

## 5种不同畜禽肉中脂肪酸组成和脂质差异分析

许辰杨<sup>1,2</sup>, 杨悠悠<sup>2</sup>, 石诗余<sup>3</sup>, 汤超华<sup>2</sup>, 冯潇慧<sup>2</sup>, 赵青余<sup>2</sup>, 张凯<sup>1</sup>, 张军民<sup>2\*</sup>

(1. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 青岛 266109; 2. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 畜禽营养与饲养国家重点实验室, 北京 100193; 3. 大连达硕信息技术有限公司, 大连 116085)

**摘要:** **目的** 基于超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱法(ultra performance liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry, UPLC-QTOF/MS)和脂质组学分析技术分析不同畜禽肉中脂肪酸和脂质组成差异。**方法** 样品经脂肪提取、皂化和萃取后采用C8柱分离,以水+甲醇(9:1, V:V)和乙腈+甲醇+异丙醇(2:3:5, V:V:V)为流动相进行梯度洗脱,经UPLC-QTOF/MS定性分析,总脂肪酸外标法定量,脂质面积百分比半定量,并结合主成分分析(principal component analysis, PCA)和偏最小二乘法判别(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)等统计学手段,实现脂质差异分析。**结果** 该方法可对38种脂肪酸进行准确定性定量;检出限范围在0.050~1.000 μg/g,定量限范围在0.125~2.500 μg/g,线性相关系数( $r^2$ )均大于0.99;以亚油酸-<sup>13</sup>C<sub>18</sub>为模型进行准确性评价,加标回收率范围为93%~104%,相对标准偏差范围为2.6%~3.9%。正、负模式下分别测得355、192种化合物,共筛选出42种差异性化合物,主要为磷脂酰胆碱和游离脂肪酸,差异脂肪酸主要为棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和花生四烯酸。**结论** 本研究中脂肪酸测定方法操作简便、分析时间短,适用于大规模畜禽肉类总脂肪酸的定性定量测定。不同畜禽肉中主要差异脂质集中于棕榈酸、油酸、花生四烯酸等脂肪酸所构成的磷脂酰胆碱类和脂肪酸类脂质。

**关键词:** 畜禽肉; 脂肪酸; 脂质; 超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱法

### Analysis of fatty acid composition and lipid difference in 5 kinds of livestock and poultry meat

XU Chen-Yang<sup>1,2</sup>, YANG You-You<sup>2</sup>, SHI Shi-Yu<sup>3</sup>, TANG Chao-Hua<sup>2</sup>, FENG Xiao-Hui<sup>2</sup>, ZHAO Qing-Yu<sup>2</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, ZHANG Jun-Min<sup>2\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109 China; 2. State Key Laboratory of Animal Nutrition, Institute of Animal Sciences of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. Dalian ChemDataSolution Information Technology, Dalian 116085, China)

**基金项目:** 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF02020)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2022-YWF-ZYSQ-09)、中国农业科学院科技创新工程协同创新任务项目(CAAS-XTX20190025-8)、家禽产业技术体系市创新团队项目(BAIC06-2023-G05)、重庆荣昌农牧高新技术产业研发专项(cstc2020ngzx0005)、中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-IAS-12)

**Fund:** Supported by the Key Research and Development Plan in Ningxia Hui Autonomous Region (2022BBF02020), the Special Basic Research Fund for Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (2022-YWF-ZYSQ-09), the Chinese Academy of Agricultural Science and Technology Innovation Project (CAAS-XTX20190025-8), the Beijing Agriculture Innovation Consortium (BAIC06-2023-G05), the Chongqing Rongchang Agriculture and Animal Husbandry Hig Development Project (cstc2020ngzx0005), and the Chinese Academy of Agricultural Science and Technology Innovation Project (ASTIP-IAS-12)

\*通信作者: 张军民, 博士, 研究员, 主要研究方向为优质功能畜禽肉蛋生产、饲料安全风险评估与新植提产品开发相关研究。E-mail: zhangjunmin@caas.cn

\*Corresponding author: ZHANG Jun-Min, Ph.D, Professor, Institute of Animal Science of Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2, Yuanmingyuan West Road, Haidian District, Beijing 100193, China. E-mail: zhangjunmin@caas.cn

**ABSTRACT: Objective** To analyze the difference of the total fatty acids and lipids in different livestock and poultry meats based on ultra performance liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UPLC-QTOF/MS) and lipidomic techniques. **Methods** The samples were gradient-eluted and separated on a C8 column after lipid extraction and saponification. The mobile phase were water+methanol (9:1, *V:V*) and acetonitrile+methanol+isopropanol (2:3:5, *V:V:V*). The lipids and fatty acids were qualified through UPLC-QTOF. The lipids were semi-quantified using area percentage method while the total fatty acids were quantified by external standard method. Statistical tools including principal component analysis (PCA) and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) were used to analyze lipid differences. **Results** Totally 38 kinds of fatty acids could be accurately qualified and quantified in this method. The limits of detection were in the range of 0.050-1.000  $\mu\text{g/g}$ , and the limits of quantification were in the range of 0.125-2.500  $\mu\text{g/g}$ . The linear coefficients ( $r^2$ ) were greater than 0.99. Using linoleic acid- $^{13}\text{C}_{18}$  as the model compound, the recoveries at 3 spiking levels were in the ranges of 93%–104%, and the relative standard deviations were in the ranges of 2.6%–3.9%. The 355 and 192 compounds were detected in the positive and negative modes, respectively. A total of 42 differential compounds were screened, mainly phosphatidylcholine and free fatty acids. The differential fatty acids were mainly palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid and arachidonic acid. **Conclusion** The analysis method in this study is easy to operate, less time-consuming and suitable for the large-scale analysis of total fatty acids and the lipidomic analysis in livestock and poultry meat. The main difference lipids in different livestock and poultry meats are mainly phosphatidylcholines and fatty acid lipids composed of fatty acids such as palmitic acid, oleic acid and arachidonic acid.

**KEY WORDS:** livestock and poultry meat; fatty acid; lipids; ultra performance liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry

## 0 引言

畜禽肉是中国居民日常消耗肉类产品来源<sup>[1]</sup>。随着经济社会发展,大众对食品安全和营养健康的要求逐步上升<sup>[2]</sup>,消费者也越来越关注畜禽肉营养。畜禽肉是消费者脂肪酸主要摄入来源之一,不同种类的脂肪酸与人类健康息息相关。脂肪酸根据碳原子数目不同可分为短链、中链、长链和超长链脂肪酸<sup>[3]</sup>。有研究表明中链脂肪酸有着易于吸收、促进生长发育、抗菌和维护肠道健康等生理功能<sup>[4]</sup>。脂肪酸按双键数目不同可分为饱和、单不饱和及多不饱和脂肪酸,同时,脂肪酸双键位置也会存在不同<sup>[5]</sup>。据报道,共轭亚油酸具有抗肥胖、保护心血管和抗癌等生物功能<sup>[6]</sup>。近年大量研究表明,通过品种<sup>[7]</sup>、饲料中日粮成分<sup>[8]</sup>和日龄<sup>[9]</sup>等因素的调控,可以改变畜禽肉中脂肪酸的组成及含量,从而间接影响畜禽肉的营养价值。脂质是生物体内大多数不溶于水而溶于非极性有机溶剂的化合物,是细胞膜的主要成分<sup>[10]</sup>,在生命活动中承担着提供能量、传导信号等多种功能<sup>[11]</sup>。相关研究证明,脂质与人类慢性疾病和精神疾病相关<sup>[12-13]</sup>。基于脂质组学分析技术,结合多变量分析方法,对样本中的脂质种类和分子进行系统性的分析<sup>[14-15]</sup>,对于生物体内脂质组成与表达变化的解析具有重要意义。因此,脂肪酸的精准定量以及脂质组学分析,对畜禽肉质量评价以及脂质功能和代谢途径的研究将具有重要意义。此外畜禽肉脂质差异分析已成为目前畜牧领域营养强化或饲

养调控等有效性评价的重要技术手段<sup>[14-15]</sup>,但目前研究多集中于单一品系畜禽,鲜有不同畜禽肉中脂质的差异分析。

目前脂肪酸的测定主要基于气相色谱-氢火焰离子化法(gas chromatography-flame ionization detector, GC-FID),如 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》应用 GC-FID 可以实现 37 种脂肪酸定性以及定量分析。使用 GC 对脂肪酸进行分析时,由于脂肪酸的强极性和高沸点,通常需要对其进行衍生化,如使用乙酰氯和三氟化硼等<sup>[16-19]</sup>对脂肪酸进行甲酯化以增加其挥发性。该样品制备过程烦琐,采用试剂毒性较大,安全性低,同时不饱和脂肪酸在甲酯化过程中容易发生变化。因此,近年来高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)基于其适用于低温或常温分析的优点也被应用于高温易分解和不饱和度较高的脂肪酸的分析<sup>[3]</sup>。由于脂肪酸的紫外吸收较弱,通常串接电雾式检测器、蒸发光散射检测器或质谱检测器等<sup>[3]</sup>。质谱<sup>[20-21]</sup>、色谱和核磁共振<sup>[22-23]</sup>等技术极大地推动了脂质组学的快速发展。其中质谱技术因其优秀的定性和定量能力,在脂质组学分析方面具有较广泛的应用<sup>[24-25]</sup>。有学者使用液相色谱与质谱联用技术如四极杆飞行时间质谱仪<sup>[26]</sup>、基质辅助激光解吸电离质谱法<sup>[27]</sup>和离子淌度质谱法<sup>[28-29]</sup>等方法应用于疾病标志物筛查和功能品质差异研究,如:通过基于电喷雾电离质谱法对生长、分裂和疾病状态下的细胞进行脂质组学研究<sup>[30]</sup>。

目前, 基于液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)进行脂肪酸的分析, 多集中于通过化学衍生化的方式, 并结合多反应离子监测模式, 实现血液、组织等生物样本中痕量游离脂肪酸的分析<sup>[31]</sup>。然而, 衍生化方式不适合于畜禽肉中总脂肪酸的分析。基于此, 本研究基于超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱法(ultra performance liquid chromatography- quadrupole time-of-flight mass spectrometry, UPLC-QTOF/MS), 建立了鸡、鸭、猪、牛、羊 5 种畜禽肉中总脂肪酸的测定方法, 并将该方法拓展至畜禽肉中脂质组成的分析, 探究不同畜禽肉脂质差异以及脂质骨架脂肪酸分布差异, 为畜禽肉脂肪酸和脂质营养研究提供理论技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

畜禽肉(鸡胸、鸭胸、猪里脊、牛里脊、羊里脊)由北京市场采购。

脂肪酸混合标准品(40 组分, C4~C24, 上海安谱瑞世标准技术服务有限公司); 乙腈、甲醇、异丙醇、正己烷、乙酸铵(色谱纯, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司); 甲酸(纯度 $\geq 88\%$ , 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 甲基叔丁基醚(纯度 $\geq 99.5\%$ , 北京市通广精细化工公司); 亚油酸- $^{13}\text{C}_{18}$ (纯度 $\geq 97\%$ , 美国 Sigma-Aldrich 公司)。

### 1.2 仪器与设备

Agilent QTOF 6545 超高效液相色谱串联四极杆飞行时间质谱仪、InfinityLab Poroshell 120 EC-C8 色谱柱(100 mm $\times$  2.1 mm, 1.9  $\mu\text{m}$ , 美国 Agilent 公司); Milli-Q Advantage A10 超纯水制备仪(德国 Merck-Millipore 公司); DZKM-D-4 电热恒温水浴锅(北京市永光明医疗仪器厂); HGC-24A 氮吹仪(天津市恒奥科技发展有限公司); KQ-500DE 型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); 5810R 小型高速冷冻离心机(德国 Eppendorf 公司); XSE105DU 分析天平(精度 0.01 mg, 瑞士 Mettler-Toledo 公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 标准曲线溶液配制

使用乙腈:甲醇:异丙醇=2:3:5 (V:V:V)溶液制备约 1 mg/mL 的脂肪酸标准储备液, 并稀释得到质量浓度分为 0.10、0.25、0.50、1.00、2.50、5.00、10.00、25.00、50.00、100.00、250.00、500.00  $\mu\text{g/mL}$  的系列标准曲线溶液。

#### 1.3.2 样品前处理

本研究脂质提取方法在综合前人研究<sup>[32-34]</sup>的提取方法基础上修改而来。新鲜肉样去除筋膜, 磨碎后称取 40 mg 于 2 mL 离心管中, 加入 300  $\mu\text{L}$  甲醇和 1000  $\mu\text{L}$  甲基叔丁基醚, 涡旋混匀 1 min。加入 250  $\mu\text{L}$  超纯水涡旋混匀 1 min。12000 r/min, 4 $^{\circ}\text{C}$  离心 15 min, 取上清液均分两份分别氮吹

(不加热), 吹至透明薄膜状。一份加入 1 mL 皂化试剂[含 0.3 mol/L 氢氧化钾的甲醇水(9:1, V:V)], 涡旋振荡, 80 $^{\circ}\text{C}$  水浴加热 1 h。加入 0.1 mL 甲酸酸化, 涡旋振荡, 加入 800  $\mu\text{L}$  正己烷提取, 重复两次, 合并有机相后氮吹至干后以溶解液定容至 1 mL, 上机待测。

#### 1.3.3 色谱条件

##### (1) 色谱条件:

流动相: A 相为水+甲醇=9:1 (V:V); B 相为乙腈+甲醇+异丙醇=2:3:5 (V:V:V), 含 10 mmol/L 乙酸铵。脂肪酸梯度洗脱程序为: 0 min, 60% B; 3.5 min, 70% B, 8.0 min, 86% B; 10.0 min, 100% B; 运行时间共 15.0 min, 后运行时间 3.0 min。柱温箱: 30 $^{\circ}\text{C}$ ; 流速: 0.3 mL/min; 进样量: 2  $\mu\text{L}$ 。脂质梯度洗脱程序: 0 min, 70% B; 3.5 min, 86% B; 11.0 min, 100% B。运行时间 20.0 min, 后运行时间 3.0 min。柱温箱 30 $^{\circ}\text{C}$ ; 流速: 0.3 mL/min; 进样量: 5  $\mu\text{L}$ 。

##### (2) 质谱条件:

脂肪酸采用质谱一级全扫描, 质量扫描范围( $m/z$ ): 50~1000, 质谱分辨率: 40000, 负离子模式检测。离子源: 电喷雾离子源; 干燥气体温度: 200 $^{\circ}\text{C}$ ; 干燥气流速: 10 L/min; 鞘气温度: 300 $^{\circ}\text{C}$ ; 鞘气流速 12 L/min。脂质采用质谱一级全扫描和二级离子全扫描, 质量扫描范围( $m/z$ ): 100~1700, 正离子和负离子模式检测。离子源: 电喷雾离子源(electrospray ionization, ESI); 干燥气体温度: 200 $^{\circ}\text{C}$ ; 干燥气流速: 10 L/min; 鞘气温度: 300 $^{\circ}\text{C}$ ; 鞘气流速 12 L/min。

### 1.4 数据分析

通过 Data Acquisition 10.1 进行数据采集, Qualitative Analysis 10.0 进行脂肪酸的定性, Quantitative Analysis 10.1 进行标准曲线的绘制和脂肪酸的定量。脂肪酸数据使用 Microsoft Office Excel 2021 进行数据统计分析, 结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。MSDIAL 5.2 软件进行脂质化合物定性与峰对齐。通过 R wersio7 4.2.2 进行质量控制(quality control, QC)样品皮尔逊相关性分析; 通过 Metaboanalst <http://www.metaboanalst.ca> 进行主成分分析(principal component analysis, PCA)和偏最小二乘法判别(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)分析; 图像采用 GraphPad Prism 8.0.2 制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 脂肪酸精准分析方法确定

研究发现, 脂肪酸易失去质子, 因此该研究使用负模式对脂肪酸进行检测。另外, 在碰撞诱导解离(collison-induced dissociation, CID)模式下, 脂肪酸基本上不会发生碎裂, 故而本研究基于全扫描模式, 通过准分子离子精确质量数提取离子对脂肪酸进行定性和定量, 如表 1 所示。另外, 本研究对比使用了 C18 和 C8 色谱柱, 由于 C18 色谱柱对于

中长链脂肪酸保留能力过强,部分饱和脂肪酸会残留在色谱柱填料中,对定量造成影响,因此采用对脂肪酸保留能力相对较弱的C8填料色谱柱进行该方法的建立。实验中脂肪酸响应良好,图1为38种脂肪酸提取离子流色谱图。

表1(续)

表1 脂肪酸名称、化学式及保留时间  
Table 1 Fatty acid name, chemical formula and retention time

名称	化学式	质荷比( $m/z$ )	保留时间/min
己酸(C6:0)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116.0837	0.939
辛酸(C8:0)	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	144.115	1.115
癸酸(C10:0)	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	172.1463	1.485
十一烷酸(C11:0)	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	186.162	1.723
月桂酸(C12:0)	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	200.1776	2.091
十三烷酸(C13:0)	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	214.1933	2.588
肉豆蔻酸(C14:0)	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	228.2089	3.174
肉豆蔻烯酸(C14:1)	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	226.1933	2.408
十五烷酸(C15:0)	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	242.2246	3.825
十五烯酸(C15:1)	C <sub>15</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	240.2089	2.947
棕榈酸(C16:0)	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	256.2402	4.462
棕榈烯酸(C16:1)	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	254.2246	3.601
十七酸(C17:0)	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	270.2559	5.118
十七碳烯酸(C17:1)	C <sub>17</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	268.2402	4.197
硬脂酸(C18:0)	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	284.2175	5.777
反式油酸(C18:1T)	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	282.2559	5.048
油酸(C18:1)	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	282.2559	4.887

名称	化学式	质荷比( $m/z$ )	保留时间/min
反式亚油酸(C18:2T)	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	280.2402	4.363
亚油酸(C18:2)	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	280.2402	4.402
花生酸(C20:0)	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	312.3028	7.008
$\gamma$ -亚麻酸(C18:3)	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	278.2246	3.275
二十碳烯酸(C20:1)	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	310.2872	6.073
亚麻酸(C18:3)	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	278.2246	3.424
二十一碳酸(C21:0)	C <sub>21</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	326.3185	7.577
二十碳二烯酸(C20:2)	C <sub>20</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	308.2715	5.213
二十二碳酸(C22:0)	C <sub>22</sub> H <sub>44</sub> O <sub>2</sub>	340.3341	8.102
二十碳三烯酸(C20:3)	C <sub>20</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	306.2559	4.429
芥酸(C22:1)	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	338.3185	7.183
花生四烯酸(C20:4)	C <sub>20</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	304.2402	3.976
二十三碳酸(C23:0)	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	354.3498	8.599
二十二碳二烯酸(C22:2)	C <sub>22</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	336.3028	6.373
二十碳五烯酸(C20:5)	C <sub>20</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	302.2246	3.231
二十四碳烯酸(C24:1)	C <sub>24</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	366.3498	8.177
二十二碳六烯酸(C22:6)	C <sub>22</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	328.2402	3.755
二十二碳五烯酸(C22:5 n-3)	C <sub>22</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	330.2559	4.274
二十二碳四烯酸(C22:4)	C <sub>22</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	332.2715	5.009
二十二碳五烯酸(C22:5 n-6)	C <sub>22</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	330.2559	4.484
二十四碳酸(C24:0)	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub> O <sub>2</sub>	368.3654	9.033

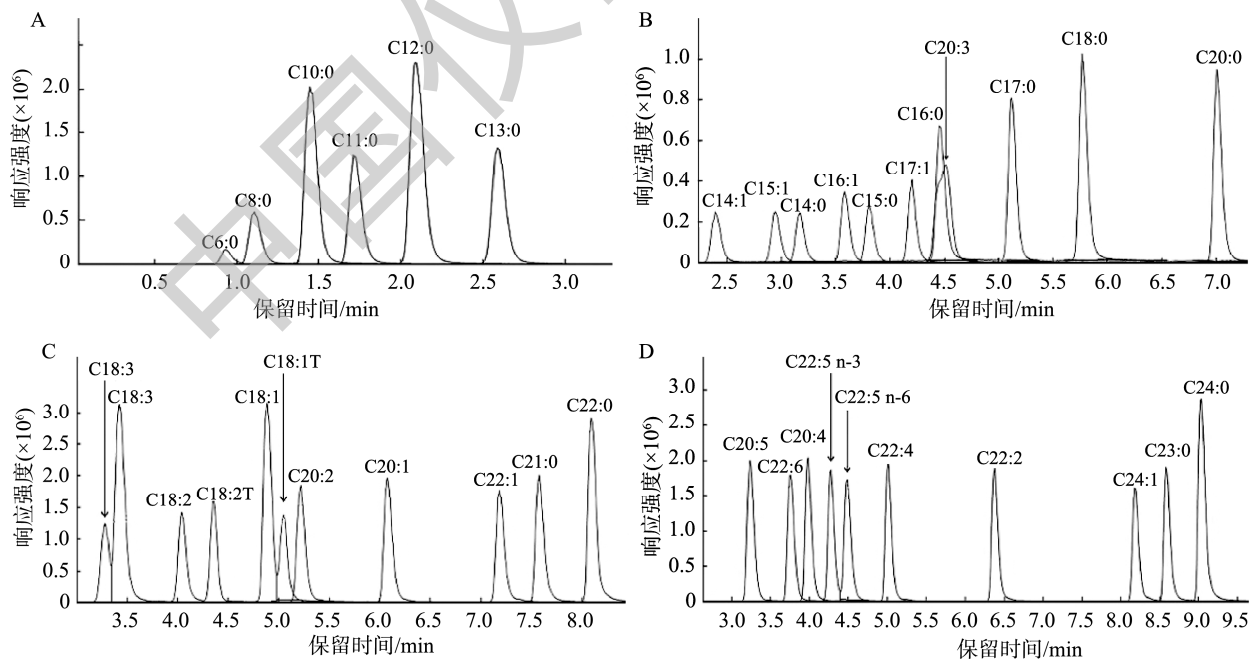


图1 38种脂肪酸的提取离子流色谱图

Fig.1 Extracted ion chromatograms of 38 kinds of fatty acid

本研究由于无法找到畜禽肉基质空白, 故采用乙腈作为溶剂进行标准曲线的绘制。在上述优化后的条件下进行 UPLC-QTOF/MS 分析, 以目标物的质量浓度为横坐标( $X$ ,  $\mu\text{g/L}$ )、相应峰面积为纵坐标( $Y$ )进行线性回归。如表 2 所示, 38 种目标物在 0.125~500.000  $\mu\text{g/g}$  线性范围内, 峰面积与质

量浓度呈良好的线性关系, 相关系数( $r^2$ )在 0.9902~0.9998 之间。以信噪比( $S/N$ )=3 为检出限(limit of detection, LOD), 信噪比( $S/N$ )=10 为定量限(limit of quantitation, LOQ), 38 种脂肪酸的 LOD 范围为 0.050~1.000  $\mu\text{g/g}$ , LOQ 范围为 0.125~2.500  $\mu\text{g/g}$ 。

表 2 脂肪酸的线性方程、线性范围、相关系数、LODs 和 LOQs  
Table 2 Linear equations, linear ranges, correlation coefficients, LODs and LOQs of fatty acids

名称	线性范围/ $(\mu\text{g/g})$	线性方程	相关系数( $r^2$ )	LODs/ $(\mu\text{g/g})$	LOQs/ $(\mu\text{g/g})$
己酸(C6:0)	2.500~250.000	$Y=79202.71X-3810.42$	0.9998	0.250	2.500
辛酸(C8:0)	1.250~250.000	$Y=317210.10X-24445.11$	0.9993	0.500	1.250
癸酸(C10:0)	2.500~500.000	$Y=476922.65X-11686.37$	0.9989	0.250	2.500
十一烷酸(C11:0)	1.250~250.000	$Y=685449.60X-81279.45$	0.9990	0.250	1.250
月桂酸(C12:0)	1.250~250.000	$Y=709870.21X-115836.49$	0.9991	0.500	1.250
十三烷酸(C13:0)	1.250~250.000	$Y=762913.13X-61397.78$	0.9991	0.500	1.250
肉豆蔻酸(C14:0)	1.250~500.000	$Y=685603.92X+25316.53$	0.9979	0.500	1.250
肉豆蔻烯酸(C14:1)	1.000~500.000	$Y=463677.49X-93392.49$	0.9991	0.250	1.000
十五烷酸(C15:0)	0.500~250.000	$Y=724592.30X+64924.95$	0.9952	0.250	0.500
十五烯酸(C15:1)	1.250~250.000	$Y=906514.63X-98349.91$	0.9992	0.250	1.250
棕榈酸(C16:0)	1.000~500.000	$Y=432235.88X+1151903.48$	0.9914	0.500	1.000
棕榈烯酸(C16:1)	2.500~250.000	$Y=1044402.31X-39068.82$	0.9987	0.500	2.500
十七酸(C17:0)	1.000~500.000	$Y=764888.43X+310736.24$	0.9918	0.500	1.000
十七碳烯酸(C17:1)	0.250~250.000	$Y=943474.67X+115365.99$	0.9938	0.500	0.250
硬脂酸(C18:0)	1.000~500.000	$Y=934315.35X+986097.26$	0.9956	0.500	1.000
反式油酸(C18:1T)	0.250~250.000	$Y=709102.24X+232988.70$	0.9939	0.500	0.250
油酸(C18:1)	2.500~500.000	$Y=919085.86X+278533.59$	0.9958	1.000	2.500
反式亚油酸(C18:2T)	0.250~250.000	$Y=792371.84X+77155.42$	0.9982	0.500	0.250
亚油酸(C18:2)	0.250~250.000	$Y=847267.50X+122138.52$	0.9926	0.500	0.250
花生酸(C20:0)	1.000~500.000	$Y=930972.20X+345855.85$	0.9941	0.250	1.000
$\gamma$ -亚麻酸(C18:3)	2.500~500.000	$Y=346244.80X+55834.26$	0.9971	1.000	2.500
二十碳烯酸(C20:1)	0.500~250.000	$Y=1190235.84X+96657.08$	0.9949	0.125	0.500
亚麻酸(C18:3)	0.250~250.000	$Y=2255614.47X+167829.24$	0.9922	0.125	0.250
二十一碳酸(C21:0)	0.500~250.000	$Y=1198619.57X+129090.38$	0.9952	0.125	0.500
二十碳二烯酸(C20:2)	0.500~250.000	$Y=1088322.51X+75954.58$	0.9982	0.125	0.500
二十二碳酸(C22:0)	1.000~500.000	$Y=1125126.09X+209218.10501$	0.9927	0.500	1.000
二十碳三烯酸(C20:3)	0.250~500.000	$Y=4638010.31X+13029.31$	0.9984	0.250	1.000
芥酸(C22:1)	1.250~250.000	$Y=1075641.70X+136319.34$	0.9934	0.250	1.250
花生四烯酸(C20:4)	0.500~250.000	$Y=1225091.93X+13311.073$	0.9994	0.250	0.500
二十三碳酸(C23:0)	0.500~250.000	$Y=1148755.87X+153450.69$	0.9925	0.125	0.500
二十二碳二烯酸(C22:2)	0.250~250.000	$Y=1140969.96X+79008.40$	0.9947	0.050	0.250
二十碳五烯酸(C20:5)	0.125~250.000	$Y=1300725.36X+5501.73$	0.9949	0.050	0.125
二十四碳烯酸(C24:1)	0.500~250.000	$Y=938780.02X+160641.91$	0.9943	0.125	0.500
二十二碳六烯酸(C22:6)	0.250~250.000	$Y=1151826.02X+2909.31$	0.9962	0.125	0.250
二十二碳五烯酸(C22:5 n-3)	2.500~250.000	$Y=1083156.64X+112813.78$	0.9903	0.500	2.500
二十二碳四烯酸(C22:4)	0.250~250.000	$Y=1114798.63X+101694.29$	0.9964	0.125	0.250
二十二碳五烯酸(C22:5 n-6)	2.500~250.000	$Y=1055628.81X+323074.64$	0.9902	0.500	2.500
二十四碳酸(C24:0)	0.500~250.000	$Y=1428988.20X+12127.55$	0.9998	0.250	0.500

本研究以亚油酸- $^{13}\text{C}_{18}$  为脂肪酸研究模型, 选取鸭胸肉为基质, 进行 2.5、12.5、25.0  $\mu\text{g/g}$  3 水平加标回收率测定和重复性验证, 每个浓度设 6 个平行组。3 个浓度水平的加标回收率范围为 93%~104%, 加标样品测定结果的相对标准偏差范围在 2.6%~3.9%之间, 准确度和精密度符合 GB/T 27404—2008《实验室质量控制规范 食品理化检测》。

由此看出, 相较于传统的 GC-FID 方法, 本方法具有较好的定性和定量能力。相较于 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》LOQ 为 33~66  $\mu\text{g/g}$ (固体类)而言, 该方法可达到更低 LOQ, 并且前处理方法简便, 无需三氟化硼进行甲酯化, 更具环境友好性。从分析时间上, GB 5009.168—2016 方法单个样品检测时间需要 85 min, 本方法仅需 20 min, 因而该分析方法通量更高, 可适用于短链、中链和长链脂肪酸的定量分析, 较贴近食品检测的需求。在定量过程中发现棕榈酸和硬脂酸的空白响应比较高, 有学者研究推测是空气中大量存在的棕榈酸和硬脂酸与前处理试剂接触造成了影响, 可通过新鲜配制前处理试剂降低影响<sup>[35]</sup>。

## 2.2 畜禽肉中总脂肪酸差异分析

基于该方法对鸡胸肉、鸭胸肉、猪里脊、牛里脊和羊里脊 5 种肉中 38 种脂肪酸含量测定结果如表 3 所示。相同样品通过 GC-FID 法检测棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和花生四烯酸含量, 测得结果与本方法一致, 也可证明本方法的适用性。在脂肪酸种类上, 鸡胸肉、鸭胸肉、猪里脊、牛里脊和羊里脊分别鉴定出 30、30、31、31、32 种脂肪酸, 畜类肉可以检测到癸酸, 而禽类肉未检测到。以脂肪酸含量进行排序: 猪里脊、羊里脊、鸭胸肉、牛里脊、

鸡胸肉, 其中鸭胸肉和牛里脊的总脂肪酸含量比较接近, 从种类上来看畜肉比禽肉的脂肪酸含量要高。

不同肉类脂肪酸相对含量见表 4。从饱和脂肪酸分布来看, 鸭胸肉、猪里脊和牛里脊的饱和脂肪酸分布较高, 在 50%以上, 羊里脊中饱和脂肪酸分布最低(40.7%)。单不饱和脂肪酸相对含量方面羊里脊(43.1%)最高, 鸭胸肉最低(22.4%)。多不饱和脂肪酸相对含量分布上, 禽类有着较多的多不饱和脂肪酸分布在 20%左右, 畜肉中分布较低, 羊里脊中多不饱和脂肪酸含量与猪里脊和牛里脊相比较为丰富。

功能性脂肪酸是指对人体有营养价值的不饱和脂肪酸, 由于双键位置的不同分为 n-3 和 n-6 型不饱和脂肪酸, 如亚油酸、花生四烯酸和二十二碳六烯酸等, 其中有报道二十二碳六烯酸和二十二碳五烯酸作为 n-3 型不饱和脂肪酸在心脏保护上的生理功能<sup>[36]</sup>。从 n-3 和 n-6 型不饱和脂肪酸含量上看, 禽类比畜类肉有更丰富的 n-6 型不饱和脂肪酸分布, 而 n-3 型不饱和脂肪酸在猪里脊与牛里脊中分布较少。畜禽肉中 n-6 型不饱和脂肪酸含量上, 猪里脊中二十二碳四烯酸和二十碳二烯酸, 羊里脊中的亚油酸, 鸭胸肉中二十二碳五烯酸和花生四烯酸及鸡胸肉中  $\gamma$ -亚麻酸是最高的。所测羊里脊与其他 4 种肉相比在亚麻酸、二十二碳六烯酸和二十碳五烯酸 3 种 n-3 型不饱和脂肪酸的含量较高。

综合来看该批样品中禽类肉和羊里脊中 n-6 和 n-3 型饱和脂肪酸含量相对丰富。畜禽肉中脂肪酸的含量组成受品种<sup>[7]</sup>、性别和饲料<sup>[37]</sup>等因素影响, 本方法所测定的畜禽肉并未把控这些指标。

表 3 5 种畜禽肉样品中脂肪酸含量(n=3)  
Table 3 Fatty acid content in 5 kinds of livestock and poultry meat samples (n=3)

名称	鸡胸肉/( $\mu\text{g/g}$ )	鸭胸肉/( $\mu\text{g/g}$ )	猪里脊/( $\mu\text{g/g}$ )	牛里脊/( $\mu\text{g/g}$ )	羊里脊/( $\mu\text{g/g}$ )
己酸(C6:0)	ND	ND	ND	ND	ND
辛酸(C8:0)	ND	ND	ND	ND	ND
癸酸(C10:0)	ND	ND	*	*	*
十一烷酸(C11:0)	ND	ND	ND	ND	ND
月桂酸(C12:0)	107.5 $\pm$ 0.5	107.2 $\pm$ 0.2	1174 $\pm$ 1.3	107.1 $\pm$ 0.2	119.3 $\pm$ 0.4
十三烷酸(C13:0)	ND	ND	ND	ND	*
肉豆蔻酸(C14:0)	55.1 $\pm$ 1.1	51.4 $\pm$ 1.7	47.3 $\pm$ 3.2	138.2 $\pm$ 0.3	532.8 $\pm$ 5.8
肉豆蔻烯酸(C14:1)	137.3 $\pm$ 2.3	132.6 $\pm$ 0.7	142.3 $\pm$ 0.4	152.3 $\pm$ 0.3	169.2 $\pm$ 1.3
十五烷酸(C15:0)	59.7 $\pm$ 1.8	56.2 $\pm$ 0.3	65.8 $\pm$ 1.9	64.3 $\pm$ 1.5	167.5 $\pm$ 3.8
十五烯酸(C15:1)	*	*	*	*	*
棕榈酸(C16:0)	5741.1 $\pm$ 23.5	7128.6 $\pm$ 12.2	12379.3 $\pm$ 55.4	7199.8 $\pm$ 14.1	7643.2 $\pm$ 38.3
棕榈烯酸(C16:1)	344.3 $\pm$ 1.6	172.3 $\pm$ 4.5	893.2 $\pm$ 3.9	215.2 $\pm$ 4.3	638.2 $\pm$ 2.2
十七酸(C17:0)	64.2 $\pm$ 1.9	85.3 $\pm$ 0.8	96.4 $\pm$ 5.9	115.3 $\pm$ 2.5	953.4 $\pm$ 5.5

表 3(续)

名称	鸡胸肉/( $\mu\text{g/g}$ )	鸭胸肉/( $\mu\text{g/g}$ )	猪里脊/( $\mu\text{g/g}$ )	牛里脊/( $\mu\text{g/g}$ )	羊里脊/( $\mu\text{g/g}$ )
十七碳烯酸(C17:1)	*	*	5.9 $\pm$ 0.1	6.4 $\pm$ 0.2	34 $\pm$ 1.2
硬脂酸(C18:0)	4835.4 $\pm$ 41.2	7822.1 $\pm$ 51.1	12688.3 $\pm$ 22.2	6903.2 $\pm$ 31.8	11472.3 $\pm$ 40.5
反式油酸(C18:1T)	ND	ND	ND	ND	ND
油酸(C18:1)	6594.5 $\pm$ 95.5	5545.6 $\pm$ 9.7	18153.4 $\pm$ 13.03	7137.5 $\pm$ 15.7	21205.5 $\pm$ 11.0
反式亚油酸(C18:2T)	ND	ND	ND	ND	ND
亚油酸(C18:2)	3875.5 $\pm$ 12.9	2217.2 $\pm$ 31.2	3975.8 $\pm$ 14.0	1038.2 $\pm$ 3.1	5433.8 $\pm$ 24.5
花生酸(C20:0)	ND	ND	ND	ND	ND
$\gamma$ -亚麻酸(C18:3)	316.7 $\pm$ 2.6	114.3 $\pm$ 2.1	115.3 $\pm$ 1.9	95.8 $\pm$ 1.8	250.2 $\pm$ 2.3
二十碳烯酸(C20:1)	16.2 $\pm$ 1.2	37.2 $\pm$ 2.1	37.9 $\pm$ 1.9	35.3 $\pm$ 1.2	25.4 $\pm$ 1.5
亚麻酸(C18:3)	9.2 $\pm$ 0.2	6.3 $\pm$ 0.2	7.1 $\pm$ 0.2	5.4 $\pm$ 0.3	13.4 $\pm$ 0.2
二十一碳酸(C21:0)	*	*	*	*	*
二十碳二烯酸(C20:2)	85.3 $\pm$ 1.3	86.5 $\pm$ 2.5	111.2 $\pm$ 2.2	31.3 $\pm$ 1.1	51.5 $\pm$ 1.5
二十二碳酸(C22:0)	*	*	*	*	*
二十碳三烯酸(C20:3)	24.1 $\pm$ 0.2	64.1 $\pm$ 2.2	38.3 $\pm$ 1.3	22.2 $\pm$ 0.2	44.2 $\pm$ 0.1
芥酸(C22:1)	*	34.2 $\pm$ 2.4	37.2 $\pm$ 2.1	*	49.2 $\pm$ 2.3
花生四烯酸(C20:4)	562.7 $\pm$ 2.8	2291.2 $\pm$ 11.7	1273.2 $\pm$ 13.2	395.2 $\pm$ 3.6	1922.3 $\pm$ 14.9
二十三碳酸(C23:0)	*	*	*	*	*
二十二碳二烯酸(C22:2)	*	*	*	*	*
二十碳五烯酸(C20:5)	17.1 $\pm$ 1.3	21.3 $\pm$ 1.1	12.5 $\pm$ 1.5	9.2 $\pm$ 1.2	105.7 $\pm$ 2.9
二十四碳烯酸(C24:1)	*	*	*	*	*
二十二碳六烯酸(C22:6)	27.3 $\pm$ 1.3	41.5 $\pm$ 1.5	15.9 $\pm$ 1.9	*	69.2 $\pm$ 1.8
二十二碳五烯酸(C22:5 n-3)	85.3 $\pm$ 2.3	91.2 $\pm$ 1.6	74.3 $\pm$ 2.6	52.4 $\pm$ 2.3	249.7 $\pm$ 1.8
二十二碳四烯酸(C22:4)	92.2 $\pm$ 0.4	35.3 $\pm$ 3.4	127.2 $\pm$ 2.6	32.1 $\pm$ 1.9	118.6 $\pm$ 1.7
二十二碳五烯酸(C22:5 n-6)	152.1 $\pm$ 2.2	231.2 $\pm$ 3.1	151.1 $\pm$ 1.2	61.1 $\pm$ 1.3	16.7 $\pm$ 7.4
二十四碳酸(C24:0)	*	16.2 $\pm$ 0.3	14.2 $\pm$ 0.5	*	8.1 $\pm$ 1.1

注: ND 为未检出; \*为含量低于 LOQ。

表 4 不同肉类中脂肪酸相对含量

Table 4 Relative content of fatty acids in different meats

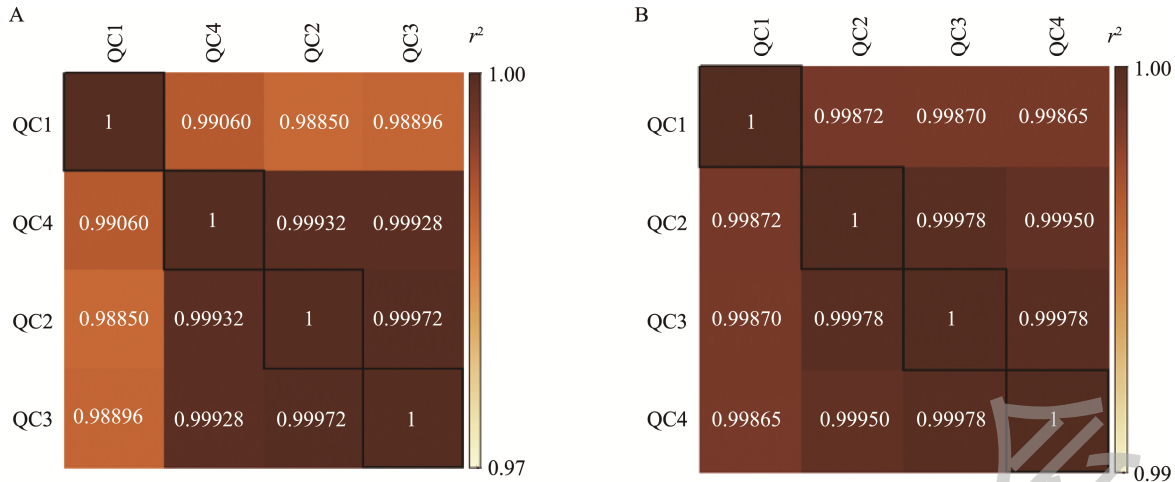
	鸡胸肉/%	鸭胸肉/%	猪里脊/%	牛里脊/%	羊里脊/%
饱和脂肪酸	46.8	57.9	51.3	61.0	40.7
单不饱和脂肪酸	30.6	22.4	37.3	31.7	43.1
多不饱和脂肪酸	22.6	19.7	11.4	7.3	16.1
n-3 型不饱和脂肪酸	0.7	0.9	0.3	0.4	0.9
n-6 型不饱和脂肪酸	21.9	18.9	11.1	6.9	15.2

## 2.3 脂质差异分析

### 2.3.1 脂质分析方法评价

该研究使用 QC 样本进行方法质量控制, 如图 2 所示为正、负模式下 QC 样本皮尔逊相关性系数。结果表明, QC 样本的相关性系数均在 0.98850 以上, 说明仪器运行稳定性良好, 检测过程中样品的均一度也比较好。通过

QC 样本对 5 种畜禽肉样品中的脂质定性, 正、负模式下分别鉴定出 355 种、192 种化合物。正、负模式下各种脂质种类数量的占比如图 3 所示。正、负模式下分别有 23 种、24 种化合物, 种类数量最高的脂质分别是甘油三酯(triglyceride, TG)、磷脂酰胆碱(phosphatidylcholine, PC)类脂质和脂肪酸(fatty acyls, FA)。



注: 图 A 为正模式; 图 B 为负模式, 下同。

图 2 QC 样本正模式、负模式 Pearson 相关性系数图

Fig.2 Pearson correlation coefficient diagrams of positive mode and negative mode of QC samples

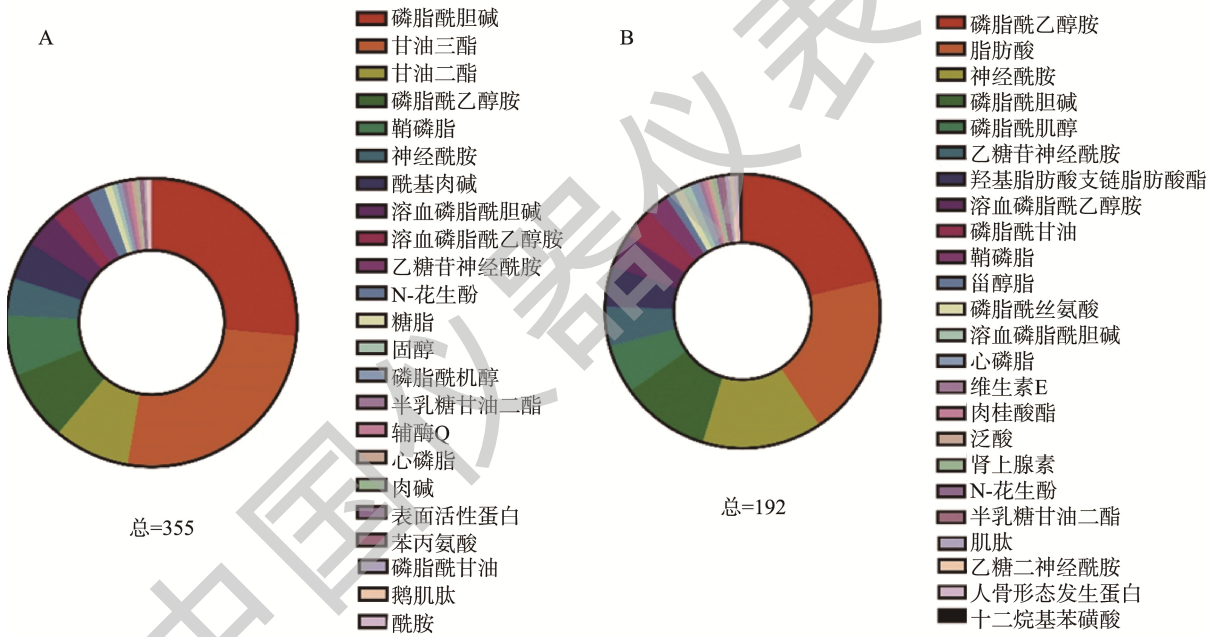


图 3 畜禽肉样本脂质种类数量占比

Fig.3 Proportion of lipid species in livestock and poultry meat samples

2.3.2 畜禽肉脂质组成及差异分析

为区分 5 种畜禽肉的脂质组学特征, 使用主成分分析法(principal component analysis, PCA)对脂质组成数据进行分析。5 种畜禽肉正、负模式下的 PCA 如图 4 所示, 正模式下 PC1 和 PC2 分别为 40.4%和 22.3%, 负模式下 PC1 和 PC2 分别为 80.6%和 17.3%, 可以看出组间明显分离, 5 种畜禽肉在脂质组成上有明显的不同。畜禽肉中脂质相对含量如图 5 所示, 正、负模式下含量相对较高的是 PC 类和 FA 类脂质。

PLS-DA 是一种有监督模式识别的多元统计分析方法,

有利于找到分组因素最相关的变量, 减少其他因素的影响, 通常用于筛选差异化合物。5 种畜禽肉正、负模式下的 PLS-DA 如图 6 所示, 正模式取得分前 10 个化合物[预测变量重要性投影(variable importance in projection, VIP) > 1 的化合物有 38 种], 负模式(VIP > 1)筛选出 4 个差异化合物, 共筛选出 42 种差异化合物, 得出主要差异化合物是 PC 类和 FA 类脂质, 5 种畜禽肉的主要差异化合物集中于主要由棕榈酸、油酸、亚油酸、硬脂酸、花生四烯酸 5 种脂肪酸构成的 PC 类和 FA 类脂质。



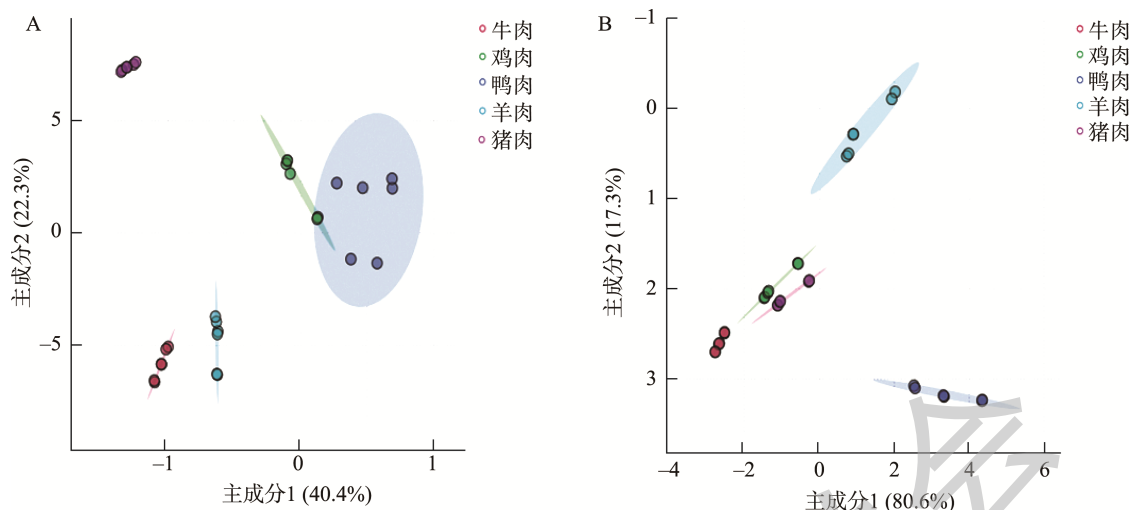


图 4 畜禽肉样本 PCA 分析图

Fig.4 PCA analysis diagram of livestock and poultry meat samples

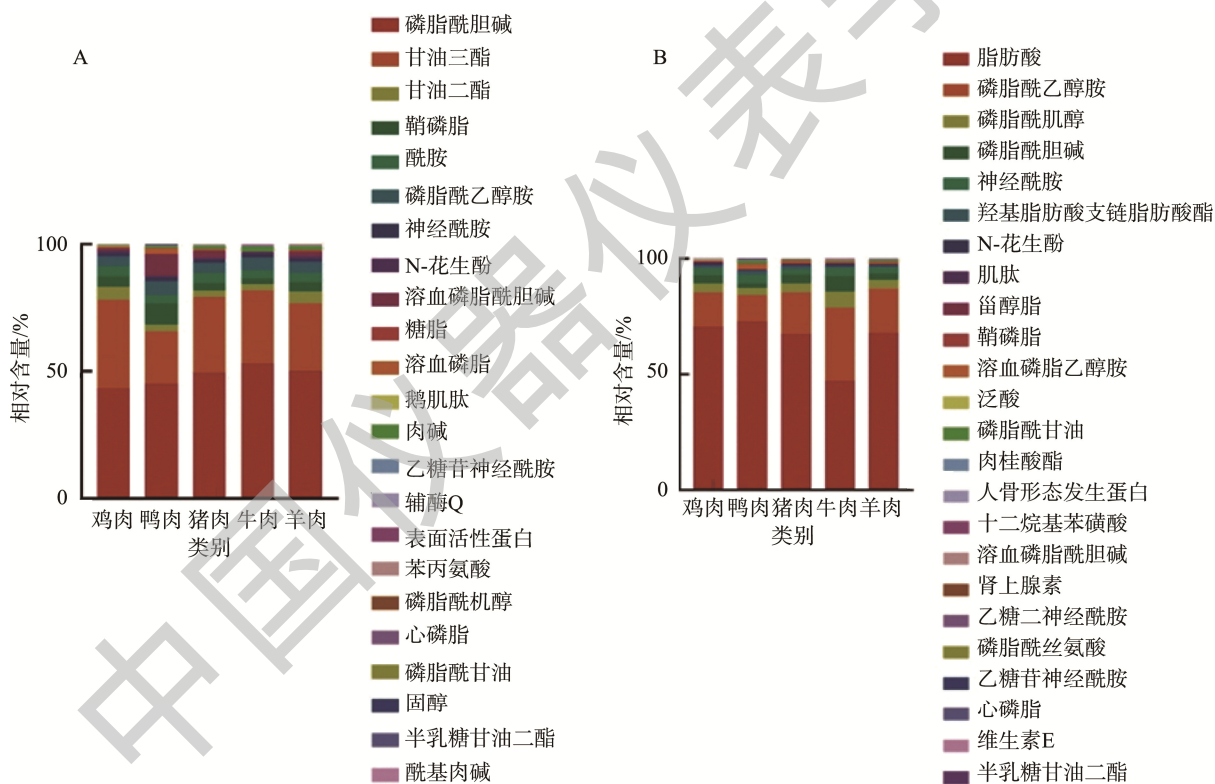


图 5 畜禽肉样本脂质相对含量图

Fig.5 Relative lipid content of livestock and poultry meat samples

正模式下 PC 类脂质和负模式下游离脂肪酸种类和含量最高。磷脂是生物膜的主要成分, 在细胞的结构、功能和信号转导中扮演着重要的角色。有研究提到磷脂的代谢途径与鸡肉风味的差异以及可能是影响鸡肉品质高低的因素, 并且磷脂与人类的健康密切相关<sup>[14,38]</sup>。有相关研究表明游离脂肪酸与脂质分解相关, 而游离脂肪酸对于鸭肉加工过程中的肉味形成有着重要作用<sup>[39]</sup>。

不同品类的畜禽肉在加工中会呈现出不同的风味, 通过对肉类营养成分与品质差异研究有助于为不同肉类选择合适的加工方式与加工用途<sup>[40]</sup>。本研究通过多变量分析方法处理脂质组学数据, 表明 5 种畜禽肉中脂质差异体现在 PC 和游离脂肪酸上, 这些脂质差异体现了不同畜禽肉代谢途径的差异, 并且可能是导致不同畜禽肉风味差异的主要原因。

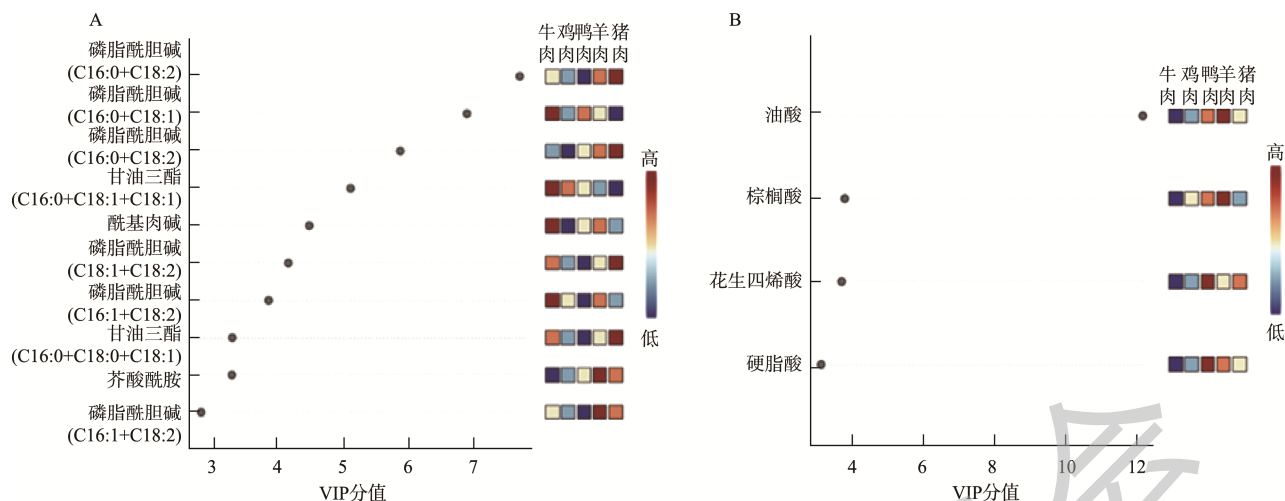


图 6 畜禽肉样本 PLS-DA 分析图

Fig.6 PLS-DA analysis diagram of livestock and poultry meat samples

### 3 结论

本研究基于 UPLC-QTOF/MS 建立了畜禽肉中 38 种脂肪酸的外标定量方法, 方法操作简便, 环境健康友好, 适用于畜禽肉中脂肪酸的定性与定量。畜禽肉中棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和花生四烯酸含量较高, 是构成畜禽肉中脂肪酸的主要成分。通过 PCA 和 PLS-DA 等统计学分析, 畜禽肉脂质构成上差异主要体现在由棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和花生四烯酸所构成的 PC 类和 FA 类脂质。综合来看棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和花生四烯酸 5 种含量较高的脂肪酸及其所构成的脂质是形成畜禽肉中脂肪酸与脂质差异的主要化合物。

### 参考文献

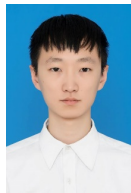
- [1] 樊帆, 黄寒松. 我国畜禽肉价格的波动特征研究[J/OL]. 价格理论与实践: 1-4. [2023-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1010.F.20230410.0910.006.html>
- [2] FAN F, HUANG HS. A study on the fluctuation characteristics of livestock and poultry meat prices in china [J/OL]. Price: Theory Pract: 1-4. [2023-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1010.F.20230410.0910.006.html>
- [3] YAN L, KEH HT, CHEN J, *et al.* Assimilating and differentiating: The curvilinear effect of social class on green consumption [J]. J Food Compos Anal, 2021, 47(6): 914-936.
- [4] 谢璇洁, 程焜, 方小伟, 等. 食品中脂肪酸的分析方法研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(5): 329-339.
- [5] XIE XJ, CHENG Y, FANG XW, *et al.* Research progress on analytical methods of fatty acids in food [J]. Mod Food Sci Technol, 2023, 39(5): 329-339.
- [6] YUAN T, WANG L, JIN J, *et al.* Role medium-chain fatty acids in the lipid metabolism of infants [J]. Front Nutr, 2022, 9: 804880.
- [7] 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): 36-42.
- [8] FANG JQ, CHI T, WANG JH, *et al.* Progress on analysis methods of fatty acids in food [J]. China Dairy Ind, 2018, 46(9): 36-42.
- [9] LI S, XU L, QING J, *et al.* Multiple biological activities and biosynthesis mechanisms of specific conjugated linoleic acid isomers and analytical methods for prospective application [J]. Food Chem, 2023, 409: 135257.
- [10] MAHIZA MIN, LOKMAN HI, IBITOYE EB. Fatty acid profile in the breast and thigh muscles of the slow- and fast-growing birds under the same management system [J]. Trop Anim Health Prod, 2021, 53(4): 409.
- [11] QI KK, CHEN JL, ZHAO GP, *et al.* Effect of dietary omega 6/omega 3 on growth performance, carcass traits, meat quality and fatty acid profiles of Beijing-you chicken [J]. J Anim Physiol Anim Nutr (Berl), 2010, 94(4): 474-485.
- [12] 张剑, 曹婧, 耿爱莲, 等. 不同日龄北京油鸡胸肌中链脂肪酸的变化规律研究[J]. 中国家禽, 2023, 45(3): 1-7.
- [13] ZHANG J, CAO J, GENG AIL, *et al.* Study on the changes of medium- and long-chain fatty acids in breast muscle of Beijing-You chicken at different days of age [J]. China Poultry, 2023, 45(3): 1-7.
- [14] 宋诗瑶, 白玉, 刘虎威. 脂质组学分析中样品前处理技术的研究进展[J]. 色谱, 2020, 38(1): 66-73.
- [15] SONG SY, BAI Y, LIU HW. Advances in the development of the sample preparation techniques in lipidomics [J]. Chin J Chromatogr, 2020, 38(1): 66-73.

- 66–73.
- [11] ZHANG T, SAGHATELIAN A. Emerging roles of lipids in BCL-2 family-regulated apoptosis [J]. *Biochim Biophys Acta*, 2013, 1831(10): 1542–1554.
- [12] CHEN L, DAR NJ, NA R, *et al.* Enhanced defense against ferroptosis ameliorates cognitive impairment and reduces neurodegeneration in 5xFAD mice [J]. *Free Radic Biol Med*, 2022, 180: 1–12.
- [13] 刘平阳, 刘占芳, 周红, 等. 生物质谱分析法在脂质组学的应用[J]. *中国生物工程杂志*, 2023, 43(1): 87–103.
- LIU PY, LIU ZF, ZHOU H, *et al.* Application of biological mass spectrometry in lipidomics [J] *China Biotechnol*, 2023, 43(1): 87–103
- [14] 赵净颖, 赵若含, 胡梅, 等. 基于脂质组学研究茶花鸡和科宝肉鸡胸肌脂质差异[J/OL]. *中国家禽*: 1-9. [2023-07-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1222.S.20221111.1458.028.html>
- ZHAO JY, ZHAO RH, HU M, *et al.* Lipid differences in breast muscle of chahua chicken and cobb broiler based on lipidomics [J/OL]. *China Poultry*: 1-9. [2023-07-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1222.S.20221111.1458.028.html>
- [15] 冯泽伟, 闫世雄, 赵若含, 等. 去势对武定鸡胸肌组织脂质组成的影响[J/OL]. *中国家禽*: 1-6. [2023-07-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1222.S.20230702.1359.006.html>
- FENG ZW, YAN SX, ZHAO RH, *et al.* Effect of ovariectomy on lipid composition of breast muscle tissue in wuding chicken [J/OL]. *China Poultry*: 1-6. [2023-07-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1222.S.20230702.1359.006.html>
- [16] CHIU HH, KUO CH. Gas chromatography-mass spectrometry-based analytical strategies for fatty acid analysis in biological samples [J]. *J Food Drug Anal*, 2020, 28(1): 60–73.
- [17] HEWAVITHARANA GG, PERERA DN, NAVARATNE SB, *et al.* Extraction methods of fat from food samples and preparation of fatty acid methyl esters for gas chromatography: A review [J]. *Arab J Chem*, 2020, 13(8): 6865–6875.
- [18] XIANG L, ZHU L, HUANG Y, *et al.* Application of derivatization in fatty acids and fatty acyls detection: Mass spectrometry-based targeted lipidomics [J]. *Small Methods*, 2020, 4(8): 1–19.
- [19] AMORES G, VIRTO M. Total and free fatty acids analysis in milk and dairy fat [J]. *Separations*, 2019, 6(1): 1–22.
- [20] SHEN S, ZHANG H, HUANG K, *et al.* Differentiation of cultivation areas and crop years of milled rice using single grain mass spectrometry [J]. *New J Chem*, 2019, 43(5): 2118–2125.
- [21] WANG SL, ZHU RY, ZHANG XL, *et al.* Rapid screening of low-quality cooking oil by extractive electrospray ionization mass spectrometry [J]. *Chin J Anal Chem*, 2021, 49(12): 43–48.
- [22] AHMMED MK, CARNE A, AHMMED F, *et al.* Positional distribution of fatty acids and phospholipid composition in King salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) head, roe and skin using nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2021, 363: 130302.
- [23] HAMA JR, FITZSIMMONS-THOSS V. Determination of unsaturated fatty acids composition in walnut (*Juglans regia* L.) oil using NMR spectroscopy [J]. *Food Anal Methods*, 2022, 15(5): 1226–1236.
- [24] XU L, LIU C, LI S, *et al.* Association of lipidome evolution with the corresponding volatile characteristics of postmortem lamb during chilled storage [J]. *Food Res Int*, 2023, 169: 112916.
- [25] ZHANG M, FU JJ, MAO JL, *et al.* Lipidomics reveals the relationship between lipid oxidation and flavor formation of basic amino acids participated low-sodium cured large yellow croaker [J]. *Food Chem*, 2023, 429: 136888.
- [26] BODZON-KULAKOWSKA A, ARENA R, MIELCZAREK P, *et al.* Mouse single oocyte imaging by MALDI-TOF MS for lipidomics [J]. *Cytotechnology*, 2020, 72(3): 455–468.
- [27] FREEMAN C, HYNDS HM, CARPENTER JM, *et al.* Revealing fatty acid heterogeneity in staphylococcal lipids with isotope labeling and RPLC-IM-MS [J]. *J Am Soc Mass Spectrom*, 2021, 32(9): 2376–2385
- [28] BOUZA M, LI Y, WANG AC, *et al.* Triboelectric nanogenerator ion mobility-mass spectrometry for in-depth lipid annotation [J]. *Anal Chem*, 2021, 93(13): 5468–5475.
- [29] BOENZI S, CATESINI G, SACCHETTI E, *et al.* Comprehensive-targeted lipidomic analysis in niemann-pick C disease [J]. *Mol Genet Metab*, 2021, 134(4): 337–343.
- [30] WANG J, XU L, XU Z, *et al.* Liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry and rapid evaporative ionization mass spectrometry were used to develop a lamb authentication method: A preliminary study [J]. *Foods*, 2020. DOI: 10.3390/FOODS9121723
- [31] CHENG J, LI Y, WANG Y, *et al.* Quaterization derivatization with bis(pyridine) iodine tetrafluoroborate: High-sensitivity mass spectrometric analysis of unsaturated fatty acids in human thyroid tissues [J]. *Anal Chem*, 2022, 94: 11185–11191.
- [32] MATYASH V, LIEBISCH G, KURZCHALIA TV, *et al.* Lipid extraction by methyl-tert-butyl ether for high-throughput lipidomics [J]. *J Lipid Res*, 2008, 49(5): 1137–1146.
- [33] ULMER CZ, JONES CM, YOST RA, *et al.* Optimization of folch, bligh-dyer, and matyash sample-to-extraction solvent ratios for human plasma-based lipidomics studies [J]. *Anal Chim Acta*, 2018, 1037: 351–357.
- [34] REICHL B, EICHELBERG N, FREYTAG M, *et al.* Evaluation and

- optimization of common lipid extraction methods in cerebrospinal fluid sample [J]. *J Chromatogr B*, 2020, 1153: 122271.
- [35] KAMPHORST JJ, FAN J, LU W, *et al.* Liquid chromatography-high resolution mass spectrometry analysis of fatty acid metabolism [J]. *Anal Chem*, 2011, 83(23): 9114–9122.
- [36] INNES JK, CALDER PC. Marine omega-3 (N-3) fatty acids for cardiovascular health: An UPdate for 2020 [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(4)
- [37] DI-MEO MC, SALZANO A, ZOTTI T, *et al.* Plasma fatty acid profile in Italian Holstein-Friesian dairy cows supplemented with natural polyphenols from the olive plant *Olea europaea* L. [J]. *Vet Anim Sci*, 2023, 21: 100298.
- [38] ZHANG J, CAO J, GENG A, *et al.* UHPLC-QTOF/MS-based comparative metabolomics in pectoralis major of fast- and slow-growing chickens at market ages [J]. *Food Sci Nutr*, 2022, 10(2): 487–498.
- [39] XU W, XU X, ZHOU G, *et al.* Changes of intramuscular phospholipids and free fatty acids during the processing of Nanjing dry-cured duck [J]. *Food Chem*, 2008, 110(2): 279–284.
- [40] 邹金浩, 唐道邦, 林耀盛, 等. 5 种珍禽腿肉营养品质及风味评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(6): 1834–1842.
- ZOU JH, TANG DB, LIN YS, *et al.* Nutritional quality and flavor evaluation of kinds of rare poultry thigh meats [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(6): 1834–1842

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

### 作者简介



许辰杨, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: xuchenyangadc@foxmail.com



张军民, 博士, 研究员, 主要研究方向为优质功能畜禽肉蛋生产、饲料安全风险评估与新植提产品开发相关研究。

E-mail: zhangjunmin@caas.cn

中国仪器仪表学会