

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241104004

超高效液相色谱-串联质谱法测定固体减肥类 保健食品中的丙酮酸盐

金绍明^{1#}, 王耀楠^{2#}, 梁瑞强¹, 刘彤彤^{1*}, 曹 进¹

(1. 中国食品药品检定研究院食品化妆品检定所, 北京 100050; 2. 首都医科大学药学院, 北京 100069)

摘 要: **目的** 建立超高效液相色谱-串联质谱法测定保健食品中丙酮酸盐的检测方法。**方法** 保健食品经过研磨, 萃取等处理步骤后, 将萃取液酸化之后以游离丙酮酸的形式, 采用超高效液相色谱-串联质谱仪中进行测定。**结果** 丙酮酸钠在 0.1~10.0 $\mu\text{g/mL}$ 的范围内线性良好, 丙酮酸钠的检出限为 20 ng/mL, 定量限为 50 ng/mL; 在 0.25、2.50 和 7.50 $\mu\text{g/mL}$ 的质量浓度条件下, 回收率分别为 87.36%~94.19%, 相对标准偏差均小于 10% ($n=6$)。**结论** 本研究样品制备步骤简便、检测灵敏度高、重复性好, 可用于快速准确的测定食品中的丙酮酸的含量, 为丙酮酸的合理规范应用提供技术支撑。

关键词: 超高效液相色谱-串联质谱法; 丙酮酸盐; 丙酮酸; 保健食品

Determination of pyruvate in solid weight loss health food by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

JIN Shao-Ming^{1#}, WANG Yao-Nan^{2#}, LIANG Rui-Qiang¹, LIU Tong-Tong^{1*}, CAO Jin¹

(1. National Institutes for Food and Drug Control, Beijing 100050, China; 2. School of Pharmaceutic Science, Capital Medical University, Beijing 100069, China)

ABSTRACT: Objective To establish a method for determination of pyruvate in health food by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. **Methods** Health food undergoes processing steps such as grinding and extraction, and then the extracted solution was acidified and injected into an ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometer for analysis in the form of free pyruvic acid. **Results** The linearity of sodium pyruvate was good in the range of 0.1–10.0 $\mu\text{g/mL}$, with a limit of detection of 20 ng/mL and a limit of quantification of 50 ng/mL. At mass concentrations of 0.25, 2.50 and 7.50 $\mu\text{g/mL}$, the recovery rates were 87.36%–94.19%, the relative standard deviation was less than 10% ($n=6$). **Conclusion** This method has simple sample preparation steps, high detection sensitivity, and good repeatability, and can be used for rapid and accurate determination of pyruvic acid content in food, providing technical support for the rational and standardized application of pyruvic acid.

KEY WORDS: ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry; pyruvate; pyruvic acid; health food

#金绍明和王耀楠为共同第一作者

#JIN Shao-Ming and WANG Yao-Nan are Co-first Authors

*通信作者: 刘彤彤, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为食品化妆品分析。E-mail: liutongtong@nifdc.org.cn

*Corresponding author: LIU Tong-Tong, Master, Associate Professor, National Institutes for Food and Drug Control, Beijing 100050, China. E-mail: liutongtong@nifdc.org.cn

0 引言

丙酮酸是生物体内参与能量代谢的重要有机酸,是糖类、脂肪和蛋白质三大营养物质发挥代谢联系的关键小分子,在细胞进行氧化供能过程中发挥重要作用。它不仅存在于动物体内,还广泛存在于水果、奶酪、啤酒、红酒等食品中^[1]。丙酮酸在生物体内的有氧氧化和无氧酵解过程中均可发挥功能。丙酮酸在室温状态下以液体形式存在,在食品中多以丙酮酸盐的形式使用,比如丙酮酸钙、丙酮酸钠等。已有的科学研究证实,丙酮酸盐在体内具有加速脂肪消耗,增强身体机能,增强耐力,消除自由基抗氧化,抗疲劳等诸多生理功效^[2-4]。

丙酮酸钙盐早期作为膳食补充剂于 1997 在美国上市,宣称能够补钙并增强脂肪代谢,成为风靡一时的减肥产品^[5]。近年来,以丙酮酸盐为基础的食品及保健食品开发成为国内外研究的热点,市场前景广阔,生产能力也在不断扩大^[6-7]。丙酮酸盐的另一种形式丙酮酸钠的应用广泛,具有改善能量代谢,纠正细胞酸中毒,抗氧化应激等功能,对多脏器具有保护作用,其口服盐溶液配制步骤及使用方法均比较简单,在动物实验以及人体临床研究中的应用都具有显著优势,应用备受关注。

在食品应用领域,目前国内相关的法规中,丙酮酸只能作为香精香料进行添加,并没有丙酮酸钠、丙酮酸钙或者其他盐的形式作为食品添加剂的规定^[8]。相关的食品标准中缺少关于丙酮酸或丙酮酸盐的检测方法,监管缺少技术支撑^[9]。个别有减肥宣称的保健食品,在产品介绍中宣称添加丙酮酸钙,但在产品信息中又没有标示丙酮酸钙的含量,无法有效开展监管。开发快速灵敏高效的丙酮酸及丙酮酸盐的检测方法,对食品或保健食品中的丙酮酸进行检测或筛查,能够有效满足监管的需求,促进丙酮酸合理的推广应用,保障人民群众的食品安全。

丙酮酸是分子量只有 88 Da 的小分子,分子中有两个共轭的羰基,在紫外波长 320 nm 处有吸收,目前采用液相色谱法对丙酮酸进行定量检测,以直接或衍生化的形式检测丙酮酸的含量。丙酮酸盐的测定大多在酸性条件下将丙酮酸盐中的阳离子游离,之后测定丙酮酸的含量。但对于食品这种复杂基质来说,仅使用紫外检测器除了灵敏度不足之外,还易受基质中其他物质的干扰,难以准确测定丙酮酸。超高效液相色谱-串联质谱技术是当今小分子定量测定的先进技术^[10-18],有灵敏度高,重复性好,抗干扰能力强等特点,在食品检测领域已广泛应用^[19-24],但目前鲜少见关于丙酮酸的相关检测。鉴于此,本研究基于超高效液相色谱-串联质谱技术,克服了丙酮酸分子量小,沸点低,在质谱上响应较差的困难,开发食品中丙酮酸的定量方法,解决食品中丙酮酸准确测定的关键科学问题,为相关部门的监管工作提供方法依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

固体减肥类保健食品购自电商平台。

甲醇、甲酸、乙腈(质谱级,美国 Thermo Fisher Scientific 公司);丙酮酸钠(纯度 99%,美国 Sigma 公司);超纯水自制。

1.2 仪器与设备

TQS 超高效液相色谱-串联质谱仪、Masslynx 数据采集和分析软件(美国 Waters 公司);5430R 高速离心机(德国 Eppendorf 公司);MS3 漩涡混合器(德国 IKA 公司);Secura-225D 精密天平(精度 0.01 mg,德国 Sartorius 公司);Milli-Q 超纯水仪(美国 Millipore 公司);Zorbax SB-C₁₈ 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.8 μm, 美国 Agilent 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 标准溶液制备

标准储备溶液:精密称取丙酮酸钠固体 20.07 mg,转移至 10 mL 容量瓶中,加 8 mL 超纯水超声溶解后定容至刻度,得到质量浓度为 2 mg/mL 的储备溶液,放入冰箱冷藏保存,一周之内有效,使用之前需先取出静置 2 h,恢复至室温之后再稀释使用。

标准工作溶液:将丙酮酸钠储备溶液逐级稀释,制备质量浓度为 10.0、5.0、2.0、1.0、0.5、0.2、0.1 μg/mL 的系列标准工作溶液,待上机分析。

1.3.2 样品制备

取减肥保健食品 30 片,放入研钵内磨成粉末,之后平行称取 500 mg 粉末 18 份至 10 mL 容量瓶中,加水 8 mL 振荡均匀后超声 10 min 提取,之后加入甲醇(含 1%甲酸)定容至 10 mL。摇匀之后取上层液体离心,在 13000 r/min 条件下离心 10 min,取上清液进入质谱分析。18 份样品分为 3 组,分别为空白基质,低浓度质控和高浓度质控样本,每组 6 份样本。其中质控样本由储备溶液添加入基质溶液制得,两组质控样本的质量浓度分别为 0.25 μg/mL 和 2.5 μg/mL。

1.3.3 色谱分离条件

色谱柱:Zorbax SB-C₁₈ 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.8 μm);流动相: A. 0.1%甲酸水(*V:V*)溶液, B. 乙腈;进样体积 5 μL;流速 0.3 mL/min;柱温: 35 °C;总运行时间 5 min。梯度洗脱程序如表 1 所示。

表 1 液相色谱洗脱梯度变化参数

Table 1 Gradient variation parameters of liquid chromatography

时间/min	流动相体积分数/%	
	A	B
0	95	5
1.0	95	5
3.0	0	100
3.5	0	100
3.6	95	5
5.0	95	5

1.3.4 质谱条件

离子源模式: 电喷雾(electrospray ionization, ESI)离子源, 负离子模式, 毛细管电压, 3.0 kV; 锥孔电压: 10 V; 雾化气压力: 1.0 bar; 雾化气温度: 350 °C。质谱以多反应监测(multiple response monitoring, MRM)的模式进行数据采集, 采集离子对为 m/z 87.0> m/z 47.1, 碰撞能量: 8 eV; 扫描时间: 300 ms。

1.4 数据处理

本研究中引用的实验图谱和数据由 Waters Masslynx (version: 4.2)提供, 实验重复 6 次测定, 表格由 Microsoft Excel 2021 软件完成。

2 结果与分析

2.1 样本前处理方法优化

本研究测定的目标物为丙酮酸, 但在保健食品中添加时, 往往以丙酮酸钙或丙酮酸钠的形式, 因此在样本前处理时, 需调节提取溶剂的 pH, 使丙酮酸盐游离为丙酮酸的形式, 便于在质谱中进行检测。本研究分别尝试用含有甲酸的纯水, 甲醇, 水加甲醇混合作为提取溶剂, 甲酸的加入量分别选择 0.1%、0.5%、1.0%。以提取之后的质控样本在质谱中的响应来考察溶剂的提取效果, 首先选用纯水和纯甲醇进行提取, 结果发现, 使用纯水时会将基质中的非挥发性成分提出, 在质谱的离子源处析出, 影响了离子化效率, 造成信号偏低; 而用纯甲醇做为提取溶剂时, 酸化之后的丙酮酸溶解度受到影响, 信号响应也偏低。基于此, 本研究先用纯水提取样本, 之后混合甲醇进行定容, 尝试了水和甲醇的不同比例, 分别为 1:4、2:3、1:1、3:2、4:1 (V/V), 结果发现, 甲醇和水比例 1:4 时, 信号的响应较好, 当增加甲醇的比例时, 虽然信号的响应有所增高, 但由于溶剂效应, 丙酮酸的信号峰展宽比较严重, 影响正常测定, 因此最终确定甲醇和水的比例为 1:4。之后考察了甲酸加入的比例, 发现甲酸含量低于 1.0% 时, 酸化不完全, 丙酮酸的信号峰拖尾严重, 当甲酸含量高于 1.0% 时, 由于离子源在负离子模式下进行检测, 高比例的甲酸抑制了丙酮酸的信号, 因此最终选择甲酸的加入量控制在 1.0%。

2.2 仪器方法优化

2.2.1 流动相优化

本研究最初选用甲醇和水作为流动相, 两种液体均添加 0.1% 的甲酸。质谱采集时选用的负离子模式, 两种溶剂都添加甲酸会降低丙酮酸在离子源的离子化效率, 因此修改流动相为只在水相中添加甲酸^[25-27], 0.1% 甲酸水-甲醇洗脱的结果见图 1A 所示, 峰形对称但有少许拖尾, 将流动相改为乙腈后拖尾情况消失, 见图 1B 所示。因此最终选用的流动相洗脱体系为 0.1% 甲酸水-乙腈。

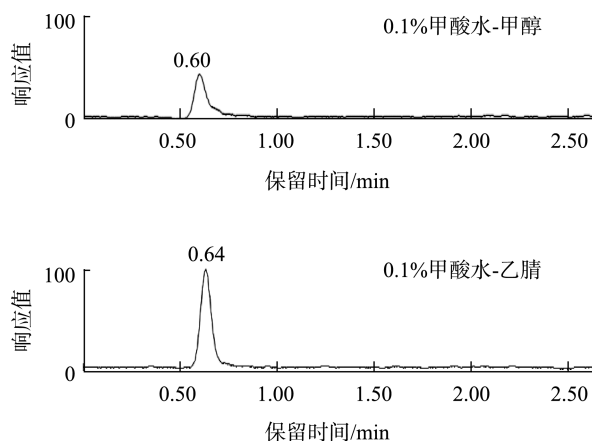


图1 不同流动相条件下丙酮酸的洗脱离子流图

Fig.1 Elution ion chromatogram of pyruvic acid under different mobile phase conditions

2.2.2 质谱采集参数优化

在进入质谱分析时需优化离子源和碰撞室的参数, 以获得最优的离子响应^[28-30]。样品引入电喷雾电离源电离时, 雾化气的压力和温度是影响离子化效率的关键参数, 本研究的目标物质丙酮酸是一个分子量只有 88 的小分子化合物, 沸点只有 165 °C, 雾化气的温度分别设置 350、450 和 550 °C 3 种条件, 结果在 350 °C 的时候丙酮酸的母离子质荷比响应最好。通常在质谱分析时, 雾化气的温度高的情况下, 引入的流动相能够迅速挥发, 带来质谱灵敏度的提高, 但在本研究中, 丙酮酸的沸点只有 165 °C, 过高的温度可能会引起分子结构的破坏, 因此在 350 °C 的条件下, 得到了最优的响应值。离子源中还有一个关键参数是锥孔电压, 通常锥孔电压的设置是为了让离子源产生的带电离子能够顺利进入质量分析器, 而不带电荷的中性分子被锥孔气吹出, 减少对仪器的污染。锥孔电压的设置值需要与分析目标物的分子量相匹配, 锥孔电压值过大会造成带电离子发生源内裂解, 降低分析的灵敏度。虽然锥孔电压设置过低会带来质谱污染的风险, 但为了得到较好的响应值, 本研究中将锥孔电压值设为 10 V。本研究采用的 MRM 模式, 需要采集丙酮酸经过碰撞池碎裂之后得到的碎片离子的响应值。在此过程中, 碰撞电压是决定碎片离子响应值的关键参数, 本研究对此参数进行了优化, 分别尝试了碰撞电压从 5 eV 到 20 eV 时碎片离子的响应值, 结果发现碎片离子的响应值最高时的碰撞电压值为 8 eV。丙酮酸经过优化之后的母离子全扫描和碎片离子质谱图如图 2 所示。

2.3 线性关系、检出限和定量限

将制备好的标准曲线系列工作溶液注入质谱仪测定, 将各样品中目标物信号峰的积分面积与样品的浓度做标准曲

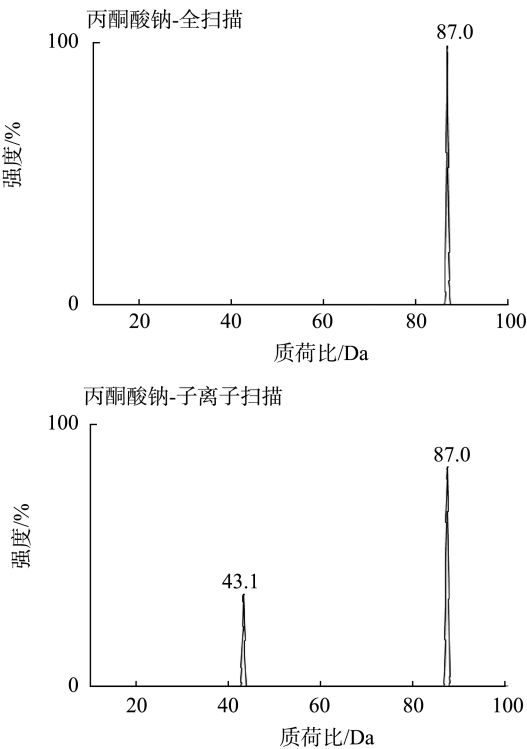


图2 丙酮酸的全扫描和子离子扫描质谱图
Fig.2 Full scan and product ion scan mass spectra of pyruvic acid

线,得到丙酮酸钠定量测定的线性范围为0.1~10.0 μg/mL,回归方程为 $Y=267.72X+44.787$ 和相关系数 $r^2=0.9993$,之后将标准曲线的最低点样品稀释之后分析,得到检出限($S/N=3$)为20 ng/mL,定量限($S/N=10$)为50 ng/mL。

2.4 添加回收率和精密度

分别向空白样本中加入丙酮酸钠,制备质量浓度为0.25、2.50和7.50 μg/mL的平行样本6份,依次注入超高效液相色谱-串联质谱仪进行测定,计算添加的回收率和相对标准偏差(relative standard deviation, RSD),结果见表2所示。3个浓度下的回收率分别为:87.36%、94.19%和93.85%,RSDs均小于5%,符合相关标准对测试方法的要求。说明添加的丙酮酸钠在3个浓度下均能够被准确定量,不受样本中其他物质的干扰。

2.5 实际样本测试

使用本研究建立的超高效液相色谱-串联质谱测定方法,对电商平台采购的5种减肥产品进行测定,结果发现4种产品未检出,1种产品检出丙酮酸钠,检出值为48.37 mg/100 g,但由于产品中未标明丙酮酸盐的种类及含量,无法对检出的结果进行科学比较,但依然能说明本研究建立的方法可以检出实际样本中的丙酮酸盐,具有普遍适用性。

表 2 丙酮酸钠在两个添加质量浓度下的回收率和 RSDs (n=6)
Table 2 Recovery rates and RSDs of sodium pyruvate at 2 added mass concentrations (n=6)

添加质量浓度/(μg/mL)	回收率/%						平均回收率/%	RSDs/%
	样 1	样 2	样 3	样 4	样 5	样 6		
0.25	85.03	87.82	84.19	93.28	82.25	91.59	87.36	4.35
2.50	88.24	89.45	93.71	95.26	99.21	99.27	94.19	4.70
7.50	86.35	92.39	95.73	97.53	94.62	96.47	93.85	4.07

3 结 论

本研究建立的超高效液相色谱-串联质谱技术定量测定保健食品中丙酮酸盐的方法,优化了液相色谱分离的条件以及质谱采集的参数,能够在5 min内准确测定样品中丙酮酸盐的含量。方法的线性范围、检出限、灵敏度等均满足定量方法标准的要求,在实际样本测试时能够检出未知样品中的丙酮酸盐,为保健食品的科学监管提供技术支撑。

参考文献

[1] MCCOMMIS KS, FINCK BN. Mitochondrial pyruvate transport: A historical perspective and future research directions [Z]. 2015.
[2] 白玉,姚娜,解小艺,等. 丙酮酸钠对2型糖尿病大鼠体外贮存红细胞形态结构和功能的影响[J]. 中国临床药理学与治疗学, 2024, 29(2): 139-145.

BAI Y, YAO N, XIE XY, *et al.* Effects of sodium pyruvate on the morphology, structure and function of erythrocyte stored *in vitro* in type 2 diabetes rats [J]. *Chin Clin Pharmacol Therapeut*, 2024, 29(2): 139-145
[3] 吕春荣,梁家充,邵庆勇,等. 丙酮酸钠对山羊冷冻精子质量的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2023, 50(6): 2363-2369.
LV CR, LIANG JC, SHAO QY, *et al.* The effect of sodium pyruvate on the quality of frozen goat sperm [J]. *Chin Anim Husb Vet Med*, 2023, 50(6): 2363-2369.
[4] 张恒,翟永志,杜明华,等. 丙酮酸钠盐的动物实验和临床应用相关研究进展[J]. 海南医学, 2024, 35(17): 2567-2572.
ZHANG H, ZHAI YZ, DU MH, *et al.* Research progress on animal experiments and clinical applications of sodium pyruvate [J]. *Hainan Med*, 2024, 35(17): 2567-2572.
[5] 王伟江,郑建仙. 丙酮酸盐及其在功能性食品中的应用[J]. 食品与机械, 2005, 22(4): 69-71, 75.
WANG WJ, ZHEGN JX. Acetoacetate and its application in functional

- foods [J]. Food Mach, 2005, 22(4): 69–71, 75.
- [6] LUO Q, DING N, LIU Y, *et al.* Metabolic engineering of microorganisms to produce pyruvate and derived compounds [J]. Molecules, 2023, 28(3): 1418.
- [7] DOWARAKA-PERSAD B, NEERGHEEN VS. Mushroom-derived compounds as metabolic modulators in cancer [J]. Molecules, 2023, 28(3): 1441.
- [8] 李文豪, 王旭. 食品检测标准在保健食品检测中的应用现状[J]. 现代食品, 2023, 29(13): 131–133.
- LI WH, WAGN X. The current application status of food testing standards in health food testing [J]. Mod Food, 2023, 29(13): 131–133.
- [9] MINOO A, GERRIT VH. LC-MS/MS method for quantitative profiling of ketone bodies, α -keto acids, lactate, pyruvate and their stable isotopically labelled tracers in human plasma: An analytical panel for clinical metabolic kinetics and interactions [J]. J Chromatogr B, 2023, 1230: 123906.
- [10] TORII A, SEKI Y, SASANO R, *et al.* Development of a rapid and reliable method to simultaneously detect seven food allergens in processed foods using LC-MS/MS [J]. Food Chem: X, 2024, 23: 101558.
- [11] TAKAYAMA T, SHINGU A, KATO S, *et al.* Countermeasure for interfered monitoring ion of perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) from intrinsic food samples based on LC-MS/MS analysis of per- and polyfluoroalkyl substances [J]. J Food Compos Anal, 2024, 133: 106436.
- [12] ZHANG J, HUANG R, FENG Y, *et al.* Development and validation of stable isotope dilution LC-MS/MS method for simultaneous quantification of four *Alternaria* toxins in 15 food commodities [J]. Food Chem, 2024, 457: 140122.
- [13] YANG C, WANG Y, DONG P, *et al.* Determination of bisphenols in food and its contact materials migration by magnetic solid-phase extraction coupled with LC-MS/MS [J]. Food Biosci, 2024, 59: 104179.
- [14] WANG M, QIAO Y, LUO Z, *et al.* Development of a QuEChERS combined with LC-MS/MS method for determining 24 sedatives and anesthetics in animal-derived foods [J]. J Food Compos Anal, 2024, 127: 106000.
- [15] LUCCHETTI D, DELFINO D, DI-GIUSTINO P, *et al.* Development of a QuEChERS-based method for the determination of quaternary ammonium compounds in different food matrices by LC-MS/MS [J]. J Food Compos Anal, 2024, 136: 106760.
- [16] ABDUL-HAY MEI, SHENDY AH, ABOALHASSEN AEFA, *et al.* Development and validation of a simple solid-liquid extraction protocol coupled with LC-ESI-MS/MS for the determination of aflatoxin M₁ in products of colostrum-based supplements and whey protein-based sports food [J]. J Food Compos Anal, 2024, 126: 105933.
- [17] ESPOSITO G, SCIUTO S, MARTELLO E, *et al.* Disclosing frauds in herbal food supplements labeling: A simple LC-MS/MS approach to detect alkaloids and biogenic amines [J]. J Food Protect, 2023, 86(10): 100152.
- [18] TORII A, SEKI Y, ARIMOTO C, *et al.* Development of a simple and reliable LC-MS/MS method to simultaneously detect walnut and almond as specified in food allergen labelling regulations in processed foods [J]. Curr Res Food Sci, 2023, 6: 100444.
- [19] 王耀楠, 貌达, 王梦婷, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定功能饮料中的牛磺酸和赖氨酸[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8730–8736.
- WANG YN, MAO D, WAGN MT, *et al.* Determination of taurine and lysine in functional beverages by ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(22): 8730–8736.
- [20] 刘静, 吴琼, 王超. 液相色谱-离子阱质谱法同时测定减肥类保健食品中非法添加的 12 种化学药物[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7286–7292.
- LIU J, WU Q, WANG C. Simultaneous determination of 12 illegally added chemical drugs in weight loss health foods by liquid chromatography ion trap mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(18): 7286–7292.
- [21] 徐慧静, 牛建娜, 杨栩, 等. 液相色谱-质谱法检测保健食品中白藜芦醇及白藜芦醇苷[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1150–1155.
- XU HJ, NIU JN, YAGN X, *et al.* Detection of resveratrol and resveratrol glycosides in health food by liquid chromatography mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(4): 1150–1155.
- [22] 周亚兰, 席彰, 康靖. 高效液相色谱-串联质谱法检测中成药/保健食品中非法添加的 49 种化学药物[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2907–2915.
- ZHOU YL, XI Z, KAGN J. Determination of 49 chemicals illegally added in traditional Chinese patent medicines and simple preparations/health food by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(9): 2907–2915.
- [23] 胡晓楠, 徐慧静, 李莹, 等. 高效液相色谱-串联质谱法检测保健食品中 25 种非甾体类抗炎药[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6409–6415.
- HU XN, XU HJ, LI Y, *et al.* Detection of 25 non steroidal anti inflammatory drugs in health food by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(19): 6409–6415.
- [24] 袁利杰, 纵伟. 超高效液相色谱-四极杆/轨道阱高分辨质谱法快速筛查功能性保健食品中 19 种特征性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6518–6527.
- YUAN LJ, ZONG W. Rapid screening of 19 characteristic components in functional health foods using ultra performance liquid chromatography quadrupole/orbital trap high-resolution mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(20): 6518–6527.
- [25] 王少亭, 李艳. 液相色谱-质谱联用技术在临床检验中的应用与发展[J]. 中华检验医学杂志, 2016, 39(8): 650–653.
- WANG ST, LI Y. Application and development of liquid chromatography mass spectrometry in clinical laboratory testing [J]. Chin J Lab Med, 2016,

- 39(8): 650–653.
- [26] 韩丽, 马媛, 周延. 液质联用技术在检测保健食品非法添加中的应用研究[J]. 食品安全导刊, 2020(18): 1.
- HAN L, MA Y, ZHOU Y. Application research of liquid chromatography-mass spectrometry technology in detecting illegal additives in health food [J]. China Food Saf Magaz, 2020(18): 1.
- [27] 曾辉, 唐玉玺. 液质联用技术在检测中成药及保健食品非法添加中的应用[Z]. 2020.
- ZENG H, TANG YX. Application of liquid chromatography-mass spectrometry in detection of illegal addition of traditional Chinese patent medicines and simple preparations and health food [Z]. 2020.
- [28] 孟爽, 周立, 付勤, 等. 色谱与质谱参数的优化对免疫抑制剂定量灵敏度的影响[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2021, 41(11): 1461–1469.
- MENG S, ZHOU L, FU Q, *et al.* The effect of optimizing chromatographic and mass spectrometry parameters on the quantitative sensitivity of immunosuppressants [J]. J Shanghai JiaoTong Univ (Med Ed), 2021, 41(11): 1461–1469.
- [29] 郝帅, 崔碧峰, 房天啸, 等. 基底温度和离子源能量对薄膜应力的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 458–464.
- HAO S, CUI BF, FANG TX, *et al.* The influence of substrate temperature and ion source energy on film stress [J]. Progress Laser Optoelectr, 2018, 55(9): 458–464.

- [30] 曹祥宽. 液质联用电喷雾离子源技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- CAO XK. Study on electro spray ion source technology for liquid mass spectrometry [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)

作者简介



金绍明, 副研究员, 主要研究方向为食品化妆品检测新技术。
E-mail: myjackyming@126.com



王耀楠, 副主任技师, 主要研究方向为仪器分析。
E-mail: wangyaonan@ccmu.edu.cn



刘彤彤, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为食品化妆品分析。
E-mail: liutongtong@nifdc.org.cn