

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80989

基于 Waters TQ-XS 三重四极杆液相质谱联用仪 鉴别鸭肉掺假牛羊肉

张 峰¹ 邹 颖² 沈雪映³(1. 浙江省杭州市公安局环境和食品药品犯罪侦查支队, 浙江 杭州 310000; 2. 杭州余杭叶开泰
综合门诊部有限公司, 浙江 杭州 310000; 3. 杭州中美华东制药有限公司, 浙江 杭州 310031)

摘要: [目的] 开发一种基于 Waters TQ-XS 三重四极杆液相质谱联用仪的高效检测方法, 用于鉴别鸭肉冒充牛羊肉的现象。[方法] 通过高效液相色谱串联质谱 (HPLC-MS/MS) 技术, 筛选和验证牛肉、羊肉和鸭肉的特异性多肽离子对, 建立多反应监测 (MRM) 模式下的定性和定量分析方法, 进行样品的前处理及质谱条件优化。[结果] 该方法具有良好的线性关系 ($R^2 > 0.99$), 灵敏度高, 最低定量限为 0.5%。不同掺假比例下的检测结果表明, 该方法能够准确、快速地鉴别和定量鸭肉冒充牛羊肉的样品。实际样品检测结果与 PCR 方法一致。[结论] 该方法在样品处理和灵敏度方面表现出较好的性能, 适用于肉制品中鸭肉掺假牛羊肉的快速鉴别与定量分析, 可为肉类产品质量控制、市场监管以及防范肉类掺假行为提供有效的技术支持。

关键词: 三重四极杆液相质谱联用仪; 食品掺假; 多肽检测; 定量分析; 牛肉; 羊肉; 鸭肉

Identification of duck meat adulteration in beef and lamb using Waters TQ-XS Triple quadrupole liquid chromatography-mass spectrometry

ZHANG Feng¹ ZOU Ying² SHEN Xueying³

(1. Environmental and Food and Drug Crime Investigation Detachment, Hangzhou Municipal Public Security Bureau, Hangzhou, Zhejiang 310000, China; 2. Hangzhou Yuhang Yekaitai Comprehensive Clinic Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China; 3. Hangzhou Zhongmei Huadong Pharmaceutical Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310031, China)

Abstract: [Objective] To develop an efficient detection method based on the Waters TQ-XS triple quadrupole liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS/MS) system for identifying cases of duck meat being substituted for beef or lamb. [Methods] Using high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS), specific peptide ion pairs of beef, lamb, and duck were screened and validated. A qualitative and quantitative analysis method was established under multiple reaction monitoring (MRM) mode, with optimization of sample pretreatment and mass spectrometry conditions. [Results] The method showed good linearity ($R^2 > 0.99$), high sensitivity, and a minimum limit of quantification of 0.5%. Detection of samples with different adulteration ratios demonstrated that the method could accurately and rapidly identify and quantify duck meat substituted for beef or lamb. Results from actual sample testing were consistent with those obtained by PCR. [Conclusion] This method demonstrates excellent performance in sample processing and sensitivity, and is suitable for the rapid identification and quantitative analysis of duck meat adulterated into beef and lamb products. It can provide effective technical support for meat quality control, market supervision, and prevention of meat adulteration.

Keywords: triple quadrupole liquid chromatography-mass spectrometry; food adulteration; peptide detection; quantitative analysis; beef; lamb; duck

通信作者: 张峰 (1975—), 男, 浙江省杭州市公安局环境和食品药品犯罪侦查支队工程师, 学士。E-mail: 707136943@qq.com

收稿日期: 2024-09-26 改回日期: 2025-09-23

引用格式: 张峰, 邹颖, 沈雪映. 基于 Waters TQ-XS 三重四极杆液相质谱联用仪鉴别鸭肉掺假牛羊肉[J]. 食品与机械, 2026, 42(1): 58-63.

Citation: ZHANG Feng, ZOU Ying, SHEN Xueying. Identification of duck meat adulteration in beef and lamb using Waters TQ-XS Triple quadrupole liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 58-63.

食品掺假是全球食品安全领域面临的重大问题之一^[1]。近年来,市场上频繁出现利用价格较低的肉类如鸭肉冒充高价牛羊肉的现象,这不仅损害了消费者的权益,也扰乱了市场秩序^[2-3]。传统的鉴别方法如聚合酶链式反应(PCR)、酶联免疫吸附测定(ELISA)和凝胶电泳技术虽然在一定程度上能够检测食品掺假^[4],但存在样品处理复杂、检测时间长、灵敏度和特异性不足等问题,无法满足快速、高效的食品安全检测需求^[5-6]。

近年来,质谱技术在食品掺假检测中的应用逐渐受到关注。质谱技术通过检测食品中的特异性多肽离子对,能够实现对不同肉类的快速、准确鉴别^[7-8]。张慧艳等^[9-10]研究表明,高效液相色谱串联质谱(HPLC-MS/MS)技术在鉴别掺假牛肉中的猪肉和鸡肉方面具有显著优势,能够快速、准确地进行定性和定量分析。此外,还有研究^[11-13]证实了质谱技术在食品掺假检测中的广泛应用和高效性。尽管质谱技术在掺假肉类的鉴别中取得了显著成果,但针对鸭肉冒充牛羊肉的研究仍较少。现有研究多集中于猪肉和鸡肉的掺假检测,缺乏对鸭肉掺假的系统性研究和验证。

研究拟利用 Waters TQ-XS 三重四极杆液相质谱联用仪,通过筛选和验证牛肉、羊肉和鸭肉的特异性多肽离子对,开发一种基于多反应监测(MRM)模式的 HPLC-MS/MS 检测方法,旨在为食品安全检测提供一种新的技术手段。

1 材料与方法

1.1 试验材料

牛肉:大厂回族自治县福盛源肉类有限公司;

羊肉:青海祁连县有机畜牧业有限公司;

鸭肉:北京湘村高科生态农业有限公司;

DNA 提取试剂盒:上海生物技术有限公司;

胰蛋白酶:酶活 $\geq 8\ 000$ USP/mg,美国 Promega 公司;

二硫苏糖醇(DTT):分析纯,美国 Promega 公司;

碘乙酰胺(IAA):分析纯,美国 Sigma 公司;

甲酸、乙酸、乙腈:色谱纯,德国 Merck 公司;

三重四极杆质谱联用仪:TSQ Ultra EMR 型,美国 Thermo Fisher 公司;

高分辨液质联用系统:Orbitrap Fusion 型,美国 Thermo Fisher 公司;

微量分光光度计:NanoDrop 2000 型,美国 Thermo Scientific 公司;

数字 PCR 液滴发生器:QX200 型,美国 Bio-Rad 公司;

热循环仪:C1000 Touch 型,美国 Bio-Rad 公司;

液滴读取器:QX200 Droplet Reader 型,美国 Bio-Rad 公司。

1.2 样品前处理

将鸭肉按质量比分别加入牛肉或羊肉中,设定比例

为 0.5%,1.0%,5.0%,10.0%,25.0%^[7]。各原料肉样经统一绞碎、称量后充分混合,立即冷冻保存用于检测。其中,为避免样品差异的干扰,所有肉样品均选择同一批次的部位进行处理,其中牛肉选自前腿肉部位,羊肉选自肩部肉,鸭肉选自胸肌部分。准确称取 2 g 样品,加入 5 mL 提取液(0.05 mol/L Tris-HCl,7 mol/L 尿素,2 mol/L 硫脲,pH 8.0),在冰水浴中均质处理。将样品在 4℃下以 12 000 r/min 离心 20 min,收集上清液用于后续分析。加入适量的 DTT 溶液并在 56℃下反应 1 h,然后加入 IAA 溶液在暗处反应 30 min。最后,加入胰蛋白酶进行酶解,并使用 HLB 固相萃取柱除盐。

1.3 仪器条件设置

在液相色谱系统中使用 C₁₈ 色谱柱进行分离,流动相 A 为 0.1% 甲酸水溶液,流动相 B 为 0.1% 甲酸乙腈溶液。质谱条件设置为喷雾电压 2 100 V,毛细管温度 275℃,采用 Full Scan 模式进行扫描,扫描质量范围 350~1 600 (*m/z*)。数据采集采用 Maxquant 软件进行非标记定量分析,检索数据库为 Uniprot 全库^[14]。

1.4 多肽定性分析方法的建立

利用高分辨质谱仪(nLC-QE)分别找出牛肉、羊肉和鸭肉的特异性多肽链,进行二级扫描以获得特异性离子对的信息。通过 HPLC-MS/MS 的 MRM 模式对牛肉、羊肉和鸭肉样品进行扫描,筛选和验证各个物种的特异性多肽离子对。通过对比每组离子对的保留时间、响应强度等,对每个物种的特异性离子对进行筛查,以确定定性及定量离子对。

1.5 多肽定量分析方法的建立

利用 HPLC-MS/MS 在 MRM 模式下对掺杂比例分别为 0.5%,1.0%,5.0%,10.0%,25.0% 的混合样品进行定量测定。绘制标准曲线,以多肽混合比例为横坐标,以所选取的多肽选择离子峰面积为纵坐标进行曲线拟合,从而实现不同掺假比例样品的定量分析。

1.6 PCR 验证方法

使用商业 DNA 提取试剂盒从 100 mg 粉末样品中提取 DNA,并通过琼脂糖凝胶电泳和 NanoDrop 检测 DNA 质量和浓度。为检测和定量牛肉、羊肉和鸭肉,设计了基于 Bos taurus beta-actin、Ovis aries 和 Anas platyrhynchos 基因的引物和探针,并通过 BLAST 验证其特异性(表 1)。PCR 反应体系为 20 μ L,包括 BBI 生命科学有限公司的 10 μ L 2 \times TaqMan 通用混合液、6.8 μ L ddH₂O、1 μ L DNA 模板和 200 nmol/L 的引物和探针,反应条件为 94℃预变性 3 min,接着进行 45 个循环:95℃5 s、60℃15 s 和 72℃30 s。然后使用 Bio-Rad 的 QX200 液滴生成器将反应混合物分为约 20 000 个液滴,并在 Bio-Rad 的 C1000 热循环仪中进行 PCR,条件为 95℃10 min,随后进行 40 个循环的 94℃30 s 变性和 60℃1 min 退火/延伸,最后在 98℃

表 1 牛肉、羊肉和鸭肉的引物和探针序列
Table 1 Primer and probe sequences for beef, lamb, and duck

物种	引物名称	序列(5'→3')
牛肉	Forward Primer (F)	ATACTCCATCCAGAACACCCAG
	Reverse Primer (R)	ATGCGAAGCAGCTCCAAGT
	Probe	HEX-CTTCTCTGAAACCATC-MGB
羊肉	Forward Primer (F)	CAGCCCTCGCCATAGTTCAC
	Reverse Primer (R)	TTGTCTGGGTCTCCGAGTAAGTC
	Probe	HEX-TCTTCCTCCACGAAACAGGATCCAACA-MGB
鸭肉	Forward Primer (F)	GATTCTACTTCACCGCCCTAC
	Reverse Primer (R)	CTACGAAGTGTCAGTATCAGGC
	Probe	FAM-ATCCACCTTCCTAACCGTCTGCC-MGB

10 min。通过液滴读取器读取液滴的阳性和阴性信号,并使用 QuantaSoft 软件计算 DNA 拷贝数^[15-16]。

1.7 质量控制与重复性

引入已知掺假比例的质控样品,确保试验的准确性。每组试验重复 3 次,计算平均值和标准差,以评估试验的重复性和可靠性。

1.8 数据分析与指标计算

1.8.1 HPLC-MS/MS 数据 通过 Waters MassLynx 软件采集液质联用分析数据,记录目标多肽离子的峰面积、保留时间及信号强度。使用特异性离子对的峰面积作为定量分析的基础。

1.8.2 PCR 数据 通过 Bio-Rad 的 QuantaSoft 软件处理液滴数字 PCR 信号,计算阳性和阴性液滴比例,确定 DNA 拷贝数。

1.8.3 最低检测限(LOD)和定量限(LOQ) 依据国际食品安全检测标准,以信噪比(S/N) ≥ 3 和 $S/N \geq 10$ 分别确定 LOD 和 LOQ。

1.8.4 精密度和回收率计算 选取鸭肉掺入牛肉与羊肉的不同比例混合样品(0.5%, 1.0%, 5.0%, 10.0%, 25.0%),分别进行 3 次重复测定,计算相对标准偏差(RSD)评估方法的精密度;通过理论值与实测值的比值计算回收率。

1.9 数据处理与方法验证

试验数据采用线性回归分析方法进行处理,计算相关系数并确定方法的定量限。所有试验数据均采用 Excel 和 SPSS 软件进行统计分析,以确保数据处理的准确性和可靠性。通过计算各定量离子的线性相关系数(R^2)来评估方法的线性关系,并通过对多组数据进行重复试验,验证方法的灵敏度和准确性。最终确定该方法的最低定量限为 0.5%,并确保试验结果的可信度。为进一步评估检测方法的可行性与稳定性,将 HPLC-MS/MS 方法的结果与 PCR 方法的结果进行对比,以验证方法的准确性。使用 t 检验或 ANOVA 等统计方法评估试验结果的显著性。通过对比试验和统计检验,确保方法的可靠性和有效性,

为进一步推广应用奠定基础。

2 结果与分析

2.1 不同物种特异性多肽离子对的筛选与分析

为实现牛肉、羊肉与鸭肉的有效鉴别,首先利用高分辨质谱仪(nLC-QE)对 3 种肉类样品进行特异性多肽离子对的筛选。由表 2 可知,牛肉、羊肉和鸭肉分别筛选出 9, 8, 7 组特异性离子对。在每种肉类样品中均呈现特定的离子特征,这些特异性多肽离子对表现出较高的保留时间分辨率及离子丰度稳定性,展示了质谱方法在样品分析中的高灵敏度和高选择性。在 MRM 模式下进一步验证上述离子对的可检测性和重复性(表 3 和图 1),通过对比分析每种肉类样品的特异性离子对在保留时间、前体离子(m/z)及产物离子(m/z)的差异性方面显示出显著的特点,进一步增强了分析的准确性和可重复性。上述筛选结果验证了特异性离子对在不同物种间的显著区分能力,且保留时间重现性好,峰面积稳定,说明高分辨筛选+MRM 验证的组合策略具有高度的检测可靠性和选择性。类似的 MRM 策略已在猪、鸡等肉类掺假中广泛使用^[9-10],但针对鸭肉的特异性离子筛选仍较少。此外,相较于传统基于蛋白或 DNA 扩增的种属鉴别方法,研究所建立的多肽级离子对筛选策略在稳定性、抗干扰性和高通量检测方面更具优势,特别适用于复杂样品背景下的快速识别。

2.2 不同掺假比例下的定量分析结果及标准曲线

在设置鸭肉掺假比例为 0.5%, 1.0%, 5.0%, 10.0%, 25.0% 的混合样本中,采用 HPLC-MS/MS 的 MRM 模式对牛肉与羊肉中掺假成分进行检测,并构建标准曲线。由表 4 可知,多肽离子峰面积与掺假比例之间呈现良好的线性关系($R^2 > 0.997$),表明方法具有优良的定量能力。该线性趋势的稳定性源于所选离子对信号响应强、保留时间一致,加上样品前处理和酶解步骤的优化,提高了整体数据的一致性。与已有研究^[9,17]中关于鸡肉或猪肉掺假检测的相关成果一致。试验证明,在 MRM 模式下多肽离

表 2 牛肉、羊肉及鸭肉特异性多肽离子对检测数据

Table 2 Detection data of specific peptide ions for beef, lamb, and duck													
样品 编号	母离子 (<i>m/z</i>)	子离子 (<i>m/z</i>)	离子丰 度比/%	保留时 间/min	离子 模式	碰撞能 量/eV	样品 编号	母离子 (<i>m/z</i>)	子离子 (<i>m/z</i>)	离子丰 度比/%	保留时 间/min	离子 模式	碰撞能 量/eV
beef_1	475.76	608.71	100	8.53	+	19	lamb_4	678.33	594.81	29	13.12	+	27
beef_2	582.67	494.56	17	8.83	+	23	lamb_5	714.22	508.53	85	12.65	+	29
beef_3	663.79	407.53	28	11.28	+	26	lamb_6	747.89	523.61	42	13.45	+	30
beef_4	681.78	446.52	80	14.57	+	26	lamb_7	812.53	602.72	91	14.11	+	32
beef_5	744.37	446.52	24	8.64	+	29	lamb_8	873.65	617.54	58	15.32	+	34
beef_6	784.86	425.46	65	13.24	+	30	duck_1	609.67	418.43	18	9.93	+	24
beef_7	831.92	522.59	45	12.64	+	32	duck_2	718.37	549.56	29	8.00	+	24
beef_8	902.01	487.53	94	11.30	+	34	duck_3	783.40	629.76	42	5.60	+	30
beef_9	1 023.10	449.48	100	11.46	+	35	duck_4	794.93	520.69	80	10.49	+	30
lamb_1	563.79	662.84	100	9.54	+	23	duck_5	812.36	502.59	72	6.95	+	31
lamb_2	584.88	712.62	34	10.38	+	24	duck_6	833.91	506.62	100	7.33	+	32
lamb_3	623.57	487.72	76	11.27	+	25	duck_7	1 061.71	505.59	4	13.71	+	35

表 3 牛肉、羊肉和鸭肉的 MRM 检测结果

Table 3 MRM detection results of beef, lamb, and duck							
样品编号	保留时间/min	前体离子(<i>m/z</i>)	产物离子(<i>m/z</i>)	峰面积	总离子流	噪声水平	分辨率
a1 (Beef_5)	8.53	347.77	646.52	1 800	25 000	50	15 000
a2 (Beef_5)	8.83	582.67	595.67	1 600	24 000	45	14 000
a3 (Beef_5)	11.28	663.79	662.84	1 400	23 000	48	14 500
b1 (Lamb_4)	6.44	658.21	416.50	1 400	22 000	55	14 700
b2 (Lamb_4)	6.41	658.21	659.71	1 450	22 500	52	15 200
b3 (Lamb_4)	6.44	658.21	602.66	1 350	21 500	50	15 000
c1 (Duck_1)	7.53	326.77	563.79	2 000	26 000	60	15 500
c2 (Duck_1)	7.83	326.77	495.67	1 850	25 500	58	15 000
c3 (Duck_1)	10.28	563.79	562.84	1 700	24 500	55	14 800

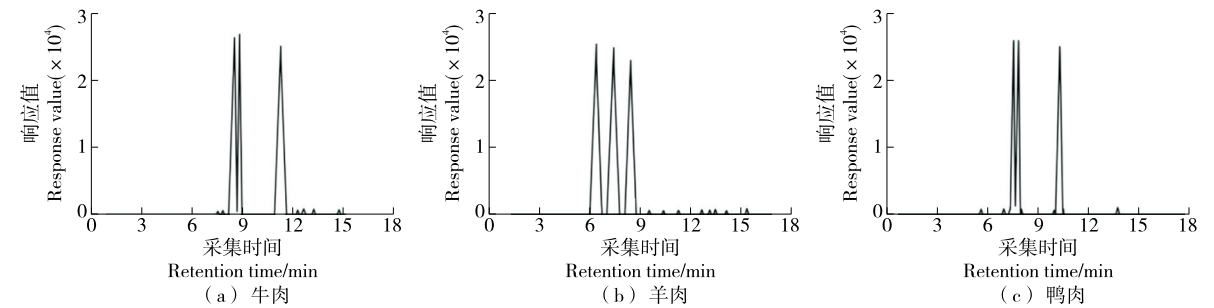


图 1 牛肉、羊肉和鸭肉的目标特异性离子对在不同保留时间点下的提取离子流色谱图

Figure 1 Extracted ion chromatograms of target specific ions for beef, lamb, and duck at different retention time periods

子可作为可靠的定量标志物,适用于鸭肉掺假牛羊肉的场景。此外,相比 ELISA 等方法,试验方法无需抗体依赖、干扰低,适合快速响应食品掺假事件的检测需求^[18]。

2.3 灵敏度分析

在灵敏度评估中,方法的最低定量限为 0.5%,最低检测限(LOD)可达 0.05%(表 5),说明其对极低比例掺假样品仍具有识别能力。在各掺假比例下的回收率为 98.52%~110.50%,相对标准偏差(RSD)为 1.2%~2.5%,反映出良好的重复性与精密度。该方法的高灵敏性得益于质谱平台(Waters TQ-XS)在离子响应与信噪控制方面的优异性能,同时也与前处理过程中对酶解效率、去盐流程的优化密切相关。相较于 PCR 方法在低浓度下可能出现

表 4 不同掺假比例下的定量分析结果及标准曲线
Table 4 Quantitative analysis results and standard curves at different adulteration ratios

掺假比例/%	牛肉(峰面积)	羊肉(峰面积)	标准曲线方程	相关系数(R^2)
0.5	1 523	1 402	$y=5\,023.8x+1\,928.3$	0.997 6
1.0	3 045	2 845	$y=10\,047.6x+3\,856.6$	0.998 2
5.0	15 230	14 225	$y=50\,238x+19\,283$	0.999 3
10.0	30 450	28 450	$y=100\,476x+38\,566$	0.999 7
25.0	76 125	71 125	$y=251\,190x+96\,415$	0.999 9

表 5 不同掺假比例下的灵敏度分析结果
Table 5 Sensitivity analysis results at different adulteration ratios %

掺假比例	LOD	LOQ	回收率	RSD
0.5	0.05	0.5	110.50	2.5
1.0	0.06	0.5	103.80	1.9
5.0	0.05	0.5	102.40	2.0
10.0	0.08	0.5	98.52	1.7
25.0	0.07	0.5	99.70	1.2

假阴性的问题^[19],HPLC-MS/MS 表现出更低的检测极限与更强的量化能力。

2.4 方法的准确性和抗干扰能力

为验证方法的准确性与抗干扰能力,使用已知比例的质控样品进行分析,由表 6 可知,各组回收率均为 90%~125%,实测值与理论值高度一致。同时,在质控样品和实际样本中均未检测到干扰离子,反映出试验方法在复杂基质下仍具良好适应性。这一结果说明,所构建的多肽离子筛选体系不仅准确性高,而且在处理实际样品过程中表现出强抗基质效应能力。基质效应是限制食品质谱应用的重要因素之一^[19],而通过优化离子对、参数设定及萃取流程能够有效规避此类干扰。

表 6 质控样品的回收率和抗干扰能力
Table 6 Recovery and anti-interference capacity of quality control samples %

掺假比例	实测值	回收率	掺假比例	实测值	回收率
0.5	0.55	110.50	10.0	9.85	98.52
1.0	1.03	103.80	25.0	24.75	99.70
5.0	5.12	102.40			

2.5 实际样品检测与应用验证

对市场购买的两批牛肉干样品进行检测,由表 7 可知,样 1 中鸭肉为主要成分,掺假比例>50%,样 2 掺假比例约为 30%。结果显示,HPLC-MS/MS 方法可准确识别实际加工食品中的掺假来源,并对其比例进行量化。这

表明,该方法不仅在试验条件下可实现鸭肉掺假定量分析,在实际复杂样本中亦具备良好的适用性和准确性。特别是在肉制品加工过程中蛋白降解、样品复合背景较强的情况下,传统方法往往受限,而 HPLC-MS/MS 凭借分离能力与选择性,在这类样品中的识别效果更优^[20]。

表 7 实际样品的检测结果
Table 7 Detection results of actual samples

样品编号	检测结果	掺假比例/%
样 1	鸭肉含量>50%,为主要成分	>50.13
样 2	鸭肉含量约为 30%,存在中度掺假	30.40

2.6 与 PCR 结果的对比分析

将 HPLC-MS/MS 检测结果与 PCR 检测结果进行对比分析(表 8),发现两者在掺假种属识别和掺假比例检测方面具有高度一致性,进一步证实了所建立方法的准确性与可靠性。相较于 PCR 方法,HPLC-MS/MS 在分析流程中可直接基于蛋白质表达产物进行多肽离子检测,避免了 PCR 对 DNA 质量依赖及操作流程繁琐的问题^[19]。此外,在低掺假比例下,PCR 方法可能因扩增效率或引物竞争而导致假阴性,而质谱方法的定量稳定性与灵敏度更具优势。因此,该方法不仅可作为 PCR 的有力补充,亦有望在未来食品掺假检测中成为主流技术。

表 8 HPLC-MS/MS 与 PCR 检测结果的对比
Table 8 Comparison of HPLC-MS/MS and PCR detection results

样品编号	HPLC-MS/MS 检测结果	PCR 检测结果
样 1	鸭肉含量>50%,为主要成分	检出鸭肉成分,比例>50%
样 2	鸭肉含量约 30%,存在中度掺假	检出鸭肉成分,比例约 30%

3 结论

该研究利用 Waters TQ-XS 三重四极杆液相质谱联用仪成功鉴别了鸭肉冒充牛羊肉的问题。通过筛选和验证特异性多肽离子对,建立了多反应监测(MRM)模式下的定性和定量分析方法。结果表明,该方法具有较高的灵敏度和特异性,能够准确识别和定量掺假样品,最低定量限为 0.5%。此外,HPLC-MS/MS 方法与 PCR 检测结果高度一致,能够准确识别掺假成分。这验证了 HPLC-MS/MS 方法的可靠性,并显示该方法在实际应用中的有效性。研究中仅验证了鸭肉掺假牛羊肉,未来应扩展至更多肉类品种,并进一步验证方法在复杂样品中的适用性。

参考文献

[1] SPINK J, MOYER D C. Defining the public health threat of

- food fraud[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(9): R157-R163.
- [2] 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.
- [3] 贝君, 王珂雯, 程雅晴, 等. 我国肉制品安全风险及监管建议[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(16): 5 540-5 546.
- BEI J, WANG K W, CHENG Y Q, et al. Safety risks and supervision suggestions of meat products in China[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(16): 5 540-5 546.
- [4] RUBERT J, ZACHARIASOVA M, HAJŠLOVA J. Advances in high-resolution mass spectrometry based on metabolomics studies for food – a review[J]. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 2015, 32(10): 1 685-1 708.
- [5] 付尚辰, 李玲, 郑卫民, 等. 掺假羊乳及其制品中牛乳的检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(8): 3 000-3 007.
- FU S C, LI L, ZHENG W M, et al. Research progress on adulteration detection technology of cow milk in goat milk and its products[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(8): 3 000-3 007.
- [6] 余卉茹, 纪艺, 彭城, 等. 肉类掺假检测技术研究进展[J]. *生物技术进展*, 2022, 12(2): 213-221.
- YU H R, JI Y, PENG C, et al. Research progress on detection technology of meat adulteration[J]. *Current Biotechnology*, 2022, 12(2): 213-221.
- [7] 路宇轩, 翟睿, 吴帆, 等. 肉类掺假检测方法及其研究进展[J]. *计量学报*, 2023, 44(6): 1 000-1 008.
- LU Y X, ZHAI R, WU F, et al. Research progress on detection technology of meat adulteration[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2023, 44(6): 1 000-1 008.
- [8] CARRERA M, ABRIL A G, PAZOS M, et al. Proteins and peptides: proteomics approaches for food authentication and allergen profiling[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2024, 57: 101172.
- [9] 张慧艳, 刘诗文, 齐诗哲, 等. 食品组学技术在食品真伪鉴别和溯源方面应用进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(3): 948-955.
- ZHANG H Y, LIU S W, QI S Z, et al. Application progress of food omics technology in food authenticity identification and traceability[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(3): 948-955.
- [10] NICOLICH R S, WERNECK-BARROSO E, MARQUES M A S. Food safety evaluation: detection and confirmation of chloramphenicol in milk by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 565(1): 97-102.
- [11] CUBERO-LEON E, PEÑALVER R, MAQUET A. Review on metabolomics for food authentication[J]. *Food Research International*, 2014, 60: 95-107.
- [12] 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.
- WANG Y R, BAI S, LUO R M, et al. Identification of adulteration of roast mutton using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometric methods[J]. *Food Science*, 2022, 43(4): 291-298.
- [13] 沈央红, 方金玉, 朱军莉, 等. 代谢组学在食品安全与质量领域应用研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 282-289.
- SHEN Y H, FANG J Y, ZHU J L, et al. Advance in the application of metabonomics in the field of food safety and quality[J]. *Food Science*, 2023, 44(5): 282-289.
- [14] STACHNIUK A, SUMARA A, MONTOWSKA M, et al. Liquid chromatography-mass spectrometry bottom-up proteomic methods in animal species analysis of processed meat for food authentication and the detection of adulterations[J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 2021, 40(1): 3-30.
- [15] WINTON L M, STONE J K, WATRUD L S, et al. Simultaneous one-tube quantification of host and pathogen DNA with real-time polymerase chain reaction[J]. *Phytopathology*, 2002, 92(1): 112-116.
- [16] PINHEIRO L B, COLEMAN V A, HINDSON C M, et al. Evaluation of a droplet digital polymerase chain reaction format for DNA copy number quantification[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(2): 1 003-1 011.
- [17] 黎星, 吴婉琴, 陈冉, 等. 超高效液相色谱—高分辨质谱组学技术鉴别咖啡掺假[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(24): 169-176.
- LI X, WU W Q, CHEN R, et al. Identification of coffee adulteration by ultra performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry combined with omics technology[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(24): 169-176.
- [18] 刘楠, 许利丽, 张晓梅, 等. 基于高分辨质谱的食品致敏蛋白检测研究进展[J]. *分析测试学报*, 2023, 42(12): 1 666-1 672.
- LIU N, XU L L, ZHANG X M, et al. Research progress on detection of food allergic protein based on high-resolution mass spectrometry[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2023, 42(12): 1 666-1 672.
- [19] 魏莹, 杨艳歌, 赵健淞, 等. 食源性甲型肝炎病毒快速检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(6): 74-82.
- WEI Y, YANG Y G, ZHAO J S, et al. Research progress of rapid detection technology for foodborne hepatitis A virus[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(6): 74-82.
- [20] 孟佳, 钮冰, 古淑青, 等. 基于液相色谱—质谱的蛋白质组学技术在食品鉴别中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(4): 998-1 003.
- MENG J, NIU B, GU S Q, et al. Application of proteomics technology based on liquid chromatography-mass spectrometry in food identification[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(4): 998-1 003.