

羊肉鉴伪技术的研究进展及其分析比较

刘达玉^{1,2*}, 肖龙泉¹, 王卫¹, 李翔¹, 张崧¹

(1. 成都大学生物工程学院, 成都 610106; 2. 四川省肉羊创新团队, 成都 610106)

摘要: 近年来, 利用鸭肉、猪肉、貂肉、老鼠肉制造假羊肉新闻屡见不鲜, 假羊肉的泛滥不仅干扰了市场秩序, 还严重损害了养殖户和消费者的利益, 因此有效利用羊肉鉴伪技术打击不法商家从事假羊肉生产经营活动, 以维护市场秩序, 保护消费者利益具有重要意义。随着仪器分析技术的发展, 假羊肉的鉴别方法从传统的感官鉴别法转向仪器分析法, 或是感官鉴别与仪器分析相结合。本文对聚合酶链式反应法(polymerase chain reaction, PCR)、环介导等温扩增技术(loop-mediated isothermal amplification, LAMP)、重组酶聚合酶扩增技术(recombinase polymerase amplification, RPA)、质谱检测法、近红外光谱法、电子鼻与电子舌法等检测方法的研究进展进行了综述, 并对其优缺点进行了比较分析, 以期为假羊肉的鉴别方法的选择提供借鉴。

关键词: 羊肉; 检测技术; 比较分析

Research progress and comparison of mutton authentication technologies

LIU Da-Yu^{1,2*}, XIAO Long-Quan¹, WANG Wei¹, LI-Xiang¹, ZHANG Yin¹

(1. College of Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;
2. Sichuan mutton Innovation Team, Chengdu 610106, China)

ABSTRACT: In recent years, it is not uncommon to make fake lamb meat from duck, pork, clam meat and rat meat., the proliferation of fake lamb not only interferes with the market order, but also seriously damages the interests of farmers and consumers. Therefore, it is of great significance to effectively use the mutton authentication technology to combat unscrupulous merchants engaged in the production and operation of fake mutton in order to maintain market order and protect consumer interests. With the development of instrumental analysis techniques, the identification method for mutton meat has changed from the traditional sensory identification method to instrumental analysis, or the combination of sensory identification and instrumental analysis. In this paper, the research progress of detection methods such as polymerase chain reaction (PCR), loop-mediated isothermal amplification (LAMP), recombinase polymerase amplification (RPA), mass spectrometry, near-infrared spectroscopy, electronic nose and electronic tongue method were reviewed, and their advantages and disadvantages were compared and analyzed, in order to provide references for the selection of the identification method of fake lamb.

KEY WORDS: mutton; detection technology; comparative analysis

*通讯作者: 刘达玉, 硕士, 教授, 主要研究方向为食品加工。E-mail: liudy1014@163.com

*Corresponding author: LIU Da-Yu, Master, Professor, College of Biological Engineering, Chengdu University & Sichuan Mutton Sheep Innovation Team, No.2025, Chengluo Avenue, Longquanyi District, Chengdu 610106, China. E-mail: liudy1014@163.com

1 引言

随着人们消费观念的改变,羊肉的消费市场越来越大,其价格也一直居高不下,而某些个人或企业为了牟取暴利,利用鸭肉、猪肉、貂肉、老鼠肉等制造假羊肉的新闻屡见不鲜。近年来,全国各地假羊肉事件频发,如 2009 年无锡假羊肉事件抓获犯罪嫌疑人 63 名,捣毁黑窝点 50 余处,现场查扣制假原料、成品半成品 10 余吨,总共的涉案价值达到 1000 多万元^[1],2013 年临邑与辽宁假羊肉事件,现场缴获假羊肉片、制假用鸭脯肉共 148.5 吨,查获假冒“绿庄园”、“清真”等标识 5000 个,生产线 1 条,生产设备 20 台,涉案价值 1091 万元^[2,3],2017 年大连假羊肉事件等^[4]。假羊肉的泛滥不仅干扰了市场秩序,损害养殖户的利益,还将严重危害消费者的身体健康。因此,打击制假售假刻不容缓,要想假羊肉泛滥的局面得到控制,关键在于假羊肉的鉴别。

随着仪器分析技术的发展,羊肉(制品)的鉴别已从传统感官鉴别法发展到仪器分析法,如以蛋白质为基础的电泳分析法、免疫分析法及色谱分析法等,以核酸为基础的 DNA 分子杂交技术、聚合酶链式反应法(polymerase chain reaction, PCR)、环介导等温扩增技术(loop-mediated isothermal amplification, LAMP)、重组酶聚合酶扩增技术(recombinase polymerase amplification, RPA)等,色谱分析法、质谱检测法、近红外光谱法、电子鼻与电子舌法等也被用来进行肉制品的鉴别。本文对比分析了 PCR 法、LAMP 法、RPA 技术、质谱检测法、近红外光谱法、电子鼻与电子舌法的优缺点,对羊肉及其制品的检测技术未来发展方向进行了探讨和展望,以期假羊肉的鉴别提供借鉴。

2 羊肉的鉴伪技术

2.1 基于核酸的分析检测技术及其比较分析

2.1.1 聚合酶链式反应法

PCR 技术是通过热循环扩增出大量目的基因片段,并根据不同物种的 DNA 保守序列的特异性进行种属的鉴别^[5]。通过 PCR 可以鉴定近缘物种,甚至可以区别产自同一物种不同性别牲畜的生肉^[6],此外,PCR 技术还解决了熟肉及其制品难以鉴定的难题^[7]。核酸检测分析法检测步骤较为复杂,对仪器设备要求较高,仪器设备前期投入费用较高,目前某些地区检测部门难以承担。

PCR 技术分为常规 PCR、多重 PCR(multiplex PCR)、随机扩增多态性 PCR(random amplified polymorphism-PCR, RAPD-PCR)、限制性片段长度多态性 PCR(restriction fragment length polymorphism-PCR, PCR-RFLP)、实时荧光定量 PCR 技术(real-time PCR, RT-PCR)及微滴式数字 PCR 技术,微滴式数字 PCR 技术无需依靠标准曲线或参照基因,

可直接得出 DNA 拷贝数,可对起始样品绝对定量^[8],因此该技术广泛应用于物种鉴定^[9]、病原检测^[10]、转基因^[11,12]及肉源成分检测^[13,14]及基因表达分析^[15]等。张弛等^[16]根据 Cyt-b 基因中的保守序列设计引物,建立了肉制品中鸭源性成分检测技术,检测灵敏度达到 1.78 pg/mg。几种 PCR 技术比较见表 1^[17,18]。Dooley 等^[19]利用 Taqman 荧光定量 PCR 方法检测牛肉、猪肉、羊肉、鸡肉和火鸡肉混合样品,检测敏感度低至 0.1%。

表 1 几种 PCR 检测技术的比较
Table 1 Comparison of several PCR detection techniques

种类	特点	存在问题
常规 PCR	同一体系内只有一对引物和单一目的模板,操作简单、快速	缺乏对比,需要多组之间相互比较,无法定量检测
多重 PCR	可在同一体系里添加多对引物实现多重 PCR 检测	引物间可能存在相互作用
随机扩增多态性 PCR	对于基因序列未知的样品,采用随机引物扩增得到 PCR 产物的指纹图谱,根据指纹图谱间的差别区分不同的种属	灵敏度低、实验重复性差、易受其他 DNA 的干扰
限制性片段长度多态性 PCR	将通用引物扩增后的 PCR 产物进行限制性内切酶酶切,通过物种特异性电泳图谱进行定性分析	容易受到目标基因序列中酶切位点随机突变的影响,易产生检测结果的不确定性
实时荧光定量 PCR	利用 PCR 反应体系中荧光信号的变化对产物生成进行实时监测;灵敏度、速度、精度和自动化水平较高;实现定量检测;无需电泳;有效避免假阳性结果	目标基因的选择、降解 DNA 校正及酶抑制剂校正三大因素容易造成不准确定量

2.1.2 环介导等温扩增技术

环介导等温扩增技术(LAMP)是 Notomi 等^[20]发明的一种新型核酸扩增技术,该技术已在医学、检验检疫、食品安全等技术领域得到了广泛应用^[21-24]。LAMP 技术的特征是针对目标 DNA 链上的 6 个区段设计 2 对不同的引物,然后再利用链置换反应在一定温度下进行扩增反应。该反应需要将基因模板、引物、链置换型 DNA 合成酶、基质等共同置于一定温度下(60~65℃),经一个步骤完成,只需在 15~60 min 即可完成 109~1010 倍扩增。李向丽等^[25]与杨丽霞等^[26]研究表明:LAMP 法能有效地对肉制品中的猪、鸭和羊源性成分进行检测,最低检出限为 1 pg,特异性良好,同时对肉制品中目标物检测的检出限可达到 0.01%,可作为羊肉制品掺假的一种快速检测方法。LAMP 法克服了传统 PCR 反应需要反复升降温的缺点,能在同一恒温条件下连续快速扩增,扩增效率极高;对设备要求低,整个过程只需要一个水浴锅即可完成;结果判定也非常简

单方便, 只需根据扩增反应产物的有无(是否浑浊或颜色变化)即可判断靶基因序列是否存在^[27]。但是, LAMP 法检测所需引物多且设计过程复杂、要求高; 由于 LAMP 扩增是链置换合成, 靶序列长度最好控制在 300 bp 内, 大于 500 bp 较难扩增, 因此不能进行长链 DNA 扩增; 灵敏度高易形成假阳性结果等。目前已有文献公开了采用 LAMP 法检测动物源性核酸成分, 如专利文献 CN 201610332595.X 公开了羊源性成分的 LAMP 检测方法的引物、检测方法和试剂盒, 可应用于动物组织及其加工品中羊源性成分的快速检测^[28]。LAMP 法与 PCR 法比较详见表 2。

表 2 LAMP 法与 PCR 法比较
Table 2 Comparison of LAMP and PCR

	LAMP	PCR
温度	全程恒温(60~65℃)	变温、热循环
时间	约 15~60 min	2~3 h
产物量	约 1010 倍	约 107 倍
特异性	极高、6 区域 4 引物	2 区域 2 引物
检测	无需其他检测步骤, 根据扩增反应发生与否进行判断	需其他检测步骤

2.1.3 重组酶聚合酶扩增技术

2006 年由英国公司 TwistDx Inc 研发的重组聚合酶等温扩增技术(recombinasepolymerase amplification, RPA)是一种核酸恒温扩增技术, 它是基于重组聚合酶介导的扩增原理, 体外模拟生物体内 DNA 复制, 在恒温条件下即可对目的片段进行扩增^[29,30]。RPA 被称为是可以替代 PCR 的核酸检测技术, 最快能够在 15min 内进行常温下的单分子核酸检测。目前 RPA 产物的检测方法有很多种, 最常用的方法一般包括凝胶电泳法、实时荧光定量测定法及横向流动试纸条检测法等。凝胶电泳法操作简单、成本较低, 但必须进行产物回收; 实时荧光 RPA 可通过荧光信号的测定对 RPA 产物进行实时定量检测分析; 横向流动试纸条检测法利用带生物素标记的引物和带羧基荧光素标记的探针与目标核酸进行扩增反应, 从而获得同时带有生物素和荧光素标记的扩增产物, 方便进行检测^[31]。

因其反应对温度要求不高、对硬件设备要求低、反应简单且快速, 特别适合于体外诊断、兽医、食品安全、生物安全、农业等领域。目前已有文献公开了采用 RPA 技术检测动物源性核酸成分, 如专利文献 CN 201710819151.3 公开了基于 RPA 技术检测羊源性成分的引物、探针、试剂盒及其应用^[32], CN201710379517.X 公开了一种检测猪源性成分的 RPA 引物、试剂盒及检测方法^[33]; 专利文献 CN201710378244.7 公开了一种检测鸭源性成分的 RPA 引物、试剂盒及检测方法^[34]。将上述技术应用到羊肉及其制品的鉴别, 有利于迅速检出羊肉制品是否掺假及

掺假肉种类。RPA 技术与 LAMP 法比较详见表 3。

表 3 RPA 技术与 LAMP 法比较^[28,32]
Table 3 Comparison of RPA and LAMP

	RPA	LAMP
反应温度	37~40℃	全程恒温(60~65℃)
反应时间	15 min 左右	约 15~60 min
酶组分	重组酶、单链结合蛋白、链置换 DNA 聚合酶	链置换 DNA 聚合酶
引物数	1 对	2 对
所需仪器	无需任何仪器	水浴锅或恒温箱
检测方式	电泳; 测流试纸; 探针法荧光定量	目视, 比浊检测
检测成本	价格相对较高	国产化、价格低
缺点	终端检测相对复杂、价格高	气溶胶、假阳性

2.2 其他方法及比较分析

2.2.1 质谱检测法

质谱技术利用不同肉类样品特征性蛋白或者多肽, 并进行定性定量。质谱技术不受食品加工的过程影响, 因为氨基酸序列比核酸序列在加工过程中更容易保存; 同时实现定性与定量, 避免假阳性且定量结果更加准确可靠, 且能够同时监测多种掺假。质谱检测技术拥有更好的避免假阴性与假阳性结果的能力, 且能够避免由于加工所带来的 PCR 或者抗体相关空间结构破坏所带来的影响。冯静等^[35]通过采集羊、猪、鸭等市场常售的易混肉品上的血液、肌肉样本进行超声破碎后, 离心提取样本水浸液, 进行基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱(matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry, MALDI-TOF-MS)检测, 表明了基于 MALDI-TOF-MS 的肉类快速溯源检测方法具有可行性。此外, 王靖等^[36]通过电子鼻结合气相色谱-质谱法对宁夏小尾寒羊肉中鸭肉掺假的快速检测, 验证了此法应用于羊肉掺假鸭肉研究的可行性。质谱被普遍认为是一种特异性好、高灵敏、高通量、可靠准确的快速检测方法, 可以直接检测肉类中的蛋白质, 很容易区分出哪怕只有一个氨基酸差别的蛋白质, 所以质谱技术被寄予厚望。但利用质谱检测假肉最大的困难是如何找到特定物种的特异蛋白质或肽, 及如何排除可能存在的假阳性。

2.2.2 近红外光谱法

由于肉类中的有机化合物都含有不同的含氢基团, 通过对肉品进行近红外分析就可以测定这些组分的含量, 且可对样品直接进行检测, 无需前处理。现在肉制品检测技术正朝着经济、实时、无损的方向发展。该法具有快速、无损检测、样品无需前处理、可同时检测多个组分等优点,

质谱分析法与近红外光谱法的特点比较如表 4 所示。利用近红外肉类分析仪分析一个样品时间约为 1 min, 特别适用于原料肉的某些成分快速分析检测。借助主成分回归和偏最小二乘法(partial least squares, PLS), 近红外光谱能对牛肉、羊肉、猪肉和鸡肉进行区分, 模型的鉴别准确度达到 80%^[37,38]。孟一等^[37]采用近红外光谱技术结合模式识别方法, 建立猪肉、牛肉和羊肉的近红外定性识别模型, 识别准确率达 97%以上。各项研究表明, 利用近红外光谱法辨别猪肉、牛肉、鸡肉、羊肉是可行的。

表 4 质谱分析法与近红外光谱法的比较
Table 4 Comparison of mass spectrometry detection method and near-infrared spectroscopy method

方法	优点	缺点	可靠性
质谱分析法	灵敏度高, 可同时进行定性定量检测, 能检测多种掺假肉	不易找到特异性蛋白和肽以及排除假阳性	可靠准备
近红外光谱法	快速、无损检测、样品无需前处理	无法鉴别混合肉、准确率较低	较为可靠

2.2.3 电子鼻与电子舌法

田晓静等^[39]利用基于金属氧化物传感器阵列的电子鼻法对混有鸡肉的羊肉进行快速检测分析, 结果表明, 电子鼻法鉴别混入鸡肉的羊肉具有可行性, 该法样品预处理简单, 操作方便。此外, 利用电子鼻、电子舌快速鉴别混入不同量鸡肉、猪肉的掺假羊肉糜及其浸提溶液, 对掺假羊肉的电子舌信号进行分析时, 主成分分析可以基本能实现对混入不同含量猪肉、鸡肉的掺假羊肉实现区分。采用电子舌定性判别不同掺假羊肉和定量预测掺假羊肉中混杂其他成分的含量时, 其检测效果优于电子鼻, 采用电子鼻和电子舌联用信号方法能提高掺假羊肉的判别正确率和预测的精度^[40,41], 具有检测速度快、操作简单、重现性好等优点^[42]。

3 小结

随着技术进步鉴别的时间逐渐缩短、鉴别准确率逐渐提高、方法不断得到改进。利用 DNA 检测技术具备高灵敏、高特异、高通量、检测样品需求量少、检测范围广等优点; 此法定性检测容易, 但是很难判定掺假肉中成分比例。由于 DNA 的高温稳定性和高度守恒的性质, DNA 分析法已广泛用于肉类的品种鉴定。

传统的感官法鉴别假羊肉方便快捷, 但是需要一定的经验, 其准确性与鉴别人员的经验相关; 利用 PCR 法、RPA 分析法、LAMP 法等鉴别假羊肉准确性高, 但是需要专业人员进行检测, 另外还需耗费一定的时间和金钱。近年来发展的红外光谱无损技术不需要对样品进行前处理, 检测时间大大缩短, 可有效提高工作效率, 但其检测成本

较高, 鉴别准确率有待提升; 质谱检测法具有特异性好、高灵敏、高通量、准确快速等优点, 但是如何找到特定物种的特异蛋白质或肽, 及如何排除可能存在的假阳性成为该法目前面临的挑战。目前, 电子鼻与电子舌技术鉴别样品因羊肉掺假比例不同, 难以对成分进行有效判定与分析。

因此, 将多种检测手段相结合, 如利用红外光谱法检测快速的优点对样品进行初步检验, 若发现样品可疑对其进行控制, 然后利用 PCR 等检测手段进行精确验证, 可有效防止假羊肉流向市场; 此外, 开发低成本快速精准鉴定的试剂盒是假羊肉检测技术未来发展趋势。

参考文献

- [1] 汤一亮. 公安部通报: 犯罪团伙用狐狸、老鼠肉冒充羊肉销往市场 [DB/OL]. [2013-5-4]. <http://m.cnwest.com/data/html/content/9132590.html>
Tang YL. Ministry of public security informed: Criminal gangs with fox, rat meat posing as mutton sold in the market China [DB/OL]. [2013-5-4]. <http://m.cnwest.com/data/html/content/9132590.html>
- [2] 张聪. 山东临邑警方披露“假羊肉案”细节: 用鸭脯肉造假 148 吨 [DB/OL]. [2013-12-4]. <http://news.iqilu.com/shandong/yuanchuang/2013/1204/1769722.shtml>
Zhang C. Shandong Linyi police disclosed fake mutton case details: Faked with 148 tons of duck breast meat [DB/OL]. [2013-12-4]. <http://news.iqilu.com/shandong/yuanchuang/2013/1204/1769722.shtml>
- [3] 王晓易. 辽宁曝光假羊肉等十大食品犯罪案例[J]. 中国防伪报道, 2013, (6): 102-104.
Wang XY. Liaoning exposed fake mutton and other top ten food crime cases [J]. China Anti-cou Rep, 2013, (6): 102-104.
- [4] 阎婧琦. 大连甘区市场监管局查获两处制造假羊肉黑窝点[N]. 地铁时报, 2017-4-14.
Yan JQ. Dalian Ganqu market authority seized two manufacturing black sheep dens point [N]. Metro Times, 2017-4-14.
- [5] 李欣南, 关一夫. 掺假肉检验技术发展现状[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(5): 189-193.
Li XN, Guan YF. Present situation of testing technology of meat adulteration [J]. Food Res Dev, 2016, 37(5): 189-193.
- [6] 朱雨薇. 肉类掺假检测鉴定技术的研究进展[J]. 食品工业, 2014, 35(11): 242-247.
Zhu YW. The development trend of the meat adulteration detection and authentication technology [J]. Food Ind, 2014, 35(11): 242-247.
- [7] 巩红霞, 任永宏, 巩强. 用多重 PCR 方法鉴定生羊肉的真假[J]. 中国畜牧兽医, 2006, 33(8): 38-39.
Gong HX, Ren YH, Gong Q. Identification of true and false raw lamb by multiplex PCR [J]. China Anim Husb Vet Med, 2006, 33(8): 38-39.
- [8] Sanders R, Huggett J, Bushell CA, et al. Evaluation of digital PCR for absolute DNA quantification [J]. Anal Chem, 2011, (83): 6474-6484.
- [9] 胡伟, 陈荣华, 张晨, 等. 微滴式数字 PCR 技术用于生物样品种属鉴定和绝对定量[J]. 法医学杂志, 2014, 30(5): 342-345.
Hu W, Chen RH, Zhang C, et al. Species identification and absolute quantification of biological samples by droplet digital PCR [J]. J For Med, 2014, 30(5): 342-345.
- [10] 董莲华, 张玲, 姜君, 等. 大肠杆菌 O157:H7 微滴数字 PCR 定量方法

- 的建立[J]. 分析化学, 2015, 43(3): 319–324.
- Dong LH, Zhang L, Jiang J, *et al.* Development of droplet digital polymerase chain reaction for quantifying *Escherichia Coli* O157:H7 [J]. *Chin J Anal Chem*, 2015, 43(3): 319–324.
- [11] Morisset D, Stebih D, Milavec M, *et al.* Quantitative analysis of food and feed samples with droplet digital PCR [J]. *PLoS One*, 2013, 8(5): 1–9.
- [12] 姜羽, 胡佳莹, 杨立桃. 利用微滴数字 PCR 分析转基因生物外源基因拷贝数[J]. 农业生物技术学报, 2014, 22(10): 1298–1305.
- Jiang Y, Hu JY, Yang LT. Estimating the exogenous genes copy number of genetically modified organisms by droplet digital PCR [J]. *Chin J Agric Biotechnol*, 2014, 22(10): 1298–1305.
- [13] Cai YC, Li X, Lv R, *et al.* Quantitative analysis of pork and chicken products by droplet digital PCR [J]. *Bioed Res Int*, 2014, (8): 1–6.
- [14] 朱鹏宇. 利用微滴数字 PCR 定量检测食品或饲料样品[J]. 农业生物技术学报, 2013, (12): 1–6.
- Zhu PY. Quantitative analysis of food and feed samples with droplet digital PCR [J]. *J Agric Biotechnol*, 2013, (12): 1–6.
- [15] Brunetto GS, Massoud R, Leibovitch EC, *et al.* Digital droplet PCR (ddPCR) for the precise quantification of human lymphotropic virus 1 proviral loads in peripheral blood and cerebrospinal fluid of HAM/TSP patients and identification of viral mutations [J]. *J Neurovirol*, 2014, 20(4): 341–351
- [16] 张弛, 邱皓璞, 张筠. 荧光定量 PCR 检测肉制品中鸭源性成分[J]. 食品科学, 2013, 39(18): 154–157.
- Zhang C, Qiu HP, Zhang Y. Quantitative fluorescent PCR method for detection of duck-derived ingredients in meat products [J]. *Food Sci*, 2013, 39(18): 154–157.
- [17] 高敬, 魏迪, 赵葵荣. 常见肉类鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 356–360.
- Gao J, Wei D, Zhao KR. Recent progress on commonly used techniques for identification of meat species [J]. *Food Sci*, 2014, 35(11): 356–360.
- [18] 何玮玲, 黄明, 张弛. 食品中肉类成分种属鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(3): 304–307.
- He WL, Huang M, Zhang C. Recent technological advances for identification of meat species in food products [J]. *Food Sci*, 2012, 33(3): 304–307.
- [19] Dooley JJ, Paine KE, Garrett SD, *et al.* Detection of meat species using TaqMan real-time PCR assays [J]. *Meat Sci*, 2004, 68(3): 431–438.
- [20] Notomi T, Okayama H, Masubuchi H, *et al.* Loop-mediated isothermal amplification of DNA [J]. *Nucleic Acid Res*, 2000, 28(12): 63.
- [21] Bühlmann A, Pothier JF, Rezzonico F, *et al.* Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) assay for rapid pathogen detection and on-site diagnosis of fire blight [J]. *J Microbiol Meth*, 2013, 92(3): 332–339.
- [22] 江再茂, 马雪萍, 殷竹君, 等. 单管可视化环介导等温扩增技术快速检测恶性疟原虫[J]. 现代生物医学进展, 2014, 14(26): 5014–5018.
- Jiang ZM, Ma XP, Yin ZJ, *et al.* A closed-tube isothermal amplification method for highly sensitive and visualized detection of *plasmodium falciparum* [J]. *Prog Mod Biomed*, 2014, 14(26): 5014–5018.
- [23] Scheel CM, Zhou Y, Theodoro RC, *et al.* Development of a loop-mediated isothermal amplification method for detection of *Histoplasma capsulatum* DNA in clinical samples [J]. *J Clin Microbiol*, 2014, 52(2): 483–488.
- [24] 初亚男, 封利颖, 张婕妤, 等. 环介导等温扩增技术改进的研究进展[J]. 微生物学通报, 2015, 42(4): 729–735.
- Chu YN, Feng LY, Zhang JY, *et al.* A systematic review of the research progress and improvement of loop-mediated isothermal amplification [J]. *Microbiol China*, 2015, 42(4): 729–735.
- [25] 李向丽, 刘焱, 谭贵良, 等. 基于 LAMP 法快速检测羊肉及其制品中的猪、鸭和羊源性成分[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(3): 247–252.
- Li XL, Liu Y, Tan GL, *et al.* Identification of porcine, duck and sheep-derived materials in mutton and its products by LAMP assay [J]. *Chin J Food Hyg*, 2015, 27(3): 247–252.
- [26] 杨丽霞, 邱华丽, 蒋成, 等. 可视化环介导等温扩增技术检测鸡鸭源性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(2): 624–628.
- Yang LX, Qiu H, Jiang C, *et al.* Visual detection of chicken and duck derived components by loop-mediated isothermal amplification method [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(2): 624–628.
- [27] 曾军辉. 可视化环介导等温扩增技术研究进展[J]. 广东畜牧兽医科技, 2016, 41(1): 8–10, 19.
- Zeng JH. Review on visualizable loop-mediated isothermal amplification [J]. *Guangdong J Anim Vet Sci*, 2016, 41(1): 8–10, 19.
- [28] 罗宝正, 赵福振, 邵建宏, 等. 羊源性成分的 LAMP 检测方法的引物、检测方法和试剂盒. 中国: CN105838807A [P]. 2016-8-10.
- Luo BZ, Zhao FZ, Shao JH, *et al.* Primers, detection methods and kits for LAMP detection methods of sheep-derived components. China: CN105838807A [P]. 2016-8-10.
- [29] Piepenburg O, Williams CH, Stemple DL, *et al.* DNA detection using recombination proteins [J]. *PLoS Biol*, 2006, 4(7): 1115–1121.
- [30] Crannell ZA, Rohman B, Richards-Kortum R. Equipment-free incubation of recombinase polymerase amplification reactions using body heat [J]. *PLoS One*, 2014, 9(11): e112146.
- [31] 彭华康, 吴兴泉. RPA 技术及其在食品检测中的应用[J]. 分子植物育种, 2018, 16(7): 2244–2248.
- Peng HK, Wu XQ. The technology of recombinase polymerase amplification (RPA) and its usage on food detection [J]. *Mol Plant Breed*, 2018, 16(7): 2244–2248.
- [32] 喻勇新, 荣国光, 刘永军, 等. 基于 RPA 技术检测羊源性成分的引物、探针、试剂盒及其应用. 中国: CN107574251A [P]. 2018-01-12.
- Yu YX, Rong GG, Liu YJ, *et al.* Primers, probes, kits and their applications for detecting sheep-derived components based on RPA technology. China: CN107574251A [P]. 2018-01-12.
- [33] 王金斌, 唐雪明, 王荣谈, 等. 一种检测猪源性成分的 RPA 引物、试剂盒及检测方法. 中国: CN106987647A [P]. 2017-7-28.
- Wang JB, Tang XM, Wang RT, *et al.* A RPA primer, kit and detection method for detecting porcine-derived components. China: CN106987647A [P]. 2017-7-28.
- [34] 王金斌, 唐雪明, 王荣谈, 等. 一种检测鸭源性成分的 RPA 引物、试剂盒及检测方法. 中国: CN106967838A [P]. 2017-7-21.
- Wang JB, Tang XM, Wang RT, *et al.* A RPA primer, kit and detection method for detecting duck-derived components. China: CN106967838A [P]. 2017-7-21.
- [35] 冯静, 刘琳, 黄孟军, 等. 基于飞行时间质谱的快速肉类溯源检测方法 [C]. 北京: 第四届中国北京国际食品安全高峰论坛论文集, 2011: 200–204.
- Feng J, Liu L, Huang MJ, *et al.* Rapid detection the origin of meat using MALDI-TOF MS [C]. Beijing: Proceedings of the Fourth International

- Food Safety Summit 2011: 200–204.
- [36] 王靖, 李璐, 王佳奕, 等. 电子鼻结合气相色谱-质谱法对宁夏小尾寒羊肉中鸭肉掺假的快速检测[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 222–228.
Wang Q, Li L, Wang JY. Rapid detection of Ningxia small-tailed han sheep meat adulterated with duck by electronic nose combined with GC-MS [J]. Food Sci, 2017, 38(20): 222–228
- [37] 孟一, 张玉华, 王家敏, 等. 基于近红外光谱技术快速识别不同动物源肉品[J]. 食品科学, 2014, 35(6): 156–158.
Meng Y, Zhang YH, Wang JM, *et al.* Rapid identification of meat of different animal origins based on near infrared spectroscopy [J]. Food Sci, 2014, 35(6): 156–158.
- [38] 孙淑敏, 郭波莉, 魏益民, 等. 近红外光谱指纹分析在羊肉产地溯源中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 937–941.
Sun SM, Guo BL, Wei YM, *et al.* The application of near-infrared spectroscopy fingerprint analysis to the source of mutton origin [J]. Spectrosc Spect Anal, 2011, 31(4): 937–941.
- [39] 田晓静, 王俊, 崔绍庆. 电子鼻快速检测区分羊肉中的掺杂鸡肉[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 2997–3001.
Tian XJ, Wang J, Cui SQ. Fast discriminating of chicken adulteration in minced mutton by electronic nose [J]. Mod Food Sci Technol, 2013, 29(12): 2997–3001.
- [40] 田晓静. 基于电子鼻和电子舌的羊肉品质检测[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Tian XJ. Quality detection of mutton based on electronic nose and electronic tongue[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [41] Tian XJ, Wang J, Cui SQ, *et al.* Analysis of pork adulteration in minced mutton using electronic nose of metal oxide sensors [J]. J Food Eng, 2013, 119(4): 744–749.
- [42] Sliwinska M, Wisniewska P, Dymerski T, *et al.* Food analysis using artificial senses [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(7): 1423–1448.

(责任编辑: 陈雨薇)

作者简介



刘达玉, 硕士, 教授, 主要研究方向为食品加工。

E-mail: liudy1014@163.com