

文章编号:1000-8551(2011)02-0302-06

基于动物组织器官中稳定性同位素组成变化的溯源研究进展

蔡先峰 郭波莉 魏益民 孙淑敏 魏 帅

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业部农产品加工与质量控制重点开放实验室,北京 100193)

摘要:稳定性同位素分析技术是一种用于研究动物产地来源和生活史的有效技术,也是一项新兴的食品追溯技术。本文综述了国内外关于动物组织器官中稳定性同位素组成特征,组织器官同位素的平衡时间,以及饲料、饮水、地域和贮藏加工过程对同位素组成影响的最新研究进展,旨在为动物源性食品产地和动物生活史的溯源研究提供理论参考。

关键词:动物;组织和器官;稳定性同位素;食品安全;食品追溯

DEVELOPMENT ON TRACEABILITY BASED ON CHANGES OF STABLE ISOTOPES IN ANIMAL TISSUES AND ORGANS

CAI Xian-feng GUO Bo-li WEI Yi-min SUN Shu-min WEI Shuai

(Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Quality Control, Ministry of Agriculture/Institute of Agro-food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193)

Abstract: Stable isotope analysis is a new method in food traceability, which can be used to trace animals' geographical origin and life history. This paper reviews the recent progress of researches on characteristics of stable isotopes and turnover time in different animal tissues and organs, as well as their influence caused by feed, drinking water, geographical origin, storing and processing. The aim of this paper is to provide theoretical reference for studies on the traceability of animal derived food and animals' life history.

Key words: animal; tissue and organ; stable isotopes; food safety; food traceability

随着经济的发展,食品的贸易量逐渐增大,流通速度增快,食品供应链延长,食品安全隐患和危害也在进一步延伸。食品安全问题不仅威胁着公众的生命健康,也给经济发展和社会稳定带来巨大负面影响。食品产地溯源技术是保障食品质量与安全的有力措施之一,不仅能创造公平的市场竞争环境,保护地区特色产品,增强消费者的消费信心,而且能协助政府机构有效地处理食品安全事故,降低危害和损失^[1]。

动物源性食品在人类膳食结构中占有重要位置,

其安全性与消费者健康密切相关。动物饲料原材料来源广、种类多,又因其喂养和交易地点可能发生变化,大大增加了保障其安全的难度,对动物产地进行追溯的任务变得更为复杂。稳定性同位素指纹分析是一种有效的食品产地溯源技术,利用不同地域来源的生物体同位素组成特征受环境、气候、地形、生物代谢等因素影响而存在的差异,实现食品原材料产地来源的判别^[2]。近年来,这一技术研究不断深入,学者们已由初步探索其对食品产地溯源的可行性转入研究动物组

收稿日期:2010-06-25 接受日期:2010-09-25

基金项目:“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAK02A16),国家自然科学基金项目(30800862)

作者简介:蔡先峰(1986-)男,湖南岳阳人,硕士研究生,研究方向为食品安全。Tel:010-62815954;E-mail:yesexf@126.com

魏益民(1957-)男,陕西咸阳市人,教授,博士,研究方向为食品质量与安全及加工技术。Tel:010-62815956;E-mail:weiyimin36@hotmail.com

织器官中同位素组成的变化机理,如探讨动物组织器官同位素组成与饲料和饮水的关系、平衡时间以及贮藏加工工艺对食品中同位素组成的影响等。这些研究将为稳定性同位素指纹分析技术的实际应用奠定基础,并为今后建立利用环境、气候、地形、水源等因子预测食品中同位素组成的预测模型提供依据。本文综述了国内外关于动物组织器官中同位素组成特征,它们相对膳食的平衡时间,以及饲料、饮水、地域和贮藏加工过程对同位素组成影响的研究进展,旨在为动物源性食品产地溯源研究提供理论参考。

1 动物不同组织器官中稳定性同位素组成特征

动物不同的组织器官具有不同的稳定性同位素组成特征,相对膳食的平衡时间也各不相同。考虑到试验选材的可操作性、实用性和经济可行性,各种组织器官在溯源研究中的作用不同。动物溯源研究的选材主要是可食用的组织器官,如肌肉、血液、心脏、肝脏和肺脏等,毛发、角、蹄甲等附属物因其采样方便也渐渐受到研究者的青睐。

1.1 肌肉组织

肌肉是最重要的食用组织,相关的研究中常分析肌肉的氢、氧、碳、氮、硫、锶等同位素和肉汁的氢或氧同位素。脂肪合成反应中的丙酮酸氧化为乙酰辅酶A的过程对 ^{13}C 具有贫化作用,但蛋白组织对 ^{13}C 具有富集作用^[3]。所以肌肉需要进行脱脂,分离为粗蛋白和粗脂肪后分别检测。在不同研究中,肉汁提取方法不同,又因肉汁中氢氧同位素容易受肌肉贮藏和加工条件的影响而不稳定,所以相关研究受到限制。

在国内外研究中,对于鹌鹑、鸡、鼠等小型动物,并没有明确的肌肉采样部位;对于猪、牛和羊等大型动物,常采取股四头肌(*quadriceps femoris*)^[4]、胸最长肌(*longissimus thoracis*)^[3,5]、后臀肉^[6,7]、颈部肌肉^[8]等作为研究材料,但采样部位并未统一。因此有学者提出采样部位是否会影响研究结果。针对此问题,郭波莉等通过牛模型试验,比较了牛胴体的前腿、中部、后臀肌肉样中碳、氮同位素组成,发现3个部位肌肉粗蛋白的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均无显著差异,粗脂肪的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也无显著差异^[6]。这表明不同部位肌肉对碳、氮同位素的分馏效应基本一致,采样部位不影响研究结果。这一研究突破了肌肉采样的局限,使这一技术的适用性更广泛。

1.2 内脏器官

内脏器官在世界大多数国家没有消费市场,因此以它们为材料进行溯源研究的报道相对较少。而在中国的食品贸易中,内脏器官占有重要份额,保证其质量是必须的,所以相关研究具有实用价值。郭波莉等对牛心脏、肝脏和肺脏3种器官的同位素组成做了比较研究,发现3者粗蛋白和粗脂肪的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均无显著差异;心脏粗蛋白的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与肝脏呈极显著差异,与肺脏粗蛋白呈显著差异^[6]。3种器官对碳同位素的分馏效应基本相同,而对氮同位素具有一定的差异,这可能是3种器官的肌纤维蛋白组成存在差异所致^[6]。这表明动物不同内脏器官碳同位素的溯源效果基本相同,在溯源研究中存在相互替代的可能,而氮同位素的溯源效果有待进一步研究验证。

1.3 毛发、角和蹄甲

毛发、角和蹄甲主要由角蛋白构成,性质稳定,一旦长成,其成分和结构不再变化,可完整地将动物历史摄食信息记录下来,为追溯动物的产地和生活史提供了可能,而且适合活体采样,采样成本低,可操作性强,逐渐受到研究者的青睐。

目前关于动物毛发与饲料、肌肉碳、氮同位素组成关系的研究报道较多。动物毛发与饲料、肌肉的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在高度相关性,毛发在追溯动物产地和生活史方面均具有很大潜力。郭波莉等研究了不同段位牛尾毛与肌肉粗蛋白、粗脂肪碳、氮同位素的相关性,并建立了预测模型^[6,9]。Schwertl等系统研究了农场生产管理、碳氮元素循环与牛尾毛碳、氮同位素组成的关系,结果表明,牛尾毛 $\delta^{13}\text{C}$ 值96%的差异与饲料中玉米干基重量有关;牛尾毛相对饲料富集 ^{13}C ,富集水平为2.7‰,这一富集水平与饲料中玉米含量比例无关;牛尾毛 $\delta^{13}\text{C}$ 值能准确反映动物玉米喂养情况和土地生产用途,而 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异的影响因素复杂,与农场氮元素循环有关^[10]。毛发取样方便,对动物不造成伤害,成为研究大型动物的首选。Cerling等利用大象尾毛研究了大象摄食和迁徙活动随季节的变化情况^[11],Ayliffe等利用马尾毛研究了马体组织稳定性同位素的平衡机理^[12],取得了很好的研究结果。

在机理研究中,为了挖掘动物的阶段摄食信息,准确分析毛发同位素组成的变化情况,需要对毛发进行科学合理分段。动物的种类、生长状况、膳食营养水平和生长环境均会影响毛发的生长速度。牛、大象、马等大型哺乳动物尾毛的生长速度一般为0.4~1.5mm/d^[10-13]。对毛发分段检测,获得的是一段时间内毛发所包含的综合信息。在保证检测所需含碳量的情况下,尽可能短的将毛发分段,一方面可以减少分段误

差,另一方面可以更精确地分析毛发同位素的变化。多数研究者选择以 5mm 长度将毛发分段。Schwertl 建议以 5~10mm 长度分段,并使用线性内插法,对动物较长的尾毛进行分段检测。这一方法既能减轻检测工作量和成本,又能合理反映同位素的变化规律;对同位素变化规律图进行平移,不仅可以最大程度地弥补因采样不完整丢失的信息,还可以辨识处于休止期的毛发,避免信息缺失^[13]。总之,在研究中应该根据实际情况和研究需要进行分段,真实准确地反映毛发中所蕴含的膳食信息。

此外,也有以动物角和蹄甲为研究材料的相关报道。Schweissing 等通过分析牛角中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的变化,推测了牛生前在不同地域间的迁徙历史^[14]。研究表明利用牛角追溯牛个体的异地迁徙和饲喂历史具有很大潜力。Harrison 等利用牛蹄研究牛的摄食情况,结果表明牛蹄甲蛋白对饲料变化反应灵敏,牛蹄在重现牛的摄食历史方面非常有潜力^[15]。在实际中,因测量生长速度和分段采样还存在一定的技术难度,动物角和蹄甲在溯源研究中的应用受到限制。

1.4 动物组织器官中同位素转化与平衡时间

动物组织器官相对膳食同位素的转化和平衡时间是目前机理研究的重要部分。同位素的转化和平衡是饲料中同位素组成特征在动物组织器官中表征并达到稳定状态的过程。血液、肝脏、心脏、尿液等代谢速率快,相对膳食的平衡时间较短,一般为几天到几十天,其同位素信息能反映动物短期内的饲料变化状况;而肌肉、骨骼及毛发等组织器官代谢速度慢,平衡时间较长,一般为几个月甚至几年,能反映动物长时间内的饲料信息^[6]。动物组织器官中同位素平衡时间将影响研究中获取的饲料信息的有效性和完整性。目前的研究主要集中在碳和氮两种同位素上。鼠、鸡、鱼等小型动物的饲养管理成本较低,取样方便,以它们作为模型动物开展的研究相对较多。对于牛、羊和猪等大型动物,其平衡时间的研究主要集中在血液、毛发上,而在肌肉、心脏、肝脏和肺脏等组织器官上的研究较少。

大量研究表明,平衡时间与组织器官的代谢速率呈负相关,即组织器官代谢越快,平衡时间越短。如在玉米饲料到小麦饲料的转变试验中,沙鼠肝脏、脂肪、肌肉、脑和毛发的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对饲喂时间均呈现负指数函数的变化趋势,达到平衡的半周期分别为 6.4、15.6、27.6、28.2 和 47.5d;经推算,在 155d 的试验时间里,只有肝脏在 84d 内达到了 99.9% 的平衡^[16]。有研究发现 $\delta^{13}\text{C}$ 值在黑熊血浆中达到平衡的半周期小于 4d,而在红细胞中平均为 28d^[17]。Jones 等通过

C_3 和 C_4 饲料的转换试验,发现牛毛达到平衡的半周期为 16d,而完全平衡需要 74d^[18]。Schwertl 等研究发现,¹⁵N 在牛尾毛中达到平衡的半周期为 19d,这为确定牛尾毛的分段长度,研究阶段性饲料信息提供了理论依据^[13]。Bahar 等研究发现碳、氮同位素在牛的背最长肌和腰大肌中达到平衡的半周期均大于 130d,而硫同位素在背最长肌中达到平衡的半周期时间更长,为 219d^[19]。因体积较大,组织器官的氧消耗速率低,代谢速率慢,前人猜测同位素在大型动物体内达到平衡所需时间更长^[16]。

因组织器官的平衡时间影响因素比较复杂,与动物种类、品种、个体生长状态、营养状况等相关,又因实际操作困难,目前各种食源性动物组织器官的平衡时间并没有明确的研究结果。利用数学算法也不失为一种解决办法。Phillips 等利用指数函数对平衡时间进行推算,结果表明利用平衡时间差异较大的 2 种组织器官的信息,能推算出当前饲料的饲喂时间,以及同位素比率的变化水平;当饲喂时间过短或者大于 2 种组织器官平衡半周期的 5~10 倍时,或者当同位素比率的变化水平过小时,模型的推算效果不理想;而当 2 种组织器官同位素比率的变化水平相近时,推算效果较好。但有些问题还不明确,如组织器官生长代谢速率常数的确定、初始阶段同位素是否达到平衡、动物是否利用内源性储备等,这些因素均将影响预测模型的准确性^[20]。对于牛、羊等大型食源性动物,因受试验成本等因素限制,开展肌肉和内脏的平衡时间研究比较困难。动物血液和毛发采样方便,对动物不造成损伤,因此可以通过研究血液、毛发与肌肉或内脏器官之间的相关性间接推算肌肉或内脏的平衡时间,从而大大降低试验成本。此外,小型动物试验成本较低,易于操作,也可通过研究小型动物与大型动物之间组织器官同位素平衡时间的换算系数,间接确定大型动物的平衡时间。

2 饲料和饮水对动物组织器官中同位素组成的影响

动物组织器官的同位素组成与饲料、饮水、地域和气候等因素密切相关。目前主要通过变换饲料配比、添加重同位素和借助动物迁徙等方式控制或改变动物膳食及环境同位素组成而进行相关研究。用于研究的动物有股蛀虫 (*Tribolium castaneurn*)、沙鼠 (*Meriones unguiculatus*)、蝙蝠、鸡、鹌鹑等小型动物^[16,21-24],也有牛、马、大象等大型动物^[9,11,12,17]。不同同位素的研究

方法不同,如对于碳同位素,主要是调配饲料中 C_3 与 C_4 植物的比例;氮同位素则主要通过改变饲料种类;而氢同位素主要通过改变饲料和饮水,还有在动物饮水中加入重水等。

目前,在固定地点通过控制动物膳食进行的研究较多,且主要集中在碳和氮同位素上,而对其他元素的研究较少。诸多研究证明了动物组织器官与饲料的同位素组成高度相关,相关性不随动物和饲料的差异发生改变^[3,10,16,17,21]。动物组织器官对各种同位素具有分馏作用,但目前分馏机理还不是十分清楚。相对于饲料,脂肪组织对 ^{13}C 有贫化作用,贫化水平约为 $-3‰ \sim -6‰$;蛋白组织对 ^{13}C 有富集作用,但不同蛋白组织对 ^{13}C 的富集水平不同,如动物毛发对饲料 ^{13}C 的富集水平约为 $+3‰ \sim +5‰$,肌肉组织约为 $+1‰ \sim +2‰$,而动物毛发和脱脂肌肉相对饲料的 ^{15}N 富集水平为 $+2‰ \sim +5‰$ ^[4-6,10,13,17,23,26]。动物体对同位素的贫化或富集水平受动物和饲料种类的影响。Männel等研究发现同位素从饲料到动物毛发的转移水平不受地域海拔的影响,但受动物种类和品种的影响,如绵羊毛和牛毛对 ^{13}C 的富集水平为 $3‰$,而山羊毛更大,为 $4.2‰$;毛发对 ^{15}N 的富集水平差异较大,在 $2.1‰ \sim 3.6‰$ 之间^[26]。Mirón等通过饲喂试验证实了膳食质量和营养水平影响蝙蝠血液对碳和氮同位素的平衡时间和分馏水平^[22]。动物组织对饲料同位素的富集或贫化水平研究为推算动物饲料构成提供了可能,但目前此方面的研究还较少。Bahar等研究发现牛饲料中玉米干基含量每增加 10% ,肌肉粗蛋白和粗脂肪 $\delta^{13}C$ 值分别增大 $0.9‰ \sim 1.0‰$ 和 $1.0‰ \sim 1.2‰$ ^[3]。Rhodes等对肉鸡做了类似试验,饲料玉米添加量和饲喂时间均会影响鸡肉中 $\delta^{13}C$ 值,而饲料中添加天然或合成色素对 $\delta^{13}C$ 值无影响;依据鸡肉 $\delta^{13}C$ 值和饲料玉米添加量的线性关系,通过鸡肉 $\delta^{13}C$ 值能判断饲料中玉米的添加量^[23]。郭波莉等通过严格控制饲料配比和喂养时间,研究建立了牛脱脂肌肉、粗脂肪、牛尾毛与饲料中 $\delta^{13}C$ 值的预测模型,以及通过饲料 $\delta^{13}C$ 值推算饲料中 C_4 植物比例的模型^[6]。

目前,也有通过控制动物膳食进行同位素分馏机理研究的相关报道。Ayliffe等通过 C_3 与 C_4 牧草的饲喂转换试验,发现马体内存在3个不同速率的碳平衡池,且马尾毛和血液与饲料的平衡时间存在差异,可能由于碳平衡池对组织碳平衡的影响不同所致^[12]。在 δD 研究方面,Hobson等通过喂食鹌鹑不同饲料和不同配比重水的饮水,发现饲料和饮水均影响鹌鹑各组织器官的 δD 值,并且饮水对代谢活跃的组织器官(如

肌肉、血液、肝等)和不活跃的组织器官(如羽毛、指甲)中氘的贡献率分别为 20% 和 $26\% \sim 32\%$ ^[24]。同位素分馏机理的研究对动物同位素转移水平、平衡时间的理解和研究具有重要作用,还有待进一步研究。

3 地域对动物组织器官中同位素组成的影响

随着经济的发展,牲畜异地交易越来越频繁,异地育肥也时有发生,这对动物产地溯源提出了新的挑战。为此,动物生活史的研究受到国内外学者的关注。而动物生活史的研究与动物生长地域的地质地形特征、水文条件等相关研究密不可分。

碳、氮、氢、氧、硫同位素在自然界中的分馏具有一定的海拔效应、陆地效应、纬度效应。Hobson等对厄瓜多尔安第斯山脉地区蜂鸟尾毛的碳、氮、氢同位素进行了研究,发现当海拔在 $400m$ 以上时, $\delta^{13}C$ 和 δD 变化显著;海拔每升高 $1000m$, $\delta^{13}C$ 值增大 $1.5‰$ ^[27]。在阿尔卑斯山脉北部地区进行的研究得到相似的结果,海拔每升高 $1000m$,牛羊毛发中的 $\delta^{13}C$ 值增大 $1.1‰$, $\delta^{15}N$ 值减小 $1.1‰$;海拔升高 $2000m$ 所引起的牛毛和羊毛中氮同位素的变化等同于动物性饲料转变为植物性饲料所引起的变化^[26]。这些研究表明同位素分馏的海拔效应在区分动物来自高山还是平原地区,或者研究动物在不同海拔地区之间的迁徙均具有很大潜力。海洋生态系统中富含 ^{15}N 和 ^{34}S ,离海距离也将影响氮和硫同位素在动物体中的组成。在近海地区,把海洋生物作为饲料或肥料,以及海水水雾的沉降作用,都将使动物体的 $\delta^{15}N$ 和 $\delta^{34}S$ 值高于内陆地区。前人对欧洲不同地区羊肉的稳定性同位素研究中发现,来自英国、爱尔兰和近地中海国家和地区羊肉的 $\delta^{15}N$ 和 $\delta^{34}S$ 值均显著高于欧洲内陆地区,原因可能是海水水雾的沉降作用和以海洋生物为肥料导致近海地区土壤富含 ^{15}N 和 ^{34}S ,进而这一特征由饲料传递到动物体内^[8]。Rumiko等研究发现来自日本不同地域牛肉的 $\delta^{18}O$ 值受纬度影响,从低纬度到高纬度地区递减^[28]。

锶同位素的组成与地质环境密切相关,受岩石年龄、pH值等因素的影响^[29]。不同地域的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 存在差异,而这一差异为追溯动物的生活史提供了可能性。Schweissing等利用牛角中 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的变化,研究了牛生前的迁徙历史^[12]。如果不同地域之间气候差异比较小,动物体碳、氮、氢、氧等同位素差异不显著,则 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 可作为重要的溯源指标。

尽管前人研究已经发现了动物体同位素组成在不同地域间的变化规律,但在多大地域范围内能实现有

效溯源等问题还未解决。

4 贮藏加工过程对肌肉组织中同位素组成的影响

目前,动物源性食品的溯源研究主要以生鲜肉为对象,对经过加工和贮藏的肉制品研究较少。

Thiem等在研究 ^{18}O 作为溯源指标的可行性时,发现肉汁的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着贮藏时间延长而呈增大趋势,贮藏可能掩盖肉样原产地的差异^[30]。Horacek等进行了类似研究,却发现肉样 $\delta^{18}\text{O}$ 值经过长时间的贮藏并没有显著变化^[31]。2项研究结果截然不同,可能是由于试验条件不同所致:前者试验用冰箱温湿度的控制较差,样品水分损失严重,而后者样品贮藏于冷库,温湿度均得到严格控制,有效保留了样品的水分^[31];尽管后者的冷藏条件接近实际,但冷藏后的分割、包装和运输过程对肌肉同位素组成是否造成影响还需进一步研究^[31]。在贮藏过程中,肌肉水分的丢失无法避免,在一定程度上会造成肌肉中氢氧同位素组成的不稳定。然而,碳、氮、硫、锶等同位素相对较稳定,不容易受贮藏条件影响,所以应该从这些同位素着手研究贮藏肉的可溯源性。

Horacek等还研究了烤制过程对牛肉 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响,结果表明,在7min内,提取肉汁的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最大变化为0.7‰,与生肉初始值相差不大^[31]。因实际中烤肉方法和工艺不同, $\delta^{18}\text{O}$ 能否作为烤肉制品溯源指标有待进一步研究。Franke等研究了 $\delta^{18}\text{O}$ 值判断牛肉干产地的效果,结果表明,尽管加工方式在一定程度上会掩盖鲜肉的初始差异,但利用 $\delta^{18}\text{O}$ 也能较好地地区分不同地域来源的牛肉干,但这一研究结果仍需要更多的指标和样本进行验证^[32]。筛选不随加工条件发生改变的同位素溯源指标,以及不同加工方式对同位素组成的影响机理将是今后需要研究的主要问题之一。

5 结语

尽管当前有关动物及动物源性食品的溯源研究较多,但此项技术与实际应用仍然存在较大的距离。主要是由于动物组织器官中的同位素组成受饲料、饮水、地域、季节、气候和贮藏加工工艺等多种因素的影响,其影响机理还没有完全揭示,而且动物各组织器官中同位素转化和平衡时间还需要进一步研究。另外,食品产地同位素溯源数据库需要不断建立和完善。这些问题将是今后的研究重点,也将对同位素溯源技术的

研究和应用起到重要的促进作用。

参考文献:

- [1] 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,2007,23(3): 284-289
- [2] 郭波莉,魏益民,潘家荣. 同位素溯源技术在食品安全中的应用[J]. 核农学报,2006,20(2): 148-153
- [3] Bahar B, Monahan F J, Moloney A P, Pdraig O' Kiely, Charlie M Scrimgeour, Olaf Schmidt. Alteration for the carbon and nitrogen stable isotope composition of beef by substitution of grass silage with maize silage [J]. *Rapid Communication in Mass Spectrometry*, 2005, 19: 1937-1942
- [4] Sacco D, Brescia M A, Buccolieri A, Jambrenghi A C. Geographical origin and breed discrimination of Apulian lamb meat samples by means of analytical and spectroscopic determinations [J]. *Meat Science*, 2005, 71: 542-548
- [5] Piasentier E, Valusso R, Camin F, Versini G. Stable isotope ratio analysis for authentication of lamb meat [J]. *Meat Science*, 2003, 64: 239-247
- [6] 郭波莉,魏益民,潘家荣. 牛肉产地溯源技术研究[M]. 北京: 科学出版社,2009: 23-85
- [7] 郭波莉,魏益民,潘家荣,李勇,张福松. 牛不同组织中稳定性碳同位素组成及变化规律研究[J]. 中国农业科学,2006,39(9): 1885-1890
- [8] Camin F, Bontermpo L, Herrinrch K, Horacek M, Kelly S D, Schlicht C, Thomas F, Monahan F J, Hoofewerff J, Rossmann A. Multi-element (H, C, N, S) stable isotope characteristics of lamb meat from different European regions [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2007, 389: 301-320
- [9] 郭波莉,魏益民,潘家荣. 牛尾毛中稳定性碳同位素组成变化规律研究[J]. 中国农业科学,2008,41(7): 2105-2111
- [10] Schwertl M, Auerswald K, Schaufele R, Schnuder H. Carbon and nitrogen stable isotope composition of cattle hair: ecological fingerprints of production systems [J]? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 109: 153-165
- [11] Cerling T E, Wittemyer G, Rasmussen H B, Vollrath F, Cerling C E, Robinson T J, Hamilton I D. Stable isotopes in elephant hair document migration patterns and diet changes [J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA*, 2006, 103(2): 371-373
- [12] Ayliffe L K, Cerling I E, Robinson T, West A G, Sponheimer M, Passey B H, Hammer J, Roeder B, Dearing M D, Ehleringer J R. Turnover of carbon isotopes in tail hair and breath CO_2 of horses fed an isotopically varied diet [J]. *Oecologia*, 2004, 139: 11-22
- [13] Schwertl M, Auerswald K, Schnyder H. Reconstruction of the isotopic history of animal diets by hair segmental analysis [J]. *Rapid Communication in Mass Spectrometry*, 2003, 17: 1312-1318
- [14] Schweissing M M, Grupe G. Tracing migration events in man and cattle by stable strontium isotope analysis of appositionally grown mineralized tissue [J]. *International Journal of Osteoarchaeology*, 2003, 13: 96-103
- [15] Harrison S M, Zazzo A, Bahar A, Monahan F J, Moloney A P,

- Scrimgeour C M , Schmidt O. Using hooves for high - resolution isotopic reconstruction of bovine dietary history [J]. Rapid Communication in Mass Spectrometry , 2007 , 21 : 479 - 486
- [16] Tieszen L L , Boutton E W , Tesdahl K G , Slade N A. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: Implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet [J]. Oecologia , 1983 , 57 : 32 - 37
- [17] Smet S D , Balcaen A , Claeys E , Boeckx P , Cleemput O V. Stable carbon isotope analysis of different tissues of beef animals in relation to their diet [J]. Rapid Communication in Mass Spectrometry , 2004 , 18 : 1227 - 1232
- [18] Jones R J , Ludlow M M , Troughton J H. Changes in the natural carbon isotope ratios of the hair from steers fed diets of C_4 , C_3 and C_4 species in sequence [J]. Journal of the Australian New Zealand Association for the Advancement of Science , 1981 , 12 : 85 - 87
- [19] Bahar B , Moloney A P , Monahan F J , Harrison S M , Zazzo A , Scrimgeour C M , Begley I S , Schmidt O. Turnover of carbon , nitrogen , and sulfur in bovine longissimus dorsi and psoas major muscles : Implications for isotopic authentication of meat [J]. Journal of Animal Science , 2009 , 87 : 905 - 913
- [20] Phillips D L , Eldridge P M. Estimating the timing of diet shifts using stable isotopes [J]. Oecologia , 2006 , 147 : 195 - 203
- [21] Teeri J A , Schoeller D A. $\delta^{13}\text{C}$ Values of an herbivore and the ratio of C_3 to C_4 plant carbon in its diet [J]. Oecologia , 1979 , 39 : 197 - 200
- [22] Mirón M L L , Herrera M L G , Ramírez P N , Hobson K A. Effect of diet quality on carbon and nitrogen turnover and isotopic discrimination in blood of a New World nectarivorous bat [J]. The Journal of Experimental Biology , 2006 , 209 : 541 - 548
- [23] Rhodes C N , Lofthouse J H , Hird S , Rose P , Reece P , Christy J , Macarthur R , Brereton P A. The use of stable carbon isotopes to authenticate claims that poultry have been corn - fed [J]. Food Chemistry , 2010 , 118 : 927 - 932
- [24] Hobson K A , Atwell L , Wassenaar L I. Influence of drinking water and diet on the stable - hydrogen isotope ratios of animal tissues [J]. Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA , 1999 , 96 : 8003 - 8006
- [25] 郭波莉 , 魏益民 , 潘家荣 , 李 勇. 碳、氮同位素在牛肉产地溯源中的应用研究 [J]. 中国农业科学 , 2007 , 40 (2) : 365 - 372
- [26] Mönnel T T , Auerswald A , Schnyder H. Altitudinal gradients of grassland carbon and nitrogen isotope composition are recorded in the hair of grazers [J]. Global Ecology and Biogeography , 2007 , 16 : 583 - 592
- [27] Hobson K A , Wassenaar L I , Mila B , Lovette I , Dingle C , Smith T B. Stable isotopes as indicators of altitudinal distributions and movements in an Ecuadorean hummingbird community [J]. Oecologia , 2003 , 136 : 302 - 308
- [28] Rumiko Nakashitaa , Yaeko Suzuki , Fumikazu Akamatsu , Yoshiko Iizumi , Takashi Korenaga , Yoshito Chikaraishi. Stable carbon , nitrogen , and oxygen isotope analysis as a potential tool for verifying geographical origin of beef [J]. Analytica Chimica Acta , 2008 , 617 : 148 - 152
- [29] Stefan R S , Horn H P , Rossmann A , Schlicht C. 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 Chemistry , 2010 , 118 : 890 - 900
- [30] Thiem I , Lupke M , Seifert H. Factors influencing the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ - ratio in meat juices [J]. Isotopes Environmental Health Studies , 2004 , 40 (3) : 191 - 197
- [31] Horacek M , Eisinger E , Papesch W. Reliability of stable isotope values from meat juice for the determination of the meat origin [J]. Food Chemistry , 2010 , 118 : 910 - 914
- [32] Franke B M , Koslitz S , Micaux F , Piantini U , Maury V , Pfammatter E , Wunderli S , Gremaud G , Jacques , Bosset O , Hadorn R , Kreuzer M. Tracing the geographic origin of poultry meat and dried beef with oxygen and strontium isotope ratios [J]. European Food Research and Technology , 2008 , 226 : 761 - 769

(责任编辑 高美须 裴 颖)



(上接第 275 页)

- [32] Yin C J , Kim S W , Lee M S , et al. Rapid selection of mutants of *Chlamydomonas reinhardtii* for carbohydrate and fatty acid metabolism by fourier transform infrared spectroscopy and gas chromatography combined with multivariate analysis [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering , 2008 , 13 : 778 - 784
- [33] Overy S A , Walker H J , Malone S , et al. Application of metabolite profiling to the identification of traits in a population of tomato introgression lines [J]. J Exp Bot , 2005 , 56 : 287 - 296
- [34] Manfered B , Enot D P , Overy D P. Representation , comparison , and interpretation of metabolome fingerprint data for total composition analysis and quality trait investigation in popato cultivars [J]. J Agric Food Chem , 2007 , 55 (9) : 3444 - 3451
- [35] Keurentjes J J B , Fu J , de Vos C H , et al. The genetics of plant metabolism [J]. Nat Genet , 2006 , 38 : 842 - 849
- [36] Lisek J , Meyer R C , Steinfath M , et al. Identification of metabolic and biomass QTL in Arabidopsis thaliana in a parallel analysis of RIL and IL populations [J]. Plant J , 2008 , 53 : 960 - 972
- [37] Rowe H C , Hansen B G , Halkier B A , et al. Biochemical networks and epistasis shape the Arabidopsis thaliana metabolome [J]. Plant Cell , 2008 , 20 : 1199 - 1216
- [38] Tieman D M , Zeigler M , Schmelz E A , et al. Identification of loci affecting flavor volatile emissions in tomato fruits [J]. J Exp Bot , 2006 , 57 : 887 - 896
- [39] Keurentjes J J B. Genetical metabolomics : closing in on phenotypes [J]. Current Opinion in Plant Biology , 2009 , 12 : 223 - 230
- [40] Mochida K , Furuta T , Ebana K , et al. Correlation exploration of metabolic and genomic diversity in rice [J]. BMC Genomics , 2009 , 10 : 568 - 577

(责任编辑 王媛媛)