

# 非靶向筛查技术在农产品质量安全中的 最新研究进展

王凤怡<sup>1,2</sup>, 侯雪<sup>1,2</sup>, 杨晓凤<sup>1,2</sup>, 韩梅<sup>1,2\*</sup>, 邱世婷<sup>1,2</sup>, 贺光云<sup>1,2</sup>, 覃蜀迪<sup>1,2</sup>

[1. 四川省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 成都 610066; 2. 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(成都), 成都 610066]

**摘要:** 食品安全源头在农产品, 农产品质量是保障食品安全的重要前提和基础。为了从源头守护老百姓舌尖上的安全, 急需开发简便、快速且高通量检测方法用于农产品中各类风险因子的快速监测。随着质谱精密度和分辨率的不断提高及数据库的扩大与完善, 非靶向筛查技术逐渐成为农产品质量安全领域定性筛查和分析的有效技术手段。本文综述了非靶向筛查技术(色谱-高分辨质谱)近 5 年来在农药残留、兽药残留、真菌毒素以及多类污染物筛查和检测中的研究进展, 重点介绍了非靶向筛查技术在数据采集模式、筛查策略和筛查方法以及样品前处理方法等方面的研究, 并提出了该技术存在的问题及应用前景, 以期促进非靶向筛查技术在农产品中多类污染物残留检测领域的发展。

**关键词:** 农产品质量安全; 非靶向筛查技术; 高分辨质谱; 数据库

## Recent research progress of non-targeted screening technology in the quality and safety of agricultural products

WANG Feng-Yi<sup>1,2</sup>, HOU Xue<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-Feng<sup>1,2</sup>, HAN Mei<sup>1,2\*</sup>,  
QIU Shi-Ting<sup>1,2</sup>, HE Guang-Yun<sup>1,2</sup>, QIN Shu-Di<sup>1,2</sup>

[1. *Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China*; 2. *Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Agro-products (Chengdu), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610066, China*]

**ABSTRACT:** The source of food safety lies in agricultural products, and the quality and safety of agricultural products is an important premise and basis for ensuring food safety. In order to protect the safety of people's tongue from the source, it is urgent to develop simple, rapid and high-throughput detection methods for the rapid detection of various risk factors of agricultural products. With the continuous advance of the precision and resolution of mass spectrometry as well as the expansion and perfection of its database, non-targeted screening technology has gradually become an effective technical means for qualitative screening and analysis in the domain of agricultural product quality and safety. This review summarized the research progress of the non-targeted screening technology (chromatography-high-resolution mass spectrometry) in the screening and detection of pesticide residues, veterinary drug residues and mycotoxins within recent 5 years, focused on the research of non-targeted screening technology in

基金项目: 四川省农业科学院人才引进培养项目

Fund: Supported by the Talent Cultivation Project of Sichuan Academy of Agricultural Sciences

\*通信作者: 韩梅, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全风险评估研究。E-mail: SCNKYHM@163.com

\*Corresponding author: HAN Mei, Master, Associate Professor, Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products of Sichuan Academy of Agricultural Sciences, No.20, Jingjusi Road, Jinjiang District, Chengdu 610066, China. E-mail: SCNKYHM@163.com

data acquisition mode, screening strategy and screening method as well as pretreatment method of sample *et al.*, and raised problems and application prospects of such technology, which promoting the development of non-targeted screening technology in the field of multi-residues of pollutants detection in agricultural products.

**KEY WORDS:** agricultural product quality and safety; non-targeted screening technology; high-resolution mass spectrometry; database

## 0 引言

在经济社会快速发展的进程中, 人民群众已由之前的“吃的饱”“吃的好”转变为如何“吃的安全”, “食以安为先”也就成为了人民群众的新期待新需求。随着人口数量及人们生活水平的不断提高, 大众对农产品的需求逐渐增加, 长期直接或间接食用受农药污染的产品导致农药在体内不断积累, 进而引起严重的疾病, 如生殖和内分泌系统紊乱、癌症、肾病、帕金森病、阿尔茨海默病等<sup>[1-3]</sup>。除此之外, 各种谷物、水果和蔬菜等农产品在耕作、收获、运输或储存等环节也极易受到真菌毒素的污染, 由于其强的肝毒性、肾毒性、胃肠道毒性, 会造成生殖紊乱和致畸、致癌、致突变等毒性作用, 尤其是黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>, 已被国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)划为一类强致癌物<sup>[4-5]</sup>。因此, 农产品质量安全已成为全球普遍关注的问题。

目前, 气相色谱法(gas chromatography, GC)和液相色谱法(liquid chromatography, LC)是残留物定量测定的常用方法, 然而这些方法主要用于单一类型的农/兽药/真菌毒素残留分析; 此外, 目标分析物数量少, 灵敏度通常不能满足微量元素检测水平, 因此不满足大批量样品高通量和非靶向多残留物检测的分析要求<sup>[6-7]</sup>。近年来, 气相色谱-质谱和液相色谱-质谱结合了色谱准确度高、分离范围广和质谱选择性好和灵敏度高的优势, 色谱与质谱联用正成为食品安全分析、环境分析、成分分析和组学分析等领域的重要分析工具<sup>[8]</sup>, 三重四极杆质谱仪(triple quadrupole mass spectrometer, QqQ)是目前常用的质谱仪, 它对于特定目标物的分析具有良好的定量性能, 但仅适用于已知化合物的分析, 难以识别基质中未知化合物<sup>[9]</sup>。由于样品基质的复杂性, 低分辨率质谱在多组分残留分析中易出现假阳性, 从而导致结果误判。基于此, 高分辨质谱因其高分辨率(>20000 FWHM)和高质量精确度(<5 ppm)受到了广泛关注, 其中静电场轨道阱(Orbitrap)和飞行时间质谱(time of flight, TOF)已成为有效的非靶向筛查仪器, 在各类农产品非靶向残留物质筛查和检测中得到广泛应用, 如蔬菜和水果<sup>[10-13]</sup>、茶叶<sup>[14-15]</sup>、中药材<sup>[16-17]</sup>、粮谷<sup>[18-19]</sup>、肉<sup>[20]</sup>、蛋<sup>[21]</sup>和奶<sup>[22]</sup>等。

综上所述, 本文主要对近 5 年来非靶向筛查技术在农产品质量安全中应用的文献进行归纳和总结, 简介了非靶

向筛查技术, 概述了 Orbitrap 和 TOF 质谱的工作原理及其在农产品质量安全领域的应用, 详述了关于农药、兽药、真菌毒素多残留以及多类污染物非靶向筛查最新的研究进展, 并综述了目前非靶向筛查技术存在的问题及应用前景。以期推动非靶向筛查技术在农产品质量安全的进一步应用以及在其他领域有更深、更宽和更广的拓展。

## 1 非靶向筛查技术

非靶向筛查从广义层面讲指的是根据代谢组学和蛋白质组学等分析方法筛选未知的化学污染物并识别样品中化学成分的差异<sup>[23-24]</sup>, 而狭义的非靶向筛查则是对可疑化合物和非目标物的筛查, 它是基于已知化合物的质谱数据、文献和商业数据库建立的化合物信息, 其筛查结果很大程度上取决于数据库的大小。因此, 非靶向筛查基于其高通量的优势, 从而有效拓展了传统靶向筛查的广度, 目前已在食品安全<sup>[25]</sup>、生物医药<sup>[26]</sup>等领域得到了广泛应用。非靶向筛查技术有气相色谱-质谱法、液相色谱-质谱法、核磁共振法、毛细管电泳-质谱法以及其他基于光谱的技术<sup>[27]</sup>。其中, 基于 Orbitrap 和 TOF 的高分辨质谱在非靶向筛查分析中应用广泛。

### 1.1 静电场轨道阱质谱法

Orbitrap 是近年来新兴的一种质谱质量分析器, 它利用离子在特定静电场中运动频率的不同对阱内离子进行质量分析, Orbitrap 基于其高质量分辨率、准确的质量精度以及高的灵敏度, 在全扫描模式下可获取化合物精确质荷比( $m/z$ )信息, 所能监测的农药种类和数目不受限制, 可实现非靶向的高通量定性筛查和定量分析<sup>[28]</sup>。目前, 在全扫描模式下, 气相色谱-四极杆静电场轨道阱质谱法(gas chromatography-quadrupole Orbitrap mass spectrometry, GC-Q-Orbitrap MS)已广泛用于各类农产品中多农药残留的定性筛查和定量检测<sup>[29-30]</sup>, 其筛查农药高达数百种, 包括有机磷、有机氯、拟除虫菊酯、三唑类、酰胺类等多类溶解度和极性差异较大的常用农药。与传统的靶向筛查技术比较, Q-Orbitrap 比 QqQ 方法耗时更短、检出限更低, 且具有分析速度更快、灵敏度更高和选择性更好等优势, 同时在定量方面, Orbitrap 的灵敏度、精确度和基质效应等方面优于 QqQ<sup>[31]</sup>。因此, 基于 Orbitrap 的高分辨质谱法对复杂食品基质中农药和污染物高通量筛查和定量分析具有巨大的应用潜力<sup>[32-33]</sup>。

## 1.2 飞行时间质谱法

TOF 是利用动能相同而质荷比不同的离子在恒定电场中运动, 经过恒定距离所需时间不同的原理, 将  $m/z$  不同的离子进行分离, 从而实现对化合物成分或结构的分析。目前, 四极杆飞行时间质谱(quadrupole-time of flight mass spectrometry, Q-TOF)的分辨率可达到 55000, 数据采集速率高达 4G/s, 基于其采集速度快、质量精度高、分析速度快、定性能力强等优势, 目前在农畜产品中未知残留物的定性筛查和定量分析得到广泛应用<sup>[34]</sup>。将目标化合物特征离子的精确质量数、保留时间、同位素和二级碎片信息进行数据库匹配, 基于 Q-TOF 的非靶向筛查技术实现了荔枝花、蜂巢和蜂蜜中可疑未知农药的快速筛查<sup>[35]</sup>, 进口粮食中未知农药的定性筛查和定量确认<sup>[18]</sup>以及棉籽壳中 237 种农药多残留筛查<sup>[36]</sup>, 上述实例进一步证实基于 Q-TOF 的非靶向筛查技术已成为农产品质量安全监测的有效技术手段。综上所述, 色谱-高分辨质谱法基于其高灵敏度 and 良好的选择性在复杂食品基质中污染物残留筛查方面具有广阔的应用前景。

## 2 非靶向筛查技术在农产品质量安全中的应用

### 2.1 农药多残留的非靶向筛查

高分辨质谱的非靶向筛查技术由于其高通量和高选择性, 一针进样可实现数百种农药的快速筛查, 在农药多残留定性筛查和定量检测方面应用广泛, 各筛查方法的应用范围、目标分析物、前处理方法、检出限(limit of detection, LOD)、定量限(limit of quantitation, LOQ)如表 1 所示。

串联质谱法(tandem mass spectrometry, MS/MS)数据获取主要通过 4 种数据采集模式: 选择离子监测(selected ion monitoring, SIM)、ddMS<sup>2</sup>、数据独立采集(data independent acquisition, DIA)和全离子碎裂(all ion fragment, AIF)<sup>[14]</sup>。其中, 全扫描(full scan, FS)/ddMS<sup>2</sup> 选择性最好, 但其扫描速度不够快, AIF 选择性最低, DIA 选择性位于两者之间并能满足大量化合物的 MS/MS 信息获取。鉴于传统靶向筛查和检测农药数量有限, WANG 等<sup>[37]</sup>建立了 845 种农药的化合物数据库, 并提出了基于 DIA 的非靶向数据采集用于靶向分析的工作流程, 该流程极大地扩展了传统靶向数据获取靶向分析方法筛选或检测的农药数量, 是一种极具潜力的果蔬农药残留综合检测技术。与传统的 QqQ 靶向分析相比, DIA 的化合物覆盖范围更广, 是非靶向分析的首选方法, 但该方法的假阳性率较高。基于此, XIE 等<sup>[38]</sup>首次提出了一种可追溯的综合农药筛查策略, 该策略主要分为五步: (1)测试分析; (2)峰检测; (3)峰确认, 检出峰面积大于农药标准品峰面积的 70%; (4)手动识别, 不规则的峰被视为背景离子干扰; (5) MS/MS 质谱信息与农药标准品对比; 通过上述筛查流程在 98 个茶叶样品中筛查并确认了 100 种农

药及其代谢物且没有假阳性检出。综上所述, 数据采集方式的优化、新型筛查策略的建立对于农产品中非靶向农药残留的快速准确筛查提供了新的研究思路。

液相色谱-四极杆飞行时间质谱法(liquid chromatography-quadrupole-time of flight mass spectrometry, LC-Q-TOF MS)适用于难溶性和中极性/强极性化合物, 气相色谱-四极杆飞行时间质谱法(gas chromatography-quadrupole-time of flight mass spectrometry, GC-Q-TOF MS)适用于挥发性/半挥发性和非/低极性化合物; 因此, 每种仪器适用范围不同无法同时检测。为了解决这个问题, 庞国芳团队<sup>[39]</sup>首次利用 GC-Q-TOF MS 和 LC-Q-TOF MS 共同建立了 733 种农药的精确质谱数据库实现果蔬中农药筛查, 该方法比单一的 GC-Q-TOF MS 和 LC-Q-TOF MS 方法分别高 51.5%和 39.6%, 且 66.6%~77.2%农药在 8 种果蔬基质中回收率均在 60%~120%。两种技术组合不仅具有各自独特的优势, 而且通过共检出农药相互验证, 相互补充, 提供内部质量控制标准, 确保检测结果的可靠性。

除了对数据采集模式和筛查方法进行研究之外, 农药由于其种类多样以及样品基质成分的复杂性, 合适的前处理方法成为多农药残留分析的关键。韩梅等<sup>[40]</sup>考察了未净化、QuEChERS 法以及氨基柱固相萃取法对生姜样品中残留农药的提取效果, 未净化样品处理方法成本低且耗时少, 但净化效果差, 仪器维护成本高; QuEChERS 方法基质效应比固相萃取强, 而固相萃取法基质干扰最小, 但部分农药回收率较差, 且该步骤烦琐、溶剂用量大; 其中未净化法和 QuEChERS 法能够满足生姜中农药残留定量检测要求且 LOQ 可达 0.01~5.13  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。综上所述, 发展仪器联用技术以及探索合适的前处理方法是全面、高通量、非靶向农药多残留检测的发展趋势。

### 2.2 兽药多残留的非靶向筛查

高分辨质谱能够在单次鉴别、定量和确认实现痕量化合物的分析, 因而, 在兽药非靶向筛查方面具有广泛应用前景<sup>[41]</sup>。目前, 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-Q-TOF MS)已经建立了 117 种禁用兽药的标准数据库和谱库从而实现残留物定性筛查<sup>[42]</sup>。基于超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱质谱法(ultra performance liquid chromatography-quadrupole-Orbitrap mass spectrometry, UPLC-Q-Orbitrap MS)成功建立了水产品中 123 种兽药残留筛查方法<sup>[43]</sup>。筛查方法扩大和完善有效提升了兽药快速检测水平, 同时对农产品风险监测具有重要意义。由于缺乏鉴定大环内酯类和代谢物的非靶向数据采集方法, 需要建立新的分析方法来满足控制程序的要求。因此, JIA 等<sup>[44]</sup>利用 UPLC/ESI Q-Orbitrap MS 对鲈鱼中 24 种大环内酯类及其代谢产物进行定性筛查和定量检测, 其中 LOD 为 0.12~3.61  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 回收率在 81%~107%,

具体结果见表 2, 同时在鲑鱼样品中筛查出了罗贝尼定、盐酸林乌霉素、噻虫啉、芬苯达唑和噻苯达唑 5 个非靶标化合物。同年, 该课题组成员还将上述构建的筛查策略成功应用于鲑鱼中磺胺类及其代谢产物的筛查研究<sup>[45]</sup>。

为了获得更好的 MS/MS 数据信息, 有必要对数据采集模式进行优化。基于此, WU 等<sup>[46]</sup>评估了 Q-Orbitrap 中 4 种数据采集模式[非靶向: DIA 和 AIF; 靶向: ddMS<sup>2</sup> 和平行反应监测(parallel reaction monitoring, PRM)]在养殖鳊鱼中对农药残留筛查的差异。对于残留物筛查, AIF 具有快速的 MS<sup>1</sup> 扫描速度, 但可能导致假阳性结果。DIA 方法更适合于监测靶向和非靶向化合物, 因为它能产生更多的特征 MS<sup>2</sup> 光谱, 用于回溯性数据分析。对于后续的靶向分析, 在搜索有限化合物时, PRM 优于 ddMS<sup>2</sup>。为了更好地表征目标分析物或其他可疑阳性化合物, 与 ddMS<sup>2</sup> 相比, MS<sup>1</sup> 全扫描与 PRM 采集相结合更具优势。上述研究对 4 种数据

采集模式的分析对于未来靶向和非靶向兽药残留筛查具有重要的指导意义。

在非靶向筛查中, 基于高分辨质谱的筛查方法虽然能获得丰富的数据信息, 但干扰筛选结果的物质过多, 有效的数据预处理策略去除干扰物质对进一步筛选未知药物具有重要意义。LIANG 等<sup>[47]</sup>提出了基于同类结构中碎片特征离子信息对未知兽药及其代谢产物的非靶向筛查方法, 在前期建立的 475 种兽药及其代谢物的内部质谱数据库基础上通过 Meteor Nexus 软件实现母体药物的代谢预测。该预测策略共建立了包含 3710 个兽药及其代谢物的 MS/MS 数据库, 实现了 33 个鸡蛋中未知兽药及其代谢物的非靶向筛查, 共筛查出 4 种兽药及 3 种代谢物。综上所述, 高分辨质谱数据库的进一步完善、样品前处理方法和数据采集模式的优化以及化合物质谱裂解规律的解析对于农产品中兽药残留以及未知污染物的非靶向筛查分析具有重要的推动意义。

表 1 非靶向筛查技术在农药残留检测中的应用

Table 1 Application of non-targeted screening technology in pesticide residues detection

基质	分析物	分析方法	前处理方法	回收率/%	LOD	LOQ/ ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	参考文献
白菜、黄瓜、苋菜、 芹菜、辣椒	61 种农药	UPLC-Q- Exactive MS	QuEChERS 法	70.3~119.7	/	1~10	[10]
金银花	569 种农药	UHPLC-Q- Orbitrap MS	QuEChERS 法	70~120 (~90%农药)	/	10 (91% 农药)	[14]
红茶和绿茶	18 种农药	UHPLC-Q- TOF MS	QuEChERS 法	84.2~122.3	0.5~8.0 $\mu\text{g}/\text{L}$	/	[15]
韭菜				73.3~123.4			
香菇				72.4~121.3			
大米	70 种农药	GC-Orbitrap MS	QuEChERS 法	73.8~112.6	0.3~3.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$	1~10	[29]
花生				73.5~122.3			
莴苣				70.5~121		0.5~5	
大米	222 种农药	GC-Orbitrap MS	固相分散萃 取一体机	70.2~119	/	1~10	[30]
茶叶				65.2~125		2.5~25	
荔枝花、蜂巢、 蜂蜜	8 种农药	HPLC-Q-TOF-MS	QuEChERS 法	80~96	0.03~0.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$	0.4~0.8	[35]
棉籽壳	237 种农药	GC/LC-Q-TOF-MS	QuEChERS 法	70~120 (91.6%农药)	/	0.2~20	[36]
苹果、香蕉、西兰 花、胡萝卜、葡萄、 莴苣、橙子、土豆、 草莓、番茄	845 种农药	UHPLC-Q- Orbitrap MS	QuEChERS 法	/	/	/	[37]
茶叶	900 种农药	UHPLC-ESI-Q- Orbitrap MS	QuEChERS 法	/	/	/	[38]
苹果、葡萄、西瓜、 葡萄柚、菠菜、番 茄、大白菜、芹菜	733 种农药	GC/LC-Q-TOF-MS	QuEChERS 法	60~120 (66.6%~77.2% 农药)	/	/	[39]
			未净化法	51.7~116.6			
生姜	125 种农药	UPLC-Q-Orbitrap MS	QuEChERS 法	44.5~117.8	/	0.01~5.13	[40]
			氨基柱固相 萃取法	0~110.8			

注: /表示文献中未提及, 下同。

表 2 非靶向筛查技术在兽药和真菌毒素残留检测中的应用  
Table 2 Applications of non-targeted screening technology in veterinary drug and mycotoxins residues detection

基质	分析物	分析方法	前处理方法	回收率/%	LOD/ ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	LOQ/ ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	参考文献
牛奶	150 种兽药	UHPLC-Q-TOF MS	乙腈、NaCl、EDTA、乙腈/水(1:19, V:V)	/	0.1~0.5	/	[28]
猪肉	117 种兽药	UPLC-Q-TOF MS	EDTA-2Na、乙腈(5%甲酸)、NaCl	/	1~80	/	[42]
草鱼、鲫鱼、黄骨鱼、鲈鱼、多宝鱼	123 种兽药	UHPLC-Orbitrap MS	乙腈-水(8:2, V:V)	53.7~129	/	0.1~50	[43]
鲈鱼	24 种兽药	UHPLC/ESI Q-Orbitrap MS	自动化在线 QuEChERS 法	81~107	0.12~3.61	/	[44]
鲑鱼	27 种兽药	UHPLC/ESI Q-Orbitrap MS	自动化在线 QuEChERS 法	83~109	0.04~1.34	/	[45]
鳊鱼	68 种兽药	UHPLC-Orbitrap MS	乙腈(0.2%—水合对甲苯磺酸和 2%冰醋酸)	/	/	/	[46]
鸡蛋	475 种兽药	UHPLC-Q-Exactive MS	乙腈/甲酸(100:1, V:V)	/	/	/	[47]
牛奶	14 种真菌毒素	UHPLC/Q-Orbitrap MS	水溶液(5%乙腈)、AOZ 免疫亲和柱、甲醇	60~106	0.0003~0.008	0.001~0.025	[25]
小麦	10 种真菌毒素	UHPLC-Q-Exactive MS	甲醇、乙腈/水(84:16, V:V)、甲醇/水(10:90, V:V)	/	/	/	[48]
番茄	11 种真菌毒素	UPLC-Q/Orbitrap HRMS	QuEChERS 法固相萃取法	78.5~108.7	0.1~10	0.3~30	[49]
谷物	200 种真菌毒素	UHPLC-Q-TOF MS	乙腈(1%甲酸)、无水 $\text{MgSO}_4$ 、NaCl	/	/	/	[50]
谷物	63 种真菌毒素	UHPLC-Q/Orbitrap HRMS	乙腈/水(50:50, V:V) (1% 乙酸)、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 或 $\text{C}_{18}$	61~109	0.001~20	0.003~60	[51]

### 2.3 真菌毒素的非靶向筛查

高分辨质谱在真菌毒素的筛查方面具有非常重要的优势,如通过测量分析物的精确质量来记录全扫描光谱的能力、筛选非靶向化合物、高度的结构确认、以及非靶向分析物的回顾性数据分析,因而在农产品中应用广泛。常规真菌毒素的检测大多基于几个或者一类毒素的分析方法,该过程费时费力。MAO 等<sup>[25]</sup>利用 UPLC-Q-Orbitrap MS 同时建立了 14 种常见真菌毒素的筛查方法并进行定量分析,其 LOD 为 0.0003~0.008  $\mu\text{g}/\text{kg}$  且回收率均在 60%~106%,详细结果见表 2。该方法还实现了中国 5 个不同省份共计 250 份原奶样品中真菌毒素的定性筛查和定量检测。与 QqQ 相比, Q-Orbitrap 在不牺牲仪器分析性能的前提下提供前体和产物离子的精确质量,因此在分析物鉴定中具有更高的置信度。除此之外,基于高分辨质谱的筛查方法还实现了小麦中镰刀毒素的筛查和确证分析<sup>[48]</sup>以及番茄样品中 11 种真菌毒素的定性筛查和定量分析,且单次分析仅需 14 min<sup>[49]</sup>。今后要继续扩大高分辨质谱技术的应用范围,进一步提高农产品中真菌毒素残留的分析检测能力,为农产品安全检测工作提供可靠的技术支撑。

由于夏季和秋季充足的降雨,潮湿的条件可能导致谷物在储存过程中产生霉菌毒素,从而引发食品安全问题进而导致巨大的经济损失。为了随时监控谷物中真菌毒素的分布现状, HUANG 等<sup>[50]</sup>采用 UPLC-Q-TOF MS 建立了涵盖 200 种不同极性和挥发性真菌毒素的高分辨质谱通用数据库,其中包括受监管的、新出现的以及被忽视的真菌毒素及其代谢产物。该筛查方法成功地应用在中国上海储藏库 138 个谷物中真菌毒素的筛查研究中,共筛查出 33 种典型真菌毒素,同时揭示了多种真菌毒素在贮存谷物中的分布、积累和转化现状。在此基础上, WU 等<sup>[51]</sup>进一步扩大筛查的品种和数量,采用 UPLC-Q-Orbitrap MS 建立了 63 种真菌毒素的筛查方法,经计算其 LOD 为 0.001~20  $\mu\text{g}/\text{kg}$  且回收率均在 61%~109%,该方法对市售 23 种粮食共计 398 个样品中真菌毒素进行筛查,发现粮食中真菌毒素污染的风险仍然很严重,特别是黄曲霉毒素、玉米赤霉烯酮、雪腐镰刀菌醇、伏马毒素、赭曲霉毒素和恩镰孢菌素。除了改善谷物的储存条件外,还要加强真菌毒素检测,不断开发灵敏、准确、可靠、快速的检测方法,为农产品安全提供技术支持。综上所述,真菌毒素的非靶向筛查技术未来还要集中于高分辨质谱数据库的完善及筛查方法应用范围的进一步拓展。

## 2.4 多类污染物的非靶向筛查

目前,在水产养殖过程中会发现除了常规使用的兽药外,还添加了中草药、人类药物以及新型的抗生素,这些药物的不合理使用会对人类健康造成潜在的危害。为了更好地监控水产品中各类污染物的风险水平,TURNISPEED 等<sup>[52]</sup>开发了水产养殖鱼类中农药、兽药及人类药物残留等多类污染物同时筛查的 UPLC-Q-Orbitrap MS 法,其中包括三嗪类除草剂、有机磷、氨基甲酸酯、消毒剂、生长促进剂和一些新的抗生素等,该方法还实现了实际进口鱼和鳃鱼样品中污染物的回溯性分析。多类污染物除了水产品养殖过程中存在外,在鸡蛋<sup>[53]</sup>、肉以及小麦粉中也时有检出,为了严格监控农产品中各类风险因子残留水平,HOU 等<sup>[21]</sup>利用 UPLC-Q-TOF MS 考察了鸡蛋样品中农兽药的残留现状,在市售的 70 个鸡蛋样品中 5 个样品筛查出磺胺氯吡啶、磺胺甲氧嘧啶和氟虫腈残留物。同样,MORETTI 等<sup>[54]</sup>也建立了 173 种兽药、122 种农药以及 9 种真菌毒素的高分辨质谱数据库并将其应用于肉和小麦粉等产品中污染物的筛查。

目前数据采集模式主要有数据依赖采集(data dependent acquisition, DDA)和 DIA 两种模式,DDA 对靶向化合物识别选择性高但无法识别未知物,而 DIA 识别范围广,包括有毒有害物质代谢产物、降解产物以及未知污染物,但是其假阳性率较高。基于此,目前研究主要集中在两个方面,一方面是 SUN 等<sup>[55]</sup>提出的 DDA 和 DIA 相结合的数据采集模式(DDIA),与单独的 DDA、DIA 模式相比,检出率: DIA $\approx$ DDIA $>$ DDA,假阴性率: DDA $>$ DIA $>$ DDIA,假阳性率: DIA $>$ DDA $>$ DDIA,因此,DDIA 方法综合了 DDA 和 DIA 的优点,在 180 种兽药、220 种农药以及 50 种真菌毒素筛查具有较高的识别重现性和较低的假阳性。另一方面,TAN 等<sup>[56]</sup>在 UPLC-Q-Orbitrap MS 的 DDA 模式基础上,将原有的包含列表(inclusion list)新增一个背景离子的排除列表(exclusion list),与传统采集方式相比,新策略具有更高的检出率,特别是在超低浓度下,消除了背景干扰的影响,从而产生更多潜在有害物质的 MS/MS 光谱,并且该方法比 DIA 更加简单易于进行后续数据的回溯分析。此外,该方法还成功地应用在牛奶中 155 种兽药、番茄中 200 种农药以及燕麦中 50 种真菌毒素的高通量筛查。综上所述,农产品中多类未知风险因子的残留监控对于人类健康和食品安全监管至关重要。

## 3 结束语

本文主要综述了非靶向筛查技术在农产品质量安全领域的应用,包括对农药残留、兽药残留、真菌毒素以及多类污染物的非靶向筛查分析,其中,基于高分辨质谱的非靶向筛查技术由于其高通量、高分辨率以及精确质量精确度在农产品质量安全方面具有巨大的应用潜力,但同时

该技术也存在一些不足。首先,在化合物鉴定方面,质谱图中化合物谱图数据有限,且各个仪器得到的质谱图也存在一定的差异,在物质鉴定的对比分析上依然存在的问题;其次,数据分析方面,样品中含量很低的化合物从大量数据中提取也存在较大困难;然后,由于目前标准化流程和评价指标的缺乏,高分辨质谱的分析结果也无法进行系统评估;最后,为了非靶向筛查技术更好地应用于目前的常规检测,未来还需继续努力扩大和完善各类污染物高分辨质谱数据库以及提升农产品中未知物的筛查能力。同时,无论是仪器技术更迭还是前处理过程的优化,进一步降低仪器检出限同时提高分析物的灵敏度和特异性对于未来非靶向技术的发展至关重要。

## 参考文献

- [1] MOSTAFALOU S, ABDOLLAHI M. Pesticides and human chronic diseases: Evidences, mechanisms, and perspectives [J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2013, 268(2): 157-177.
- [2] QIN G, ZOU K, LI Y, *et al.* Pesticide residue determination in vegetables from western China applying gas chromatography with mass spectrometry [J]. *Biomed Chromatogr*, 2016, 30(9): 1430-1440.
- [3] ALAMGIR ZCM, FAKHRUDDIN ANM, NAZRUL IM, *et al.* Detection of the residues of nineteen pesticides in fresh vegetable samples using gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Control*, 2013, 34: 457-465.
- [4] BRASE S, ENCINAS A, KECK J, *et al.* Chemistry and biology of mycotoxins and related fungal metabolites [J]. *Chem Rev*, 2009, 109(9): 3903-3990.
- [5] 范楷, 祭芳, 徐剑宏, 等. 长三角地区市场常见农产品中 40 种真菌毒素的污染状况和特征分析[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(13): 2870-2884. FAN K, JI F, XU JH, *et al.* Pollution status and characteristics analysis of 40 mycotoxins in common agricultural products in the Yangtze River Delta region [J]. *Agric Sci China*, 2021, 54(13): 2870-2884.
- [6] 唐雪妹, 陈志廷, 黄健祥, 等. 超高效液相色谱-高分辨质谱非靶向快速筛查果蔬中农药残留[J]. *分析测试学报*, 2021, 40(12): 1720-1727. TANG XM, CHEN ZT, HUANG JX, *et al.* Rapid screening of pesticide residues in fruits and vegetables by ultra-high performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry [J]. *J Instrum Anal*, 2021, 40(12): 1720-1727.
- [7] LEE J, KIM L, SHIN Y, *et al.* Rapid and simultaneous analysis of 360 pesticides in brown rice, spinach, orange, and potato using microbore GC-MS/MS [J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(16): 3388-3396.
- [8] STEINER D, MALACHOVA A, SULYOK M, *et al.* Challenges and future directions in LC-MS-based multiclass method development for the quantification of food contaminants [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2020, 413(11): 25-34.
- [9] HERRERO P, CORTES-FRANCISCO N, BORRULL F, *et al.* Comparison of triple quadrupole mass spectrometry and Orbitrap high-resolution mass spectrometry in ultra performance liquid chromatography for the determination of veterinary drugs in sewage: Benefits and drawbacks [J]. *J Mass Spectrom*, 2014, 49(7): 585-596.
- [10] 韩梅, 侯雪, 邱世婷, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱测定蔬菜中 61 种农药残留[J]. *农药*, 2020, 59(10): 743-749. HAN M, HOU X, QIU ST, *et al.* Determination of 61 pesticide residues in vegetables using QuEChERS-UPLC-quadrupole/electrostatic field orbitrap high resolution mass spectrometry [J]. *Agrochemicals*, 2020, 59(10):

- 743-749.
- [11] 黄猛富. 超高效液相色谱-高分辨质谱法快速筛查土豆中的农药残留[J]. 轻工科技, 2018, 34(4): 11-12.
- HANG MF. Rapid screening of pesticide residues in potato by ultra performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry [J]. Light Ind Sci Technol, 2018, 34(4): 11-12.
- [12] ZOMER P, HANS GJ. Simultaneous quantitative determination, identification and qualitative screening of pesticides in fruits and vegetables using LC-Q-Orbitrap™-MS [J]. Food Addit Contam A, 2015, 32(10): 1628-1636.
- [13] 岳宁, 李晓慧, 王琦, 等. 基于超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道离子阱高分辨质谱法非靶向筛查典型三嗪类除草剂[J]. 分析试验室, 2023, 42(2): 159-166.
- YUE N, LI XH, WANG Q, *et al.* Non-targeted screening of typical triazine herbicides based on ultra-high performance liquid chromatography-Quadrupole/electrostatic field Orbital ion trap high resolution mass spectrometry [J]. Anal Lab, 2023, 42(2): 159-166.
- [14] ZHOU H, CAO Y, MIAO S, *et al.* Qualitative screening and quantitative determination of 569 pesticide residues in honeysuckle using ultrahigh-performance liquid chromatography coupled to quadrupole-Orbitrap high resolution mass spectrometry [J]. J Chromatogr A, 2019, 1606: 460374.
- [15] 卢巧梅. QuEChERS-液相色谱/高分辨质谱技术分析茶叶中农药残留[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 430-434.
- LU QM. Analysis of pesticide residues in tea by QuEChERS-liquid chromatography/high resolution mass spectrometry technology [J]. J Fuzhou Univ (Nat Sci Ed), 2019, 47(3): 430-434.
- [16] 曹依敏, 周恒, 兰岚, 等. 超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法快速测定3种含生物碱类中药材中193种农药残留[J]. 农药学报, 2022, 24(4): 857-871.
- CAO YM, ZHOU H, LAN L, *et al.* A rapid screening method for 193 pesticide residues in 3 traditional Chinese medicines containing alkaloids by ultrahigh-performance liquid chromatography coupled to quadrupole-orbitrap high resolution mass spectrometry [J]. J Pestic Sci, 2022, 24(4): 857-871.
- [17] WANG Y, ZHANG C, ZHANG L, *et al.* A comprehensive strategy for screening and exploring multi-class mycotoxins contamination status in *Astragali radix* [J]. Microchem J, 2020, 158: 105294.
- [18] 周秀锦, 陈宇, 杨赛军, 等. 超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱法非靶向快速筛查进出口粮谷中未知的农药残留[J]. 色谱, 2017, 35(8): 787-793.
- ZHOU XJ, CHEN Y, YANG SJ, *et al.* Rapid screening of pesticides residues in imported grains by ultrahigh-performance liquid chromatography coupled to time of flight mass spectrometry [J]. Chin J Chromatogr, 2017, 35(8): 787-793.
- [19] DONG H, XU Y, YE H. *et al.* Advances in analysis of contaminants in foodstuffs on the basis of orbitrap mass spectrometry: A review [J]. Food Anal Method, 2022, 15: 803-819.
- [20] SHAO B, LI H, SHEN J, *et al.* Nontargeted detection methods for food safety and integrity [J]. Annu Rev Food Sci Technol, 2019, 10(1): 429-455.
- [21] HOU X, XU X, XU X, *et al.* Application of a multiclass screening method for veterinary drugs and pesticides using HPLC-QTOF-MS in egg samples [J]. Food Chem, 2020, 309: 125746.
- [22] 贾玮, 董旭阳, 石琳, 等. 高分辨质谱法在乳品外源性风险物质筛查分析中的应用[J]. 现代食品科技, 2018, 34(8): 246-254.
- JIA W, DONG XY, SHI L, *et al.* Application of high resolution mass spectrometry in screening and analysis of extrinsic risk substances in dairy products [J]. Mod Food Sci Technol, 2018, 34(8): 246-254.
- [23] KUNZELMANN M, WINTER M, ABERG M, *et al.* Non-targeted analysis of unexpected food contaminants using LC-HRMS [J]. Anal Bioanal Chem, 2018, 410: 5593-5602.
- [24] SHEPHERD LV, FRASER P, STEWART D. Metabolomics: A second-generation platform for crop and food analysis [J]. Bioanalysis, 2011, 3: 1143-1159.
- [25] MAO J, ZHENG N, WEN F, *et al.* Multi-mycotoxins analysis in raw milk by ultra high performance liquid chromatography coupled to quadrupole orbitrap mass spectrometry [J]. Food Control, 2018, 84: 305-311.
- [26] XU T, ZUO L, SUN Z, *et al.* Chemical profiling and quantification of ShenKang injection, a systematic quality control strategy using ultra high performance liquid chromatography with Q exactive hybrid quadrupole orbitrap high-resolution accurate mass spectrometry [J]. J Sep Sci, 2017, 40: 4872-4879.
- [27] CEVALLOS JM, REYES-DE-CORCUERA JI. Metabolomics in food science [J]. Adv Food Nutr Res, 2012, 67: 1-24.
- [28] AMELIN VG, FEDINA NM, PODKOLZIN IV, *et al.* Rapid screening and determination of residual veterinary drugs in milk by ultrahigh performance liquid chromatography-high-resolution quadrupole time-of-flight mass spectrometry [J]. J Anal Chem, 2018, 73: 576-585.
- [29] 孟志娟, 孙文毅, 赵丽敏, 等. 气相色谱-静电场轨道阱高分辨质谱快速筛查农产品中70种农药残留[J]. 分析化学, 2019, 47(8): 1227-1243.
- MENG ZJ, SUN WY, ZHAO LM, *et al.* Rapid screening of 70 pesticide residues in agricultural products by gas chromatography-electrostatic field orbital trap high resolution mass spectrometry [J]. Anal Chem, 2019, 47(8): 1227-1243.
- [30] 殷雪琰, 朱佳明, 堵燕钰, 等. 基于气相色谱-静电场轨道阱高分辨质谱法快速筛查和确证农产品中222种农药残留[J]. 分析测试学报, 2022, 41(2): 172-186.
- YIN XY, ZHU JM, DU YY, *et al.* Rapid screening and confirmation of 222 pesticide residues in agricultural products based on gas chromatography-electrostatic field orbitwell high resolution mass spectrometry [J]. J Instrum Anal, 2022, 41(2): 172-186.
- [31] CAVALIERE C, ANTONELLI M, CAPRIOTTI AL, *et al.* A triple quadrupole and a hybrid quadrupole orbitrap mass spectrometer in comparison for polyphenol quantitation [J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(17): 4885-4896.
- [32] BELARBI S, VIVIER M, ZAGHOUBANI W, *et al.* Comparison of new approach of GC-HRMS (Q-Orbitrap) to GC-MS/MS (triple-quadrupole) in analyzing the pesticide residues and contaminants in complex food matrices [J]. Food Chem, 2021, 359: 129932.
- [33] 王培锋, 王凤美, 张鸿伟, 等. 高效液相色谱-四极杆轨道阱高分辨质谱对动物源食品中抗生素类成分的快速筛查[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(12): 3769-3777.
- WANG PF, WANG FM, ZHANG HW, *et al.* Screening of antibiotics in foodstuffs of animal origin by high performance liquid chromatography-quadrupole/electrostatic field orbitrap high resolution mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(12): 3769-3777.
- [34] 唐德雨, 褚能明, 张雪梅, 等. 飞行时间质谱技术在农畜产品中的应用研究[J]. 南方农业, 2015, 9(34): 57-60.
- TANG SY, CHU NM, ZHANG XM, *et al.* Application of time-of-flight mass spectrometry in agricultural and livestock products [J]. South China Agric, 2015, 9(34): 57-60.
- [35] 王思威, 孙海滨, 刘艳萍, 等. 高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱技术非靶向快速筛查荔枝花、蜂巢和蜂蜜中农药[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 310-315.
- WANG SW, SUN HB, LIU YP, *et al.* Rapid non-targeted screening of pesticide residues in Litchi flower, hive and honey by high performance liquid chromatography-quadrupole-time of flight mass spectrometry [J]. Food Sci, 2021, 42(20): 310-315.
- [36] TONG K, XIE Y, HUANG S, *et al.* QuEChERS method combined with

- gas- and liquid-chromatography high resolution mass spectrometry to screen and confirm 237 pesticides and metabolites in cottonseed hull [J]. *Separations*, 2022, 9(4): 91.
- [37] WANG J, CHOW W, WONG JW, *et al.* Non-target data acquisition for target analysis (nDATA) of 845 pesticide residues in fruits and vegetables using UHPLC/ESI Q-Orbitrap [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2019, 411: 1421–1431.
- [38] XIE G, HUANG J, SUNG G, *et al.* Traceable and integrated pesticide screening (TIPS), a systematic and retrospective strategy for screening 900 pesticides and unknown metabolites in tea [J]. *Anal Chem*, 2022, 94: 16647–16667.
- [39] PANG G, CHANG Q, BAI R, *et al.* Simultaneous screening of 733 pesticide residues in fruits and vegetables by a GC/LC-Q-TOFMS combination technique [J]. *Engineering*, 2020, 6: 432–441.
- [40] 韩梅, 郭灵安, 焦颖, 等. 比较 3 种不同前处理方法结合高分辨质谱测定姜中农药残留的效果[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(9): 3674–3683.
- HAN M, GUO LAN, JIAO Y, *et al.* Comparison of the effects of 3 kinds of different pretreatment methods combined with high-resolution mass spectrometry applied to the determination of pesticide residues in ginger [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(9): 3674–3683.
- [41] 覃璐璐, 汪龙飞, 鲍蕾. 高分辨质谱定性筛查牛奶和奶粉中兽药残留[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(24): 8211–8230.
- QIN LL, WANG LF, BAO L. Qualitative screening of veterinary drug residues in milk and milk powder by high-resolution mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(24): 8211–8230.
- [42] 王聪, 赵晓宇, 董喆, 等. 超高效液相色谱-四极杆串联飞行时间高分辨质谱法筛查和确证猪肉中 117 种兽药残留[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(9): 3684–3693.
- WANG C, ZHAO XY, DONG Z, *et al.* Screening and confirmation of 117 kinds of veterinary drugs residues in pork by ultra performance liquid chromatography-quadrupole tandem time-of-flight mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(9): 3684–3693.
- [43] 欧阳少伦, 蓝草, 陈文锐, 等. 在线净化/液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法快速筛查水产品中 123 种兽药残留[J]. *分析测试学报*, 2022, 41(3): 309–318.
- OUYANG SL, LAN C, CHEN WR, *et al.* Rapid screening and confirmation of 123 veterinary drugs in aquatic products by on-line cleanup/liquid chromatography-quadrupole/electrostatic field orbitrap high-resolution mass spectrometry [J]. *J Instrum Anal*, 2022, 41(3): 309–318.
- [44] JIA W, SHIA L, CHUA X, *et al.* A strategy for untargeted screening of macrolides and metabolites in bass by liquid chromatography coupled to quadrupole Orbitrap mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2018, 262: 110–117.
- [45] JIA W, SHI L, CHU X. Untargeted screening of sulfonamides and their metabolites in salmon using liquid chromatography coupled to quadrupole Orbitrap mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2018, 239: 427–433.
- [46] WU IL, TURNIPSEED S, STOREY J, *et al.* Comparison of data acquisition modes with Orbitrap high-resolution mass spectrometry for targeted and nontargeted residue screening in aquacultured eel [J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2020, 34: e8642.
- [47] LIANG W, ZHENG F, CHEN T, *et al.* Nontargeted screening method for veterinary drugs and their metabolites based on fragmentation characteristics from ultrahigh-performance liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2022, 369: 130928.
- [48] CIASCA B, PASCALE M, ALTIERI VG, *et al.* In-house validation and small scale collaborative study to evaluate analytical performances of multi-mycotoxin screening methods based on liquid chromatography-high resolution mass spectrometry: Case study: Fusarium toxins in wheat [J]. *J Mass Spectrom*, 2018, 53: 743–752.
- [49] 王昌钊, 李子豪, 张亚莉, 等. 超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法同时筛查和测定番茄中 11 种真菌毒素[J/OL]. *食品科学*: 1–14. [2023-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220916.1342.022.html>
- WANG CZ, LI ZH, ZHANG YL, *et al.* Simultaneous screening and determination of eleven mycotoxins in tomato by ultra-high performance liquid chromatography-quadrupole/orbitrap high-resolution mass spectrometry [J/OL]. *Food Sci*: 1–14. [2023-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220916.1342.022.html>
- [50] HUANG Q, GUO W, ZHAO X, *et al.* Universal screening of 200 mycotoxins and their variations in stored cereals in Shanghai, China by UHPLC-Q-TOF MS [J]. *Food Chem*, 2022, 387: 132869.
- [51] WU W, HUANG X, LIANG R, *et al.* Determination of 63 mycotoxins in grain products by ultrahigh-performance liquid chromatography coupled with quadrupole-Orbitrap mass spectrometry [J]. *Food Control*, 2023, 150: 109772.
- [52] TURNISPEED SB, STOREY JM, WU IL, *et al.* Extended liquid chromatography high resolution mass spectrometry screening method for veterinary drug, pesticide and human pharmaceutical residues in aquaculture fish [J]. *Food Addit Contam A*, 2019, 36(10): 1501–1514.
- [53] XU X, XU XY, HAN M, *et al.* Development of a modified QuEChERS method based on magnetic multiwalled carbon nanotubes for the simultaneous determination of veterinary drugs, pesticides and mycotoxins in eggs by UPLC-MS/MS [J]. *Food Chem*, 2018, 276: 419–426.
- [54] MORETTI S, CAVANNA D, LAMBERTINI F, *et al.* Practical approach to develop a multi-group screening method for detection of mycotoxins, pesticides and veterinary drugs in food [J]. *J Mass Spectrom*, 2020, 55(11): e4618.
- [55] SUN F, TAN H, LI Y, *et al.* An integrated data-dependent and data-independent acquisition method for hazardous compounds screening in foods using a single UHPLC-Q-Orbitrap run [J]. *J Hazard Mater*, 2021, 401: 123266.
- [56] TAN H, SUN F, ABDALLAH M, *et al.* Background ions into exclusion list: A new strategy to enhance the efficiency of DDA data collection for high-throughput screening of chemical contaminations in food [J]. *Food Chem*, 2022, 385: 132669.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

## 作者简介



王凤怡, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品中风险危害因子的筛查技术研究。

E-mail: wangfengyichem@163.com



韩梅, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全风险评估研究。

E-mail: SCNKYHM@163.com