

稳定同位素、矿质元素及可见-近红外光谱技术在禽制品真实性鉴别中的应用研究进展

刘雅回^{1,2}, 谭丹², 母健², 张昂^{2,*}

(1.宁夏大学食品与葡萄酒学院, 宁夏 银川 750021; 2.秦皇岛海关技术中心, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 禽制品在食品消费中占据很大比例, 近年来, 禽制品掺假、造假等事件频发, 禽制品真实性鉴别成为研究热点。随着掺假造假手段的多样化, 传统的感官鉴别方法已经难以满足禽制品真实性鉴别的需要。近年来, 现代分析仪器和技术发展迅速, 现代分析方法在禽制品真实性检测中展现出优势。本文重点阐述稳定同位素技术、矿质元素指纹技术及可见-近红外光谱技术在禽制品真实性鉴别中的应用与发展趋势, 旨在为我国禽制品真实性鉴别研究提供参考。

关键词: 禽制品; 同位素; 矿质元素; 可见-近红外光谱

Progress in the Application of Stable Isotope Techniques, Mineral Element Fingerprint and Visible-Near Infrared Spectroscopy in the Authenticity Identification of Poultry Meat Products

LIU Yahui^{1,2}, TAN Dan², MU Jian², ZHANG Ang^{2,*}

(1.School of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2.Qinhuangdao Customs Technical Center, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Poultry meat products account for a large proportion of food consumption. In recent years, incidents of adulteration and fraud of poultry meat products have occurred frequently, and the authenticity identification of poultry meat products has become a research hotspot. With the diversification of adulteration and counterfeiting methods, the traditional sensory evaluation methods have been unable to meet the requirements for the authenticity identification of poultry meat products. In recent years, modern analytical instruments and technologies have developed rapidly, and modern analytical methods have shown advantages in the authenticity detection of poultry meat products. This article focuses on recent trends in the application and development of stable isotope techniques, mineral element fingerprinting and visible-near infrared spectroscopy in the authenticity identification of poultry meat products, aiming to provide a reference for future research on the authenticity identification of poultry products in the country.

Keywords: poultry meat products; isotopes; mineral elements; visible-near infrared spectroscopy

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210426-114

中图分类号: TS207.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2021) 11-0064-09

引文格式:

刘雅回, 谭丹, 母健, 等. 稳定同位素、矿质元素及可见-近红外光谱技术在禽制品真实性鉴别中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(11): 64-72. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210426-114. <http://www.rlyj.net.cn>

LIU Yahui, TAN Dan, MU Jian, et al. Progress in the application of stable isotope techniques, mineral element fingerprint and visible-near infrared spectroscopy in the authenticity identification of poultry meat products[J]. Meat Research, 2021, 35(11): 64-72. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210426-114. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2021-04-26

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2017YFC1601703); 海关总署科技项目(2020HK215; 2020HK216)

第一作者简介: 刘雅回(1995—)(ORCID: 0000-0002-5135-5632), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 1454408915@qq.com

*通信作者简介: 张昂(1982—)(ORCID: 0000-0002-1955-1430), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为葡萄酒及大宗农产品真实性检测技术。E-mail: zhanganggrape@hotmail.com

禽制品在中国人的饮食结构中占据重要地位,更是人体蛋白质的重要来源。2020年我国禽肉年产量2 361 万t,仅次于猪肉。自1985年以来,我国鸡蛋产量稳居世界第一^[1]。随着人们生活水平的提高,消费者对禽制品的关注程度越来越高,禽制品的安全性始终是人们关注的热点之一。随着禽制品需求的增加,越来越多的禽制品真实性问题被发现。2013年德国下萨克森州的有机鸡蛋欺诈事件、英国的鸡肉掺假事件等,严重影响了消费者的购买信心,对禽制品销售市场产生了严重的不良影响,也对消费者利益和健康产生了威胁。近些年食品造假、掺假的手段增多,食品真实性鉴别的范围也更加广泛。食品真实性鉴别的目标主要包括产地溯源、种类鉴别、掺假鉴别、品牌鉴别、品质识别、工艺鉴定、标签符合程度鉴定等^[2-4]。禽制品中常见的掺假问题有鸡肉注水、注胶及高价的禽肉肉糜中掺入低价肉或植物蛋白等。商品种类错误标注在禽制品销售环节中尤为常见,如笼养鸡蛋冒充散养鸡蛋,普通禽制品冒充有机禽制品,低价鸭肝充当高价鹅肝等。近些年食品标签上的地理来源信息受到了消费者的关注,Vukasovič^[5]研究表明,禽肉的产地来源已经成为影响斯洛文尼亚消费者是否购买的重要因素,产地来源的真实性对消费者也显得尤为重要。为保障消费者的合法权益和规范禽制品市场,研究能够正确验证禽制品真实性的分析方法和技术具有重要意义。

目前常用于鉴别禽制品真实性的分析技术主要有以聚合酶链式反应、分子标记、DNA指纹图谱等^[6-8]为代表的分子生物学技术,以光谱、质谱、色谱等^[9-11]为代表的理化分析技术,以电子鼻和电子舌等^[12-13]为代表的人工智能技术。近年来,光谱法中的可见-近红外光谱技术因其无损、简便、高效的优点,被国内外研究人员广泛关注,也越来越多地被应用于禽制品真实性鉴别研究中。目前,常用于禽制品产地溯源的技术主要是稳定同位素技术和矿质元素指纹图谱技术^[14],禽制品中的矿质元素含量和稳定同位素比可以反映其产地、饮食等信息。禽制品的种类众多,不法商贩常在禽制品的品种、养殖方式(散养或笼养)、有机属性上造假,用低价禽制品充当高价禽制品,以赚取差价。现有研究已经证明以散养方式生产的禽制品品质相较于普通笼养生产的禽制品更优^[15-16]。有机禽制品与普通禽制品因其饲养制度的差异在营养成分含量上也存在差异^[17-18],这种差异为区分有机禽制品和普通禽制品提供了条件。目前,稳定C、N同位素比和矿质元素已被广泛用于鉴定家禽的养殖方式和有机属性^[19-21]。本文将围绕稳定同位素技术、矿质元素指纹技术和可见-近红外光谱技术在禽制品真实性鉴别方面的应用展开综述,以期为我国禽制品真实性鉴别技术的发展提供参考。

1 稳定同位素技术

1.1 稳定同位素技术应用的理论基础

同位素是指含有相同质子数、不同中子数的一类元素,分为放射性同位素和稳定性同位素。稳定性同位素具有整合、示踪和指示的功能,是食品真实性鉴别的良好指标。在自然界中,生物体会不断与外界环境进行物质交换,稳定同位素会在物理、化学及生物化学作用过程中发生分馏^[22]。同位素分馏受生物体代谢类型、气候环境等多种因素影响,因此不同来源的生物体内稳定同位素比值存在差异,这种差异为禽制品的真实性鉴别提供了特征指纹。

在食品真实性鉴别技术中,常用到的稳定同位素包括C、N、H、O、S、Pb和Sr等。C、N、H、O同位素分馏受自然因素和人为因素的影响,如海拔、气候、地球大气循环和水循环以及农业种植条件等。土壤中S稳定同位素的丰度与该地的地质特点(火山岩、沉积岩、酸性岩和碱性岩)和工业污染有关。农作物在生长过程中会从土壤中摄取元素,因此农作物的C同位素组成一定程度上反映了该地土壤的C同位素组成^[23]。S稳定同位素还与该地与海洋的距离有关,动物长期食用添加海洋生物的饲料会对其体内S稳定同位素组成产生影响^[24]。Pb有4种天然的同位素,其中²⁰⁴Pb半衰期很长,一般被当作稳定同位素处理。不同地区Pb同位素的组成因其地质结构、矿质元素含量、地质年龄和降水分布的不同而不同,因此Pb同位素也常用于农副产品产地溯源^[25]。Sr对于自然界的生物体至关重要,它普遍存在于动物的壳和骨中。植物体中的Sr主要来源于水和土壤,进而通过食物链在动物体内产生富集。而土壤中的Sr与该区域的岩石性质(从基性到酸性)有关,不同性质的岩石Sr同位素的组成也不同。水体中的Sr一般来源于雨水和河流对途经流域岩石和土壤的淋洗和冲刷,所以一般不同地区土壤和水中Sr同位素组成也不同^[26]。生物体吸收Sr的过程中Sr同位素的组成不发生分馏^[27],植物体中Sr同位素的组成反映了植物生长环境中Sr同位素的组成。

1.2 稳定同位素技术在禽制品真实性鉴别中的应用

1.2.1 稳定同位素技术在禽制品产地溯源中的应用

禽制品的H、O同位素组成与家禽的饮水有关,不同地区水中H、O同位素组成不同,因此H、O同位素常被用于禽制品产地溯源。例如,Franke等^[28]用 $\delta^{18}\text{O}$ 值成功区分巴西、法国、德国、匈牙利和瑞士5国的鸡胸肉样品($P<0.001$)。H、O同位素常与C、N、S等同位素结合用于禽制品的产地溯源,如孙丰梅等^[29]利用同位素比值质谱仪测定北京、山东、湖南和广东4省9个不同地区鸡肉粗蛋白中的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 值(分别为4种稳定同位素比值,下同)和相应各地饮用水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,

结合多元方差分析4省鸡肉粗蛋白中的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 值。结果表明, $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 值在不同地区的鸡肉中均存在显著差异($P<0.05$),采用贝叶斯判别分析对各地鸡肉产地鉴别的准确率为100%,且多同位素结合判别准确率高于单一同位素,同时该研究还发现不同地区鸡肉粗蛋白中的 $\delta^2\text{H}$ 值和当地饮水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈极显著正相关性($P<0.01$),这进一步说明饮水是鸡肉中 $\delta^2\text{H}$ 的重要来源,这与王慧文^[30]、戴祁^[31]等的研究结果一致。同时,王慧文等^[30]的研究表明,鸡肉粗蛋白中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与鸡所食用的饲料高度相关。戴祁^[31]测定北京昌平、天津空港、江苏南京、山东聊城、甘肃定西、新疆阿克苏、河南平顶山和四川成都地区鸡蛋蛋清中的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 值,结果表明,不同地区鸡蛋蛋清中的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在显著差异,由于不同地区的优势作物不同,导致不同地区养殖蛋鸡时投喂的饲料存在差异,这为产地的鉴别提供了条件。Swanson等^[32]研究家禽饲料中同位素组成对禽制品同位素组成的影响,结果证明饲料中的金属稳定同位素会在禽制品中产生富集,影响禽制品的同位素组成。家禽饮水与饲料的选择受地理因素影响,进而对禽制品的同位素组成产生影响,这是禽制品产地鉴别的重要依据^[33]。

1.2.2 稳定同位素技术在禽制品产品类型真实性鉴别中的应用

家禽养殖方式(笼养和散养)与有机属性的区分是禽制品行业的研究热点。戴祁等^[34]利用元素分析-稳定同位素比值质谱测定鸡蛋蛋黄、蛋清和蛋壳膜中的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值,对比散养鸡蛋和笼养鸡蛋蛋清的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围,结果表明,散养鸡蛋蛋清中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围分别为 $-18.00\text{‰} \sim -14.97\text{‰}$ 、 $3.02\text{‰} \sim 4.37\text{‰}$,笼养鸡蛋蛋清中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围分别为 $-18.96\text{‰} \sim -15.98\text{‰}$ 、 $1.66\text{‰} \sim 2.68\text{‰}$ 。可见结合 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值可区分散养和笼养鸡蛋。Rogers^[21]测定18种笼养、谷仓饲养、散养和有机饲养的鸡所产鸡蛋的蛋黄、蛋白和蛋壳膜的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。结果表明,散养和有机饲养的鸡蛋蛋黄、蛋白和蛋壳膜的 $\delta^{15}\text{N}$ 值更为偏正,表明养殖方式会对鸡蛋蛋黄、蛋白和蛋壳膜中N同位素组成产生影响,这与戴祁等^[34]的研究结果相同,但Rogers^[21]的研究中部分有机鸡蛋与普通鸡蛋 $\delta^{15}\text{N}$ 值相同,无法将二者完全区分。随后Rogers等^[35]测定荷兰49家养殖场的笼养、谷仓、自由放养和有机饲养条件下生产的鸡蛋蛋清中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值,利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值成功区分了有机鸡蛋和谷仓鸡蛋。

Coletta等^[19]对比使用同种饲料喂养的圈养鸡和散养鸡鸡胸肉中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值,结果表明,二者 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在差异,散养鸡的 $\delta^{15}\text{N}$ 值更为偏正,这与散养鸡额外摄入动物蛋白有关。林涛等^[36]用 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值结合P、K、Ca、Na、Mg、Mn、Zn、Fe、Cu 9种元素成功区分有机鸡与

普通鸡,鉴别准确率为100%,交叉验证正确率为90%。在有机禽制品和普通禽制品的鉴别中,稳定同位素技术和多元素分析方法结合可有效提高产地鉴别的准确率。Lü Jun等^[37]测定取自北京普通养鸡场、有机养鸡场和吉林普通养鸡场3种鸡肉的蛋白质、脂肪、 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值以及12种矿物元素(Na、Mg、K、Ca、V、Fe、Co、Ni、Cu、Rb、Ba和Pb)的含量。结果表明,有机组的鸡肉蛋白质含量更高、去脂鸡肉的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均更为偏正,普通组和有机组鸡肉除Mg外的其他11种元素含量均存在显著差异($P<0.05$),这些差异可为区分有机鸡肉与普通鸡肉提供参考依据。

综上所述, $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 值是禽制品真实性鉴别的重要特征指标,金属同位素可反映家禽的养殖环境,在禽制品真实性鉴别中有较大潜力,稳定同位素与禽制品矿质元素含量及有机组分差异相结合可进一步提高禽制品真实性鉴别准确率。饮水和饲料是影响不同地区禽制品同位素差异的关键因素,研究饮水和饲料中稳定同位素在家禽体内的代谢途经对禽制品真实性鉴别具有重要意义。在禽制品真实性鉴别研究中,可根据测定指标将样品的不同组分分离后进行测定,可减少因样品不均匀带来的误差,如将禽蛋蛋清和蛋黄分离后分别测定各组分稳定同位素比值。随着稳定同位素技术的发展,样品前处理逐渐简化,测定效率得到提升,稳定同位素技术将会更广泛应用于禽制品真实性鉴别。

2 矿质元素指纹鉴别技术

2.1 矿质元素指纹鉴别技术应用的理论基础

不同地区土壤中的矿质元素组成和含量存在差异,这主要与地下岩层有关,地下岩层的风化是影响土壤矿质元素种类与含量的重要因素^[38]。不同地区的地质类型不同,这使得每个地区土壤中的元素种类与含量等具有地质特异性。生物体所含矿质元素受产地环境影响,因此,各产地生物体内所含矿质元素存在差异。水和土壤是植物摄取矿质元素最直接的途径,动物需要从水和食物中获取生长所需的矿质元素,因此不同来源生物体中的矿质元素与其生长的地理环境密切相关,可在不同程度上反映出其产地的地质特征。

矿质元素指纹鉴别技术在实际应用中存在样本量大、变量多的问题,需引入化学计量学方法进行数据处理。如利用方差分析法可筛选样本间存在差异的变量,利用主成分分析(principal component analysis, PCA)、线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)、偏最小二乘判别分析和聚类分析等可建立样本判别模型,从而对样品属性进行预测。

2.2 矿质元素指纹鉴别技术在禽制品真实性鉴别中的应用

2.2.1 矿质元素指纹鉴别技术在禽制品产地溯源中的应用

Franke等^[39]分析瑞士、巴西、泰国、法国、德国和匈牙利6个国家的25份禽肉样品中的46种元素。结果表明,As能准确区分泰国与其他国家的样本,这主要与泰国饮用水中的As超标有关,Rb可将巴西、瑞士和德国的禽肉准确区分,Ti是区分法国与其他5个国家样本的特征元素。Franke等^[40]测定取自巴西、法国、瑞士和匈牙利的56份禽肉样品,结合相关研究^[39]进行数据分析,建立的产地判别模型判别准确率达到77%,筛选出能够表征产区特色的As、Na、Rb、Se、Sr、Ti 6种元素,证明了矿质元素在禽制品地理信息真实性鉴别中的可行性。Zhao Yan等^[41]通过对我国4省(黑龙江、山西、江西和福建)鸡肉样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素和K、Ca、Na、Mg、Al、Zn、Fe、Cu、Ti、Rb、Se、Ba 12种矿质元素的分析,筛选出能够表征产区特色的元素为K、Zn和Rb,结合 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 建立产地判别模型,判别正确率为100%,证明矿质元素指纹鉴别技术与稳定同位素技术相结合可有效提高产地鉴别准确率。

Esposito等^[42]试图从意大利坎帕尼亚地区散养鸡蛋中的微量元素分析散养鸡蛋是否受到坎帕尼亚大火的影响,从坎帕尼亚鸡蛋中检测到19种痕量元素(As、Be、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mo、Mn、Ni、Pb、Sb、Se、Sn、Sr、Tl、U、V、Zn),但缺少无污染地区鸡蛋进行对比。研究者已经证明饲料中的矿质元素和环境中的重金属会在禽制品中富集^[43-45],但从特定地区生产的禽制品和该地区土壤和水源污染建立联系,从而进行地理信息真实性鉴定的方法有待进一步研究。饮食是家禽摄入矿质元素的主要方式,Bandoniene等^[46]在鸡饲料中引入Tb和Tm作为元素标签,区分标记的鸡和未标记的鸡。结果表明,经短时间投喂添加Tb和Tm元素的饲料后,在蛋黄、蛋壳、骨、肝脏、肉、血液和粪便中均检测到Tb和Tm富集,且引入的元素含量足够低,能确保产品安全。该方法可用于某些特定条件下生产的禽制品的特殊标签,以确保禽制品的真实性。

2.2.2 矿质元素指纹鉴别技术在禽制品产品类型真实性鉴别中的应用

家禽的养殖方式决定了家禽的活动范围和所接触的环境,散养家禽相对于笼养家禽可从外界环境摄入一部分矿质元素。Zhu等^[20]分析Ca、P、Zn、Cu、Mn、Se、Cd和Pb在自由放养和常规饲养的鸡蛋中的含量。结果发现:普通鸡蛋的Cu、Zn和S含量显著高于散养鸡蛋,而Mn、Pb含量则显著低于散养鸡蛋,P、Cd含量没有显著差异;散养鸡蛋蛋黄中的Zn含量相对较低,因为散养鸡生活环境更为复杂,一部分Zn用于提高自身的免疫力;散养鸡可以从外界环境中摄入部分Ca和P元素,但由于

散养鸡在扑翼和奔跑的过程中促进其肢骨和其他骨骼生长,同时也促进了Ca和P的吸收,这使得散养鸡蛋蛋黄中的Ca、P含量反而低于笼养鸡。Vincevica-Gaile等^[47]验证了不同养殖类型鸡蛋矿质元素差异,来自有机农场鸡蛋中的Fe、Zn、Cu、Ba、Rb、Mn和Pb元素含量高于大型养殖场和普通家养鸡蛋的含量,大型养殖场鸡蛋矿质元素含量与普通家养鸡蛋接近。De Freitas等^[48]验证了巴西传统鸡蛋与普通家养鸡蛋的矿质元素含量差异,其中Ba、Cd、Co、Pb、Se、Fe、Zn、Mo元素含量具有显著差异,这种差异和养殖方式、喂养饲料和生长环境等有关。Barbosa等^[49]测定同一地区的散养蛋和非散养蛋中15种矿质元素(As、Ba、Cd、Co、Cs、Cu、Fe、Mg、Mn、Mo、Pb、Se、Sr、V和Zn)含量,分别运用决策树和朴素贝叶斯2种化学计量学方法建立鸡蛋养殖方式的判别模型,决策树模型鉴别准确率为80.8%,朴素贝叶斯模型的鉴别准确率达到90.4%,证明矿质元素指纹技术可有效鉴别家禽养殖方式,选择合适的化学计量学方法可提高鉴别准确率。

矿质元素指纹技术在禽制品的有机属性鉴别中也有广泛应用。例如,Matt等^[50]对比发现,有机鸡蛋K含量相对较高,而Ca含量相对较低。Giannenas等^[51]对比有机鸡蛋、常规鸡蛋和庭院散养鸡蛋3种产品中的元素差异,发现Se、Zn和Gr含量在3种鸡蛋中存在差异,有机鸡蛋Se含量最高,这可能是由于日常摄入饲料导致金属元素的沉积,有机鸡蛋Zn含量最低,这与Kuecuckyilmaz等^[52]的研究结果一致。Borges等^[53]测定巴西的有机鸡蛋和常规鸡蛋中的19种元素,进行PCA,筛选出As、Co、Cr、Fe、Mn、P、Rb、Se、Tl、V 10种矿质元素可准确区分有机鸡蛋和常规鸡蛋,证明了矿质元素指纹技术在禽制品有机属性鉴定中的可行性。

陈艳珍等^[54]对比山东7种品牌鸡(寿光鸡、琅琊鸡、日照麻鸡、鲁西斗鸡、芦花鸡、济宁百日鸡和莱芜黑鸡)鸡蛋中的10种矿质元素(Ca、Na、K、Mg、Fe、Zn、Cr、Cu、Mn、Pb)含量。结果表明,K、P元素在莱芜黑鸡鸡蛋中含量最高,Na、Ca、Mg元素在百日鸡鸡蛋中含量最高,Zn、Fe、Mn、Gr元素在鲁西斗鸡鸡蛋中含量最高,Cu元素在寿光鸡和琅琊鸡鸡蛋中含量最高,寿光鸡鸡蛋和日照麻鸡鸡蛋Pb含量最高。贺英等^[55]在相同条件下用相同饲料饲养坝上长尾鸡和海兰褐蛋鸡,5周后取2种鸡所产的鸡蛋,分析Ca、P、Zn、Fe、Mn、Se 6种元素含量差异,结果显示,坝上长尾鸡的鸡蛋中Ca、P、Zn、Fe、Mn含量均显著高于海兰褐蛋鸡($P<0.05$),表明不同品种的鸡对饲料中矿质元素的吸收能力不同,这与杨小林等^[56]的研究结果相同。杨小林等^[56]对比相同饲养条件下阿坝州3个不同品系藏鸡所产鸡蛋的矿质元素差异,结果表明,3个品系藏鸡蛋蛋清中P、Ba和

Mn含量差异显著 ($P<0.05$)，阿藏Ⅱ系蛋黄中B、Ca、Fe、K、Mn、P和Zn含量与阿藏Ⅰ系和Ⅲ系存在显著差异 ($P<0.05$)，这种差异可能和不同品系的鸡吸收转化能力不同有关，说明不同品种禽制品的元素差异不仅仅是由饮食引起的。白婷等^[57]仅用Mn、Mo、Cs 3种元素成功区分了黑水凤尾鸡和普通白羽鸡的鸡胸肉，区分正确率达到100%。

矿质元素指纹技术已被广泛应用于禽制品的产地溯源、品种鉴别、有机属性鉴别等多个方面。检测禽制品矿质元素含量一方面可用于禽制品真实性鉴别，同时可以保障禽制品的质量安全。饮食来源是影响禽制品元素组成的重要因素，家禽的消化吸收能力也会影响元素在家禽体内的累积。不同品种家禽对矿质元素的吸收能力存在差异，这是矿质元素指纹技术用于区分不同品种禽制品的理论依据。矿质元素是保证人体健康生长所必需的营养素，通过在家禽饲料中添加适量的微量元素可作为特定禽制品的产品标签，有助于区分特定禽制品与普通禽制品，还可以对禽制品的品质起到强化作用。随着矿质元素测定技术的发展，可准确测定的微量元素种类增多，强化了矿质元素指纹图谱技术在禽制品真实性鉴别方面的能力。

3 可见-近红外光谱技术在禽制品真实性鉴别中的应用

3.1 可见-近红外光谱技术应用的理论基础

可见-近红外光谱的其中一段波长属于可见光 (400~760 nm) 波段，另一段属于近红外光 (780~2 526 nm) 波段。几乎所有的生物大分子物质和基团在380~2 500 nm波段均能够形成稳定的谱图，由于物质的成分不同，主要是O—H、C—H、C—N键的振动吸收不同，它们在某一特定范围的波长下形成的谱图也不同。可见-近红外光谱的峰位置、峰数及峰强度包含了样品的成分、含量及结构等众多信息，可用来对不同样品进行快速区分。

传统检测技术前处理繁琐，耗时长，且对产品本身有损害，在检测中受到一定的限制，建立快速、无损的检测技术成为迫切需要。近红外光谱技术已经被证明是一种产品真实性鉴定的可靠、高效检测技术。目前可见-近红外光谱技术已经在肉制品^[58]、果蔬^[59-60]、蜂蜜^[61]和咖啡豆^[62]等农副产品的真实性鉴别中广泛应用。

3.2 可见-近红外光谱技术在禽制品真实性鉴别中的应用

3.2.1 可见-近红外光谱技术在禽制品产地溯源中的应用

王彬等^[63]采集湖北省4个不同地区鸡蛋500~900 nm波长下的透射光谱，采用直接正交信号校正 (direct orthogonal signal correction, DOSC) 对光谱数据进行预处理，处理后的光谱数据经 t 分布式随机邻域嵌入

(t -distributed stochastic neighbor embedding, t -SNE)

和PCA降维后分别输入至极限学习机和随机森林中，建立鸡蛋产地溯源模型。结果显示，DOSC预处理及 t -SEN提取的光谱特征信息结合随机森林建立的模型最优，训练集判别正确率为100%，预测集判别正确率为98.33%。吴鹏等^[64]利用可见-近红外光谱技术对山西省4个地区鸡蛋进行产地溯源，结合PCA建立的判别模型判别准确率达到100%，证明可见-近红外光谱技术在鸡蛋产地鉴别中可行。

孙潇等^[65]采集4个不同厂家的鸡肉样本，分别采用蒸、煮和微波处理后采集近红外光谱，对光谱数据进行聚类分析和PCA并建立产地鉴别模型。结果表明：在波数7 000~4 000 cm^{-1} 内，原始光谱经二阶求导 (13点平滑) 和标准正态变换 (standard normal variate transform, SNV) 预处理后，3种不同加工方式处理的鸡肉近红外光谱图均存在显著差异，建立的判别模型识别正确率可达90%~95%。该研究证明，近红外光谱技术可用于鉴别加工后禽肉制品的产地，对保障禽制品产地真实性有重要意义。史岩等^[66]利用可见-近红外光谱法成功区分辽宁大连、潍坊坊子、河北遵化、潍坊昌邑、潍坊诸城5个产地的鸡肉样本，识别率和拒绝率均为100%。龚艳^[67]利用可见-近红外光谱技术分析不同产地鸡胸肉中的蛋白质和水分含量，基于蛋白质和水分含量成功区分了不同产地鸡胸肉，区分正确率分别可达87.5%和93.8%，可见-近红外光谱技术可对禽制品中含O—H、C—H、C—N键的成分进行快速检测，如脂肪、蛋白质和水分，进而通过禽制品成分差异来区分不同产地的禽制品。

3.2.2 可见-近红外光谱技术在禽制品产品类型真实性鉴别中的应用

Cozzolino等^[68]用可见-近红外光谱法分析牛肉、羊肉、猪肉和鸡肉400~2 500 nm波长的光谱特征，建立4种样品的PCA判别模型和偏最小二乘判别模型，判别识别率超过85%，该研究证明了可见-近红外光谱法在识别不同肉类方面具有潜力，可应用于禽肉制品的鉴别。在不同肉类的鉴别中，不同波长下吸收带的形成主要与肉中的血红蛋白、水、脂肪和脂肪酸有关。在Rannou等^[69]的研究中，鸡肉和火鸡肉主要光谱特征差异存在于536 nm和574 nm波长处，差异与肌红蛋白和氧合肌红蛋白有关，不同肉类中呈色物质的差异可作为鉴别不同禽制品的指标。

可见-近红外光谱技术在不同品种禽肉产品的鉴别中也有应用。向灵孜等^[70]利用可见-近红外光谱技术成功区分了散养土鸡鸡肉和常规饲养的白羽肉鸡鸡肉，建立的聚类分析产品预测模型预测正确率高达100%。不同品种禽肉理化性质之间的差异是可见-近红外光谱技术在禽肉真实性鉴别应用中的前提，Ding Haibiao等^[71]的研究证明，土鸡肉和肉鸡肉的光谱差异与2种鸡肉胶原蛋白、脂

肪含量、pH值及色度值的差异有关。鸡胸肉的表面特征（如纤维大小）对分类会产生影响，肌肉切碎时其生物学特性会发生改变，这种改变产生的散射效应会影响肌肉本身的光谱信息，因此需要消除其影响。龚艳等^[72]扫描3种不同品种的鸡肉切块和鸡肉糜1 000~2 500 nm波长范围内的光谱，利用偏最小二乘法建立判别模型，鉴别准确率分别为100.0%和97.7%，脂肪含量的差异是区分不同品种禽制品的重要指标。可见-近红外光谱技术作为一种可快速、无损预测肌肉脂肪含量的技术^[73]，可用于不同品种禽肉快速无损鉴别。王彬^[74]利用可见-近红外光谱技术成功区分了湖北4个不同地区鸡蛋，利用增强回归树算法建立鸡蛋的品种鉴别模型，模型训练集和预测集的判别正确率分别为98.33%和97.00%，该研究表明，可见-近红外光谱技术可用于不同品种鸡蛋的无损鉴别。

3.2.3 可见-近红外光谱技术在禽制品其他真实性问题鉴别中的应用

可见-近红外光谱技术在肉鸡木质肉鉴定、鸡肉和鸡蛋品质属性预测以及熟制鸡肉掺假鉴定等多个方面均有应用（表1）。Geronimo等^[75]利用近红外光谱技术结合计算机视觉系统获取了同一养殖场80份鸡胸肉的近红外光谱信息，并表征了样品的理化信息和技术参数，利用支持向量机（support vector machine, SVM）建立鸡肉木质肉的判别模型，模型判别准确率为91.8%。Rahim等^[76]利用近红外光谱技术预测鸡胸肉嫩度，以Warner-Bratzler剪切仪测定结果作为标准进行比较，结果表明，近红外光谱技术预测准确率超过85%。Abdel-Nour等^[77]采购相同饲养条件下生产的360枚新鲜鸡蛋，将其置于温度和相对湿度恒定（温度18℃、相对湿度55%）的环境中贮藏16 d，并在0、2、4、6、8、10、12、14、16 d各取40枚

鸡蛋扫描可见-近红外光谱数据，并测定鸡蛋的哈夫单位及蛋白pH值，建立偏最小二乘判别模型。结果表明，鸡蛋的哈夫单位和蛋白pH值的测量值与保存时间预测值之间的相关系数最高分别可达0.94和0.90，可见-近红外光谱法是评估鸡蛋新鲜度和测定鸡蛋哈夫单位和蛋白pH值的有效工具。

Word等^[78]的研究表明，近红外技术可以对肌肉中蛋白质含量以及水与肌肉结合的紧密程度进行量化，这是近红外技术可以成功区分木质肉和正常肉的主要原因。除此之外，近红外光谱中还包含鸡肉的颜色、剩余血液量和木质化程度等众多信息，这为木质化禽肉的鉴别提供了条件。刘平^[82]研究发现，鸡蛋粉中掺入其他成分会导致鸡蛋粉的吸光度发生变化，波峰和波形的变化受掺入物质的结构影响，选择合适的光谱预处理方法有助于掺假鸡蛋粉的鉴别。在禽制品掺假鉴别中，建立模型时选择合适的主成分也尤为重要，主成分选择过少不足以反映样品的全部信息，选择过多则会增加无用的数据量，导致信噪比降低^[81]。

综上所述，可见-近红外光谱技术在禽制品真实性鉴别中有一定的应用价值。相对其他技术而言，可见-近红外光谱技术有无需前处理、快速、高效的优势，能在无损条件下实现对物质结构、成分含量及变化的监测，用于解决掺假、产地溯源和品质预测等多种禽制品真实性问题。在禽制品真实性鉴别的实际应用中，需考虑外界因素的影响，如环境光线变化和样品取样部位的透光性差异。可见-近红外光谱包含的信息量大，不同成分之间会产生干扰，选择合适的光谱预处理方法可减少数据冗余，有助于模型建立。

表1 可见-近红外光谱技术在禽制品真实性鉴别中的应用

Table 1 Recent applications of visible-near infrared spectroscopy in authenticity identification of poultry meat products

目的	产品	波段/nm	光谱预处理方法	建模方法	准确率/%	参考文献
肉鸡木质肉鉴别	鸡胸肉	760~1 040	SNV、lg (1/R)	PCA、LDA	训练集准确率100， 测试集预测准确率96	[78]
火鸡白纹肉鉴别	火鸡鸡胸肉	550~1 100	SNV、MSC、lg (1/R)、Savitzky-Golay 导数、Savitzky-Golay平滑	PCA、PLSR	可见红外光谱法准确率98， 近红外光谱法准确率97， 可见-近红外光谱法准确率96	[79]
不同部位鸡肉鉴别	鸡肉	900~1 700	Savitzky-Golay二阶导数（9个平滑点）	PCA、LDA、 SVM、RF	RF整体准确率90， LDA整体准确率97.5， SVM整体准确率97.5， SVM ^t 整体准确率97.5	[80]
熟制鸡肉掺假鉴别	熟制鸡肉	1 000~2 500	SNV、Savitzky-Golay导数	PLSR	掺卡拉胶预测准确率98.4 掺水预测准确率99	[81]
鸡蛋粉掺假鉴别	蛋清粉、蛋黄粉、 全蛋粉	1 000~1 799	MSC、SNV、Savitzky-Golay导数、 Savitzky-Golay平滑	PLSR	>90	[82]
区分不同贮藏温度的鸡肉	鸡胸肉	400~2 500	lg (1/R)	PCA	可成功区分未冻结鸡肉（4、-3℃）与 冻结鸡肉（-12、-18℃），准确率98.5	[83]
预测鸡蛋新鲜度	鸡蛋	480~960	MSC、Savitzky-Golay平滑、SNV、 一阶导数、二阶导数	PLSR	—	[84]
识别败血症鸡肝和正常鸡肝	鸡肝	400~2 498	lg (1/R)	PCA	94	[85]

注：—，文献中没有提及；R，反射率；MSC，多元散射校正（multiplicative scatter correction）；PLSR，偏最小二乘回归（partial least squares regression）；t，优化线性核算法（algorithm tuned to linear kernel）；RF，随机森林（random forest）。

4 结 语

在禽制品真实性检测中, 矿质元素指纹鉴别技术、稳定同位素技术和可见-近红外光谱技术都能够简单、快速、准确地检测禽制品的特征信息, 是禽制品真实性检测的有效手段, 但各自均具有一定的适用范围, 因此针对不同禽制品真实性问题选择合适的检测技术尤为重要。目前研究仍存在以下几方面的问题: 1) 在禽制品真实性鉴别中, 测定的样本数量有限, 建立的鉴别模型和数据库具有一定的局限性, 且误差较大, 需增加样本量来提高判别准确率; 2) 家禽饲料的选择受多种因素影响, 商品饲料的使用缩小了不同产区家禽饮食间的差异, 为产地鉴别增加了难度, 需结合相对稳定的特征因子进行鉴别, 如饮水中H、O同位素; 3) 稳定同位素检测仪器昂贵, 检测成本较高, 建立完整的鉴别系统需要大量数据支撑, 导致其在禽制品真实性鉴别中的应用十分有限, 需不断研发新的检测技术, 降低稳定同位素的检测成本。

综合来看, 单一技术无法满足所有禽制品真实性问题的检测, 多技术联用是未来的一大发展趋势, 在此基础上结合化学计量学统计方法, 可有效降低误差, 提高鉴别准确率; 为适应现代食品工业快速、高效的技术特点, 手持式和便携式检测仪器的研发成为一个新的研究方向, 可见-近红外光谱技术在手持式和便携式的检测设备研发中具有良好的应用前景。随着人们生活水平的提高, 禽制品的真实性被越来越多的消费者所重视, 通过发展禽制品真实性分析技术可以有效减少禽制品真实性问题的发生, 为保障食品安全提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 秦富. 我国蛋鸡产业发展现状问题及建议[J]. 北方牧业, 2017(23): 10-11.
- [2] MCGRATH T F, HAUGHEY S A, PATTERSON J, et al. What are the scientific challenges in moving from targeted to non-targeted methods for food fraud testing and how can they be addressed? Spectroscopy case study[J]. Trends in Food Science and Technology, 2018, 76: 38-55. DOI:10.1016/j.tifs.2018.04.001.
- [3] DANEZIS G P, TSAGKARIS A S, CAMIN F, et al. Food authentication: techniques, trends and emerging approaches[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2016, 85: 123-132. DOI:10.1016/j.trac.2016.02.026.
- [4] EVERSTINE K, SPINK J, KENNEDY S. Economically motivated adulteration (EMA) of food: common characteristics of EMA incidents[J]. Journal of Food Protection, 2013, 76(4): 723-735. DOI:10.4315/0362-028X.JFP-12-399.
- [5] VUKASOVIĆ T. Consumer perception of poultry meat and the importance of country of origin in a purchase making process[J]. World's Poultry Science Journal, 2009, 65(1): 65-74. DOI:10.1017/S0043933909000051.
- [6] XIAO Mingya, CHEN Yang, CHU Haijiao, et al. Development of a polymerase chain reaction: nucleic acid sensor assay for the rapid detection of chicken adulteration[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109679. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109679.
- [7] STAMOULIS P, STAMATIS C, SARAFIDOU T, et al. Development and application of molecular markers for poultry meat identification in food chain[J]. Food Control, 2010, 21(7): 1061-1065. DOI:10.1016/j.foodcont.2009.12.027.
- [8] COTTENET G, SONNARD V, BLANCPAIN C, et al. A DNA macro-array to simultaneously identify 32 meat species in food samples[J]. Food Control, 2016, 67: 135-143. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.02.042.
- [9] DENIZ E, ALTUNTAS E G, AYHAN B, et al. Differentiation of beef mixtures adulterated with chicken or turkey meat using FTIR spectroscopy[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(10): e13767. DOI:10.1111/jfpp.13767.
- [10] FORNAL E, MONTOWSKA M. Species-specific peptide-based liquid chromatography-mass spectrometry monitoring of three poultry species in processed meat products[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 489-498. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.01.074.
- [11] HÄFNER L, KALKHOF S, JIRA W. Authentication of nine poultry species using high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Food Control, 2020, 122: 107803. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107803.
- [12] TIAN Xiaojing, WANG Jun, SHEN Ruiqian, et al. Discrimination of pork/chicken adulteration in minced mutton by electronic taste system[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2019, 54(3): 670-678. DOI:10.1111/ijfs.13977.
- [13] ZAUUU J L Z, GILLAY Z, KOVACS Z. Standardized extraction techniques for meat analysis with the electronic tongue: a case study of poultry and red meat adulteration[J]. Sensors, 2021, 21(2): 481. DOI:10.3390/s21020481.
- [14] TZOUROS N E, ARVANITOYANNIS I S. Agricultural produces: synopsis of employed quality control methods for the authentication of foods and application of chemometrics for the classification of foods according to their variety or geographical origin[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2001, 41(4): 287-319. DOI:10.1080/20014091091823.
- [15] 陈杰, 赵鸿杰, 玄祖迎, 等. 不同养殖模式对贵妃鸡肌纤维特性和肉品质的影响[J]. 中国家禽, 2015, 37(18): 28-31. DOI:10.16372/j.issn.1004-6364.2015.18.007.
- [16] 吉小凤, 杨华, 李锐, 等. 不同饲养模式鸡蛋品质及营养成分比较研究[J]. 农产品质量与安全, 2019(4): 65-68. DOI:10.3969/j.issn.1674-8255.2019.04.013.
- [17] KÜÇÜKYILMAZ K, BOZKURT M, YAMANER C, et al. Effect of an organic and conventional rearing system on the mineral content of hen eggs[J]. Food Chemistry, 2012, 132(2): 989-992. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.11.084.
- [18] CASTELLINI C, BERRI C, BIHAN-DUVAL E L, et al. Qualitative attributes and consumer perception of organic and free-range poultry meat[J]. World's Poultry Science Journal, 2008, 64(4): 500-512. DOI:10.1017/S0043933908000172.
- [19] COLETTA L D, PEREIRA A L, COELHO A, et al. Barn vs. free-range chickens: differences in their diets determined by stable isotopes[J]. Food Chemistry, 2012, 131(1): 155-160. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.08.051.
- [20] ZHU S B, ZHAO Q Y, LIU B L, et al. Variations in yolk mineral element contents from different chicken rearing systems: eggs analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2015, 7(7): 530-533. DOI:10.5901/mjss.2015.v6n2s2p173.



- [21] ROGERS K M. Stable isotopes as a tool to differentiate eggs laid by caged, barn, free range, and organic hens[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(10): 4236-4242. DOI:10.1021/jf803760s.
- [22] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 66-75.
- [23] 刘贤赵, 张勇, 宿庆, 等. 现代陆生植物碳同位素组成对气候变化的响应研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(12): 1341-1354. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.12.1341.
- [24] CRITTENDEN R G, ANDREW A S, LEFOURNOUR M, et al. Determining the geographic origin of milk in Australasia using multi-element stable isotope ratio analysis[J]. *International Dairy Journal*, 2007, 17(5): 421-428. DOI:10.1016/j.idairyj.2006.05.012.
- [25] 黄志勇, 杨妙峰, 庄峙厦, 等. 利用铅同位素比值判断丹参不同产地来源[J]. *分析化学*, 2003(9): 1036-1039. DOI:10.3321/j.issn:0253-3820.2003.09.003.
- [26] 刘向阳, 谢若男, 王茹梦. 利用锶同位素对农产品原产地溯源的研究[J]. *质量与认证*, 2020(4): 69-71.
- [27] CAPO R C, STEWART B W, CHADWICK O A. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods[J]. *Geofisica Internacional*, 1998, 82(1/3): 197-225. DOI:10.1016/S0016-7061(97)00102-X.
- [28] FRANKE B M, KOSLITZ S, MICAUX F, et al. Tracing the geographic origin of poultry meat and dried beef with oxygen and strontium isotope ratios[J]. *European Food Research and Technology*, 2008, 226(4): 761-769. DOI:10.1007/s00217-007-0588-x.
- [29] 孙丰梅, 王慧文, 杨曙明. 稳定同位素碳、氮、硫、氢在鸡肉产地溯源中的应用研究[J]. *分析测试学报*, 2008(9): 925-929. DOI:10.3969/j.issn.1004-4957.2008.09.005.
- [30] 王慧文, 杨曙明, 程永友. 鸡肉中稳定同位素组成与饲料和饮水关系的研究[J]. *分析科学学报*, 2008, 24(1): 47-50.
- [31] 戴祁. 稳定同位素在鸡蛋鉴别及溯源中的应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016: 42-45.
- [32] SWANSON C A, REAMER D C, CLAUDE V, et al. Intrinsic labeling of chicken products with a stable isotope of selenium (^{76}Se)[J]. *Journal of Nutrition*, 1983, 113(4): 793-799. DOI:10.1093/jn/113.4.793.
- [33] REES G, KELLY S D, CAIRNS P, et al. Verifying the geographical origin of poultry: the application of stable isotope and trace element (SITE) analysis[J]. *Food Control*, 2016, 67: 144-154. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.02.018.
- [34] 戴祁, 钟其顶, 王道兵, 等. 散养与笼养鸡蛋中稳定碳氮同位素特征研究[J]. *质谱学报*, 2016, 37(4): 366-373. DOI:10.7538/zpxb.2016.37.04.0366.
- [35] ROGERS K M, RUTH S M V, ALEWIJN M, et al. Verification of egg farming systems from the Netherlands and New Zealand using stable isotopes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(38): 8372-8380. DOI:10.1021/acs.jafc.5b01975.
- [36] 林涛, 刘兴勇, 邵金良, 等. 应用铅同位素比值和元素含量分析法识别有机鸡样品真实性[J]. *食品科学技术学报*, 2018, 36(6): 101-106. DOI:10.3969/j.issn.2095-6002.2018.06.015.
- [37] LÜ Jun, ZHAO Yan. Combined stable isotopes and multi-element analysis to research the difference between organic and conventional chicken[J]. *Food Analytical Methods*, 2016, 10(2): 347-353. DOI:10.1007/s12161-016-0588-1.
- [38] 周东晓, 彭渤, 王勤, 等. 扬子地台西缘下寒武统黑色页岩土壤元素地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2020, 39(1): 66-78. DOI:10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.119.
- [39] FRANKE B M, HALDIMANN M, REIMANN J, et al. Indications for the applicability of element signature analysis for the determination of the geographic origin of dried beef and poultry meat[J]. *European Food Research and Technology*, 2007, 225(3/4): 501-509. DOI:10.1007/s00217-006-0446-2.
- [40] FRANKE B M, HALDIMANN M, GREMAUD G, et al. Element signature analysis: its validation as a tool for geographic authentication of the origin of dried beef and poultry meat[J]. *European Food Research and Technology*, 2008, 227(3): 701-708. DOI:10.1007/s00217-007-0776-8.
- [41] ZHAO Yan, ZHANG Bin, GUO Bin, et al. Combination of multi-element and stable isotope analysis improved the traceability of chicken from four provinces of China[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2016, 14(2): 163-168. DOI:10.1080/19476337.2015.1057235.
- [42] ESPOSITO M, CAVALLLO S, CHIARAVALLE E, et al. Trace elements in free-range hen eggs in the Campania region (Italy) analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(6): 326. DOI:10.1007/s10661-016-5316-1.
- [43] ZHUANG Ping, ZOU Huiling, SHU Wensheng. Biotransfer of heavy metals along a soil-plant-insect-chicken food chain: field study[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(6): 849-853. DOI:10.1016/S1001-0742(08)62351-7.
- [44] 宗航, 牛梦晓, 鲍颖颖, 等. 日粮不同微量元素水平对蛋鸡生产性能日粮不同微量元素水平对蛋鸡生产性能、蛋品质及营养物质表观代谢率的影响[J]. *中国家禽*, 2019, 41(10): 36-40. DOI:10.16372/j.issn.1004-6364.2019.10.007.
- [45] BAHAKAIM A, MAGIED H A, OSMAN S, et al. Effect of using different levels and sources of zinc in layer's diets on egg zinc enrichment[J]. *Egyptian Poultry Science Journal*, 2014, 34(1): 39-56. DOI:10.21608/epsj.2014.5305.
- [46] BANDONIENE D, WALKNER C, ZETTL D, et al. Rare earth element labeling as a tool for assuring the origin of eggs and poultry products[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(44): 11729-11738. DOI:10.1021/acs.jafc.8b03828.
- [47] VINCEVICA-GAILE Z, GAGA K, KLAVINS M. Food and environment: trace element content of hen eggs from different housing types[J]. *APCBEE Procedia*, 2013, 5: 221-226. DOI:10.1016/j.apcbee.2013.05.038.
- [48] DE FREITAS R, RAMOS NACANO L, LEMOS BATISTA B, et al. Toxic and essential elements in conventional and home-produced eggs by ICP-MS analysis[J]. *Food Additives and Contaminants: Part B*, 2013, 6(1): 30-35. DOI:10.1080/19393210.2012.721095.
- [49] BARBOSA R M, NACANO L R, FREITAS R, et al. The use of decision trees and naive bayes algorithms and trace element patterns for controlling the authenticity of free-range-pastured hens' eggs[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 79(9): C1672-C1677. DOI:10.1111/1750-3841.12577.
- [50] MATT D, VEROMANN E, LUIK A. Effect of housing systems on biochemical composition of chicken eggs[J]. *Agronomy Research*, 2009, 7(2): 662-667. DOI:10.3382/ps.0481013.
- [51] GIANNENAS I, NISIANAKIS P, GAVRIIL A, et al. Trace mineral content of conventional, organic and courtyard eggs analysed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(2): 706-711. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.09.079.
- [52] KUECUEKYILMAZ K, BOZKURT M, YAMANER C, et al. Effect of an organic and conventional rearing system on the mineral content of hen eggs[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(2): 989-992. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.11.084.
- [53] BORGES E M, VOLMER D A, GALLIMBERTI M, et al. Evaluation of macro- and microelement levels for verifying the authenticity of

- organic eggs by using chemometric techniques[J]. Analytical Methods, 2015, 7(6): 2577-2584. DOI:10.1039/C4AY02986.
- [54] 陈艳珍, 张录强, 宋新华, 等. 山东7个地方鸡品种鸡蛋中矿物质元素含量的比较研究[J]. 微量元素与健康研究, 2006(6): 32-34. DOI:10.3969/j.issn.1005-5320.2006.06.014.
- [55] 贺英, 常丽, 关学敏, 等. 笼养条件下坝上长尾鸡与海兰褐蛋鸡的鸡蛋营养成分和蛋品质比较[J]. 动物营养学报, 2019, 31(8): 3535-3542. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2019.08.014.
- [56] 杨小林, 何世明, 吴锦波, 等. 阿坝州藏鸡蛋蛋矿物质元素含量的比较研究[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(5): 107-110. DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2018.05.026.
- [57] 白婷, 蔡浩洋, 邓银华, 等. 基于微量元素指纹图谱对黑水凤尾鸡进行产地溯源的研究[J]. 中国测试, 2018, 44(9): 57-62. DOI:10.11857/j.issn.1674-5124.2018.09.011.
- [58] LÓPEZ-MAESTRESALAS A, INSAUSTI K, JAREN C, et al. Detection of minced lamb and beef fraud using NIR spectroscopy[J]. Food Control, 2018, 98: 465-473. DOI:10.1016/j.foodcont.2018.12.003.
- [59] BORBA K R, AYKAS D P, MILANI M I, et al. Portable near infrared spectroscopy as a tool for fresh tomato quality control analysis in the field[J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3209. DOI:10.3390/app11073209.
- [60] LÜ Chenfei, YANG Jinghui, LIU Yanjun, et al. Identification of true and false Aksu apple based on NIRS and PLS-DA[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2019, 310(4): 042005. DOI:10.1088/1755-1315/310/4/042005.
- [61] ALIAO-GONZÁLEZ M J, FERREIRO-GONZÁLEZ M, ESPADA-BELLIDO E, et al. A screening method based on visible-NIR spectroscopy for the identification and quantification of different adulterants in high-quality honey[J]. Talanta, 2019, 203: 235-241. DOI:10.1016/j.talanta.2019.05.067.
- [62] ARBOLEDA E R. Discrimination of civet coffee using near infrared spectroscopy and artificial neural network[J]. International Journal of Advanced Computer Research, 2018, 8(39): 324-334. DOI:10.19101/IJACR.2018.839007.
- [63] 王彬, 王巧华, 肖壮, 等. 基于可见-近红外光谱及随机森林的鸡蛋产地溯源[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 243-247. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.24.047.
- [64] 吴鹏, 宋海燕, 杨威, 等. 基于近红外光谱的鸡蛋产地溯源[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 227-231. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020020107.
- [65] 孙潇, 史岩. 近红外光谱技术对加工后鸡肉产地溯源的研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(6): 315-321. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.6.050.
- [66] 史岩, 赵田田, 陈海华, 等. 基于近红外光谱技术的鸡肉产地溯源[J]. 中国食品学报, 2014, 14(12): 198-204. DOI:10.16429/j.1009-7848.2014.12.006.
- [67] 龚艳. 近红外光谱法用于鸡肉定性鉴别及定量分析研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015: 24-26. DOI:10.7666/d.Y2788033.
- [68] COZZOLINO D, MURRAY I. Identification of animal meat muscles by visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(4): 447-452. DOI:10.1016/j.lwt.2003.10.013.
- [69] RANNOU H, DOWNEY G. Discrimination of raw pork, chicken and turkey meat by spectroscopy in the visible, near-and mid-infrared ranges[J]. Analytical Communications, 1997, 34(12): 401-404. DOI:10.1039/A707694K.
- [70] 向灵孜, 郭培源. 近红外光谱分析技术在鸡肉分类检测中的应用[J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(6): 66-71. DOI:10.3969/j.issn.2095-6002.2014.06.013.
- [71] DING Haibiao, XU Ruojun, CHAN D K O. Identification of broiler chicken meat using a visible/near-infrared spectroscopic technique[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79(11): 1382-1388. DOI:10.1002/(SICI)1097-0010(199908)79:113.O.CO;2-U.
- [72] 龚艳, 汤晓艳, 王敏, 等. 近红外光谱法对鸡肉品种的快速无损鉴别[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 148-152. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201516027.
- [73] FOWLER S M, MORRIS S, HOPKINS D L. Preliminary investigation for the prediction of intramuscular fat content of lamb *in situ* using a hand-held NIR spectroscopic device[J]. Meat Science, 2020, 166: 108153. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201516027.
- [74] 王彬. 基于电子鼻及可见-近红外光谱的鸡蛋品种及产地鉴别研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 59-60.
- [75] GERONIMO B C, MASTELINI S M, CARVALHO R H, et al. Computer vision system and near-infrared spectroscopy for identification and classification of chicken with wooden breast, and physicochemical and technological characterization[J]. Infrared Physics and Technology, 2019, 96: 303-310. DOI:10.1016/j.infrared.2018.11.036.
- [76] RAHIM H A, GHAZALI R. The application of near-infrared spectroscopy for poultry meat grading[C]//IEEE 8th International colloquium on signal processing and its applications (CSPA). Malacca, Malaysia: IEEE, 2012: 58-62. DOI:10.1109/CSPA.2012.6194691.
- [77] ABDEL-NOUR N, NGADI M, PRASHER S, et al. Prediction of egg freshness and albumen quality using visible/near infrared spectroscopy[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(5): 731-736. DOI:10.1007/s11947-009-0265-0.
- [78] WOLD J P, MÅGE I, LØVLAND A, et al. Near-infrared spectroscopy detects woody breast syndrome in chicken fillets by the markers protein content and degree of water binding[J]. Poultry Science, 2019, 98(1): 480-490. DOI:10.3382/ps/pey351.
- [79] ZAID A, ABU-KHALAF N, MUDALAL S, et al. Differentiation between normal and white striped turkey breasts by visible/near infrared spectroscopy and multivariate data analysis[J]. Food Science of Animal Resources, 2020, 40(1): 96-105. DOI:10.5851/kosfa.2019.e88.
- [80] NOLASCO PEREZ I M, BADARÓ A T, BARBON S, Jr, et al. Classification of chicken parts using a portable near-infrared (NIR) spectrophotometer and machine learning[J]. Applied Spectroscopy, 2018, 72(12): 1774-1780. DOI:10.1177/0003702818788878.
- [81] 石佳, 柳兴国. 基于红外特征光谱的熟制鸡肉鉴别技术研究[J]. 中国调味品, 2020, 45(2): 154-156; 170. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2020.02.035.
- [82] 刘平. 基于近红外和高光谱检测鸡蛋粉掺假的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017: 85.
- [83] LYON B G, WINDHAM W R, LYON C E, et al. Sensory characteristics and near-infrared spectroscopy of broiler breast meat from various chill-storage regimes[J]. Journal of Food Quality, 2001, 24(5): 435-452. DOI:10.1111/j.1745-4557.2001.tb00621.x.
- [84] DONG Xiaoguang, ZHANG Beibei, DONG Jun, et al. Egg freshness prediction using a comprehensive analysis based on visible near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy Letters, 2020, 53(7): 512-522. DOI:10.1080/00387010.2020.1787455.
- [85] HSIEH C, CHEN Y R, DEY B P, et al. Separating septicemic and normal chicken livers by visible/near-infrared spectroscopy and back-propagation neural networks[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(2): 459-469. DOI:10.13031/2013.8515.