

羊肉的产地溯源和鉴别技术研究进展

康 帅¹, 任晓璞^{1,*}, 彭增起²

(1.塔里木大学食品科学与工程学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2.南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095)

摘 要: 随着羊肉消费量不断增加和相关食品安全问题频现, 对羊肉溯源和掺假鉴别技术的需求已经成为当前社会的关注热点之一。目前, 对于羊肉的溯源和鉴别已有相应研究, 稳定同位素技术、矿物质元素指纹图谱、近红外光谱、DNA分子标记溯源技术、基于脂肪酸的溯源和鉴别技术、基于风味化合物的产地溯源和鉴别技术等, 在溯源和鉴别研究中得到了大量应用。但在这些技术不断发展的同时, 也暴露出了一些亟待解决的问题。本文基于当前羊肉溯源和鉴别技术的相关研究资料和文献, 对相应技术的优缺点进行总结和讨论, 分析目前技术研究中存在的问题, 并提出相应的建议和解决方法, 以期对羊肉溯源和鉴别的进一步研究提供理论支持。

关键词: 羊肉; 产地溯源; 掺假鉴别; 矿物质元素指纹图谱; 稳定同位素; 近红外光谱

Progress in Techniques for Mutton Traceability and Authentication

KANG Shuai¹, REN Xiaopu^{1,*}, PENG Zengqi²

(1.College of Food Science and Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;

2.College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: With the increasing consumption of mutton and the frequent occurrence of related food safety problems, the demand for mutton traceability and authentication technologies has become a hot spot in the current society. At present, there have been reports on the traceability and identification of mutton. Stable isotope technology, mineral element fingerprinting, near-infrared spectroscopy, DNA molecular marker-based traceability technology, fatty acid-based traceability and identification technology, and flavor compound-based traceability and identification technology have been widely used in traceability and identification research. However, with the continuous development of these technologies, some urgent problems have been exposed. Based on the current research data and literature, this paper summarizes and discusses the advantages and disadvantages of mutton traceability and identification technologies, analyzes the problems existing in the current technical research, and puts forward suggestions and solutions, in order to provide theoretical support for further research.

Keywords: mutton; geographical traceability; identification; mineral element fingerprinting; stable isotope; near-infrared spectroscopy

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230206-011

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2023) 04-0048-06

引文格式:

康帅, 任晓璞, 彭增起. 羊肉的产地溯源和鉴别技术研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(4): 48-53. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230206-011. <http://www.rlyj.net.cn>

KANG Shuai, REN Xiaopu, PENG Zengqi. Progress in techniques for mutton traceability and authentication[J]. Meat Research, 2023, 37(4): 48-53. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230206-011. <http://www.rlyj.net.cn>

随着近年来我国人民物质生活水平的提高, 人们逐渐开始关注食品的营养价值和品质问题。肉类作为一种

日常消费品, 其需求量和品质要求与日俱增。在众多肉类制品中, 羊肉因其高蛋白、低脂肪且营养丰富、风味

收稿日期: 2023-02-06

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(3226003); 塔里木大学塔里木畜牧科技兵团重点实验室开放课题项目(HS202203); 塔里木大学校长基金创新研究团队项目(TDZKCX202207)

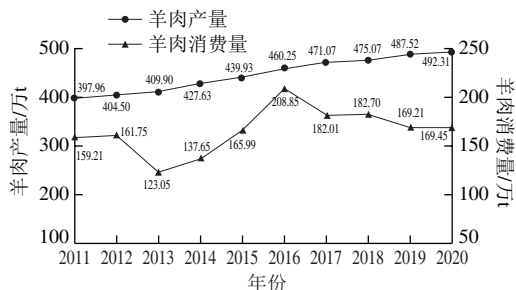
第一作者简介: 康帅(2000—)(ORCID: 0000-0001-6828-4327), 男, 硕士研究生, 研究方向为畜产品加工与安全。

E-mail: 2846002960@qq.com

*通信作者简介: 任晓璞(1985—)(ORCID: 0000-0001-9550-4356), 男, 副教授, 博士, 研究方向为畜产品加工与质量控制。

E-mail: alarxp@126.com

优越的特点,逐渐受到消费者的青睐。2000年开始,我国的羊肉消费量逐年上升^[1]。由图1可知,2011—2020年,我国的羊肉产量和消费量整体呈上升趋势,说明我国消费者对羊肉的需求量在不断提升。



数据来源:国家统计局。

图1 2011—2020年我国羊肉产量与消费量

Fig. 1 Mutton output and consumption in China during 2011–2020

羊肉消费的增长促进了我国羊肉产业的进步,并且出现了一批以地区特色羊肉为卖点的地方羊肉品牌,对地方经济的发展起到了一定的促进作用。羊肉消费量的上升有利于国内相关产业的发展,但与此同时,羊肉掺假、以次充好等问题也不断浮现。这些食品安全问题不仅损害了消费者的身体健康,还对我国的羊肉产业,尤其是地方产业造成了一定程度的损害。羊肉产地溯源和鉴别技术的发展和研究为食品安全控制体系提供了技术支持,同时对地方羊肉品牌起到了保护作用。基于此,本文旨在通过对国内外羊肉产地溯源和鉴别技术的研究现状进行分析总结,系统分析各种技术的优势及其存在的问题,以期羊肉产地溯源和鉴别技术的进一步发展提供理论支持。

1 稳定同位素分析技术

稳定同位素分析技术是一种能够有效追溯不同产地食品来源的技术,基于不同种类的稳定同位素在不同生物中的分馏效应进行。稳定同位素在生物体的成长过程中受到来自环境、饮食等因素的影响而产生分馏,使其在生物体内产生同位素差异,通过质谱技术等可以测定生物体内的稳定同位素比值和种类,从而判断其真实产地^[2-3]。此技术选用的特征物,即稳定同位素相对于其他特征物而言更加稳定,不易受外界因素影响,因此在产地溯源、掺假鉴别和身份确认等领域均有应用^[4-5]。

在世界范围内,多位学者应用该技术对羊肉的产地溯源进行了研究。孙淑敏等^[6]采集内蒙古自治区锡林郭勒盟、呼伦贝尔市和阿拉善盟3个牧区以及山东省菏泽市、重庆市2个农区共计99个羊肉样本,采用稳定性同位素比率质谱仪对羊肉中的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 2种稳定同位素进行分析。结果显示,不同地区的羊肉样品中稳定同位

素种类差异显著,并且多种同位素指标的联合判别能力更强。李政^[7]对甘肃黑山羊、宁夏滩羊、新西兰羊和安徽湖羊4个品种的78份羊肉样品进行研究,其结果也表明多种同位素结合的判别能力高于单一指标判别,且同位素指标越多,判别能力越强。米瑞芳等^[8]对内蒙古、宁夏、新疆、新西兰、意大利5个产地的76份羊肉样品进行研究,测定样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 4种稳定同位素并进行显著性分析,结果表明, $\delta^{13}\text{C}$ 在5个地区羊肉中均存在显著差异, $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在国内的3个地区差异显著,国外2个地区差异不显著,这表明单一同位素的判别正确率较差,错判的几率较大,而多指标分析的正确率较高,能正确分类几乎所有样品。

有学者发现稳定同位素技术在不同部位样品的判别分析中存在一定差异。李政^[7]在对羊肉、全骨粉、脱脂骨粉和骨胶原进行溯源研究后发现,稳定同位素技术对羊肉的判别能力高于全骨粉、脱脂骨粉和骨胶原;王倩等^[9]的研究结果也表明,不同产地的羊肉、全骨粉、脱脂骨粉、骨胶原中同位素含量存在显著差异,且羊肉的判别成功率高于全骨粉和骨胶原。

目前稳定同位素技术在世界范围内研究较为广泛,针对样品的采集、处理、分析均有较为深入的研究,但是仍存在问题。当前大部分研究多为针对不同地理位置所进行的溯源研究,对地理位置相近或相邻地区样本进行的研究较少,无法判断该技术应用于相同或相似地理位置的样品时能否准确判别。

2 矿物质元素溯源技术

生物体在成长过程中会从周围环境中摄取矿物质元素并在体内累积,这些元素受当地环境因素的影响较大,具有较强的地区特异性,被认为是产地溯源和鉴别的有效指标。目前通过质谱技术结合化学计量方法可以测定和找出特异性矿物质元素,通过此类元素的种类和比例可以判断出生物体的原产地。

由于矿物质元素易检出、灵敏度高优点,矿物质元素溯源技术在国内外的各类食品中均有大量研究^[10-15]。孙淑敏等^[16]采用电感耦合等离子体-质谱(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)对不同地区羊肉样品中的矿物质元素进行测定,经方差分析后发现其中Na、Be、Al、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ag、Sb、Ba、Tl、Pb、Th和U 21种元素在不同地区的样品中存在显著差异,再进一步利用这些差异显著的矿物质元素进行判别分析,结果显示,农区和牧区样品能够全部被正确归类,其判别正确率分别为93.9%和88.9%。马梦斌^[17]对来自宁夏盐池县、内蒙古自治区鄂托克前旗、陕西定边县和甘肃环县4个产区的

共240只滩羊进行ICP-MS分析,结果显示,不同产地的羊肉样品中部分元素的含量存在显著差异,使用这些特征元素进行判别分析能将所有样品正确分类,且判别正确率高达100%。王雪蓉等^[18]使用ICP-MS针对宁夏盐池县3个地区的共60只滩羊进行测定,对得到的数据进行分析发现,盐池县3个不同地区的羊肉样品中K、Na、Ca、Mg、P、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Se、Rb、Sr、Mo、Sn和Ba 17种矿物质元素存在显著差异,并且通过筛选特征矿物质元素发现,与滩羊肉密切相关的矿物质元素和与地理环境相关的矿物质元素的判别正确率均高于90%,证实对随机羊肉样品的产地溯源和鉴别有效。目前,矿物质元素溯源技术在羊肉溯源上的表现优良、发展成熟,适宜运用在羊肉的产地溯源研究中。

矿物质元素作为一种发展较为成熟的产地溯源和鉴别技术,其在鉴别不同地理环境的羊肉样品上表现优异,但仍存在一定的缺陷,例如操作步骤繁琐、数据量庞大等,导致处理速度慢、鉴别时间长等问题^[19-20]。同时,饲料中添加的矿物质元素也会影响畜禽体内矿物质元素的种类和含量,对溯源和鉴别研究有一定影响^[21-22]。因此,在矿物元素产地溯源和鉴别研究中应围绕如何缩短矿物质元素技术的鉴别时间并精简操作,同时也应对环境等其他因素对羊肉中矿物质元素比值影响的相关机制进行对比分析。

3 近红外光谱技术

近红外光谱技术作为一种无污染、快速、简便的检测手段,近年来也被学者广泛用于羊肉样品的产地溯源和鉴别相关研究中。近红外光谱是近红外光照射物体后形成的吸收光谱,由于不同地区的环境、气候、地理等因素会导致不同地区羊肉的化学成分和结构存在一定差异,其形成的吸收光谱也不同。采用近红外光谱技术测定羊肉样品的吸收光谱,结合化学计量方法对光谱图进行分析,可以明确不同羊肉样品的特异性指标,从而达到鉴别和溯源的目的^[23-25]。

目前国内外都有针对该技术进行的研究。张宁等^[26]运用近红外光谱技术对山东、河北、内蒙古、宁夏4个产地的144份羊肉样品进行溯源和鉴别分析,利用簇类独立软模式识别方法对4个产地羊肉分别建立判别模型,且建立的模型基本能正确识别4个不同产地的羊肉样品,同时能100%识别其他产地羊肉。Dumalisile等^[27]运用近红外光谱结合线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)、偏最小二乘判别分析等化学计量方法对南非不同牧场的3种中型羚羊和3种大型羚羊肉样进行研究,发现判别精准度达到68%~100%。Hoffman等^[28]使用近红外光谱仪对来自澳大利亚的3种不同品种山羊肉

进行分析,发现在使用LDA结合二阶导数近红外光谱时,对单个肌肉样本进行识别的正确率达到68%~94%。Cuzzolino等^[29]使用近红外光谱结合主成分分析、LDA和相似性指数(similarity index, SI)等分析方法,对包括绵羊肉在内的多种肉类进行测定,发现使用LDA的分类准确率达到87.8%,而使用SI可以准确区分来自不同动物的肉类样本。这均表明在羊肉样品的溯源和鉴别分析中,近红外光谱技术是一种有效的技术,且结合化学计量法后能取得更好的鉴别效果。

近红外光谱技术目前在国内外有一定量的研究,其相比稳定同位素技术和矿物质元素技术更加方便、快捷,且识别能力不弱于上述2种技术,但是目前该技术仍存在建模精度较低、自动化程度低等问题^[24,30]。接下来应重点围绕近红外光谱技术的建模精度、通用性、自动化程度及便携式设备的开发进行研究。

4 DNA分子标记溯源技术

DNA分子标记技术是通过以生物个体间核苷酸序列的变异为基础建立的遗传标记来判断不同生物个体差异,通过聚合酶链式反应等DNA检测技术对特定的DNA分子标记进行分析检测,以获得该个体的DNA指纹图谱,从而达到鉴别和溯源的一种技术^[31-33]。目前该技术已经发展了限制性内切酶片段长度多态性、简单重复序列及单核苷酸多态性(single nucleotide polymorphism, SNP) 3代,其中SNP因具有数量大、遗传稳定性高、代表性强和易实现自动化等优点而被广泛用于产地溯源研究^[34-38]。

在世界范围内,已有多位学者使用SNP分子标记对羊肉进行了溯源和鉴别研究。Dimauro等^[39]通过筛选出判别效果最好的110个SNP和108个多态信息含量较高的SNP,成功区分了来自意大利5个不同地理区域的21个绵羊种群。Wu Qiayu等^[40]从美国国家生物技术信息中心数据库中选择8个SNP,并检测其在中国西北和东部饲养的135只羊血液或肉样本中的含量,结果表明,其中7个SNP适合羊肉的产地溯源,每2个羊个体具有相同基因型的概率为0.185%。

SNP分子标记具有数量多、稳定性好等优点,但是在实际应用中也存在一些问题。该方法对于动物个体和品种的溯源鉴别需要依靠特异性SNP位点,但是由于样品的种类、产地等差异,初次筛选出的SNP位点在不同样品中的适用性较差,需要不断扩大样品数量并优化筛选方法才能获得理想的SNP组合^[39,41]。当前由于研究的不足,相关数据库还处在建立阶段。随着研究的进一步深入,未来SNP技术在食品溯源方面将发挥更为重要的作用。

5 基于脂肪酸的溯源和鉴别技术

基于脂肪酸的产地溯源和鉴别技术是通过利用色谱、质谱、光谱等方法测定羊肉中的脂肪酸指标达到判别和溯源目的的一种技术。不同地区的饲养方式、饲料种类、气候环境等因素均会导致动物体内脂肪酸含量和种类等指标的不同,通过对比分析特征性脂肪酸的含量即可实现产地溯源和鉴别^[42-46]。

当前,国内外都有基于脂肪酸进行的溯源或鉴别研究。贾菲菲等^[47]从西北、西南、中原和东北4个羊肉主产区分别选择来自新疆、云南、山东和内蒙古的50份羊肉样品,分析其脂肪酸种类和含量差异,结果发现,除C_{15:0}、C_{16:0}、C_{16:1}、C_{18:0}和C_{20:0}外,其余脂肪酸在不同地区间存在显著性差异;进一步的主成分分析得出,可通过第1主成分和第2主成分对农区(山东、云南)和牧区(新疆、内蒙古)样品进行区分,通过判别分析,发现单个产地的回代和交叉验证正确率分别为100%和88%,表明该方法基本能够区分4个产地的羊肉样品。Osorio等^[48]利用傅里叶变换中红外光谱对不同养殖体系(母乳乳喂养和牛乳替代物喂养)的羔羊进行研究,检测分析不同体系的脂肪酸种类及含量,发现其能够明显区分不同饲养系统的羔羊肉样品。

基于脂肪酸的产地溯源和鉴别研究虽然取得了一定成效,但是由于脂肪酸组成和含量受饲料、基因、品种、年龄及贮藏条件的影响较大,导致其对于不同产地样品进行判别时需考虑到各种条件的影响,尽可能减少干扰因素^[43-44,49]。

6 基于风味化合物的产地溯源和鉴别技术

风味化合物是指食品在加工和烹饪过程中产生的具有挥发性的成分,其组成和含量对食品的风味起关键作用。不同种类、产地的羊肉中,其风味物质存在差异,利用这些差异可以绘制基于特征性风味化合物的指纹图谱,从而实现产地溯源和鉴别^[50-52]。近年来针对风味化合物的研究中,气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术、电子鼻技术及GC-离子迁移谱(GC-ion mobility spectroscopy, GC-IMS)技术较为常见。

李梦琪等^[53]采用GC-MS分析青海藏羊和小尾寒羊肉发现,其部分挥发性风味物质存在显著差异,结合聚类分析方法能够有效将二者区分。孟新涛等^[54]使用GC-IMS对新疆的阿勒泰羊、巴什拜羊、巴音布鲁克羊、多浪

羊、和田羊和哈萨克羊6个品种的羊肉进行检测,结果表明,GC-IMS能有效区分不同品种羊肉,且不同产区羊肉风味化合物组成差异较大,结合主成分分析可以有效区分阿勒泰羊、巴什拜羊、多浪羊和哈萨克羊,并且各品种羊肉均具有各自不同的特征性风味化合物,为各品种的产地溯源和鉴别提供了依据。Wang Qian等^[55]采用电子鼻技术结合GC-MS,对掺有不同比例熟化鸭肉的小尾寒羊样品进行检测,结果发现,电子鼻能正确区分掺假样品和羊肉样品,最低检测限为10%。

目前,在基于风味化合物的产地溯源和鉴别研究中,不同羊肉样品均具有其特征性的风味化合物,利用这些特征性成分进行溯源和鉴别的效果良好,但同时也存在挥发性成分提取困难的问题;电子鼻技术相对简单、成本低、检测速度快,但目前的技术容易受到环境影响而出现偏差,且相对于其他技术其检测限较高,对羊肉样品中低含量挥发性成分的分析效果不佳^[19-20]。下一步应围绕如何有效提高挥发性成分的提取率开展研究。

7 其他产地溯源和鉴别技术

除以上提及的产地溯源和鉴别技术外,国内外学者还提出了一些其他技术。刘兴勇等^[56]针对云南5个产地的黑山羊肉中的17种水解氨基酸含量进行分析,发现不同产地黑山羊肉中的水解氨基酸含量存在显著差异,通过聚类分析和K-最近邻法可将5个产地的黑山羊肉进行分类,其中丽江、龙陵和罗平的样品能实现100%完全分类,通过人工神经网络对昆明、石林、丽江3个产地进行识别时,其正确率也高达100%。

张季等^[57]使用快速蒸发电离质谱(rapid evaporative ionization mass spectrometry, REIMS)技术结合电子手术刀(iKnife)对习水麻羊、内蒙古羊、吉林羊和贵州羊进行检测,聚类分析结果显示,4种不同的羊肉样品可以互相区分,聚类效果良好,进一步建立识别模型,模型的识别率高达97.32%,同时对模型的可靠性进行验证,发现结果匹配度为100%,证实了该模型体系及方法的可靠性。

iKnife-REIMS技术的优点在于不需要对样品进行前处理,只要采集一定数据即可对未知样品进行分析,且可将分析时间缩短至数秒;但其缺点是需要大量的真实样品用于建立验证模型,因此目前该类研究数据较少,有待进一步研究。

现阶段国内外羊肉溯源与鉴别技术优缺点对比如表1所示。

表1 现阶段国内外羊肉溯源与鉴别技术优缺点对比
Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of mutton traceability and identification technologies

溯源与鉴别技术	技术优点	存在问题	参考文献
稳定同位素	技术成熟, 特征元素稳定, 鉴别效果好	耗时长, 样品制备繁琐	[2-9]
矿物质元素	技术成熟, 鉴别效果好	耗时较长, 样品制备繁琐, 特征元素易受人为因素干扰 (如人为添加矿物质元素强化剂等)	[10-22]
近红外光谱	相对方便、快捷, 鉴别效果好	自动化程度低, 判别模型通用性较差	[23-30]
DNA分子标记	分子标记数量大、稳定性好, 鉴别效果良好	通用性较低, 现阶段研究不足, 需要进一步研究发展	[31-41]
脂肪酸指纹图谱	鉴别效果良好	脂肪酸含量和种类易受外界因素干扰而变化, 不稳定	[42-49]
风味化合物	鉴别效果好, 相对稳定, 成本低, 速度快	特征性化合物提取存在一定困难, 电子鼻技术当前不够完善, 存在一定问题	[50-55]
其他	鉴别效果良好	相关研究较少, 有待进一步验证其可行性	[56-57]

8 结 语

目前, 国内外对肉类溯源技术的研究主要集中于牛肉、猪肉, 羊肉的相关研究相对较少, 但近年来也在不断发展。本文综述的羊肉产地溯源和鉴别技术, 其判别正确率和对未知样品的识别效果均较好, 但是各种技术也分别存在一定的问题, 亟待进一步完善解决。同时, 目前针对羊肉的溯源和鉴别研究中, 不同部位羊肉样品对溯源的影响、同一地区的不同品种羊肉、不同地区的同一种类羊肉对产地溯源技术的影响等问题相关研究较少, 存在一定的空白, 应针对这些问题开展研究, 进一步扩展和完善羊肉溯源和鉴别研究体系的广度和深度。随着将来对羊肉溯源和鉴别技术需求的不断增加, 所使用技术的检测速度、便携性和易操作性均面临较大挑战。单一技术的检测范围和能力均存在不足和限制, 将多种技术联合应用以提高溯源和鉴别的范围和效果也是未来的发展方向之一, 多种技术的融合运用能够有效弥补单一技术的缺点, 实现优势互补。目前已有将2种技术联合使用的报道^[58-59], 效果明显证实了多种技术联合使用的可行性。此外, 对目前的产地溯源和鉴别技术进行更深层次的探索也极为重要。

在已有的溯源技术中, DNA分子标记技术具有巨大的发展潜力, 在取得一定量的研究数据后, 其能发挥出相较于其他溯源技术更快、更精准的溯源和鉴别能力, 未来应瞄准DNA分子标记技术开展进一步的研究和探索, 充分挖掘其潜力。

参考文献:

[1] 王馨慧. 中国居民肉类消费及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020: 34-35. DOI:10.27010/d.cnki.gdbnu.2020.000486.
[2] BONER M, FORSTEL H. Stable isotope variation as a tool to trace the authenticity of beef[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2004, 378(2): 301-310. DOI:10.1007/s00216-003-2347-6.

[3] 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. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2022.21.046.
[4] ZHAXI Cidan, ZHAO Shanshan, ZHANG Tangwei, et al. Stable isotopes verify geographical origin of Tibetan chicken[J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129893. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129893.
[5] BOL R, MARSH J, HEATON T H. Multiple stable isotope (^{18}O , ^{13}C , ^{15}N and ^{34}S) analysis of human hair to identify the recent migrants in a rural community in SW England[J]. Rapid Commun Mass Spectrom, 2007, 21(18): 2951-2954. DOI:10.1002/rcm.3168.
[6] 孙淑敏, 郭波莉, 魏益民, 等. 稳定性氢同位素在羊肉产地溯源中的应用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(24): 5050-5057. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2011.24.010.
[7] 李政. 稳定同位素技术在羊肉产地溯源中的应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020: 16-36. DOI:10.27277/d.cnki.gsdnu.2020.000565.
[8] 米瑞芳, 陈曦, 戚彪, 等. 不同产地羊肉稳定同位素特征差异及其溯源应用[J]. 核农学报, 2020, 34(增刊1): 89-95. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.34.0089.
[9] 王倩, 李政, 赵姗姗, 等. 稳定同位素技术在羊肉及羊骨产地溯源中的研究[C]//中国核科学技术进展报告(第七卷): 中国核学会2021年学术年会论文集第7册(同位素分卷、辐射研究与应用分卷、核技术工业应用分卷、核农学分卷、辐照效应分卷、放射性药物分卷), 2021: 220-230. DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.067030.
[10] 齐婧, 李莹莹, 姜锐, 等. 矿物元素和稳定同位素在肉类食品产地溯源中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2019, 33(11): 67-72. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190826-199.
[11] 宗万里, 刘海金, 赵姗姗, 等. 基于矿物元素的西藏自治区牦牛肉产地溯源研究[J]. 农产品质量与安全, 2022(5): 12-20. DOI:10.3969/j.issn.1674-8255.2022.05.002.
[12] 陈庚超, 徐正华, 杨雪娇. 走私冷冻肉类食品的产地溯源技术研究进展[J]. 中国口岸科学技术, 2022, 4(1): 55-59. DOI:10.3969/j.issn.1002-4689.2022.01.011.
[13] 白扬. 内蒙古放牧和舍饲牛肉稳定同位素与矿物质元素溯源研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021: 8-38. DOI:10.27229/d.cnki.gnmnu.2021.000736.
[14] PIANEZZE S, CAMIN F, PERINI M, et al. Tracing lamb meat with stable isotope ratio analysis: a review[J]. Small Ruminant Research, 2021, 203: 106482. DOI:10.1016/j.smallrumres.2021.106482.
[15] NIE Jing, SHAO Shengzhi, XIA Wei, et al. Stable isotopes verify geographical origin of yak meat from Qinghai-Tibet plateau[J]. Meat Science, 2020, 165: 108113. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108113.
[16] 孙淑敏, 郭波莉, 魏益民, 等. 基于矿物元素指纹的羊肉产地溯源技术[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 237-243. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.17.035.
[17] 马梦斌. 基于矿物质元素指纹特征的滩羊肉产地溯源方法研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019: 5-43. DOI:10.27257/d.cnki.gnxhc.2019.000780.
[18] 王雪蓉, 罗瑞明, 李亚蕾, 等. 基于ICP-MS的滩羊骨骼矿物质元素溯源指纹图谱[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 322-328. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210615-167.
[19] FRANKE B M, GREMAUD G, HADORN R, et al. Geographic origin of meat elements of an analytical approach to its authentication[J]. European Food Research and Technology, 2005, 221(3/4): 493-503. DOI:10.1007/s00217-005-1158-8.
[20] BAI Yang, LIU Haijin, ZHANG Bin, et al. Research progress on traceability and authenticity of beef[J]. Food Reviews International, 2021, 7: 1-21. DOI:10.1080/87559129.2021.1936000.
[21] SUN Shumin, GUO Boli, WEI Yimin, et al. Multi element analysis for determining the geographical origin of mutton from different regions of China[J]. Food Chemistry, 2011, 124(4): 1151-1156. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.07.027.
[22] 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.



- [23] 沈啸, 唐修君, 樊艳凤, 等. 近红外光谱技术在肉类品质评价中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(21): 7260-7264. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2019.21.034.
- [24] LISTRAT A, LEBRET B, LOUVEAU I, et al. How muscle structure and composition influence meat and flesh quality[J]. The Scientific World Journal, 2016, 2016: 3182746. DOI:10.1155/2016/3182746.
- [25] 吕雪峰, 许艳丽, 王乐. 近红外光谱技术在畜产品检测中的应用研究[J]. 农产品质量与安全, 2022(6): 27-34. DOI:10.3969/j.issn.1674-8255.2022.06.004.
- [26] 张宁, 张德权, 李淑荣, 等. 近红外光谱结合SIMCA法溯源羊肉产地的初步研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 309-312. DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.2008.12.063.
- [27] DUMALISILE P, MANLEY M, HOFFMAN L, et al. Near-infrared (NIR) spectroscopy to differentiate *Longissimus thoracis et lumborum* (LTL) muscles of game species[J]. Food Analytical Methods, 2020, 13: 1-14. DOI:10.1007/s12161-020-01739-x.
- [28] HOFFMAN L C, INGLE P, KSOLE A H, et al. Characterisation and identification of individual intact goat muscle samples (*Capra* sp.) using a portable near-infrared spectrometer and chemometrics[J]. Foods, 2022, 11(18): 2894. DOI:10.3390/foods11182894.
- [29] COZZOLINO D, BUREŠ D, HOFFMAN L C. Evaluating the use of a similarity index (SI) combined with near infrared (NIR) spectroscopy as method in meat species authenticity[J]. Foods, 2023, 12(1): 182. DOI:10.3390/foods12010182.
- [30] 柴迎慧, 俞玥, 宋嘉慧, 等. 近红外光谱技术结合化学计量学用于畜禽肉制品品质分析的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3098-3105. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2022.10.011.
- [31] 王淑新, 连林生. 单核苷酸多态性作为新一代分子标记的优越性[J]. 中国畜牧兽医, 2008(4): 31-33. DOI:10.3969/j.issn.1001-9111.2008.02.013.
- [32] MORETTI R, CRISCIONE A, TURRI F, et al. A 20-SNP panel as a tool for genetic authentication and traceability of pig breeds[J]. Animals, 2022, 12(11): 1335. DOI:10.3390/ani12111335.
- [33] 赵杰, 游新勇, 徐贞贞, 等. SNP检测方法在动物研究中的应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 299-305. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2018.04.037.
- [34] 吴华莉, 涂尾龙, 曹建国, 等. SNP技术在猪肉溯源过程中的应用[J]. 畜牧与饲料科学, 2020, 41(6): 84-89. DOI:10.12160/j.issn.1672-5190.2020.06.016.
- [35] 张小波, 何慧, 吴满, 等. 基于SNP标记的肉类溯源技术[J]. 肉类研究, 2011, 25(5): 40-45. DOI:10.3969/j.issn.1001-8123.2011.05.010.
- [36] 吴满, 吕贝贝, 王金斌, 等. SNP标记用于猪肉产品DNA溯源[J]. 食品科学, 2017, 38(24): 278-282. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201724045.
- [37] DADOUSIS C, MUÑOZ M, OVILO C, et al. Admixture and breed traceability in European indigenous pig breeds and wild boar using genome-wide SNP data[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 7346. DOI:10.1038/s41598-022-10698-8.
- [38] GALAL-KHALLAF A, HUSSEIN D, EL-SAYED HASSAB EL-NABI S. Single nucleotide polymorphism-based methodology for authentication of bovine, caprine, ovine, camel, and donkey meat cuts[J]. Journal of Food Science, 2021, 86: 4444-4456. DOI:10.1111/1750-3841.15885.
- [39] DIMAURO C, NICOLOSO L, CELLES M, et al. Selection of discriminant SNP markers for breed and geographic assignment of Italian sheep[J]. Small Ruminant Research, 2015, 128: 27-33. DOI:10.1016/j.smallrumres.2015.05.001.
- [40] WU Qiayu, ZHOU Guanghong, YANG Sasa, et al. SNP genotyping in sheep from northwest and east China for meat traceability[J]. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2017, 12(2): 1-6. DOI:10.1007/s00003-017-1092-2.
- [41] 王彦彦, 杨曙明. 基于SNP标记的肉产品溯源研究进展[J]. 农产品质量与安全, 2021(3): 74-79. DOI:10.3969/j.issn.1674-8255.2021.03.014.
- [42] 苏馨, 车天宇, 谢遇春, 等. 乌珠穆沁羊、杜泊羊和萨福克羊脂肪酸指纹图谱的建立[J]. 肉类研究, 2021, 35(8): 37-41. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210312-068.
- [43] 方景泉, 迟涛, 王菁华, 等. 食品中脂肪酸分析方法的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2018, 46(9): 36-41; 64. DOI:10.3969/j.issn.1001-2230.2018.09.007.
- [44] 张振华. 不同饲养方式下羊肉脂肪酸指纹特征初探[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021: 25-54. DOI:10.27229/d.cnki.gnmnu.2021.000229.
- [45] 方晨, 胡瀚月, 郭飞, 等. 中国地方猪种与国外猪种猪肉脂肪酸组成的对比分析[J]. 食品科技, 2020, 45(3): 166-171. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.03.031.
- [46] ORTIZ A, PARRINI S, TEJERINA D, et al. Potential use of near-infrared spectroscopy to predict fatty acid profile of meat from different European autochthonous pig breeds[J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 5801. DOI:10.3390/app10175801.
- [47] 贾菲菲, 王钢力, 冯芳, 等. 基于脂肪酸指纹图谱的我国羊肉产地溯源研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4638-4646. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2021.11.046.
- [48] OSORIO M T, ZUMALACARREGUI J M, ALAIZ-RODRIGUEZ R, et al. Differentiation of perirenal and omental fat quality of suckling lambs according to the rearing system from Fourier transforms mid-infrared spectra using partial least squares and artificial neural networks analysis[J]. Meat Science, 2009, 83: 140-147. DOI:10.1016/J.Meatsci.2009.04.013.
- [49] 余玮玥, 黄冬梅, 李学辉, 等. 化学分析技术在动物源性食品产地溯源中的应用[J]. 农产品质量与安全, 2018(1): 59-66. DOI:10.3969/j.issn.1674-8255.2018.01.012.
- [50] 陈通, 吴志远, 王正云, 等. 基于气相离子迁移谱和化学计量学方法判别肉的种类[J]. 中国食品学报, 2019, 19(7): 221-226. DOI:10.16429/j.1009-7848.2019.07.029.
- [51] ECHEGARAY N, DOMÍNGUEZ R, BODAS R, et al. Characterization of volatile profile of *Longissimus thoracis et lumborum* muscle from Castellana and INRA 401 lambs reared under commercial conditions[J]. Small Ruminant Research, 2021, 200: 106396. DOI:10.1016/j.smallrumres.2021.106396.
- [52] GRABEŽ V, BJELANOVIC M, ROHLOFF J, et al. The relationship between volatile compounds, metabolites and sensory attributes: a case study using lamb and sheep meat[J]. Small Ruminant Research, 2019, 181: 12-20. DOI:10.1016/j.smallrumres.2019.09.02.
- [53] 李梦琪, 陈耀祥, 赵索南, 等. 青海藏羊肉特征风味指纹图谱分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(5): 127-134; 141. DOI:10.13432/j.cnki.jgsau.2017.05.019.
- [54] 孟新涛, 乔雪, 潘俨, 等. 新疆不同产区羊肉特征风味成分离子迁移色谱指纹图谱的构建[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 218-226. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190429-383.
- [55] WANG Qian, LI Lu, DING Wu, et al. Adulterant identification in mutton by electronic nose and gas chromatography-mass spectrometer[J]. Food Control, 2018, 98: 431-438. DOI:10.1016/j.foodcont.2018.11.038.
- [56] 刘兴勇, 林涛, 刘宏程, 等. 基于水解氨基酸分析山羊肉的产地溯源[J]. 现代食品科技, 2013, 29(11): 2788-2792. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2013.11.006.
- [57] 张季, 凌蕾, 卢叶, 等. 基于iKnife-REIMS技术对地理标志保护产品习水麻羊产地溯源的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 286-292. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021050108.
- [58] ZHAO Jie, ZHAO Yan, YOU Xinyong, et al. Genetic traceability practices in a large-size beef company in China[J]. Food Chemistry, 2018, 277: 222-228. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.10.007.
- [59] 王永瑞, 柏霜, 罗瑞明, 等. 基于电子鼻、GC-MS结合化学计量学方法鉴别烤羊肉掺假[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 291-298. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210307-089.