

# 基于稳定性同位素技术的水果及其制品产地溯源研究进展

蒋 越<sup>1,2\*</sup>, 李 安<sup>1</sup>, 靳欣欣<sup>1</sup>, 潘立刚<sup>1</sup>, 张志勇<sup>2</sup>

(1. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100193; 2. 北京农学院食品科学与工程学院, 北京 102206)

**摘 要:** 随着我国社会主义市场经济的不断发展, 果品贸易飞速发展, 在软饮料行业中占有举足轻重的地位。但欺瞒消费者果品原产地事件仍然存在, 为了保护各地的优质产品不受影响、保障消费者的合法权益不受侵害以及出现问题时能够快速准确的实施相应的补救措施, 建立一套健全的质量安全全程可追溯体系是必不可缺少的。本文基于国内外学者对水果及其制品的产地溯源研究进展, 综述了现有技术的基本原理、特点、局限性及应用现状, 重点阐述了稳定同位素技术原理、不同元素的应用特点、主要分析仪器以及在果品产地溯源应用研究现状, 并对该技术的应用前景进行了展望。

**关键词:** 产地溯源; 稳定同位素; 水果及其制品

## Research progress on origin tracing of fruit and its products based on stable isotope technology

JIANG Yue<sup>1,2\*</sup>, LI An<sup>1</sup>, JIN Xin-Xin<sup>1</sup>, PAN Li-Gang<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-Yong<sup>2</sup>

(1. *Beijing Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research Center, Beijing 100193, China;*  
2. *College of Food Science and Engineering, Beijing Agricultural College, Beijing 102206, China*)

**ABSTRACT:** With the continuous development of China's socialist market economy, the fruit trade has developed rapidly, occupying a pivotal position in the soft drink industry. However, incidents of cheating consumers on the origin of fruit products still exist. In order to protect high-quality products from being affected, protect the legitimate rights and interests of consumers from being infringed and implement corresponding remedial measures quickly and accurately when problems occur, it is essential to establish a complete traceability system of quality and safety. Based on the research progress of the origin of fruit and its products by domestic and foreign scholars, this paper reviewed the basic principles, characteristics, limitations and current application status of the existing technology, expounded the principle of stable isotope techniques, the application characteristics of different elements, the main analysis instrument and application in fruit origin traceability research present situation, and prospected the application prospect of the technology.

**KEY WORDS:** origin tracing; stable isotope; fruits and their products

\*通讯作者: 蒋越, 主要研究方向为食品真实性溯源。E-mail: 2533369723@qq.com

\*Corresponding author: JIANG Yue, Beijing Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research Center, Beijing 100193, China.  
E-mail: 2533369723@qq.com

## 1 引言

当前,随着政府出台的一系列食品安全管控举措,食品安全基本呈现总体向好的态势。然而,伴随食品贸易快速发展而来的食品欺诈现象也引起了社会的广泛关注,如食品掺杂掺假、食品标签造假(营养标识不符、原产造假)等事件频繁发生,对广大人民群众的身体健康造成了一定的威胁。为保障消费者的合法权益不受侵害及发生食品安全问题能够快速查找源头,开展食品溯源技术研究、建立一套健全的质量安全全程可追溯体系是必不可少的。

现阶段,果品因其营养丰富、食用价值高、市场消费量大等优势,在人们的日常消费生活中所占比重逐渐增加,成为最具竞争力的农产品之一,但在栽培种植及销售过程中存在的一些不当行为,致使其质量安全问题和产地的真实性<sup>[1]</sup>备受关注。针对这一现象,越来越多的国内外学者投入到果品的产地溯源研究当中。目前,水果及其制品中用到的常规溯源技术主要有电子标签溯源技术、有机成分指纹溯源技术、近红外光谱溯源技术、矿物元素指纹分析技术,除此之外,稳定同位素溯源技术作为农产品食品真实性溯源与确证领域最具应用前景的技术之一现已广泛应用于果品的产地溯源。

本文综述了近些年国内外学者对水果及其制品的产地溯源研究技术的基本原理、特点、局限性及应用现状,重点阐述了稳定同位素技术原理、不同元素的应用特点、主要分析仪器以及在果品产地溯源中应用研究现状,为推动稳定同位素技术在水果及其制品产地溯源领域的深入研究和实际应用提供参考。

## 2 常规产地溯源技术

### 2.1 电子标签溯源技术

电子标签溯源是常见的一种物理溯源法。普通的产品标签虽然也包含一定的溯源信息,但所承载的信息量有限,通常只有产品名称、生产商、成分表、通讯方式和使用说明等。信息化标签是将条形码<sup>[2]</sup>、二维码<sup>[3]</sup>及无线射频识别技术(radio frequency identification, RFID)<sup>[4]</sup>同相应的硬件设备和网络系统相结合进行产品溯源,具有存储信息量大、查询方便等特点。二维码和 RFID 溯源是伴随着物联网(物联网<sup>[5]</sup>是以互联网为基础,进而发展形成的物与物之间互联的技术)的发展而来的溯源技术。其中 RFID 溯源<sup>[6]</sup>是物联网溯源中的基础,它可以通过发射无线射频信号来自动识别并获取样品数据信息,但所需成本较高,标签存在易被人为更改、标记模糊不清等缺点,致使产品信息在丢失之后难以查询,甚至无法进行溯源;二维码溯源<sup>[7]</sup>较前 2 种有较大优势,它可以承载的信息量多,在果品采摘入库时,相关工作人员可利用数据采集器获取新鲜水果的

原始数据,并生成二维码标签,贴上标签后,发现果品存在问题时就可以通过扫描二维码来获取产品信息,准确的完成溯源工作。综上所述,标签溯源法在给产品溯源带来便利的同时,也存在许多问题,最主要的问题是难以做到“物签一致”,一旦标签损毁或失落,就失去了溯源的功能。此外,标签仿冒、随意扩大标签适用范围、标签信息不全等行为都是利用了标签技术无法做到“物签一致”的弱点。

### 2.2 有机成分指纹溯源技术

由于果品中有机成分组成及含量易受到土壤、温度、湿度和光照等自然环境因素的影响,致使不同产区的同一种果品中的有机成分含量存在显著差异,针对这一差异使得以有机成分来建立指纹判别模型成为可能<sup>[8]</sup>,但因有机成分种类繁多,一般情况下,需根据不同果品所具有的特点及属性来筛选其特有且指示性强的成分进行溯源。马奕颜<sup>[9]</sup>分析了陕西、湖南、四川 3 个主产区猕猴桃的有机成分,筛选出了 VC、VE 及总糖等判别率较高的几种有机成分作为猕猴桃产地鉴别的重要指标。于年文等<sup>[10]</sup>对 5 个南果梨主要产区的果实中的有机成分组成进行分析,结果表明其果实糖分的组成以果糖为主,且不同产区含量差异较大,以此建立判别模型实现了南果梨原产地的有效判别。但有机成分指纹溯源具有一定的局限性<sup>[11]</sup>:不同的有机成分所需样品前处理方法和检测方法各不相同且耗时长;在加工、运输、贮藏等过程中易受到影响,有机成分会随之发生变化,影响产地溯源模型的判别准确率。

### 2.3 近红外光谱溯源技术

近红外光谱<sup>[12]</sup>是有机物分子中含氢基团接受近红外光照射后,含氢基团因受到激发而发生跃迁,待测物吸收近红外光部分能量而形成的。近红外光谱分析因其检测速度快、对待测样品无损、成本较低等优点,现已在农产品和食品的检测及溯源方面被广泛应用,时常辅以不同的化学计量方法以达到不同的检测效果<sup>[13]</sup>。庞艳苹等<sup>[14]</sup>采用因子化法、主成分分析法及合格性测试对成安和非成安的 225 个草莓建模分析后,发现不同产地草莓识别正确率均高于 93.3%。Arana 等<sup>[15]</sup>通过对西班牙 Cadreita 和 Villamayor de Monjardin 2 个地区的葡萄进行近红外光谱仪扫描,所得光谱辅以偏最小二乘法建立判别模型,结果表明准确率分别达到 97.2%和 79.2%。但因近红外光谱分析技术易受到样品来源、环境条件、建模方式、算法局限性光谱重叠性和不连续性等因素的影响,使得与物质相关的信息很难直接提取出来,导致判别模型的正确率大大降低<sup>[16]</sup>。为此,有学者建议应在检测时多点采集光谱取平均值以提高准确度<sup>[17]</sup>。

### 2.4 矿物元素指纹分析技术

近年来,矿物元素指纹分析技术在产地鉴别领域的应用越来越广泛。由于矿物元素在自然界中易受到当地的

水、土壤、气候环境等因素的影响, 致使其分布不均匀, 使得不同地区的果品之间微量与痕量元素的含量存在明显差异<sup>[18]</sup>, 果品的品质也相差较大, 形成了不同产区特有的矿物元素指纹图谱<sup>[19]</sup>。在以往实验中所筛选出的指标大多为过渡元素或稀土元素, 且有部分研究已将稀土元素作为产地判别的有效指标, 而过渡元素方面还有待进一步的研究<sup>[20]</sup>。黄小龙等<sup>[21]</sup>采集了北京市昌平区、山东省栖霞市、陕西省水林羔镇 3 个苹果产区的苹果, 并对其所含 20 种矿物元素含量进行测定, 结果表明, 不同产地的苹果所含矿物元素的种类和含量有较显著的差异。但由于受到我国农产品产地溯源的研究现状、样品的特征指标库的建立及样品信息等诸多因素的影响, 且检测前处理技术较为繁琐, 使得矿物元素指纹分析技术的发展也相对缓慢。

2.5 其 他

除了以上提到的溯源技术外, 电子鼻溯源<sup>[22]</sup>、DNA 溯源<sup>[23]</sup>、虹膜溯源<sup>[24]</sup>等在产品溯源方面也常见报道。电子鼻因其良好的特异性, 在产品溯源过程中可以根据样品的不同气味而显示出不同的信号, 再与样品数据库中的信号对比完成判别<sup>[25]</sup>, 但此技术中传感器易受温度、湿度过载中毒等因素的影响, 还处于实验室阶段, 不能用于商业化的产品溯源; DNA 技术溯源在效率方面较优于 DNA 指纹法, 但由于待检测样本的种属特异性很难建立通用的检测方法。

3 稳定同位素溯源技术

3.1 原理及特点

自然界中, 质子数相同而中子数不同的同一元素的不同核素互为同位素。同位素根据有无放射性分为放射性同位素和稳定性同位素, 且大部分元素都含有两种及两种以上的稳定同位素<sup>[26]</sup>, 其来源主要有两种: 一种为自然界中本身存在的, 如 C、H、O、N 等轻同位素; 另一种为放射性同位素衰变后的产物, 如 Pb、Sr 等重同位素<sup>[27]</sup>。其中多数元素的所含同位素中放射性和稳定性是并存的, 也不乏全是放射性的。稳定性同位素在生物体内富集程度不尽相同, 造成这种富集程度差异的原因是生物体受到自然环境、代谢类型、农业生产活动等因素的影响并与外界进行物质交换, 使得生物体内会携带有环境因子的信息, 组成了其特有的自然属性及特定的指纹分析图谱<sup>[28]</sup>。这种效应称为同位素的分馏效应<sup>[29]</sup>。将同位素的这种自然分馏效应作为机理, 用稳定同位素比值质谱仪(isotope ratio mass spectrometers, IRMS)检测出同位素所存在的自然丰度差异, 得到某元素的同位素组成变化, 可以区分不同种类的产品及其可能来源地。

3.2 稳定性同位素技术较其他溯源技术的优势

(1) 水果中所含的同位素指纹图谱属于自然标签, 仅与

其生长环境密切相关, 不会随着外源添加剂的改变而改变;

(2) 可为果品产地溯源提供科学独立、权威的身份鉴定信息;

(3) 具有高灵敏度、精准度及低检测限等优点。

3.3 稳定同位素分析仪器

基于稳定同位素的自然分馏效应, 可将常见的几种同位素 C、H、O、N、S、Sr 和 Pb 用于食品的产地溯源研究。由于稳定同位素有轻重之分, 所采用的仪器也不尽相同, 如表 1 所示。与重同位素相比, 轻同位素易受产地环境的变化而发生明显分馏效应, 故在农产品溯源过程中采用轻同位素的研究较多, 仪器多采用同位素比值质谱仪。目前, 稳定同位素溯源技术在我国果品产地溯源中的应用主要集中在梨、枣、枸杞、柑橘、葡萄、苹果等水果及其制品。

表 1 不同同位素及其所用仪器  
Table 1 Different isotopes and their instruments

| 同位素种类 | 类别   | 仪器                      |
|-------|------|-------------------------|
| C     | 轻同位素 | 同位素比值质谱仪<br>同位素分馏-核磁共振仪 |
| N     |      |                         |
| O     |      |                         |
| H     |      |                         |
| S     | 重同位素 | 热电离质谱<br>多收集器等离子体质谱     |
| Sr    |      |                         |
| Pb    |      |                         |

3.4 常见轻同位素在果品产地溯源中的应用

3.4.1 碳同位素

自然界中碳元素含有 7 种同位素, 其中仅有 <sup>12</sup>C 和 <sup>13</sup>C 为稳定同位素, 常以  $\delta^{13}\text{C}$  表示其同位素组成:

$$\delta^{13}\text{C}\text{‰}=(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}-1)\times 1000$$

式中  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$  表示样品中两种碳稳定同位素的比值同标准的对应比值的相对千分差, 从而清晰地反应其同位素组成的变化;  $R_{\text{样品}}$  表示待测样品中碳元素的重轻同位素丰度之比;  $R_{\text{标准}}$  一般采用美国南卡罗来纳州白垩纪皮狄组层位中的拟箭石化石中碳元素的重轻同位素丰度之比, 其值为  $R_{\text{标准}}=^{13}\text{C}/^{12}\text{C}=[(11\ 237.2\pm 90)\times 10^{-6}]$ 。

在果品的产地溯源过程中, 可根据果树对 CO<sub>2</sub> 固定方式的不同及同一物种因受环境因素差异和大气中 CO<sub>2</sub> 的  $\delta^{13}\text{C}$  值影响使得碳同位素组成产生的差异作为果品产地判别的有效指标<sup>[30]</sup>, 如表 2 所示。

3.4.2 氢同位素

氢元素含有 3 种同位素, <sup>1</sup>H 和 <sup>2</sup>H 为其稳定同位素, 稳定氢同位素组成常以  $\delta^2\text{H}$  表示, 其丰度比表现为  $R=^2\text{H}/^1\text{H}$ , 以标准平均海洋水为标准物质,  $R_{\text{标准}}=[\text{SMOW}, \text{D/HSMOW}]$

$= (155.76 \pm 0.1) \times 10^{-6}$ ]<sup>[35]</sup>。一般情况下,水是植物体中氢同位素的来源,它会随着纬度的增加而减少,由海岸向内陆递减,随着海拔高度的增加其含量减少,同气温的高低呈反比例变化<sup>[36]</sup>。在果树生长过程中,水分运输到各个部位时并无分馏现象发生,但是在植株进行一系列的生化反应后产生了同位素的分馏,导致丰度比发生变化,可据此来检测果品中氢同位素组成来完成果品的产地溯源<sup>[37]</sup>。

表 2 碳同位素技术在果品产地溯源中的应用  
Table 2 Application of carbon isotope technology in tracing fruit origin

| 研究者                      | 果品   | 产区            | 同位素                           | 溯源信息 | 参考文献 |
|--------------------------|------|---------------|-------------------------------|------|------|
| Simpkin (2000)           | 橙汁   | 澳大利亚          | $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ | 地理信息 | [31] |
| 张遴 ZHANG Lin (2013)      | 苹果   | 中国            | $\delta^{13}\text{C}$         | 地理信息 | [32] |
| 吴浩 WU Hao (2015)         | 葡萄酒  | 法国、澳大利亚、美国、中国 | $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ | 地理信息 | [33] |
| 黄岛平 HUANG Daoping (2013) | 柑橘果汁 | 广西、湖南、福建、四川   | $\delta^{13}\text{C}$         | 地理信息 | [34] |

3.4.3 氮同位素

$^{14}\text{N}$  和  $^{15}\text{N}$  为氮的稳定同位素,其丰度比为  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  表示氮同位素组成,以空气中的氮为标准物质,其  $R_{\text{标准}} = ^{15}\text{N}/^{14}\text{N} = (3676.5 \pm 8.1) \times 10^{-6}$ 。植物体中使得氮同位素的分馏原因有很多,其中包括植株的不同类型、自然环境的差异等,但最主要的因素是不同植株所获取的氮源不同及农业生产中化肥的使用<sup>[38]</sup>,从而使得在果品的产地溯源中起到有效的判别效果,在柑橘<sup>[39]</sup>的产地溯源中得到了广泛应用,但因其易受到气候条件及氮肥使用的影响,产品中氮元素的丰度值会随之波动,使得氮同位素在产地判别的过程中存在一定的局限性。

3.4.4 氧同位素

氧元素含有  $^{16}\text{O}$ 、 $^{17}\text{O}$  和  $^{18}\text{O}$  3 种同位素且均为稳定同位素,常以  $\delta^{18}\text{O}$  表示氧同位素组成,其丰度比为  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,一般采用标准平均海洋水为标准物质。果树中氧同位素主要来源于水,其产生分馏与植株体内水的蒸发、浓缩与沉淀有关。水中氧元素的丰度比会随其所处的海拔及其距离海洋的远近而发生变化,经大气循环,通过降水使得地下水中的氧同位素产生一定的地域特征,在降雨挥发的过程中温度的降低会导致氧元素的重同位素的消耗殆尽。此外,可根据临近海域的远近来判断地下水中的氧同位素组成的变化,判断样品中氧同位素组成以此区分水果及制品的来

源地,且此技术在葡萄、苹果等的果品产地溯源中已得到广泛应用。

3.5 常见重同位素在果品产地溯源中的应用

利用轻同位素进行果品的产地溯源时往往难以达到预想的判别效果,故在此情况下可用矿物元素同位素来进行产品的产地溯源。

3.5.1 锶同位素

锶在自然界中存在的稳定性同位素为  $^{84}\text{Sr}$ 、 $^{86}\text{Sr}$ 、 $^{87}\text{Sr}$  和  $^{88}\text{Sr}$ 。同其他同位素相比,在植株的生长过程中并未出现分馏现象,其发生分馏的主要原因是岩石年龄及  $\text{Rb}/\text{Sr}$  比值<sup>[40]</sup>,它所反映出的溯源信息主要是果品所在的地域地质特征,故其溯源原理是基于植株所处的地质环境导致果品中元素的含量及  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的差异来区分产品。康露等<sup>[41]</sup>通过采集若羌县和新郑灰枣,测定两个产区灰枣中锶含量及同位素组成特征有效区分了若羌县和新郑灰枣,故运用锶同位素可作为若羌灰枣产地溯源的指标之一。现如今此技术已被应用于柠檬<sup>[42]</sup>、葡萄<sup>[43]</sup>、橙子<sup>[44]</sup>、枣<sup>[45]</sup>等果品的产地溯源中。

3.5.2 铅同位素

铅含有  $^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}$  等 4 种同位素,因自然界中  $^{204}\text{Pb}$  的丰度较低,使得测定精度较差,通常以  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  作为检测指标。果树中铅元素的来源主要为地表水及土壤,使其具有地域特征,故可用于果品的产地溯源<sup>[46]</sup>。但铅同位素易受生产设备的材质影响可能会发生改变,故其研究多数集中于检测环境污染等方面,Dutra 等<sup>[47]</sup>通过对巴西南部葡萄酒中  $\text{Rb}$  及氧同位素进行检测,发现其含量存在显著的产区差异,故可将铅同位素应用于葡萄酒的产地溯源中。

3.6 多种同位素在果品产地溯源中的应用

由于果品中所含成分较为复杂,有时仅凭一种同位素很难实现有效溯源,为使果品的产地溯源能更加的快速准确,将 2 种及 2 种以上的元素同位素相结合的多同位素技术是行之有效的手段。Suzuki 等<sup>[48]</sup>利用苹果中碳氧两种元素的同位素组成,有效区分了中国和日本两个国家的苹果样品,并对日本不同产区的苹果能有效的进行判别。江伟等<sup>[49]</sup>对山东烟台、河北沙城及昌黎、宁夏荷兰山 4 大产区的‘赤霞珠’葡萄酒中的  $\text{C}$ 、 $\text{H}$ 、 $\text{O}$  3 种同位素进行单独分析比较,发现判别效果不明显,但利用线性判别分析手段综合 3 种同位素分析,能 100%区分不同产区的葡萄酒。

4 同位素结合其他技术在果品产地溯源中的应用

同位素分馏原理使得同位素溯源技术同其他溯源技术相比具有其独特的优势,但因其自身属性及溯源过程中所需庞大数据库的支撑,使其对于独立完成对食品的原产地溯源略显乏力,为此需结合多元素、多方法来实现果品

的产地判别。如 Gremaud 等<sup>[50]</sup>在瑞士葡萄酒的产地判别实验中,利用此技术大致划分了葡萄酒的产区,但并未做到准确的溯源,在后续实验中将同位素丰度比、元素及化学成分等3种变量相结合,利用线性判别分析实现了产区间的判别,成功将瑞士分为4个主要的葡萄酒产区。

## 5 展 望

同位素溯源技术是以同位素分馏原理为基础,以同位素自然丰度的变化规律为理论依据发展而来的一项新兴技术,目前已被广泛应用于农产品的产地溯源研究工作中。随着稳定同位素比值质谱仪的普及,建立有效可靠的食物原产地追溯技术已成为可能。我国的稳定同位素溯源技术起步较晚,同国外研究相比,研究相对滞后,但目前发展速度相对较快,经过近年来的研究积累,此技术由起初的只针对单一同位素的研究到现阶段的多元同位素同多种其他技术相结合,已被广泛应用于肉制品、林产品、葡萄酒、蔬菜、谷物<sup>[51]</sup>等诸多领域,且判别准确率也不断提高。

稳定同位素溯源技术虽有其特有的优势,但也因其昂贵的检测成本、完整数据库的缺乏以及在我国的发展现状等一系列因素的影响受到一定的局限,为使此技术能广泛有效地应用于果品的产地溯源,还需从以下几个层面进行更深入的研究:

建立一套健全的同位素指纹图谱数据库。因不同果品所具有的同位素组成特征不同,建立健全的同位素产地溯源数据库成为亟待解决的问题;

深入挖掘多种稳定同位素的溯源潜力。当前,关于稳定同位素用于食品溯源的研究大多集中在C、H、O等少数几种元素上,需要深入挖掘其他具有溯源潜力的稳定同位素,开展元素互补或联合效应的研究;

开展同位素技术与其他溯源技术相结合的研究。单一技术虽能起到一定的鉴别效果,但无法进行所有来源的区分,故而根据多元同位素同多重技术相结合所反映出来的产品特征、不同产区土壤及其加工处理等方面进行综合分析便能得到更可靠的结论等。

## 参考文献

- [1] Franke BM, Gremaud G, Hadoyn R, *et al.* Geographic origin of meat-elements of an analytical approach to its authentication [J]. *Eur Food Res Technol*, 2005, 221(3/4): 493–503.
- [2] 李永华, 姜磊, 杨宝祝. 数字化防伪溯源技术在农资监管中的应用[J]. *农学学报*, 2018, 8(3): 64–68.
- Li YH, Jiang L, Yang BZ. Application of digital security traceability technology in agricultural material supervision [J]. *J Agron*, 2018, 8(3): 64–68.
- [3] 陈俊. 基于二维码技术的烟草防伪溯源系统设计与实现[D]. 湘潭: 湖南大学, 2018.

- Chen J. Design and implementation of tobacco security traceability system based on two-dimensional code technology [D]. Xiangtan: Hunan University, 2018.
- [4] 李威力. 基于RFID技术的仓储管理系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- Li WL. Research on warehouse management system based on RFID technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [5] 黄闻达. 物联网技术与应用[J]. *电子技术与软件工程*, 2019, (16): 9–10.
- Huang WD. internet of things technology and application [J]. *Electr Technol Software Eng*, 2019, (16): 9–10.
- [6] 赵训铭, 刘建华. 射频识别(RFID)技术在食品溯源中的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(2): 212–216, 225.
- Zhao XM, Liu JH. Research progress on application of radio frequency identification (rfid) technology in food traceability [J]. *Food Mach*, 2019, 35(2): 212–216, 225.
- [7] 李乾. 冰糖橙果品质量安全溯源技术体系的建立[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- Li Q. Establishment of traceability technology system for quality and safety of Bingtang orange fruit [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.
- [8] 王世成, 李国琛, 王颜红, 等. 果品产地溯源技术研究进展及其在南果梨产地溯源的应用展望[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(9): 3289–3294.
- Wang SC, Li GC, Wang YH, *et al.* Research progress of fruit origin traceability technology and its application prospect in Nanguo pear origin traceability [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(9): 3289–3294.
- [9] 马奕颜. 猕猴桃有机成分地域指纹信息的稳定性研究[A]. 中国食品科学技术学会. 科技与产业对接——CIFST-中国食品科学技术学会第十届年会暨第七届中美食品业高层论坛论文摘要集[C]. 中国食品科学技术学会, 2013: 2.
- Ma YY. Study on the Stability of Regional Fingerprint Information of Organic Components in Kiwifruit [A]. Chinese Institute of Food Science and Technology. Linking Science and Technology with Industry-Summaries of Papers from CIFST-chinese institute of food science and technology 10th Annual Meeting and 7th Sino-US Food Industry Summit [C]. Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013: 2.
- [10] 于年文, 李俊才, 王家珍, 等. 不同产地南果梨果实品质比较[J]. *北方园艺*, 2009, (12): 8687.
- Yu NW, Li JC, Wang JZ, *et al.* Comparison of fruit quality of nanguo pear from different producing areas [J]. *North Hortic*, 2009, (12): 8687.
- [11] 项洋, 柴沙驼, 郝力壮, 等. 化学方法在农产品产地溯源中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(20): 371–376.
- Xiang Y, Chai ST, Hao LZ, *et al.* Research progress of chemical methods in tracing origin of agricultural products [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2015, 36(20): 371–376.
- [12] 苏学素, 张晓焱, 焦必宁, 等. 基于近红外光谱的脐橙产地溯源研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 240–245.
- Su XS, Zhang XY, Jiao BN, *et al.* Study on origin traceability of navel orange based on near infrared spectroscopy [J]. *J Agric Eng*, 2012, 28(15): 240–245.
- [13] 马慧莹, 余冰雪, 李妍, 等. 食品溯源技术研究进展[J]. *食品与发酵工*

- 业, 2017, 43(5): 277-284.
- Ma HL, Yu BX, Li Y, *et al.* Research progress of food traceability technology [J]. Food Ferment Ind, 2017, 43(5): 277-284.
- [14] 庞艳苹, 刘坤, 闫军颖, 等. 近红外光谱法快速鉴别安草莓[J]. 现代食品科技, 2013, 29(5): 1160-1162.
- Pang YP, Liu K, Yan JY, *et al.* Rapid identification of an strawberry by near infrared spectroscopy [J]. Mod Food Sci Technol, 2013, 29(5): 1160-1162.
- [15] Anara I, Jarn C, Arazuri S. Maturity, variety and origin determination in white grapes (*Vitis vinifera* L.) using near infrared reflectance technology [J]. J Near Inf Spectrosc, 2005, 13(6): 349.
- [16] 管晓, 古方青, 杨永健. 近红外光谱技术在食品产地溯源中的应用进展[J]. 生物加工过程, 2014, 12(2): 77-82.
- Guan X, Gu FQ, Yang YJ. Application progress of near infrared spectroscopy in traceability of food origin [J]. Chin J Bioprocess Eng, 2014, 12(2): 77-82.
- [17] 张勇, 王督, 李雪, 等. 基于近红外光谱技术的农产品产地溯源研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(23): 6161-6166.
- Zhang Y, Wang D, Li X, *et al.* Research progress on origin traceability of agricultural products based on near infrared spectroscopy [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(23): 6161-6166.
- [18] 陈秋生, 张强, 刘焯潼, 等. 矿质元素指纹技术在植源性特色农产品产地溯源中的应用研究进展[J]. 天津农业科学, 2014, 20(6): 4-8.
- Chen QS, Zhang Q, Liu YT, *et al.* Research progress on application of mineral element fingerprint technology in origin tracing of plant-derived characteristic agricultural products [J]. Tianjin Agric Sci, 2014, 20(6): 4-8.
- [19] Bingham FT, Page AL, Strong JE. Yield and cadmium content of rice grain in relation to addition rates of cadmium, copper, nickel, and zinc with sewage sludge and liming [J]. Soil Sci, 1980, 130(1): 32-38.
- [20] 王成, 赵多勇, 王贤, 等. 食品产地溯源及确证技术研究进展[J]. 农产品质量与安全, 2012, (S1): 59-61.
- Wang C, Zhao DY, Wang X, *et al.* Research progress on traceability and confirmation technology of food origin [J]. Qual Saf Agric Prod, 2012, (S1): 59-61.
- [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苹果的鉴定[J]. 食品科学, 2010, 31(8): 171-173.
- Huang XL, He XQ, Zhang N, *et al.* Determination of trace elements by ICP-MS for identification of geographical indication products apple [J]. Food Sci, 2010, 31(8): 171-173.
- [22] 赵丹, 张玉荣, 林家永, 等. 电子鼻在小麦品质控制中的应用研究[J]. 粮食与饲料工业, 2012, (3): 10-15.
- Zhao D, Zhang YR, Lin JY, *et al.* Application of electronic nose in wheat quality control [J]. Grain Feed Ind, 2012, (3): 10-15.
- [23] 郭振华, 陈换美. 食品溯源技术研究现状及分析[J]. 新疆农机化, 2017, (6): 34-37.
- Guo ZH, Chen HM. Research Status and analysis of food traceability technology [J]. Xinjiang Agric Mechaniz, 2017, (6): 34-37.
- [24] 罗忠亮, 段琢华, 戴经国. 虹膜识别在基于物联网的肉类食品溯源中的研究[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(5): 102-108.
- Luo ZL, Duan ZH, Dai JG. Research on iris recognition in traceability of meat products based on internet of things [J]. Mathemat Pract Cognit, 2013, 43(5): 102-108.
- [25] 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.
- Tian XJ, Long M, Wang J, *et al.* Study on origin traceability of wolfberry fruit based on odor information of electronic nose and multivariate statistical analysis [J]. J Zhejiang Agric, 2018, 30(9): 1604-1611.
- [26] 赵威, 王征宏. 稳定性同位素技术在生物科学中的应用[J]. 生物学通报, 2008, 43(1): 12-14.
- Zhao W, Wang ZH. application of stable isotope technology in bioscience [J]. Biol Bull, 2008, 43(1): 12-14.
- [27] 郭波莉, 魏益民, 潘家荣. 同位素指纹分析技术在食品产地溯源中的应用进展[J]. 农业工程学报, 2007, (3): 284-289.
- Guo BL, Wei YM, Pan JR. Application of isotope fingerprint analysis in traceability of food origin [J]. J Agric Eng, 2007, (3): 284-289.
- [28] Banner JL. Application of the trace element and isotope geochemistry of strontium to studies of carbonate diagenesis [J]. Sedimentology, 1995, 42(5): 805-824.
- [29] 袁红朝, 李春勇, 简燕, 等. 稳定同位素分析技术在农田生态系统土壤碳循环中的应用[J]. 同位素, 2014, 27(3): 170-176.
- Yuan HC, Li CY, Jian Y, *et al.* Application of stable isotope analysis technology in soil carbon cycle of farmland ecosystem [J]. Isotope, 2014, 27(3): 170-176.
- [30] 樊金娟, 宁静, 孟宪菁, 等. C3 植物叶片稳定碳同位素对温度、湿度的响应及其在水分利用中的研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1502-1507.
- Fan JJ, Ning J, Meng XJ, *et al.* Responses of stable carbon isotopes in c3 plant leaves to temperature and humidity and research progress in water use [J]. Soil Bull, 2012, 43(6): 1502-1507.
- [31] Simpkins WA, Patel G, Harrison M, *et al.* Stable carbon isotope ratio analysis of Australian orange juices [J]. Food Chem, 2000, 70(3): 385-390.
- [32] 张遵, 蔡砚. 中国富士苹果碳同位素比的含量和分布特征[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(2): 501-503.
- Zhang L, Cai Y. Content and distribution characteristics of carbon isotope ratio of Fuji apple in China [J]. J Food Saf Qual, 2013, 4(2): 501-503.
- [33] 吴浩, 谢丽琪, 靳保辉, 等. 气相色谱-燃烧-同位素比率质谱法测定葡萄酒中 5 种挥发性组分的碳同位素比值及其在产地溯源中的应用[J]. 分析化学, 2015, 43(3): 344-349.
- Wu H, Xie LQ, Jin BH, *et al.* Determination of carbon isotope ratio of five volatile components in wine by gas chromatography-combustion-isotope ratio mass spectrometry and its application in origin tracing [J]. Anal Chem, 2015, 43(3): 344-349.
- [34] 黄岛平, 陈秋虹, 林葵, 等. 稳定碳 氢同位素在柑桔产地溯源中应用初探[J]. 科技与企业, 2013, (17): 256.
- Huang DP, Chen QH, Lin K, *et al.* Preliminary study on application of stable carbon and hydrogen isotope in traceability of citrus origin [J]. Sci Technol Enter, 2013, (17): 256.
- [35] 袁玉伟, 张永志, 付海燕, 等. 茶叶中同位素与多元素特征及其原产地 PCA-LDA 判别研究[J]. 核农学报, 2013, 27(1): 47-55.
- Yuan YW, Zhang YZ, Fu HY, *et al.* Isotope and multielement characteristics in tea and PCA-LDA discrimination study on origin [J]. Nucl Agron, 2013, 27(1): 47-55.
- [36] 李成, 潘立刚, 王纪华, 等. 稳定同位素技术在农产品产地溯源中的应用研究进展[J]. 农产品质量与安全, 2013, (5): 53-59.
- Li C, Pan LG, Wang JH, *et al.* Research progress on application of stable isotope technology in traceability of agricultural products [J]. Qual Saf Agric Prod, 2013, (5): 53-59.

- [37] 杜俊杉. 基于氢氧同位素的农田 GSPAC 界面水分转化研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- Du JS. Study on Water Transformation at GSPAC Interface in Farmland Based on Hydrogen and Oxygen Isotopes [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [38] 冯海强, 潘志强, 于翠平, 等. 利用 $^{15}\text{N}$ 自然丰度法鉴别有机茶的可行性分析[J]. 核农学报, 2011, 25(2): 308–312.
- Feng HQ, Pan ZQ, Yu CP, *et al.* Feasibility Analysis of Identification of Organic Tea by  $^{15}\text{N}$  Natural Abundance Method [J]. Nucl Agron, 2011, 25(2): 308–312.
- [39] Rummel S, Hoelzl S, Horn P, *et al.* The combination of stable isotope abundance ratios of H, C, N and S with  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  for geographical origin assignment of orange juices [J]. Food Chem, 2010, 118(4): 890–900.
- [40] 王兵, 李心清, 杨放. 元素-锶同位素技术在农产品原产地溯源中的应用[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 391–396.
- Wang B, Li XQ, Yang F. Application of element-strontium isotope technology in origin tracing of agricultural products [J]. Earth Environ, 2012, 40(3): 391–396.
- [41] 康露, 朱靖蓉, 赵多勇, 等. 锶同位素溯源若羌灰枣产地的可行性研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(6): 1066–1075.
- Kang L, Zhu JR, Zhao DY, *et al.* Feasibility Study on Strontium Isotope Traceability to Ruoqiang Huizao Origin [J]. Xinjiang Agric Sci, 2017, 54(6): 1066–1075.
- [42] Schipilliti L, Dug P, Bonaccorsi I, *et al.* Authenticity control on lemon essential oils employing gas chromatography-combustion-isotope ratio mass spectrometry (GCC-IRMS) [J]. Food Chem, 2012, 131(4): 1523–1530.
- [43] Almeida CM, Vasconcelos MTSD. Does the winemaking process influence the wine  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ? a case study [J]. Food Chem, 2004, 85(1): 7–12.
- [44] Rummel S, Hoelzl S, Horn P, *et al.* The combination of stable isotope abundance ratios of H, C, N and S with  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  for geographical origin assignment of orange juices [J]. Food Chem, 2010, 118(4): 890–900.
- [45] Vinciguerra V, Stevenson R, Widory D, *et al.* Strontium isotope characterization of wines from Quebec, Canada [J]. Food Chem, 2016, 210(2): 121–128.
- [46] 白志鹏, 张利文, 朱坦, 等. 稳定同位素在环境科学研究中的应用进展[J]. 同位素, 2007, 20(1): 57–64.
- Bai ZP, Zhang LW, Zhu T, *et al.* Progress in application of stable isotope in environmental science research [J]. Isotope, 2007, 20(1): 57–64.
- [47] Dutra SV, Adam L, Marcon AR, *et al.* Determination of the geographical origin of Brazilian wines by isotope and mineral analysis [J]. Anal Bioanal Chem, 2011, 401(5): 1571–1576.
- [48] Suzuki Y, Nakashita R, Kobe R, *et al.* Tracing the geographical origin of Japanese (Aomori prefecture) and Chinese apples using stable carbon and oxygen isotope analyses [J]. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 2012, 59(2): 69–75.
- [49] 江伟, 吴幼茹, 薛洁. C、H、O 同位素分析在葡萄酒产区鉴别的应用[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 166–171.
- Jiang W, Wu YR, Xue J. Application of C, H, O isotope analysis in identification of wine producing areas [J]. Food Sci, 2016, 37(6): 166–171.
- [50] Gremaud G, Quaile S, Piantin U, *et al.* Characterization of Swiss vineyards using isotopic data in combination with trace elements and classical parameters [J]. Eur Food Res Technol A, 2004, 219(1): 97–104.
- [51] 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 ratio of rice in China and its traceability application [J]. Qual Saf Agric Prod, 2019, (4): 9–12, 40.

(责任编辑: 韩晓红)

## 作者简介



蒋 越, 主要研究方向为农产品质量安全。  
E-mail: 2533369723@qq.com



潘立刚, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全研究。  
E-mail: Panlg@brcast.org.cn