

## 自制表面解吸大气压化学电离质谱装置检测不饱和脂肪酸

张小平\*, 胡平花, 张军, 杨文雯, 曹晶晶

东华理工大学, 江西省质谱科学与仪器重点实验室, 南昌 330013

**摘要:** 为应对当前化学教学实验多以验证性实验为主且学生自主创新能力不足的现状, 设计了一项新实验——“自制表面解吸大气压化学电离质谱装置检测不饱和脂肪酸”。通过让学生自主搭建常压电晕放电电离装置, 他们可以深入理解电离与环氧化的原理, 激发实验主动性。这种自制装置简便高效, 大幅降低教学成本, 同时避免使用有机试剂, 体现绿色环保理念。在本实验中, 学生将研究新型活性物种水自由基阳离子( $\text{H}_2\text{O})_2^{+}$ 与油酸的C=C键的环氧化反应, 以实现快速定量分析。该实验考察了分析化学的基本操作及有机质谱实验技能, 旨在培养学生的动手能力及科学创新思维, 非常适合用于本科化学实验教学。

**关键词:** 油酸; 直接质谱分析; 定量分析; 教改实验; 无需样品预处理

**中图分类号:** G64; O6

## Self-Developed Surface Desorption Atmospheric Pressure Chemical Ionization Mass Spectrometry for Detection of Unsaturated Fatty Acids

Xiaoping Zhang\*, Pinghua Hu, Jun Zhang, Wenwen Yang, Jingjing Cao

Jiangxi Key Laboratory for Mass Spectrometry and Instrumentation, East China University of Technology,  
Nanchang 330013, China.

**Abstract:** In response to the current situation in chemistry education, where experiments predominantly focus on verification and students' ability for independent innovation is limited, a novel experiment titled "Self-developed Surface Desorption Atmospheric Pressure Chemical Ionization Mass Spectrometry for Detection of Unsaturated Fatty Acids" has been designed. By guiding students to build their own atmospheric corona discharge ionization device, the experiment offers a deep understanding of the principles of ionization and epoxidation, encouraging experimental initiative. The homemade device is simple, efficient, and significantly reduces teaching costs, while also avoiding the use of organic reagents, reflecting an environmentally friendly approach. In this experiment, students investigate the epoxidation of the C=C bond of oleic acid with the water radical cation ( $\text{H}_2\text{O})_2^{+}$ , a novel active species, for the rapid quantitative analysis of oleic acid in vegetable oils. The experiment emphasizes essential analytical chemistry techniques and organic mass spectrometry skills, with the goal of cultivating students' hands-on abilities and fostering scientific innovation. This experiment is particularly suitable for undergraduate chemistry laboratory courses.

**Key Words:** Oleic acid; Direct mass spectrometry; Quantitative analysis; Teaching reform experiment;  
No sample pretreatment

收稿: 2024-05-17; 录用: 2024-10-10; 网络发表: 2024-12-04

\*通讯作者, Email: zhangxpsunshine@163.com

基金资助: 江西省高等学校教学改革研究项目(JXJG-21-6-23); 江西国家级大学生创新创业训练计划(202310405004X); 东华理工大学实验技术开发项目(DHSY-202315); 东华理工大学校级教改项目(1310101295)

为应对当前本科化学实验多为验证性实验、忽视学生创新能力培养的现状，结合我国在质谱等高端科学仪器领域面临的“卡脖子”问题，并依托我校培养具有较强科研实践创新能力的复合型本科人才的办学定位，本团队基于质谱科学与仪器国际联合研究中心等科研平台，设计了一项新创实验。该实验旨在培养具备实践创新能力的复合型人才。该新创实验隶属于我校特色课程——质谱科学与仪器，面向应用化学专业三年级学生开设，为课程新增实验。实验通过引导学生深入理解质谱原理及其关键部件——离子源，鼓励学生自主设计、搭建并组装离子源，旨在培养学生对仪器研制的兴趣，激发创新思维，并提升实践动手能力<sup>[1]</sup>。同时，实验中还引导学生处理和分析数据，培养其科学思维能力和解决问题的能力，帮助学生掌握正确的学习方法和基础的科学研究方法<sup>[2]</sup>。最终，实验致力于培养具备科研实践创新能力的应用型本科人才。

不饱和脂肪酸在植物油中扮演着关键角色，影响其营养价值和感官特性<sup>[3]</sup>。不同品种、不同生产地理区域的植物油中不饱和脂肪酸(如油酸、亚油酸和亚麻酸)的组成差异很大<sup>[4]</sup>。因此，植物油中不饱和脂肪酸的快速定性定量分析对于鉴别不同品种和确定其地理来源至关重要。然而，传统的分析检测方法通常需要繁琐的提取步骤，这些过程耗时，且需要使用大量的有机溶剂等<sup>[5]</sup>。因此，需要开发装置简单、灵敏度高、分析速度快、无需样品预处理的方法，以实现植物油中不饱和脂肪酸的直接检测分析。本团队通过精密调控能荷传递方式，设计了能高效产生水二聚体自由基阳离子 $(\text{H}_2\text{O})_2^{+\bullet}$ 的电晕放电电离装置<sup>[6-8]</sup>，并探索了 $(\text{H}_2\text{O})_2^{+\bullet}$ 的高反应活性，如环氧化己烯醇分子中的C=C双键<sup>[7,8]</sup>。

在此基础上，本团队设计了“自制表面解吸大气压化学电离质谱装置高效检测不饱和脂肪酸”新创教学实验。该实验基于 $(\text{H}_2\text{O})_2^{+\bullet}$ 环氧化不饱和脂肪酸C=C进而区分双键位置的衍生策略，通过自行研制并组装表面解吸大气压化学电离装置制备出 $(\text{H}_2\text{O})_2^{+\bullet}$ ，利用其高效捕获并活化不饱和脂肪酸C=C的特性，实现无需样品预处理条件下植物油中不饱和脂肪酸的直接、快速、高灵敏检测分析。该新创实验的优势包括：① 策略新颖，尚未有基于 $(\text{H}_2\text{O})_2^{+\bullet}$ 环氧化不饱和脂肪酸的文献报道；② 离子-分子反应速度快、选择性高、形成的产物易解离产生双键定位特征离子；③ 样品分子避免直接接触高压，保证实际样品的无创、直接检测；④ 装置简单、环境友好、无需有机衍生试剂、无需样品预处理。这一新创实验已纳入我校特色课程——质谱科学与仪器，面向应用化学专业三年级学生开设，成为课程的新增实验内容。实验主要涉及在线反应装置搭建、标准溶液配制、质谱仪操作、谱图解析和数据处理等，实现有机化学、分析化学及食品科学等多个二级学科的交叉融合，综合性与创新性较强<sup>[9,10]</sup>。

## 1 实验部分

### 1.1 实验目的

- (1) 掌握质谱分析过程基本原理和离子源设计思路。
- (2) 理解 $(\text{H}_2\text{O})_2^{+\bullet}$ 的形成过程和与双键作用的环氧化反应机理。
- (3) 掌握植物油中油酸的检测与定量分析方法。
- (4) 熟练质谱数据分析软件的使用。

### 1.2 实验装置

自制常压电晕放电电离装置基于表面解吸常压化学电离原理，包括：表面解吸常压化学电离源(surface desorption atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry, DAPCI)、用于放置样品的玻璃片、可控温陶瓷加热板、用于固定玻璃片和加热板的铁架台，见图1。

该DAPCI装置中可控温陶瓷加热板的添加促进了样品从表面解吸出来，使信号强度显著增加，实现了在不通过载气引入水蒸气的条件下制备出丰富的 $(\text{H}_2\text{O})_2^{+\bullet}$  ( $m/z$  36)。该装置易于搭建、操作简便，无需萃取过程直接检测植物油，避免了萃取过程中油酸的损失，同时也避免了喷雾系统和钢瓶等笨重仪器设备的使用，有利于在小型质谱仪上进行现场快速分析。

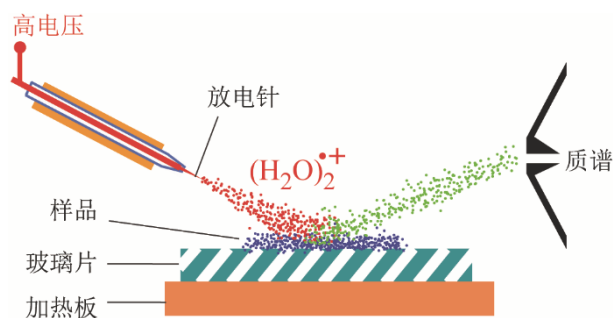
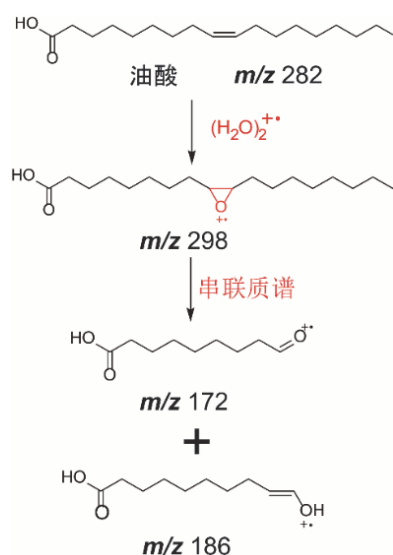


图1 自制表面解吸常压化学电离装置

### 1.3 实验原理

本实验设计基于 $(\text{H}_2\text{O})_2^+$ 环氧化不饱和脂肪酸 $\text{C}=\text{C}$ 进而区分双键位置的衍生策略。通过自行研制并组装表面解吸大气压化学电离装置，制备出 $(\text{H}_2\text{O})_2^+$ ，利用其高效捕获并活化不饱和脂肪酸 $\text{C}=\text{C}$ 的特性，建立油酸与 $(\text{H}_2\text{O})_2^+$ 作用形成环氧化产物并解离形成诊断双键位置特征离子的方法。该方法无需样品预处理，可实现植物油中油酸的直接、快速、高灵敏检测分析。实验原理如图2所示。

图2  $(\text{H}_2\text{O})_2^+$ 与油酸作用形成环氧化产物并解离成定位双键特征离子的原理过程

### 1.4 实验试剂与仪器

本实验所用主要试剂及材料见表1，所用主要仪器零件见表2。大豆油、玉米油、花生油等购自当地商店；去离子水由本实验室Millipore纯水仪器制备；所有试剂均未经进一步处理直接使用。

### 1.5 实验步骤

#### (1) DAPCI离子源研制

DAPCI电离源的初级离子是通过电晕放电产生的，而电晕放电是一个复杂的物理化学过程。当高电压加载在放电针上时，由于放电针针尖的曲率半径很小，容易发生稳定的电晕放电。电晕放电首先将针尖附近容易电离的物质电离，在电场的作用下，这些被电离的物质与其周围的中性粒子发生碰撞，将电荷传递给这些粒子，使之带电，这些带电的粒子在电场的作用下又与其周围的中性粒子碰撞，如此循环，最终生成高密度的初级离子。

表1 本实验所用试剂及材料

名称	性状	纯度或规格	制造商
油酸	无色油状液体	≥ 98%	上海麦克林生化科技股份有限公司
2-三烯酸	无色液体	≥ 98%	上海麦克林生化科技股份有限公司
重氧水(H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O)	无色液体	99.9%	美国剑桥同位素实验室有限公司
玉米油	液体	食用级别	益海嘉里金龙鱼食品集团有限公司
大豆油	液体	食用级别	益海嘉里金龙鱼食品集团有限公司
花生油	液体	食用级别	益海嘉里金龙鱼食品集团有限公司
亚麻籽油	液体	食用级别	益海嘉里金龙鱼食品集团有限公司

表2 本实验所用主要仪器装置

仪器名称	型号	制造商
移液枪1000 μL	大龙	大龙兴创实验仪器(北京)有限公司
移液枪100 μL	大龙	大龙兴创实验仪器(北京)有限公司
分析天平	BSA124S-CW	爱来宝(济南)生物技术有限公司
线性离子阱质谱仪	LTQ-XL	赛默飞世尔科技(中国)有限公司
玻璃片	7105型	华中实验器材厂
可控温陶瓷加热板	JH SG-1102	江海电热仪表贸易有限公司
表面解吸大气压化学电离源	自行研制	江西省质谱科学与仪器重点实验室

DAPCI-MS典型结构示意图如图1所示,从中可以看出,DAPCI源主要由毛细管及置于毛细管中的高压放电针及相应的辅助试剂引入系统构成。放电针在高压下发生电晕放电产生初级离子,辅助试剂引入系统方便地将初级离子化试剂引入DAPCI源。放电针针尖端与质谱仪进样口及样品表面三者间的空间位置等参数,即放电针针尖与样品表面的距离 $a$ 、角度 $\alpha$ ,样品表面与质谱仪进样口之间的距离 $b$ 、角度 $\beta$ 等四个参数,直接或将间接影响离子的产生以及传输,进而影响最终的分析结果。因此,在实验中需要准确调节这些参数以优化实验效果。

## (2) 搭建在线装置

将温控陶瓷加热板、玻璃片和离子源分别固定在铁架台上,调节玻璃片和放电针位置,使二者位于同一水平线。调节放电针与离子源使其位于玻璃片上方1 cm处。调节放电针与质谱口间距为8 mm,放电针与样品板间角度为30°,温控陶瓷加热板温度为90 °C,如图3所示。此装置操作简便且成本低廉,非常适用于教学实验和小型质谱的快速分析。

## (3) 质谱参数设置

质谱仪采用美国赛默飞公司的线性离子阱质谱仪(LTQ-XL),设置为正离子检测模式,检测范围为 $m/z$  15–200 Da。实验中,毛细管电压设定为1 V,管透镜电压为30 V,电离电压为3.0 kV,离子传输管温度保持在175 °C。在一级质谱分析中,采用背景扣除法以提高信噪比,串联质谱分析则使用碰撞诱导解离(collision induced dissociation, CID)技术进行。串联质谱实验中,设定 $m/z$ 宽度为1 Da,碰撞气体选用氦气,碰撞能量为15%–30%之间优化,碰撞时间为30 ms。

## (4) 样品处理

使用分析天平称取3份0.100 g不同种类的植物油样品。每份植物油样品中加入1 mL异丙醇溶解,得到浓度100 mg·mL<sup>-1</sup>的溶液。

## (5) 信号采集

首先对目标离子进行质谱条件优化。用移液枪吸取100 μL植物油溶液滴于玻璃片上,采集一级谱图0.5 min,改为串联质谱采集0.5 min。重复以上实验步骤3次。

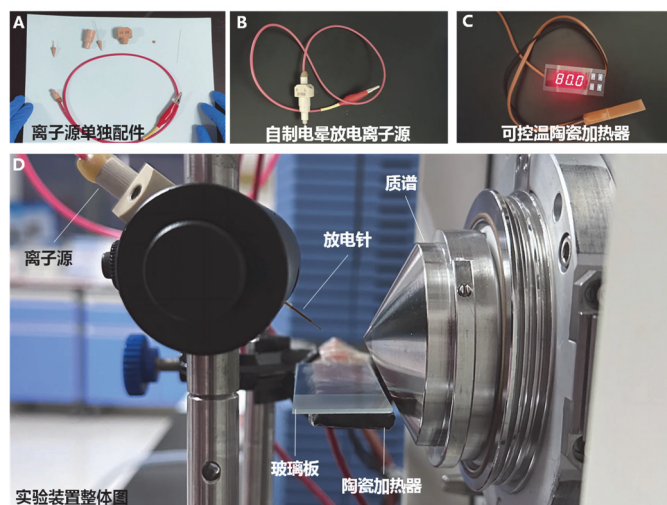


图3 耦合表面解吸大气压化学电离装置、陶瓷加热板、质谱仪

(A) 离子源单独配件; (B) 自制电晕放电离子源; (C) 可控温加热陶瓷器; (D) 实验装置整体图

#### (6) 标准曲线绘制

选择2-三烯酸作为内标, 在所有脂肪酸标准溶液和植物油样品中其浓度保持在 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。以油酸为例, 在异丙醇中配制浓度为 $0.1$ 、 $1$ 、 $5$ 、 $10$ 、 $50$ 、 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标准溶液。按顺序在线监测油酸环氧化物( $m/z$  298)和内标环氧化物( $m/z$  228)的离子信号强度。根据相应环氧化物的离子强度( $m/z$  298/228)与脂肪酸浓度之比绘制校准曲线。实际植物油样品用异丙醇稀释至 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。然后, 将 $m/z$  298/228的比值输入到校准曲线中, 即可计算出所有植物油中油酸的浓度。

#### (7) 数据处理

使用Xcalibur软件(Version 3.0, Thermo Fisher Scientific, USA)对质谱数据进行处理与分析。该软件操作简便, 适合教学实验中的数据分析, 学生可以通过该软件直观了解质谱数据的分析方法及结果。

### 1.6 注意事项

- (1) 2-三烯酸对皮肤和眼睛有一定刺激性, 实验过程中需佩戴手套与口罩, 在通风橱中配制溶液;
- (2) 实验开始前先检查质谱参数(如真空压力、离子规等)是否正常, 实验过程中避免接触高压线;
- (3) 同一组实验过程中需保证玻璃片位置不变, 减小误差;
- (4) 在高压区域和电线周围设计并安装耐高压的绝缘防护罩, 确保任何情况下都不会直接接触到高压线路;
- (5) 在所有高压点和设备上贴上清晰的警告标识, 提醒操作人员注意高压风险;
- (6) 配备自动断路装置, 当检测到异常电流或短路情况时, 立即切断电源, 防止任何进一步的危险;
- (7) 在实验课程开始前, 对学生进行详细的安全培训, 确保他们了解高压实验的风险及需要遵循的安全操作规范。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验重现性及学时说明

本实验所开发的新型DAPCI装置适用于所有含 $\text{C}=\text{C}$ 物质的检测与定量, 可应用于生物分析、化学研究和食品安全检测等多个领域。多次重复实验表明当电离电压为 $4.0 \text{ kV}$ 、陶瓷加热板温度为 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 、放电针与质谱口间距为 $8 \text{ mm}$ 、毛细管温度为 $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 环氧化物离子信号最强。本科生实

验均在最优条件下进行。经过多次同位素串联质谱实验，验证了 $m/z$  298为油酸与 $(\text{H}_2\text{O})_2^+$ 反应生成的环氧化产物[油酸+O] $^{+}$ 。

经全流程多次重复实验，本实验阶段学时分配如表3所示，具体分为四个阶段，包括：1) 学生课前预习、调研报告撰写；2) DAPCI离子源研制、组装，环氧化反应装置搭建与质谱仪器操作；3) 油酸环氧化反应分析方法的建立，实际植物油样品中油酸的定性、定量分析；4) 质谱实验数据处理与分析整理、实验报告撰写。共计16.0学时，为本科综合实验。通过对整个实验过程进行板块化设计，各高校可根据学校实际教学学时和学生知识背景进行部分或全部实验，从而满足不同教学目标的需求。

表3 阶段学时分配

阶段	主要任务	具体操作	耗时
阶段一	课前预习 调研报告撰写	学生提前预习油酸与 $(\text{H}_2\text{O})_2^+$ 环氧化机理及产物裂解机理，了解质谱仪基本操作	2.0学时
阶段二	DAPCI离子源研制、组装，环氧化反应装置搭建与质谱仪器操作	学生参与设计并组装DAPCI离子源、搭建DAPCI-MS在线反应装置，并完成实验条件、装置参数的优化表征	4.0学时
阶段三	油酸环氧化反应分析方法的建立，实际植物油样品中油酸的定性、定量分析	实际样品数据的收集，标线浓度的配制与实验、实际植物油样品的检测分析	8.0学时
阶段四	质谱实验数据处理与分析整理、实验报告撰写	绘制标准曲线完成定量分析	2.0学时

## 2.2 装置搭建与制备水自由基阳离子

首先通过自制的表面解吸常压化学电离装置(图1和图3)，调控能荷传递过程制备出丰富的水自由基阳离子(图4)。在图4中可观察到离子峰 $m/z$  36,  $m/z$  37,  $m/z$  54和 $m/z$  55, 其中,  $m/z$  36离子强度最高。结合实验数据和文献报道<sup>[6-8]</sup>,  $m/z$  36和 $m/z$  54分别对应于 $(\text{H}_2\text{O})_2^+$ 和 $(\text{H}_2\text{O})_3^+$ , 而 $m/z$  37和 $m/z$  55分别对应于 $(\text{H}_2\text{O})_2\text{H}^+$ 和 $(\text{H}_2\text{O})_3\text{H}^+$ 。

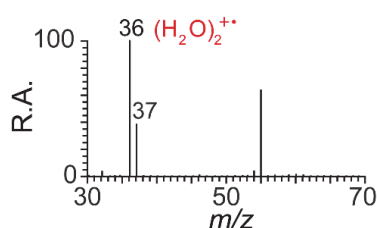


图4 水自由基阳离子团簇与质子化的水自由基阳离子团簇质谱图

R.A.代指Relative abundance

## 2.3 油酸与水自由基阳离子环氧化分析方法的建立

加入一定浓度的油酸标准品溶液，使其与水自由基阳离子作用并发生环氧化反应，形成的环氧化产物实验结果如图5A所示，可观察到质荷比增加16的离子峰 $m/z$  298，对其进行串联质谱分析可以生成质荷比为 $m/z$  172和 $m/z$  186的两种离子(图5B)，该离子的形成为三元环环氧化产物开环所形成，具体的裂解途径如图5C所示。当使用重氧水同位素时，也会观测到相应的环氧化产物离子 $m/z$  300(图5D)，经串联质谱分析得到特征碎片离子对 $m/z$  174和 $m/z$  188(图5F)，为相应的环氧化产物开环所形成。由于串联质谱中产生的两种离子对与双键位置的断裂有关，因此被称之为双键位置的诊断离子。综上，不饱和脂肪酸 $\text{C}=\text{C}$ 位置不同，环氧化产物碎裂产生的诊断碎片离子也不同，可明确指定 $\text{C}=\text{C}$ 位置。

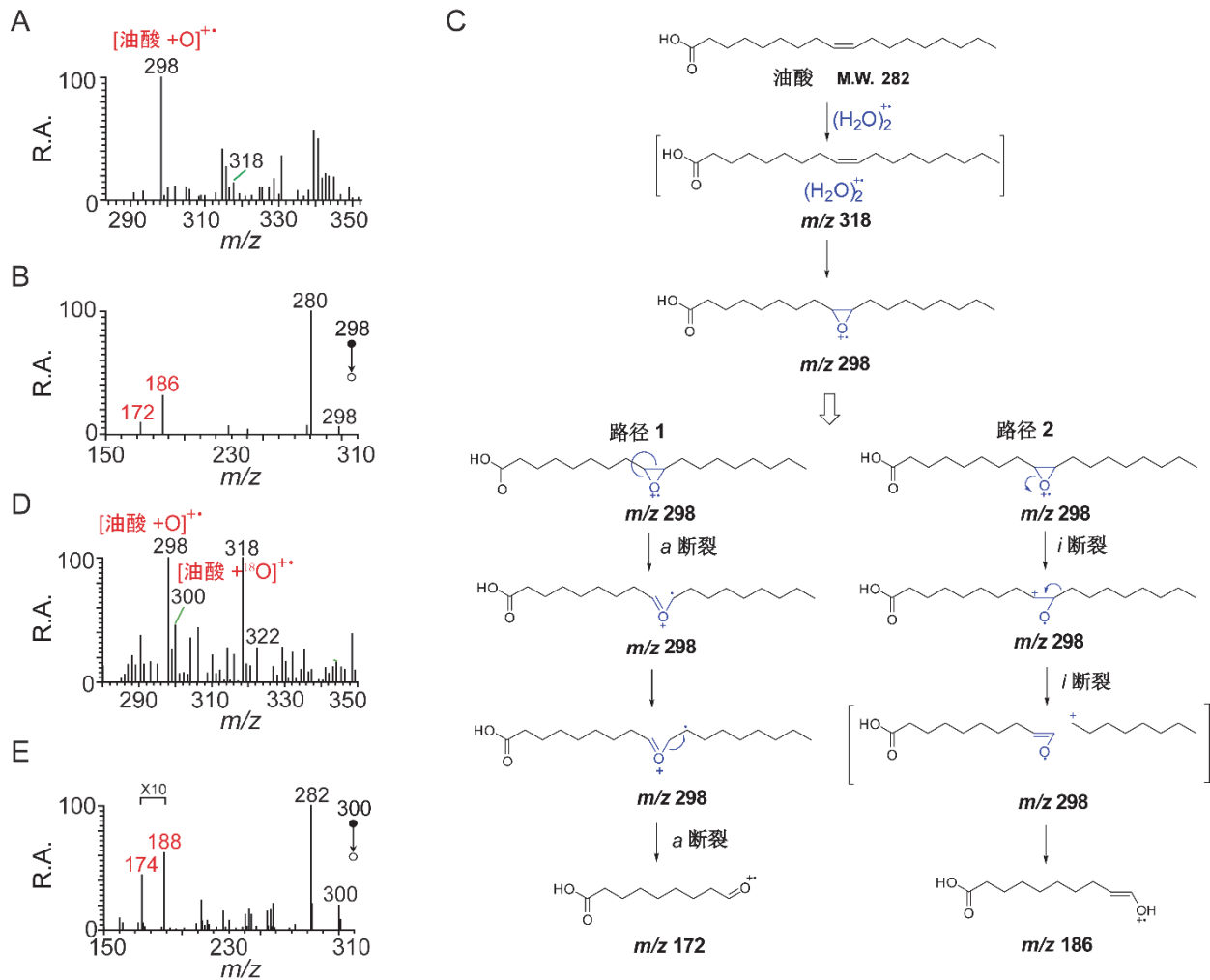


图5 油酸环氧化物( $m/z$  298)的产生与其相应的CID-MS串联质谱

(A) 油酸与水自由基阳离子作用的质谱图; (B) 油酸环氧化产物的串联质谱图; (C) 油酸环氧化产物的形成与裂解过程;  
(D) 油酸与重氧水自由基阳离子作用的质谱图; (E) 重氧同位素标记油酸环氧化产物的串联质谱图

实验条件会影响环氧化物产物的检测灵敏度。因此,对电晕放电电离电压、加热板温度、针尖到质谱入口的距离、毛细管温度等进行了优化。放电电压优化范围为2.5–5.0 kV(图6A)。当放电电压在2.5–4.0 kV时,  $m/z$  298的响应强度增加,然后保持在4.0 kV。因此,电晕放电电离电压设为4.0 kV,用于后续实验。优化后的毛细管温度、针尖到MS入口的距离和加热板温度分别如图6B、图6C和图6D所示。当加热板温度低于280 °C时,信号强度随温度的升高而显著增加,高于280 °C时则无明显变化(图6B)。当针尖到质谱入口的距离优化为8 mm(图6C),毛细管温度优化为280 °C(图6B)时,  $m/z$  298的信号强度最强。对于加热板温度,在40–90 °C范围内,  $m/z$  298离子的信号强度随温度的升高而显著增加,90 °C之后变化不明显(图6D)。因此,后续实验将加热板温度设置为90 °C。

## 2.4 植物油中油酸的定性检测分析

使用DAPCI-MS在线监测不同植物油中油酸与 $(\text{H}_2\text{O}_2)^+$ 的环氧化反应,得到相应的植物油指纹图谱。油酸环氧化产物 $m/z$  298的峰清晰可见(图7)。图7为植物油(大豆油、花生油、亚麻籽油和玉米油)经 $(\text{H}_2\text{O}_2)^+$ 环氧化后的表面解吸大气压化学电晕放电电离质谱图。这些光谱都经过了背景噪声校正。质谱分析表明,这些植物油均可检测到油酸环氧化产物 $m/z$  298。其中,  $m/z$  294和 $m/z$  296可能为亚麻酸、亚油酸的环氧化物。这些产物均采用串联质谱进行辅助验证。

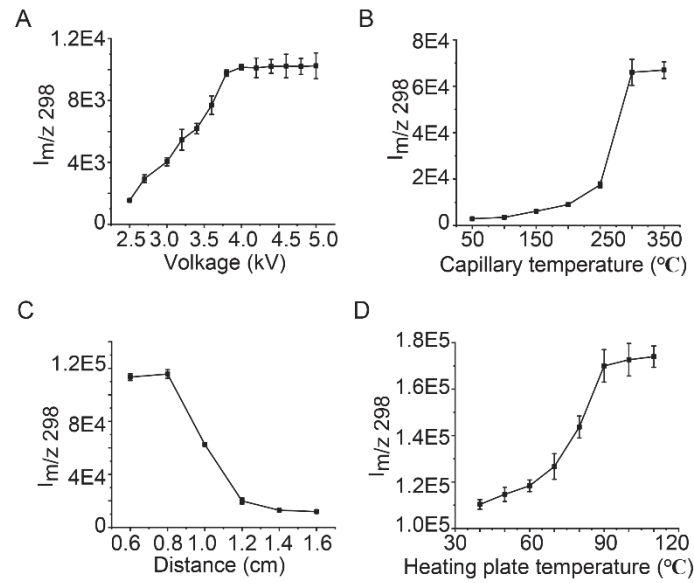


图6 实验条件优化结果

(A) 电压; (B) 毛细管温度; (C) 距离; (D) 加热板温度  
I代指Intensity

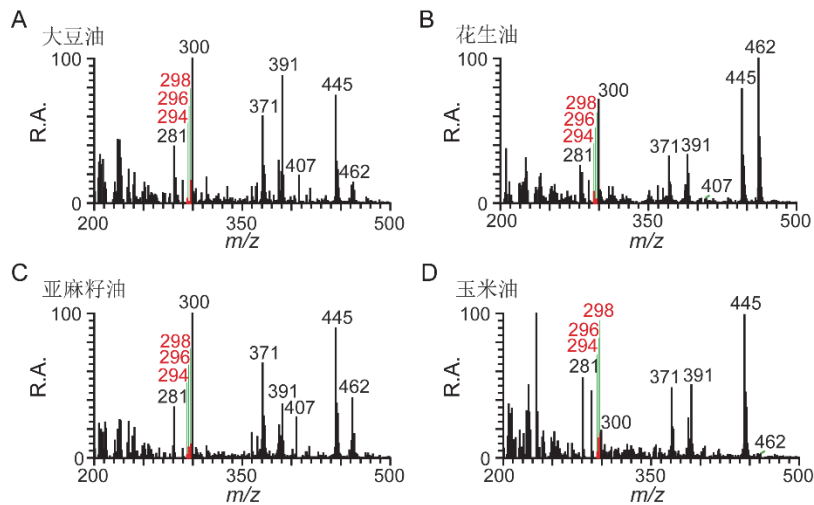


图7 不同植物油的油酸与水自由基阳离子作用形成环氧化物( $m/z$  298)的质谱指纹图

(A) 大豆油; (B) 花生油; (C) 亚麻籽油; (D) 玉米油

## 2.5 植物油中油酸的定量检测分析

采用内标法对大豆油、花生油、亚麻油和玉米油中的油酸进行了定量分析。2-三烯酸被选为内标。以油酸环氧化产物与内标环氧化产物的信号强度比为纵坐标，油酸与内标混合溶液的浓度( $0.01\text{--}100\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )为横坐标进行标准曲线绘制，得到图8。该方法检出限为 $1.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，与传统方法差不多，省去了复杂的预处理等步骤。我们在不同条件下测试了不同类型的油，重点关注回收率和重现性。结果表明，不同样品的回收率均在可接受范围内( $8\%\text{--}12\%$ )，准确度可靠。该方法重现性好，在不同实验条件下，相对标准偏差均在 $4\%$ 以下。根据标准曲线，可以得到不同品种油中油酸的准确含量。例如，学生测试的一组大豆油、花生油、亚麻籽油与玉米油中油酸的含量分别为 $185.3$ 、 $501.4$ 、 $189.1$ 、 $219.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。该含量结果与文献报道一致<sup>[11]</sup>，验证了我们所建立的方法的准确性与有效性。

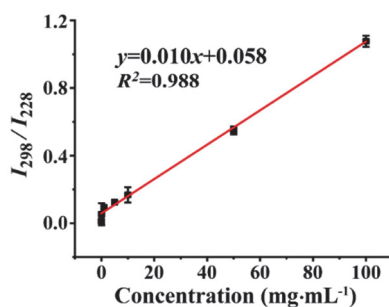


图8 油酸定量标准曲线

### 3 本实验涉及知识点

本实验涉及的知识点如表4所示，主要包含有机化学、分析化学、食品科学等。

表4 本实验涵盖的教学知识点

二级学科	教学板块	教学知识点	主要原理
有机化学	有机反应及机理	双键与(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> <sup>+</sup> 的环氧化反应	环氧化反应机理
分析化学	溶液配制、仪器基本操作、 质谱分析	移液枪、外标定量法、梯度稀释、 分析天平、质谱仪、谱图解析	环氧化产物裂解机理、线性相关分析
食品科学	食品检测	植物油中油酸的定性与定量分析	诊断离子信号强度与浓度间的线性关系

### 4 结语

本实验创新性设计并研制了表面解吸常压化学电离源装置，并基于该装置制备了活性物种水自由基阳离子，开发出一种测定不饱和脂肪酸中C=C位置的方法，实现了植物油中不饱和脂肪酸的快速定性定量分析。该方法相较于传统方法具有检测快速、无需衍生试剂、条件温和以及操作简单的优点，包含完整的分析化学基本实验操作和简单的有机质谱实验技能，教学意义丰富。在实验中，学生自主设计、组装在线检测装置，有利于加深对电离基本过程和环氧化反应的机理的认识。本实验结合教学实际情况，针对不同高校进行了板块化设计，高校既能选取部分实验作为基础实验教学，又能选取全部作为本科综合实验。实验知识点涉猎广泛，涉及有机化学、分析化学以及食品科学等多个二级学科，具有多学科交叉的特点，有利于学生融会贯通。且所使用的表面解吸常压化学电离源是一种新型自制电离源，应用广泛，可与生物、医学、环境和食品等学科结合，拓展新的综合实验，促使学生拓展知识视野。

### 5 实验特色与创新性

(1) 引导学生设计、组装质谱关键部件离子源。学生通过自主组装常压电晕放电电离装置有利于锻炼思考能力，加深对电离基本原理的理解；

(2) 开发无需样品预处理、结构简单的环氧化装置。本实验不需要催化剂，省去了萃取过程，分析速度快，且氧化剂由空气中的水电离产生，廉价易得；

(3) 建立区分不饱和脂肪酸C=C位置的方法。本实验方法实现了不饱和脂肪酸C=C位置的定位，该方法后期有望应用于食品、生物医药等领域；

(4) 实际样品植物油中不饱和脂肪酸的定性、定量。本实验培养了学生利用所学知识解决复杂分析测试问题的能力；

(5) 该方法同样适用于分析其他不饱和脂肪酸，如亚油酸和亚麻酸等，能够适配多个检测体系，普适性强。另外，该方法能够精确定位C=C双键的位置，即使存在异构体，检测结构也不受影响。

本实验拓展性强, 适用于包括生物、化学、食品在内的多个领域, 同时模块化设计满足不同高校实际教学需要。

### 参 考 文 献

- [1] 郑彩娟, 李天略, 黄国雷, 周学明, 陈光英. *大学化学*, **2024**, *39* (7), 160.
- [2] 林佳丽, 吴舒婷, 郑琤, 林子俺, 魏巧华, 郑寿添. *大学化学*, **2024**, *39* (7), 129.
- [3] González-Becerra, K.; Ramos-Lopez, O.; Barrón-Cabrera, E.; Riezu-Boj, J. I.; Milagro, F. I.; Martínez-Lopez, E.; Martínez, J. A. *Lipids Health Dis.* **2019**, *18*, 178.
- [4] 穆同娜, 孙婷, 吴燕涛, 赵玉琪. *粮油食品科技*, **2011**, *19* (3), 36.
- [5] 赵先恩, 白玉, 刘虎威. *中国科学: 化学*, **2017**, *47* (12), 1392.
- [6] Zhang, X.; Su, R.; Li, J.; Huang, L.; Yang, W.; Chingin, K.; Balabin, R.; Wang, J.; Zhang, X.; Zhu, W.; *et al.* *Nat. Commun.* **2024**, *15* (1), 1535.
- [7] Yang, W.; Zhang, X.; Zhang, J.; Wang, G.; Liang, H.; Zhang, X.; Chingin, K.; Chen, H. *J. Agric. Food. Chem.* **2023**, *72* (1), 845.
- [8] Zhang, X.; Ren, X.; Chingin, K.; Xu, J.; Yan, X.; Chen, H. *Anal. Chim. Acta* **2020**, *1139*, 146.
- [9] 曹陶, 房方, 李念光, 张毅楠, 詹其琛. *大学化学*, **2024**, *39* (5), 63.
- [10] 刘利娟, 王雄雷. *大学化学*, **2024**, *39* (11), 1.
- [11] Tomé-Rodríguez, S.; Barba-Palomeque, F.; Ledesma-Escobar, C. A.; Miho, H.; Díez, C. M.; Priego-Capote, F. *Food Chem.* **2023**, *422*, 136175.