判别模型, 97.7%的样品可以正确识别, 表明建立的矿物元素溯源方法可以应用于冰湖野米的产地溯源。

野米的植物微量元素保证了其作为一种功能性食品的发展<sup>[30-32]</sup>。但由于产地不同微量元素含量差别较大, 加拿大冰湖野米因独特的地理优势使其成为野米中的“贵族”, 高昂的价格导致市面上存在以假乱真、以次充好的现象。因此, 如何对产品真实性进行判别势在必行。本研究建立的矿物元素指纹图谱技术为野米的产品溯源提供了有力的技术支撑。目前, 矿物元素指纹分析技术已经广泛应用到食品的多个领域, 包括粮食、肉制品、蔬菜、水果等。产地溯源技术的发展可以有效保障产品的真实性。

### 参考文献

- [1] 王惠梅, 谢小燕, 苏晓娜, 等. 中国菰资源研究现状及应用前景[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(2): 279-288.  
WANG HM, XIE XY, SU XN, *et al.* Current status and application prospect of *Zizania latifolia* (Griseb.) Turcz. ex Stapf in China [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(2): 279-288.
- [2] HAN SF, ZHANG H, QIN LQ, *et al.* Effects of dietary carbohydrate replaced with wild rice (*Zizania latifolia* (Griseb) Turcz) on insulin resistance in rats fed with a high-fat/cholesterol diet [J]. Nutrients, 2013, 5(2): 552-564.
- [3] 濮思源, 陈睿, 朱霞, 等. 菰营养成分及保健功能研究最新进展[J]. 园艺与种苗, 2021, 41(5): 39-43.  
PU SY, CHEN R, ZHU X, *et al.* Recent advance in nutritional components and health function of *Zizania latifolia* [J]. Horticulture & Seed, 2021, 41(5): 39-43.
- [4] HAN SF, ZHANG H, ZHAI CK. Protective potentials of wild rice (*Zizania latifolia* (Griseb) Turcz) against obesity and lipotoxicity induced by a high-fat/cholesterol diet in rats [J]. Food & Chemical Toxicology, 2012, 50(7): 2263-2269.
- [5] 徐美琪, 张昱格, 陈旭, 等. 冰湖野米粉及其淀粉的精细结构、理化和消化特性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(16): 5279-5287.  
XU MQ, ZHANG YG, CHEN X, *et al.* Study on the fine structure, physicochemical and digestive characteristics of *Zizania palustris* flour and its starch [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(16): 5279-5287
- [6] TIMM DA, SLAVIN JL. Review: Wild rice: Both an ancient grain and a whole grain [J]. Cereal Chemistry, 2014, 91(3): 207-210.
- [7] 闫宁, 张忠锋. 中国菰米功能成分研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021.  
YAN N, ZHANG ZF. Study on functional components of *Zizania latifolia* in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2021.
- [8] 陈旭, 罗健伟, 付玲玲, 等. 纤维对冰湖野米粉理化和消化特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(20): 6797-6803.  
CHEN X, LUO JW, FU LL, *et al.* Effects of fiber on physical and chemical properties and digestion characteristics of wild rice flour [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(20): 6797-6803.
- [9] 俞秋嫣, 张崇生, 张鹏程, 等. 浙南地区菰米与普通稻米营养成分的比较分析[J]. 营养学报, 2024, 46(1): 81-85.  
YU QY, ZHANG CS, ZHANG PC, *et al.* Comparative analysis of nutritional composition of *Zizania latifolia* and ordinary rice in Southern Zhejiang [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2024, 46(1): 81-85.
- [10] KAHLER AL. Genome organization and genetic diversity of wildrice (*Zizania palustris* L.) [M]. Ann Arbor: ProQuest Dissertations Publishing, 2010.
- [11] ZHAO Y, SMYTH HE, TAO K, *et al.* Starch molecular structural features and volatile compounds affecting the sensory properties of polished Australian wild rice [J]. Foods, 2022, 11(4): 511.
- [12] 楚美俊. 中国菰米酚类成分及生物活性研究[D]. 青岛: 中国农业科学院, 2019.  
CHU MJ. Studies on phenolics and bioactivities of Chinese wild rice [D]. Qingdao: Tobacco Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [13] 王柏辉, 刘婷, 杨晨晖, 等. 基于矿物质元素和稳定同位素指纹分析的阿尔巴羊肉产地溯源[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 278-283.  
WANG BH, LIU T, YANG CH, *et al.* Origin traceability of Albas mutton based on mineral element and stable isotope fingerprinting [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 278-283.
- [14] 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 the detection of mineral elements in rice and the elements-based identification of rice geographical origin [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(20): 1-8.
- [15] 谭翌, 吴文琴, 张炜奇, 等. 农产品及产地环境中微量元素检测研究进展[J]. 中国油料作物学, 2020, 42(3): 334-340.  
TAN Z, WU WQ, ZHANG WQ, *et al.* Development of detection for trace elements in agricultural products and their field environm [J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2020, 42(3): 334-340.
- [16] 孙岩, 卢智玲, 邹耀华, 等. 基于 ICP-MS 结合多元统计的林下山参中矿物质元素分析[J]. 中药材, 2024, 7(47): 1738-1744.  
SUN Y, LU ZL, ZOU YH, *et al.* Analysis of mineral elements in shanye rhizoma at the understory using ICP-MS combined with multivariate statistics [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2024, 7(47): 1738-1744.
- [17] 钟红梅. ICP-MS 分析在矿产中金属元素的定量检测[J]. 世界有色金属, 2024(3): 38-40.  
ZHONG HM. ICP-MS analysis for quantitative detection of metallic elements in mine [J]. World Nonferrous Metals, 2024(3): 38-40.
- [18] 谭凯燕, 梁晓琳, 缪璐, 等. 多元素分析判别奶粉产地来源研究[J]. 食品工业科技, 2015, 2(36): 52-56.  
TAN KY, LIANG XL, MIU L, *et al.* Determination of milk powder

- geographical origin based on multi-element analysis [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 2(36): 52–56.
- [19] 王洁, 伊晓云, 马立锋. ICP-MS 和 ICP-AES 在茶叶矿质元素分析及产地溯源中的应用[J]. *茶叶学报*, 2015, 3(56): 145–150.
- WANG J, YI XY, MA LF. ICP-MS and ICP-AES for mineral analysis and origin-tracing on tea products [J]. *Acta Tea Sinica*, 2015, 3(56): 145–150.
- [20] 崔艳梅. 基于稳定同位素技术的海参产地溯源研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2023.
- CUI YM. Source tracing in sea cucumber using stable isotope technology [D]. Yantai: Yantai University, 2023.
- [21] 吴智威. ICP-QMS 同位素分析及其在农产品产地溯源中的应用[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- WU ZW. Isotope ratios analysis by ICP-QMS and its application for tracing geographical origins of agriculture products [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- [22] 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(24): 5073–5081.
- WEI YM, GUO BL, WEI S, *et al.* The principle of food geographical origin traceability and authenticity technique [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012(24): 5073–5081.
- [23] 王雪蓉, 罗瑞明, 李亚蕾, 等. 基于 ICP-MS 的滩羊骨骼矿质元素溯源指纹图谱[J]. *食品科学*, 2022, 43(10): 322–328.
- WANG XR, LUO RM, LI YL, *et al.* Fingerprinting of bone mineral elements by inductively coupled plasma-mass spectrometry for geographical traceability of tan sheep [J]. *Food Science*, 2022, 43(10): 322–328.
- [24] 孙艳, 徐大江, 翟凤云, 等. 基于 ICP-MS 测定蜂蜜矿物质元素进行蜂蜜产地溯源[J]. *中国蜂业*, 2020, 71(9): 59–62.
- SUN Y, XU DJ, ZHAI FY, *et al.* Origin traceability of honey based on determination of mineral elements by ICP-MS [J]. *Apiculture of China*, 2020, 71(9): 59–62.
- [25] 陈庚超, 杨雪娇, 王静, 等. 基于稳定同位素比质谱技术的进口牛肉产地溯源技术研究[J]. *化学试剂*, 2022, 44(8): 1218–1223.
- CHEN GC, YANG XJ, WANG J, *et al.* Origin traceability of imported beef based on stable isotope ratio mass spectrometry [J]. *Chemical Reagent*, 2022, 44(8): 1218–1223.
- [26] 高小琴, 聂继云, 陈秋生, 等. 基于矿物元素指纹技术的“富士”苹果产地溯源[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(21): 4252–4264.
- GAO XQ, NIE JY, CHEN QS, *et al.* Geographical origin tracing of fuji apple based on mineral element fingerprinting [J]. *Technology Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(21): 4252–4264.
- [27] 孙淑敏. 羊肉产地指纹图谱溯源技术研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012.
- SUN SM. Study on geographical origin traceability techniques of lamb meat based on fingerprint analysis [D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2012.
- [28] 璩甘, 孙乌日娜, 陶梦慧, 等. 基于质谱的农产品产地溯源应用进展[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 85–96.
- NAO G, SUN WRN, TAO MH, *et al.* Origin traceability of agricultural products based on mass spectrometry [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 43(3): 85–96.
- [29] SHAO B, LI H, SHEN JZ, *et al.* Nontargeted detection methods for food safety and integrity [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2019(10): 429–455.
- [30] YU X, CHU M, CHU C, *et al.* Wild rice (*Zizania* spp.): A review of its nutritional constituents, phytochemicals, antioxidant activities, and health-promoting effects [J]. *Food Chemistry*, 2020, 30(331): 173–178.
- [31] CHEN LM, MA YM, HE TJ, *et al.* Integrated transcriptome and metabolome analysis unveil the response mechanism in wild rice (*Zizania latifolia* griseb.) against sheath rot infection [J]. *Plants*, 2023. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1163464>
- [32] SURENDIRAN G, ALSAIF M, KAPOURCHALI FR, *et al.* Nutritional constituents and health benefits of wild rice (*Zizania* spp.) [J]. *Nutrition Reviews*, 2014, 4(72): 227–236.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)