

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241031003

引用格式: 于寒冰, 郭阳, 李安, 等. 基于稳定同位素和元素技术的草莓产地溯源[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(3): 162–168.

YU HB, GUO Y, LI AN, *et al.* Traceability of *Fragariaananassa* Duch. origin based on stable isotope and elemental technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(3): 162–168. (in Chinese with English abstract).

基于稳定同位素和元素技术的草莓产地溯源

于寒冰¹, 郭 阳¹, 李 安², 赵 杰², 郑君杰¹, 习佳林^{1*}

(1. 北京市农产品质量安全中心, 北京 100029; 2. 北京市农林科学院质量标准与检测技术研究所, 北京 100097)

摘 要: **目的** 研究利用草莓中稳定同位素和多种元素地域特征进行产地准确溯源的可行性。**方法** 应用稳定同位素质谱技术和电感耦合等离子体质谱法, 测试草莓样品中碳($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)、氮($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)、氢($^2\text{H}/^1\text{H}$)、氧($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) 4 种稳定同位素比值和 18 种元素含量, 分析不同产地草莓的特征指标, 采用逐步判别分析, 分别建立稳定同位素、矿物元素、稳定同位素和矿物元素结合 3 种产地判别模型, 开展昌平、双流和丹东草莓产地溯源。**结果** 3 种模型交叉检验的正确判别率分别为 88.4%、90.7%和 100.0%。**结论** 采用单一技术进行设施草莓产地溯源判别准确率并不理想, 而同时利用稳定同位素和元素技术进行溯源, 能够对产地进行精准区分, 为设施种植产品产地溯源的可行性提供方法依据。

关键词: 稳定同位素; 元素; 产地溯源; 草莓

Traceability of *Fragariaananassa* Duch. origin based on stable isotope and elemental technology

YU Han-Bing¹, GUO Yang¹, LI An², ZHAO Jie², ZHENG Jun-Jie¹, XI Jia-Lin^{1*}

(1. Beijing Agricultural Product Quality and Safety Center, Beijing 100029, China;
2. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing 100097, China)

ABSTRACT: Objective To study investigates the feasibility of accurately tracing the origin of *Fragariaananassa* Duch. using stable isotopes and regional characteristics of multiple elements. **Methods** Using stable isotope ratio mass spectrometry technology and inductively coupled plasma mass spectrometry, the stable isotope ratios of carbon ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), nitrogen ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$), hydrogen ($^2\text{H}/^1\text{H}$), and oxygen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) and the content of 18 kinds of elements in *Fragariaananassa* Duch. samples was tested. The characteristic indicators of *Fragariaananassa* Duch. from different origins were analyzed, and stepwise discriminant analysis was used to establish 3 kinds of origin discrimination models for stable isotopes, mineral elements, and stable isotopes and mineral elements. The traceability of *Fragariaananassa* Duch. origins in Changping, Shuangliu, and Dandong was carried out. **Results** The correct discrimination rates of cross testing of 3 kinds of models were 88.4%, 90.7%, and 100.0%, respectively. **Conclusion** Research has

收稿日期: 2024-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(32102057)

第一作者: 于寒冰(1973—), 男, 硕士, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: fishymh@163.com

*通信作者: 习佳林(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为产品质量安全与营养品质。E-mail: jialinxi@126.com

shown that using a single technology for facility *Fragariaananassa* Duch. origin tracing and identification is not ideal, while simultaneously using stable isotope and elemental technologies for tracing can accurately distinguish the origin and provide a methodological basis for the feasibility of facility grown product origin tracing.

KEY WORDS: stable isotopes; elements; origin tracing; *Fragariaananassa* Duch.

0 引 言

草莓(*Fragariaananassa* Duch.)是蔷薇科草本植物, 营养物质丰富, 被誉为“水果皇后”, 深受消费者喜爱^[1]。我国草莓种植主要以设施种植为主, 面积呈逐年递增趋势, 经过几十年的发展, 我国已建立了东北、黄淮海、长江中下游、西南、华南 5 个草莓主产区, 产量居世界首位^[2-4]。草莓产业作为北京市农业特色产业, 近几年种植面积约为 873 hm², 年产量 2.04 万 t, 年产值 5.6 亿元^[5]。北京明星产品“昌平草莓”分别于 2010 年、2011 年被农业部和国家质检总局批准实施地理标志登记和保护。农产品产地溯源可以保障农产品质量安全、提升产品市场竞争力、增强消费信心, 是促进农业高质量发展的有效手段。目前, 常用产地溯源技术包括矿物元素、稳定同位素、近红外光谱、有机成分 DNA 指纹等技术方法^[6-12]。稳定同位素溯源技术可以实现大空间尺度的农产品产地的精准溯源, 已广泛应用于茶叶、橄榄油、水果等农产品产地溯源^[13-19]。矿物元素溯源技术也具有很好的溯源属性, 在农产品产地溯源和判别中得到广泛应用^[20-23]。早期产地溯源研究多采用单一技术。近年来, 产地溯源研究趋势逐渐向多种技术联合的方向发展, 主要围绕稳定同位素和矿物元素技术开展大闸蟹、酒类、枸杞、水果、牛羊肉等各类农产品的产地溯源, 产地判别准确率明显高于单一技术的产地判别^[24-29]。

国内外多种技术联合溯源的研究技术已经比较成熟, 但是溯源产品多为露地种植产品或养殖产品, 针对设施种植产品研究较少。设施种植产品受自然气候环境影响相对较小, 产品特征不易被挖掘。本研究针对设施草莓种植特点, 同时分析设施草莓中多种元素和稳定同位素指标, 采用稳定同位素、元素和稳定同位素结合元素的方式分别建立判别模型, 为开展设施种植产品产地精确溯源研究提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

ICP-MS 8900 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司); IRMS MAT 253 稳定同位素质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); MARs6 微波消解仪(美国 CEM 公司); BJL-2200 全自动水分提取系统(北京剑灵科技有限公司); XP6

微量天平(精度 0.001 mg, 瑞士 Mettler Toledo 公司)。

1.2 试 剂

稳定同位素标准物质 USGS40 ($\delta^{13}\text{C}=-26.39\text{‰}$ / $\delta^{15}\text{N}=-4.52\text{‰}$)、USGS45 ($\delta^2\text{H}=-10.3\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O}=-2.238\text{‰}$)、USGS46 ($\delta^2\text{H}=-235.8\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O}=-29.8\text{‰}$)、USGS47 ($\delta^2\text{H}=-150.2\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O}=-19.80\text{‰}$)(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); 26 种元素储备液(10 mg/L)、内标元素贮备液(100 $\mu\text{g/mL}$)(美国 Agilent 公司); 硝酸(优级纯, 北京化学试剂厂)。

1.3 样品采集

分别在北京昌平、四川双流、辽宁丹东 3 个草莓主产区采集 86 份红颜草莓样品, 其中昌平草莓和丹东草莓各采集 30 个样品, 双流草莓采集 26 个样品。“昌平草莓”“双流草莓”和“丹东草莓”均为地理标志产品。样品相关信息见表 1。

表 1 样品采集信息
Table 1 Collection information of sample

产地	样品数量	坐标	平均海拔 /m	年均降水量 /mm
北京昌平	30	40.1776N~40.2191N 116.3468E~116.4030E	30~100	550
辽宁丹东	30	39.8641N~39.9476N 124.0402E~124.2401E	300~500	981
四川双流	26	30.3511N~30.5468N 103.8929E~103.9547E	400~1000	807

1.4 实验方法

1.4.1 样品处理

采集的草莓样品应避免表皮残留灰尘等杂质, 需将表皮清理干净后进行匀浆, 匀浆好的样品分装成 3 份, 分别用于元素检测, 稳定同位素碳、氮的检测和稳定同位素氢、氧的检测。

样品元素检测前处理采用微波消解方法, 准确称取 5 g(精确到 0.001 g)制备好的草莓样品于微波消解罐中, 加入 5 mL 硝酸, 加盖放置过夜后进行消解, 开始消解时需加入 3 mL 纯水, 保证消解罐中溶液不少于 8 mL。消解完成后用纯水定容至 50 mL, 按同样方法处理试剂空白, 待测。稳定同位素碳、氮检测需冷冻干燥处理样品, 称取适量制备好的草莓样品于烧杯中, 进行预冻处理后立即置于冷冻干燥机中, 设置-40 $^{\circ}\text{C}$ 、50 Pa 条件下冻干 48 h 以上。冻干后的样品研磨过 0.150 mm 筛, 过筛粉末需保存于干燥器中待测。稳定同位素氢、氧检测需对样品进行水分提

取处理,称取约 2 g 制备好的草莓样品于 10 mL 棕色玻璃瓶中,以不超过玻璃瓶容量的 2/3 为益,真空冷凝抽提 10 min,将提取出的水分转移至棕色样品瓶中,密封避光保存待测。

1.4.2 分析测试

应用稳定同位素质谱法(stable isotope ratio mass spectrometry, IRMS)检测分析碳、氮、氢、氧 4 种稳定同位素比值。IRMS 参数设置氮气载气流速 180 mL/min, 氮气吹扫流速 100 mL/min, 氧气流速 250 mL/min, 碳、氮燃烧炉温度 960 °C, 氢、氧裂解炉温度 1400 °C, 气相柱温度 65 °C, 稀释压力 0.6 bar, 氮气参考气压 1.0 bar。将处理好的样品送入元素分析仪, 碳、氮稳定同位素比值分析在 960 °C 高温下燃烧, 氧化还原成二氧化碳和氮气, 在氮载气流和色谱柱吸附解吸后进行同位素比值的测定, 采用标准物质 USGS 40 单点校正测试结果。氢、氧稳定同位素比值分析在 1400 °C 高温下, 催化裂解为氢气和一氧化碳, 并在氮载气流和色谱柱吸附解吸后进行同位素比值的测定, 采用标准物质 USGS 45、USGS 46 和 USGS 47 三点校正的方式校正测试结果。

应用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)检测分析 Ce、La、Sc、Tb、Al、As、Ba、Ca、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Ga、K、

Mg、Mn、Na、Ni、Pb、Rb、Se、Sr、Zn、Hf、Pd 等 26 种元素含量。ICP-MS 参数设置载气流速 0.83 L/min, 辅助气流速 0.23 L/min, 氦气流速 4.0 mL/min, 采样深度 8 mm, 射频功率 1550 W。ICP-MS 测定微波消解待测液和内标元素的信号响应值, 根据标准曲线计算待测元素的浓度。

1.5 数据处理

数据应用 SPSS 22.0 进行统计学分析, 并应用逐步判别分析方法分别建立不同产地草莓产地判别模型。

2 结果与分析

2.1 草莓稳定同位素比值结果分析

采用 IRMS 检测分析了不同产地草莓样品中 4 种稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$, 结果如图 1 所示。通过分析发现, 昌平草莓 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -28.2‰~23.8‰, 丹东草莓 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -26.6‰~23.4‰, 双流草莓 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -25.5‰~23.8‰, 方差分析结果显示昌平草莓与丹东草莓和双流草莓的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异显著, 丹东草莓和双流草莓 $\delta^{13}\text{C}$ 差异不明显; 昌平草莓的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 -1.7‰~7.4‰, 丹东草莓和双流草莓 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 1.1‰~9.7‰和 -1.5‰~3.6‰, 昌平草莓和丹东草莓 $\delta^{15}\text{N}$ 值明显高于双流草莓, 可能与昌平和丹东地区草莓种植使用有机肥比例比双流地区高有关。

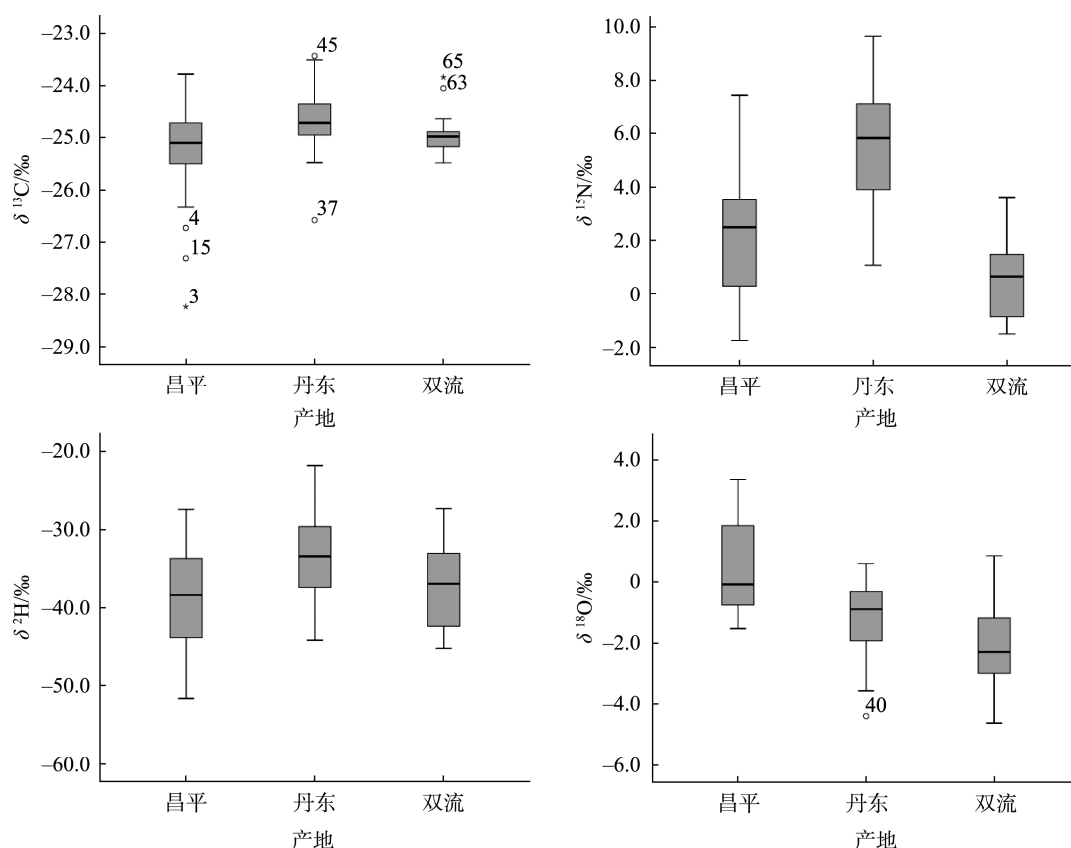


图 1 草莓稳定同位素箱线图

Fig.1 Stable isotope box diagram of *Fragaria ananassa* Duch.

昌平草莓、丹东草莓和双流草莓的 $\delta^2\text{H}$ 值范围分别为 $-51.7\text{‰} \sim -27.5\text{‰}$ 、 $-44.2\text{‰} \sim -21.8\text{‰}$ 和 $-45.2\text{‰} \sim -27.4\text{‰}$, 昌平草莓和丹东草莓差异显著, 但是各地的 $\delta^2\text{H}$ 值分布范围跨度较大, 可能是水分提取过程有分馏; 昌平草莓、丹东草莓和双流草莓的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-1.5\text{‰} \sim 3.4\text{‰}$ 、 $-4.4\text{‰} \sim 0.6\text{‰}$ 和 $-4.6\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值理论上应与大气降水的离岸效应一致, 即离海岸越远, 同位素比值越低, 因此双流 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低, 同时同位素比值还受海拔高度影响, 即海拔越高, 同位素含量比值越低, 昌平和丹东到海岸距离相差不大, 同位素比值受海拔影响较明显。

2.2 草莓元素含量结果分析

采用 ICP-MS 同时检测草莓中 18 种元素含量, 并对比了 3 个产地的草莓中元素含量水平。数据分析表明(表 2), 昌平草莓与丹东草莓有 15 种矿物元素差异显著, 昌平草莓与双流草莓有 16 种矿物元素差异显著。筛选出昌平草莓和其他两产地草莓均差异显著的特征元素有 13 种, 分别为 Na、Mg、Ca、Mn、Cu、Rb、Sr、Ba、Sc、Pd、La、Ce 和 Tb, 其中显著高于其他产地的元素为 Na、Mg、Ca, 显著低的元素为 Mn、Cu、Rb、Sr、Ba 和 Sc, Pd、La、Ce 和 Tb 等 5 种元素水平介于丹东草莓和双流草莓之间。

2.3 产地判别模型建立与验证

基于 SPSS 逐步判别方法对草莓样品进行多变量判别分析, 应用稳定同位素 C、N、H、O 建立稳定同位素判别模型; 筛选元素 K、Ca、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Se、Sr、Ba 等 10 个元素建立元素判别模型; 筛选 O、K、Ca、Zn、Ga、Sr、Ba、Sc、Pd、Tb、Hf 等 11 个指标建立稳定同位素和元素结合判别模型(表 3)。

利用判别模型对不同产地草莓样本进行交叉检验, 交叉检验不同于原始回代检验, 每次检验会随机选择一个测试样本, 其余样本全部作为训练样本, 交叉检验的判别结果与模型训练整个测试样本的期望值最为接近, 能够比较真实地体现模型的判别能力。

表 2 草莓中元素含量结果分析
Table 2 Analysis of element content in *Fragariaananassa* Duch.

元素	含量/(mg/kg)		
	昌平草莓	丹东草莓	双流草莓
Na	8.988±7.359 ^a	4.618±3.730 ^b	6.431±6.374 ^b
Mg	143.921±27.261 ^a	114.429±13.581 ^b	108.346±9.901 ^b
Al	0.790±0.821 ^a	0.159±0.145 ^b	0.687±0.447 ^a
K	1351.000±285.000 ^a	1371.000±161.000 ^a	858.000±139.000 ^b
Ca	33.774±7.908 ^a	20.262±2.894 ^b	31.040±4.204 ^c
Mn	2.949±1.225 ^a	6.043±2.191 ^b	3.077±1.152 ^c
Ni	0.016±0.012 ^a	0.024±0.014 ^a	0.018±0.006 ^b
Cu	0.212±0.079 ^a	0.370±0.074 ^b	0.419±0.145 ^c
Zn	0.783±0.250 ^a	1.023±0.191 ^b	0.727±0.0158 ^a
Ga	0.091±0.034 ^a	0.106±0.037 ^a	0.219±0.089 ^b
Rb	0.341±0.275 ^a	0.709±0.310 ^b	0.559±0.257 ^b
Sr	0.851±0.233 ^a	1.141±0.424 ^b	1.067±0.127 ^b
Ba	0.752±0.290 ^a	1.124±0.422 ^b	1.842±0.749 ^c
Sc	0.014±0.018 ^a	0.032±0.023 ^b	0.060±0.008 ^c
Pd	0.130±0.039 ^a	0.051±0.027 ^b	0.169±0.025 ^c
La	0.009±0.007 ^a	0.003±0.003 ^b	0.013±0.006 ^c
Ce	0.017±0.015 ^a	0.005±0.004 ^b	0.019±0.008 ^c
Tb	0.039±0.007 ^a	0.212±0.044 ^b	0.021±0.004 ^c

注: 同行数据角标字母不同表示具有显著性差异($P<0.05$)。

表 4 为采用不同技术进行产地判别的结果, 采用稳定同位素判别模型分别对昌平、丹东和双流 3 地的草莓进行产地判别时, 昌平有 3 个草莓被误判为双流草莓, 丹东有 2 个草莓被误判为双流草莓, 双流有 5 个草莓被误判为昌平草莓, 样本整体正确判别率为 88.4%; 采用元素判别模型进行判别时, 昌平有 2 个草莓被误判为双流草莓, 丹东有 1 个草莓被误判为双流草莓, 双流有 5 个草莓被误判为昌平草莓, 整体正确判别率为 90.7%; 采用稳定同位素和元素结合判别模型进行判别时, 没有出现误判, 整体正确判别率为 100.0%。

表 3 判别模型分类函数系数
Table 3 Classification function coefficients of discriminant model

稳定同位素判别				元素判别				稳定同位素和元素判别			
指标	昌平	丹东	双流	指标	昌平	丹东	双流	指标	昌平	丹东	双流
C	-66.934	-62.965	-65.793	K	0.030	0.049	0.015	O	-2.647	-6.384	-3.414
N	-10.311	-8.673	-10.333	Ca	0.630	-0.482	0.184	K	0.045	0.077	0.006
H	-5.614	-4.691	-4.992	Co	-704.978	-1664.486	-818.216	Ca	1.109	0.803	0.422
O	17.811	14.011	14.574	Ni	217.322	570.950	271.444	Zn	-6.448	-16.356	16.311
常数	-947.128	-822.715	-897.569	Cu	35.780	98.198	50.257	Ga	698.058	1502.743	115.441
				Zn	-0.495	-3.257	8.015	Sr	21.453	79.584	-2.591
				Ga	-219.567	-611.332	-221.682	Ba	-82.033	-167.985	-10.529
				Se	18.061	26.768	55.421	Sc	-95.260	158.513	93.357
				Sr	3.881	13.447	8.185	Pd	-141.982	-699.060	147.493
				Ba	21.994	66.426	26.354	Tb	298.626	1546.896	397.373
				常数	-36.170	-59.912	-34.711	Hf	-159.500	-601.084	77.396
				常数	-52.313	-217.565	-41.432				

表 4 草莓产地判别结果
Table 4 Results of *Fragariaananassa* Duch. origin discriminant

判别模型	产地	预测组的成员			正确判别率/%	整体正确判别率/%
		昌平草莓	丹东草莓	双流草莓		
稳定同位素	昌平草莓(<i>n</i> =30)	27	0	3	90.0	88.4
	丹东草莓(<i>n</i> =30)	0	28	2	93.3	
	双流草莓(<i>n</i> =26)	5	0	21	80.8	
元素	昌平草莓(<i>n</i> =30)	28	0	2	93.3	90.7
	丹东草莓(<i>n</i> =30)	0	29	1	96.7	
	双流草莓(<i>n</i> =26)	5	0	21	80.8	
稳定同位素和元素	昌平草莓(<i>n</i> =30)	30	0	0	100.0	100.0
	丹东草莓(<i>n</i> =30)	0	30	0	100.0	
	双流草莓(<i>n</i> =26)	0	0	26	100.0	

通过模型判别,建立产地判别散点图,如图 2 所示,从稳定同位素、元素和稳定同位素结合元素 3 种判别模型对不同产地的区分情况中可以得到,稳定同位素结合元素的判别模型对昌平草莓、双流草莓和丹东草莓进行了很好的区分。

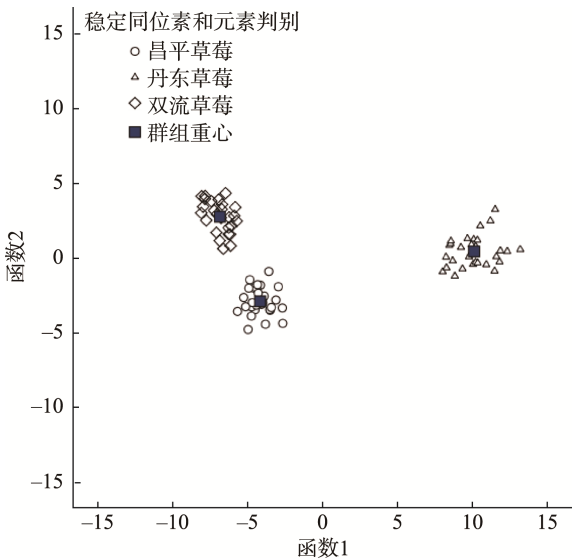


图 2 草莓产地判别散点图
Fig.2 Scatter plot of *Fragariaananassa* Duch. origin discrimination

3 讨论与结论

生物体内的稳定同位素,可视为一种隐藏的语言,通过对生物体内稳定同位素含量的测量,可以了解生物体的食物来源、生长环境和生物过程。不同产地农产品中稳定同位素自然丰度受自然环境、代谢类型和农业生产活动等因素影响,具有一定特征^[30]。稳定同位素技术是通过检测分析受产地环境等影响的不同样品中稳定同位素的组成和丰度值差异来进行产品溯源的一种技术,是当前国际上公

认的原产地评估及真伪鉴别的安全、可靠技术之一^[31]。研究发现,应用稳定同位素技术进行草莓产地判别准确率为 88.4%,准确率偏低,这可能与草莓设施种植方式有关。虽然各地草莓中的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在一定的差异,但是各地差异受地域环境、气候因素等条件影响的规律并不明显,设施种植的方式较大地降低了草莓生长过程中受地域和气候等因素影响的稳定同位素分馏效应。丹东草莓 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 1.1‰~9.7‰,显著高于双流草莓,这可能与产地土壤耕作和施肥方式有关。施用不同类型肥料 $\delta^{15}\text{N}$ 值会有一定差异,如施用畜禽粪便、非豆类秸秆等来源有机肥的植物 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高,而施用化学氮肥的植物 $\delta^{15}\text{N}$ 值较低。

矿物元素是植物体内各种生物化学反应和代谢过程的组成部分,参与植物的营养吸收、光合作用、细胞分裂、蛋白质合成等关键生理过程^[32]。不同产地农产品中矿物元素含量与产地环境中矿物元素含量有显著的相关性^[33]。但是植物体中的元素指标受生长周期及对元素的富集作用等影响,并不是所有元素含量均与产地显著相关,本研究分析了草莓样品中的 26 种元素,采用逐步判别分析方法,筛选出 K、Ca、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Se、Sr 和 Ba 等 10 种元素建立判别模型,进行产地溯源,整体判别准确率为 90.7%,略高于稳定同位素模型判别。

本研究采用稳定同位素和元素结合的方式进行判别,筛选 O、K、Ca、Zn、Ga、Sr、Ba、Sc、Pd、Tb、Hf 等 11 个指标建立判别模型,判别准确率为 100.0%,对不同产地的草莓进行了精准区分。结果表明,采用单一技术进行设施草莓产地溯源判别准确率并不理想,而同时利用草莓中稳定同位素比值和元素含量特征指标建立产地判别模型,能够准确区分不同产地设施种植草莓,为设施种植产品产地溯源的可行性提供了方法依据。

参考文献

[1] 高清山. 我国草莓产业的现状分析及发展趋势研究[J]. 果树资源学报, 2024, 5(5): 79-82.

- GAO QS. Status analysis and development trend research of strawberry industry in China [J]. *Journal of Fruit Resources*, 2024, 5(5): 79–82.
- [2] 潘妮, 程雪, 沈文飏, 等. 富氢水对草莓生长发育及光合作用的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(2): 278–286.
- PAN N, CHENG X, SHEN WB, *et al.* Effects of hydrogen-rich water on growth and photosynthesis of strawberry [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(2): 278–286.
- [3] 岳焕芳, 李友丽, 安鑫语, 等. 基于水分传感器的灌溉决策对基质栽培草莓生长、产量与品质的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(11): 39–49.
- YUE HF, LI YL, AN XY, *et al.* The impact of irrigation decisions based on moisture sensor on the growth, yield and quality of strawberries cultivated in substrate [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(11): 39–49.
- [4] 祝宁, 宗静, 钟传飞, 等. 北京市草莓育苗模式及发展建议[J]. *中国果菜*, 2024, 44(9): 72–75.
- ZHU N, ZONG J, ZHONG CF, *et al.* The mode and development suggestion of strawberry seedling in Beijing City [J]. *China Fruit & Vegetable*, 2024, 44(9): 72–75.
- [5] 冯文霞, 彭林娟. 双流冬草莓产业发展优势分析和对策建议[J]. *四川农业科技*, 2022, 2: 81–83.
- FENG WX, PENG LJ. Analysis of the development advantages and countermeasures of Shuangliu winter strawberry industry [J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2022, 2: 81–83.
- [6] ZHANG ML, LI CL, LIU YM, *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, 72(16): 8955–8962.
- [7] CAMIN F, BONER M, BONTEMPO L, *et al.* Stable isotope techniques for verifying the declared geographical origin of food in legal cases [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 61: 176–187.
- [8] LIU ML, GAO DL, YANX L, *et al.* Application of mineral fingerprint in geographical origin tracing of animal-derived foods [J]. *Food Nutrition China*, 2017, 23(5): 9–13.
- [9] SUN X, SHI Y. Determining the geographic origin of cooked chicken based on near-infrared spectroscopy [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 6: 315–321.
- [10] DOU P, YUAN Y, GUO J, *et al.* Classification of kiwi fruits according to their geographical origin based on polyphenolic compound profile [J]. *Modern Food Science Technology*, 2015, 12: 387–393.
- [11] MONAHAN FJ, SCHMIDT O, MOLONEY AP. Meat provenance authentication of geographical origin and dietary background of meat [J]. *Meat Science*, 2018, 144: 2–14.
- [12] MENG Y, JIN BH, ROGERS KM, *et al.* Hydrogen and oxygen isotope fractionation effects in different organ tissues of grapes under drought conditions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(37): 13662–13671.
- [13] 洪赫阳, 田秀慧, 温丰功, 等. 利用稳定同位素进行农产品产地溯源和真伪鉴别研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(21): 6889–6897.
- HONG HY, TIAN XH, WEN FG, *et al.* Research progress on using stable isotopes for origin tracing and authenticity identification of agricultural products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(21): 6889–6897.
- [14] 庞荣丽, 王书言, 王瑞萍, 等. 同位素技术在水果及制品产地溯源中的应用研究进展[J]. *果树学报*, 2018, 35(6): 747–759.
- PANG RL, WANG SY, WANG RP, *et al.* Research progress on the application of isotope technology in traceability of fruit and product origin [J]. *J Fruit Science*, 2018, 35(6): 747–759.
- [15] 张越. 基于稳定性同位素的甜樱桃产地溯源研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2020.
- ZHANG Y. Research on the origin traceability of sweet cherry based on stable isotopes [D]. Yantai: Yantai University, 2020.
- [16] 郭祖闻, 李春霖, 徐扬, 等. 浙江省不同地理尺度有机茶稳定同位素特征差异分析[J]. *核农学报*, 2024, 38(1): 76–83.
- GUO ZC, LI CL, XU Y, *et al.* Analysis of stable isotope characteristics of organic tea at different geographical scales in Zhejiang Province [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(1): 76–83.
- [17] 马玉华, 唐方东, 刘佳煜, 等. 稳定同位素比技术用于橄榄油的掺假鉴定[J]. *质谱学报*, 2021, 42(2): 189–196.
- MA YH, TANG FD, LIU JY, *et al.* Olive oil adulteration identification using stable isotope ratio technique [J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2021, 42(2): 189–196.
- [18] 张伟, 丁长伟, 马雪, 等. 氢、氧稳定同位素在植源性食品真实性鉴别中的应用[J]. *食品质量安全检测学报*, 2021, 12(12): 5031–5038.
- ZHANG W, DING CW, MA X, *et al.* Application of stable hydrogen and oxygen isotopes in authenticity identification of plant-derived foods [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(12): 5031–5038.
- [19] 李继荣, 刘鑫, 王君, 等. 牦牛乳制品加工过程中稳定碳、氮同位素分馏效应[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(10): 1982–1993.
- LI JR, LIU X, WANG J, *et al.* Fractionation effect of stable carbon and nitrogen isotope ratios in yak dairy products processing [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(10): 1982–1993.
- [20] 李跃红, 陈露, 赵阳, 等. 基于 ICP-MS 对红心猕猴桃矿质元素的测定及主成分分析[J]. *中国口岸科学技术*, 2021(1): 12–18.
- LI YH, CHEN L, ZHAO Y, *et al.* Determination and principal component analysis of mineral elements in red-centred kiwifruit based on ICP-MS [J]. *China Port Science and Technology*, 2021(1): 12–18.
- [21] 骆凌寒, 何赞, 曾粤鑫, 等. 基于稀土元素指纹的贵州茶叶产地溯源研究[J]. *福建茶叶*, 2023, 45(10): 25–27.
- LUO LH, HE Z, ZENG YX, *et al.* Research on the origin traceability of Guizhou tea based on rare earth element fingerprint [J]. *Tea in Fujian*, 2023, 45(10): 25–27.
- [22] 齐婕, 李莹莹, 姜锐, 等. 基于矿物元素指纹分析的中国地理标志猪肉

- 产地溯源研究[J]. 现代食品科技, 2020, 36(3): 1–9.
- QI J, LI YY, JIANG R, *et al.* Research on traceability of China's geographical indication pork origin based on mineral element fingerprint analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(3): 1–9.
- [23] 王静静, 房芳, 周晓明, 等. 基于矿物元素含量的葡萄干产地溯源[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(1): 69–77.
- WANG J, FANG F, ZHOU XM, *et al.* Traceability of raisin origin based on mineral element content [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(1): 69–77.
- [24] 王默涵, 高铭, 李雅丽, 等. 基于稳定同位素和矿物元素的牛奶产地溯源技术[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 284–290.
- WANG MH, GAO M, LI YL, *et al.* Traceability technology of milk origin based on stable isotope and mineral elements [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 284–290.
- [25] 胡翔宇, 郅梦洁, 赵姗姗, 等. 基于矿物元素和稳定同位素技术不同产地陈皮鉴别研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 20(14): 46–55.
- HU XY, QI MJ, ZHAO SS, *et al.* Identification of *Citri reticulatae pericarpium* from different origin based on mineral elements and stable isotope technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 20(14): 46–55.
- [26] 开建荣, 张瑶, 吕毅, 等. 不同生育期和茬次枸杞同位素与元素特征及对溯源的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(9): 1724–1733.
- KAI JR, ZHANG Y, LV Y, *et al.* Study on the isotopic and elemental variances of wolfberry with different maturities and plucking times [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(9): 1724–1733.
- [27] 开建荣, 王彩艳, 李彩虹, 等. 基于稀土元素和稳定同位素指纹的枸杞道地性表征[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 169–176.
- KAI JR, WANG CY, LI CH, *et al.* Authentic characterization of *Lycium barbarum* based on the fingerprint characteristics of rare earth elements and stable isotope [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(13): 169–176.
- [28] 张建, 马义虔, 田玲, 等. 基于多元素和稳定同位素的特基拉酒原产地鉴定[J]. 食品工业, 2020, 41(3): 180–183.
- ZHANG J, MA YQ, TIAN L, *et al.* Origin identification of Tequila wine based on multi-element and stable isotopes [J]. Food Industry, 2020, 41(3): 180–183.
- [29] 张政权, 黄冬梅, 蔡友琼, 等. 矿物元素结合稳定同位素的中华绒螯蟹产地溯源[J]. 食品科学, 2020, 4(17): 15–19.
- ZHANG ZQ, HUANG DM, CAI YQ, *et al.* Traceability of the origin of Chinese mitten crab based on stable isotopes of mineral element sets [J]. Food Science, 2020, 4(17): 15–19.
- [30] LI Y, ZONG W, ZHAO S, *et al.* Nutrition and edible characteristics, origin traceability and authenticity identification of yak meat and milk: A review [J]. Trends Food Science Technology, 2023, 139(9): 104133
- [31] LI Y, YANG XT, ZHAO SS, *et al.* Effects of sampling time and location on the geographical origin traceability of protected geographical indication (PGI) Hongyuan yak milk: Based on stable isotope ratios [J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138283.
- [32] 李彦龙, 钱丽丽, 陈明明, 等. 元素指纹在茶叶产地溯源中的应用及其影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(24): 293–301.
- LI YL, QIAN LL, CHEN MM, *et al.* The Application of elemental fingerprints in tea origin traceability and the research progress on influencing factors [J]. Food Science, 2024, 45(24): 293–301.
- [33] 习佳林, 郭阳, 李安, 等. 基于多元素和稳定同位素技术的桃产地溯源[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 9(15): 62–68.
- XI JL, GUO Y, LI AN, *et al.* Traceability of the origin of *Prunus persica* based on multi-element and stable isotope techniques [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 9(15): 62–68.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)