DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251009006
引用格式: 杜宇峰, 张凤艳, 谭燕, 等. 鸡蛋中兽药残留检测技术的研究现状、挑战与发展趋势[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(1): 169–179.
DU YF, ZHANG FY, TAN Y, *et al*. Research status, challenges and development trend of detection technology of veterinary drug residues in eggs [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 169–179. (in Chinese with English abstract).

鸡蛋中兽药残留检测技术的研究现状、挑战与发展趋势

杜宇峰, 张凤艳, 谭　燕, 孙黎君, 孙　娜, 王　婷, 李环亭*
(青岛市产品质量检验研究院, 青岛　266101)

摘　要: 鸡蛋作为重要的营养食品, 其质量安全尤其是兽药残留问题备受关注。本文系统综述了鸡蛋中兽药残留检测技术的现状、核心挑战与发展趋势。首先剖析了我国兽药残留限量标准体系的现状, 并指出其存在的检测方法标准不配套的关键问题, 具体表现为共计 24 种兽药在鸡蛋基质中缺乏针对性的检测方法。其次, 重点论述了检测技术的最新进展: 在前处理技术方面, 改进的 QuEChERS 方法、微萃取技术和磁性固相萃取的发展显著提升了净化效率与自动化水平; 在仪器分析方面, 离子阱质谱和高分辨质谱联用等技术为实现多残留高通量筛查与非靶向发现提供了强大工具; 在快速检测技术方面, 纳米材料和传统检测技术的融合极大地提升了现场筛查的灵敏度与时效性。最后, 对未来技术的发展进行了展望, 微流控芯片技术、基于人工智能的光谱解析方法、适用于现场筛查的便携式质谱仪以及多技术联用平台的发展将是未来的发展重点。以期为保障鸡蛋产品质量安全提供参考, 并促进产业健康发展。

关键词: 鸡蛋; 兽药残留; 检测技术; QuEChERS; 高分辨质谱法; 快速检测

Research status, challenges and development trend of detection technology of veterinary drug residues in eggs

DU Yu-Feng, ZHANG Feng-Yan, TAN Yan, SUN Li-Jun, SUN Na, WANG Ting, LI Huan-Ting*
(*Qingdao Product Quality Testing Research Institute*, *Qingdao* 266101, *China*)

ABSTRACT: As an important nutritious food, the quality and safety of eggs, especially the problem of veterinary drug residues, have attracted much attention. This paper systematically reviewed the present situation, core challenges and development trend of detection technology for veterinary drug residues in eggs. First of all, this paper analyzed the current situation of the standard system of veterinary drug residue limit in China, and pointed out the key problem that the detection methods and standards are not matched, which is embodied in the lack of targeted detection methods for 24 kinds of veterinary drugs in egg matrix. Secondly, the latest progress of detection

收稿日期: 2025-10-09
基金项目: 山东省市场监督管理局科研项目(sdscjgj2024sp08)
第一作者: 杜宇峰(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: dyfv650@163.com
***通信作者:** 李环亭(1966—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为产品质量安全检测技术。E-mail: lht1966808@163.com

technology is emphasized: In the pretreatment technology, the development of improved QuEChERS method, micro-extraction technology and magnetic solid-phase extraction has significantly improved the purification efficiency and automation level; in instrumental analysis, ion trap mass spectrometry and high-resolution mass spectrometry provide powerful tools for multi-residue high-throughput screening and non-targeted discovery. In terms of rapid detection technology, the integration of nano-materials and traditional detection technology has greatly improved the sensitivity and timeliness of on-site screening. Finally, this paper looked forward to the future development of technology, and the development of microfluidic chip technology, spectral analysis method based on artificial intelligence, portable mass spectrometer suitable for on-site screening and multi-technology combined platform will be the focus of development. In order to provide reference for ensuring the quality and safety of egg products and promote the healthy development of the industry.

KEY WORDS: eggs; veterinary drug residues; detection technology; QuEChERS; high resolution mass spectrometry; rapid detection

0 引 言

鸡蛋作为优质蛋白和膳食胆固醇的天然载体，其营养价值在人类膳食结构中占据重要地位。每 100 g 鸡蛋含蛋白质约 13 g，包含人体必需的 8 种氨基酸，生物利用率达 95%以上，是公认的“全营养食品”[1–2]。鸡蛋富含卵磷脂、胆碱及多种脂溶性维生素(A、D、E、K)，对促进儿童大脑发育、维持心血管健康和增强免疫力具有显著作用[3–4]。

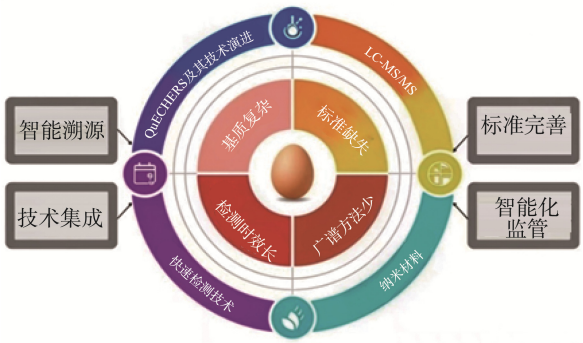
根据联合国粮农组织《2024 年世界粮食及农业统计年鉴》的数据，2022 年全球鸡蛋产量达到 8700 万 t，较 2010 年增长约 45%。中国作为全球最大的鸡蛋生产国，占全球总产量的约 34.0%，连续 15 年位居世界首位[5]。近年来，中国鸡蛋产业呈现“规模化、集约化、标准化”发展趋势。我国既是鸡蛋的生产大国，又是鸡蛋的消费大国[6]，鸡蛋产业已成为农村经济的重要支柱，对保障“菜篮子”安全和农民增收具有重大的战略意义。

随着“健康中国 2030”战略的深入推进和消费者食品安全意识的显著提升，鸡蛋中兽药残留问题日益受到社会广泛关注[7]。兽药残留不仅降低了鸡蛋的品质与安全性，更可能通过引发消费者的抗生素耐药性、过敏反应及慢性毒性等问题，并借助食物链传递，对公共卫生安全构成多重威胁[8]。

本文将系统梳理鸡蛋兽药残留检测技术的最新进展，从样品前处理技术、仪器分析检测技术及快速筛查技术 3 个维度，深入分析当前检测技术的优缺点、应用现状及发展趋势，整体框架结构图如图 1 所示，为构建“生产—加工—流通—消费”全链条兽药残留风险防控体系提供科学依据和技术支撑。

1 鸡蛋中兽药残留检验的研究现状

鸡蛋中的兽药残留主要来源于在饲料和饮水中加入的抗虫和抗菌药物(如磺胺类及各类抗生素等)[9]。兽药的合理使用是保障蛋鸡健康、控制疾病的重要手段，对提升鸡蛋及其相关产品的安全性起到了积极的作用[10]。然而，若兽药被滥用，例如超范围、超剂量使用或不遵守休药期规定，则易导致鸡蛋中药物残留超标，这不仅可能直接危害消费者健康，破坏生态环境，还会加剧细菌耐药性的发展，对公共卫生安全构成严重威胁[11–12]。



注：液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)。

图 1 鸡蛋中兽药残留检测技术的问题与发展趋势示意图

Fig.1 Problems and development trend of veterinary drug residue detection technology in eggs

为了控制鸡蛋中的兽药残留的超标，我国已制定了较为完备的兽药残留限量的标准体系。我国已确立旨在管控鸡蛋兽药残留的监管框架，形成以 GB 31650—2019《食品安全国家标准 食品中兽药最大残留限量》及其增补标准 GB 31650.1—2022《食品安全国家标准 食品中 41 种兽药最大残留限量》为核心、农业农村部第 250 号公告为补充的限量标准体系。该体系全面规定了 75 种兽药在鸡蛋中的残留限量，其中包含 45 种禁用药物，突显了源头控制的严格性，为保障鸡蛋产品质量安全提供了关键的制度保障[13]。

尽管目前兽药在鸡蛋中的残留限量已经有了较明确的规定，但仍存在检测方法标准不配套、部分药物缺失检测方法等问题。据统计，共有 15 种兽药在鸡蛋中缺乏相应的检测方法标准，主要涉及多肽类抗生素、抗线虫药等(其中类固醇激素类禁用兽药及硝基咪唑类以第 250 号公告规定按 1 种进行统计)。具体情况见表 1。

表 1　中国标准体系下鸡蛋的兽药残留限量和检测标准情况

Table 1　Residue limits and inspection standards of veterinary drugs in eggs under China standard system

药物类别	兽药名称	限量/(μg/kg)	限量依据	检测方法标准号	检测技术
氨基糖苷类抗生素	安普霉素	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	GB 31659.12—2025《食品安全国家标准 禽蛋和奶中氨基糖苷类药物残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
	大观霉素	2000	GB 31650—2019	GB 29685—2013《食品安全国家标准 动物性食品中林可霉素、克林霉素和大观霉素多残留的测定 气相色谱-质谱法》	GC-MS
	卡那霉素	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	GB 31659.12—2025	LC-MS/MS
	新霉素	500			
大环内酯类抗生素	红霉素	50	GB 31650—2019	GB 31658.26—2025《食品安全国家标准 动物性食品中 127 种药物残留量的筛查 液相色谱-高分辨质谱法》	LC-HRMS
	泰乐菌素	300	GB 31650.1—2022	SN/T 0670—2012《出口食品中泰乐菌素残留量的测定 液相色谱-质谱 质谱法》	LC-MS/MS
	泰乐菌素	300		农业部 1163 号公告-6-2009《动物性食品中泰乐菌素残留检测 高效液相色谱法》	HPLC
	泰万菌素	200		GB 31613.2—2021《食品安全国家标准 猪、鸡可食性组织中泰万菌素和 3-乙酰泰乐菌素残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
	替米考星	产蛋期禁用		GB 31658.26—2025	LC-MS
多肽类抗生素	杆菌肽	500	GB 31650—2019	/	/
	黏菌素	300		SN/T 5142—2019《进出口动物源性食品中粘菌素残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS
寡糖类抗生素	阿维拉霉素	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	GB 31659.13—2025《食品安全国家标准 禽蛋中阿维菌素类药物残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
抗生素	泰妙菌素	1000	GB 31650—2019	SN/T 4584—2016《出口动物源性食品中沃尼妙林和泰妙菌素残留量的测定 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
林可胺类抗生素	林可霉素	50	GB 31650—2019	GB 29685—2013	GC-MS
四环素类抗生素	多西环素	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	GB 31659.2—2022《食品安全国家标准 禽蛋、奶和奶粉中多西环素残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
	土霉素/金霉素/四环素	400	GB 31650—2019	GB 31658.6—2021《食品安全国家标准 动物性食品中四环素类药物残留量的测定 高效液相色谱法》	HPLC
酰胺醇类抗生素	氟苯尼考	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	GB 31658.20—2022《食品安全国家标准 动物性食品中酰胺醇类药物及其代谢物残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
	氟苯尼考	产蛋期禁用		GB/T 22338—2008《动物源性食品中氯霉素类药物残留量测定》	GC-MS 或 LC-MS/MS
	甲砜霉素	产蛋期禁用		GB 31658.20—2022	LC-MS/MS
	甲砜霉素	产蛋期禁用		GB/T 22338—2008	GC-MS 或 LC-MS/MS
β-内酰胺类抗生素	阿莫西林	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	SN/T 2050—2008《进出口动物源食品中 14 种 β-内酰胺类抗生素残留量检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
	氨苄西林	产蛋期禁用			
	苯唑西林	产蛋期禁用			
	氯唑西林	产蛋期禁用		GB 31658.26—2025	LC-HRMS
	青霉素	产蛋期禁用		GB/T 21315—2007《动物源性食品中青霉素族抗生素残留量检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
合成抗菌药	氨苯胂酸/洛克沙胂	500	GB 31650—2019	/	/

表 1(续)

药物类别	兽药名称	限量/(μg/kg)	限量依据	检测方法标准号	检测技术
磺胺类合成抗菌药	磺胺二甲嘧啶	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	农业部 1025 号公告-23-2008《动物源食品中磺胺类药物残留检测 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
	磺胺类	产蛋期禁用			
喹诺酮类合成抗菌药	达氟沙星	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	GB/T 21312—2007《动物源性食品中 14 种喹诺酮药物残留检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
	噁喹酸	产蛋期禁用			
	恩诺沙星	产蛋期禁用			
	二氟沙星	产蛋期禁用			
	氟甲喹	产蛋期禁用			
	洛美沙星	2			
	诺氟沙星	2			
	培氟沙星	2			
	沙拉沙星	产蛋期禁用			
	氧氟沙星	2			
抗菌增效剂	甲氧苄啶	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	SN/T 2538—2010《进出口动物源性食品中二甲氧苄氨嘧啶、三甲氧苄氨嘧啶和二甲氧甲基苄氨嘧啶残留量的检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
抗球虫药	氨丙啉	4000	GB 31650—2019	SN/T 4583—2016《出口动物源食品中氨丙啉残留量的测定液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
	地克珠利	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	SN/T 2318—2009《动物源食品中地克珠利、妥曲珠利、妥曲珠利亚砜和妥曲珠利砜残留量的检测 高效液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
	托曲珠利	产蛋期禁用			
抗线虫药	芬苯达唑	1300	GB 31650.1—2022	/	/
	氟苯达唑	400		/	/
	哌嗪	2000	GB 31650—2019	SN/T 2317—2009《进出口动物源性食品中哌嗪残留量检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
	左旋咪唑	产蛋期禁用	GB 31650.1—2022	GB 31659.8—2025《食品安全国家标准 禽蛋中左旋咪唑残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
杀虫药	氟雷拉纳	1300	农业农村部公告第 657 号	试行标准(农业农村部)《动物性食品中氟雷拉纳残留量的测定液相色谱–串联质谱法(试行)》	LC-MS/MS
	溴氰菊酯	30	GB 31650—2019	GB/T 5009.162—2008《动物性食品中有机氯农药和拟除虫菊酯农药多组分残留量的测定》	GC
解热镇痛抗炎药	阿司匹林	10	GB 31650.1—2022	SN/T 1922—2007《进出口动物源性食品中对乙酰氨基酚、邻乙酰水杨酸残留量的检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
精神药物	地西泮	允许治疗用不得检出	GB 31650—2019	SN/T 2624—2010《动物源性食品中多种碱性药物残留量的检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
	氯丙嗪	允许治疗用不得检出		/	/
抗原虫药	地美硝唑	允许治疗用不得检出	GB 31650—2019	SN/T 2624—2010《动物源性食品中多种碱性药物残留量的检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
	甲硝唑	允许治疗用不得检出			
激素类药物	苯甲酸雌二醇	允许治疗用不得检出	GB 31650—2019	/	/
	丙酸睾酮	允许治疗用不得检出		农业部 1031 号公告-1-2008《动物源性食品中 11 种激素残留检测 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
糖皮质激素类药	苯丙酸诺龙	允许治疗用不得检出	GB 31650—2019	农业部 1031 号公告-1-2008《动物源性食品中 11 种激素残留检测 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
β-兴奋剂	克伦特罗	禁用兽药	农业农村部公告第 250 号	SN/T 2624—2010《动物源性食品中多种碱性药物残留量的检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS

表 1(续)

药物类别	兽药名称	限量/(μg/kg)	限量依据	检测方法标准号	检测技术
抗真菌药(氨基糖苷类)	潮霉素 B	允许治疗用不得检出	GB 31650—2019	GB 31659.12—2025	LC-MS/MS
类固醇激素	醋酸美仑孕酮	禁用兽药	农业农村部公告第 250 号	GB 31658.28—2025《食品安全国家标准 动物性食品及尿液中乙酰孕激素类药物残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
其他禁用兽药	安眠酮	禁用兽药	农业农村部公告第 250 号	/	/
	氨苯砜	禁用兽药		/	/
	毒杀芬(氯化烯)	禁用兽药		/	/
	呋喃丹(克百威)	禁用兽药		GB 31658.10—2021《食品安全国家标准 动物性食品中氨基甲酸酯类杀虫剂残留量的测定 液相色谱—串联质谱法》	LC-MS/MS
	汞制剂: 氯化亚汞、醋酸汞、硝酸亚汞、吡啶基醋酸汞	禁用兽药		GB 5009.17—2021《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》	CVAAS
	己二烯雌酚、己烯雌酚、己烷雌酚及其盐、酯	禁用兽药		GB 31658.30—2025《食品安全国家标准 动物性食品中二苯乙烯类药物残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
	酒石酸锑钾	禁用兽药		/	/
	卡巴氧及其盐、酯	禁用兽药		GB 31659.9—2025《食品安全国家标准 禽蛋中卡巴氧和喹乙醇代谢物残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
	孔雀石绿	禁用兽药		/	/
	林丹	禁用兽药		GB/T 5009.19—2008《食品中有机氯农药多组分残留量的测定》	GC
	氯霉素及其盐、酯	禁用兽药		GB 31658.20—2022	GC-MS 或 LC-MS/MS
	氯霉素及其盐、酯	禁用兽药		GB/T 22338—2008	GC-MS 或 LC-MS/MS
	杀虫脒(克死螨)	禁用兽药		GB 23200.113—2018《食品安全国家标准 植物源性食品中 208 种农药及其代谢物残留量的测定 气相色谱-质谱联用法》	GC-MS/MS
	万古霉素及其盐、酯	禁用兽药		SN/T 5360—2021《出口动物源食品中万古霉素和去甲万古霉素残留量的测定 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
	五氯酚酸钠	禁用兽药		GB 23200.92—2016《食品安全国家标准 动物源性食品中五氯酚残留量的测定 液相色谱-质谱法》	LC-MS/MS
	锥虫砷胺	禁用兽药		/	/
其他禁用兽药: 类固醇激素	甲基睾丸酮	禁用兽药	农业农村部公告第 250 号	/	/
	群勃龙	禁用兽药		GB 31658.14—2021《食品安全国家标准 动物性食品中 α-群勃龙和 β-群勃龙残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	LC-MS/MS
	玉米赤霉醇	禁用兽药		GB/T 21982—2008《动物源食品中玉米赤霉醇、β-玉米赤霉醇、α-玉米赤霉烯醇、β-玉米赤霉烯醇、玉米赤霉酮和玉米赤霉烯酮残留量检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	LC-MS/MS
其他禁用兽药: 硝基咪唑类	洛硝达唑	禁用兽药	农业农村部公告第 250 号	/	/
	替硝唑	禁用兽药		/	/

注: /表示无此项。超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS); 气相色谱法(gas chromatography, GC); 气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS); 高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC); 液相色谱-高分辨质谱联用技术(liquid chromatography-high resolution mass spectrometry, LC-HRMS); 液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS); 冷蒸汽原子吸收光谱法(cold vapor atomic absorption spectrometry, CVAAS), 表 2 同。

目前缺失检验标准的项目涉及到氨基糖苷类抗生素、寡糖类抗生素、抗线虫药等 15 种兽药残留, 对于相关的检测标准进行搜索发现, 这 15 种兽药中的 13 种具有明确的检测方法标准, 但检测方法标准中的适用基质并不包括鸡蛋, 主要适用基质为动物的肌肉和内脏、牛奶和乳粉、水产品, 此外氟苯达唑和苯甲酸雌二醇目前现行的检测方法的适用基质分别为饲料和原料药, 具体情况见表 2。同时, 两种含有重金属的禁用兽药酒石酸锑钾和锥虫砷胺缺少准确定量的方法。

表 2 缺少鸡蛋基质的兽药残留相关检测方法汇总

Table 2 Summary of related detection methods for lack of egg matrix

药物类别	兽药名称	现行的代表性检测标准	适用基质范围	方法
多肽类抗生素	杆菌肽	GB/T 20743—2006《猪肉、猪肝和猪肾中杆菌肽残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	猪肉、猪肝和猪肾	LC-MS/MS
合成抗菌药	氨苯胂酸/洛克沙胂	GB/T 22146—2008《饲料中洛克沙胂的测定 高效液相色谱法》	饲料	HPLC
抗线虫药	芬苯达唑	GB/T 22972—2008《牛奶和奶粉中噻苯达唑、阿苯达唑、芬苯达唑、奥芬达唑、苯硫氨酯残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	牛奶和奶粉	LC-MS/MS
	氟苯达唑	农业部 1730 号公告-1-2012《饲料中 8 种苯并咪唑类药物的测定 液相色谱-串联质谱法和液相色谱法》	配合饲料、浓缩饲料和预混合饲料	LC-MS/MS 或 HPLC
精神药物	氯丙嗪	GB/T 20763—2006《猪肾和肌肉组织中乙酰丙嗪、氯丙嗪、氟哌啶醇、丙酰二甲氨基丙吩噻嗪、甲苯噻嗪、阿扎哌隆、阿扎哌醇、咔唑心安残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	猪肾和肌肉组织	LC-MS/MS
激素类药物	苯甲酸雌二醇	中华人民共和国药典(2025 版 二部)	原料药	HPLC
其他禁用兽药	安眠酮	GB 29697—2013《食品安全国家标准 动物性食品中地西泮和安眠酮多残留的测定 气相色谱-质谱法》	猪的肌肉组织	GC-MS
	氨苯砜	GB 29706—2013《食品安全国家标准 动物性食品中氨苯砜残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	猪和牛的肌肉及肝组织	LC-HRMS
	毒杀芬(氯化烯)	SN/T 0502—2013《出口水产品中毒杀芬残留量的测定 气相色谱法》	鳕鱼、扇贝、虾、蟹	GC
	孔雀石绿	GB/T 19857—2005《水产品中孔雀石绿和结晶紫残留量的测定》	水产品	LC-HRMS
	锥虫砷胺	/	/	/
	酒石酸锑钾	/	/	/
其他禁用兽药:类固醇激素	甲基睾丸酮	GB/T 20753—2006《牛和猪脂肪中醋酸美仑孕酮、醋酸氯地孕酮和醋酸甲地孕酮残留量的测定 液相色谱-紫外检测法》	牛和猪脂肪	HPLC
其他禁用兽药:硝基咪唑类	洛硝达唑	GB/T 21318—2007《动物源性食品中硝基咪唑残留量检验方法》	猪肉、鸡肉、牛肉、猪肝、鸡肝、牛肝、猪肾、牛肾、鱼肉、奶粉、蜂蜜	LC-MS/MS
	替硝唑			

针对上述问题, 国家层面近年来积极推动标准体系的完善, 以应对日益复杂的兽药残留监控需求。近期, 中华人民共和国农业农村部发布了第 906 号公告, 发布了 33 项兽药残留检测方法食品安全国家标准, 填补了禽蛋等多种动物源性食品中部分常规兽药缺乏残留检测方法的空缺[14]。并针对当前养殖业中兽药使用的实际情况和潜在风险, 新增了对喹诺酮类、酰胺醇类、硝基咪唑类等多种药物残留的检测方法, 特别是加强了对水产品和蜂产品等高风险品种的监管依据, 标志着我国兽药残留标准体系建设迈入一个更加严密、科学的新阶段。同时, 近年来检测技术的快速革新, 也呈现出向更高灵敏度、更高通量、更便捷操作方向发展的趋势[15–16]。

2 鸡蛋中兽药残留检测的技术发展趋势

鸡蛋中兽药残留检测技术是一个系统性的工程, 其技术构成主要可分为 3 个核心部分: 样品前处理技术、仪器分析检测技术以及快速筛查技术。样品前处理技术的目的是将目标兽药从复杂的鸡蛋基质(富含蛋白质、脂质、卵磷脂)中提取、净化、富集出来, 以减少基质干扰。仪器分析检测技术是以高分辨质谱等先进设备为依托, 实现对净化后的样品高精度、高灵敏度的定性和定量分析。快速检测技术是面向市场监管, 更为便捷和减少仪器依赖的一种检测技术, 这类技术侧重于操作的便捷性与结果的即时性。

2.1 前处理技术

2.1.1 传统液液萃取与固相萃取

传统的兽药残留检测前处理方法主要有液液萃取和固相萃取(solid-phase extraction, SPE)等。液液萃取主要是基于目标分析物在两种互不相溶的溶剂(通常是水相和有机相)中溶解度的不同, 实现目标物的分离。在脂溶性兽药等中性及非极性化合物的检测中具有良好的效果[17]。SPE 技术是基于液-固相色谱理论, 采用选择性吸附、选择性洗脱的方式对样品进行富集、分离、净化[18]。相比于液液萃取, SPE 提取具有高灵敏度、自动化程度高、试剂消耗低等优势[19]。但是鸡蛋基质复杂(富含蛋白质、脂质及卵磷脂等[20–22]), 导致传统前处理方式在操作复杂、耗时耗力的同时, 还会引入显著的基质效应, 对检测的灵敏度和准确性带来挑战[23–24]。对于传统 SPE 柱的改进, FaVEx-MN50 快速柱[25]、Clean-up LPAS[26]等新型 SPE 柱在减少净化操作时间、减少基质干扰方面取得了积极的效果。还有研究表明, 通过还原氧化石墨烯改性三聚氰胺海绵作为 SPE 柱的提取材料, 结合 UPLC-MS/MS 技术, 可以实现 32 种兽药残留的快速检测[27]。

2.1.2　QuEChERS 及其改进技术

QuEChERS 是利用吸附剂填料与基质中的杂质相互作用, 通过乙腈提取、盐析分层、吸附剂净化等步骤去除干扰物的一种高效的前处理技术[28]。与传统的液液萃取与固相萃取等方法相比, QuEChERS 方法可使溶剂消耗和成本减少约 95%, 同时所花费的时间是传统方法的十分之一左右[29]。

QuEChERS已广范应用于鸡蛋的兽药检测中, 其在鸡蛋基质中的应用从基础材料优化到场景化定制不断深化[30]。HPLC-MS/MS 结合 QuEChERS 的方法可以实现 9 种糖皮质激素的痕量高灵敏度检测, 其检出限可达到 0.05~0.08 μg/kg[31]。多项研究通过优化提取剂、盐析剂和新型净化材料(如 EMR-lipid、MWNTs、Z-Sep/C_{18} 等), 进一步扩展了 QuEChERS 的适用范围并提升了方法灵敏度。陈容等[32]比较了 C_{18}、N-丙基乙二胺(primary secondary amine, PSA)、增强型除脂材料(enhanced matrix removal lipid, EMR-lipid)、多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotubes, MWNTs)、Z-Sep/C_{18} 等 5 种 QuEChERS 净化材料的处理效果, 发现 EMR-lipid 能够选择性去除鸡蛋提取液中的脂质等干扰成分, 且对分析结果的影响较小。针对鸡蛋高脂高蛋白的特殊基质, GUO 等[33]对传统的 QuEChERS 方法进行优化, 采用硫酸钠、氯化钠和柠檬酸三钠作为脱水盐; PSA 和 C_{18} 作为吸附剂, 用于鸡蛋中氟苯尼考及其代谢物和 3 种氟喹诺酮类药物的同时检测。朱万燕等[34]将 QuEChERS 的净化剂扩展为 PSA、C_{18}和氨基的联合吸附净化体系, 结合 UPLC-MS/MS 技术, 构建了在鸡蛋等基质中 9 类 31 种产蛋期禁用兽药的同时测定方法。

2.1.3　分散固相萃取技术

分散固相萃取(dispersive solid-phase extraction, dSPE)是一种高效的样品前处理技术, 通过将固体吸附剂直接分散到样品溶液中吸附目标物, 随后通过离心或磁场分离实现待测物与基质的分离。与 SPE 不同, dSPE 不需要将吸附剂填充到特定的柱子中, 而是直接将吸附剂添加到样品溶液中进行混合, 从而增大接触面积, 提高吸附效率[35]。磁性固相萃取(magnetic solid-phase extraction, MSPE)是 dSPE 技术中一种具有代表性的分支。它以磁性吸附剂为介质, 可以实现目标物从复杂样品中的分离、纯化和富集, 具有高效、便捷的特性[36], 并在兽药残留检测中展现出巨大的潜力。有研究表明, 以磁性沸石咪唑酯框架作为吸附剂与超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱(ultra performance liquid chromatography-quadrupole-orbitrap, UPLC-Q-HRMS)结合, 可实现鸡蛋中氟喹诺酮类、四环素类和酰胺醇类药物的高灵敏快速检测[37]。SAJJAD 等[38]构建了一种可循环使用的琼脂糖-壳聚糖-磁性氧化石墨烯材料, 并通过 HPLC 用于测定鸡蛋样品中的链霉素和庆大霉素等氨基糖苷类药物, 该方法在 0.2~1.6 μg/kg 范围内线性关系良好, 回收率可以达到 94%。同时也有研究表明, 基于磁性碳纳米管表面制备的分子印迹聚合物具有高比表面积、出色的机械性能, 可以用于快速同步提取鸡蛋样品中 4 种氟喹诺酮类药物残留[39]。

2.1.4　微萃取技术

微萃取技术是一种在微小体积内完成目标物高效富集与分离的样品前处理方法, 其核心在于使用减少甚至完全避免有机溶剂的使用, 按照萃取相的不同状态, 可分为液相微萃取和固相微萃取, 目前已成为兽药残留检测中一种高效、灵敏、经济、环保的前处理方法[40]。固化漂浮有机液滴的分散液液微萃取技术已被证明在牛奶和鸡蛋样品中 5 种类固醇和 4 种非甾体抗炎药物残留的提取和富集过程中具有良好的效果[41]。关正萍等[42]分别利用涡旋辅助液液微萃取-上浮溶剂固化和分散液液微萃取-上浮溶剂固化与 HPLC 技术相结合, 实现了鸡蛋中头孢噻呋和头孢氨苄的快速高灵敏度检测, 检出限为 0.42 μg/kg。同时, 该研究还发现涡旋辅助液液微萃取具有更好的萃取效果。目前固相微萃取技术在鸡蛋兽药残留检测中的应用实例目前相对较少, 但已广泛地用于其他动物源性食品的兽药残留检测, 展现出巨大的发展潜力。例如 KHALED[43]开发了基于 96 针固相微萃取系统的自动化方法, 用于鸡肉组织中 77 种兽药残留的高通量检测, 该方法在线性范围、准确度和精密度方面均表现出色; 固相微萃取结合便携式质谱可在 30 s 内完成 5 种常见兽药(如磺胺类、β-受体激动剂等)的同时检测, 检出限低至 1.6~30.6 μg/kg[44]。

此外, 采用低温方式加速蛋白和脂肪的沉淀被视为是一种环保、经济、快捷的净化方法, 为鸡蛋中兽药残留检测的前处理提供了新的思路。TOMASZEWSKI 等[45]采用低温净化结合 LC-MS/MS 定量检测了鸡蛋中阿苯达唑等 15 种抗虫药及其代谢物的残留, 可以实现大规模样品的快速检测。

就目前的技术发展情况而言, 改进型 QuEChERS 是目前与 LC-MS/MS 联用的最主流和均衡的选择, 它兼顾了检测成本、效率和分析性能等多种因素[46]。磁性固相萃取旨在追求高灵敏度和自动化检测, 是未来技术的发展方向[47]。低温净化法受到基质和目标物特性等因素的限制更适合作为初步或者补充净化手段。尽管微萃取技术在追求极致灵敏度方面效果突出, 但其通量较低以及操作要求高等特性限制了其在常规高通量质筛实验室应用, 更多用于特定条件下的方法优化[48]。

2.2　多残留筛查技术

为了应对日益复杂的食品安全监管需求, 发展能够同时检测多种兽药残留的高通量筛查技术已成为当前的研究热点。离子阱质谱法和高分辨质谱法联用等技术通过将强大的分离能力与超高分辨的检测能力相结合, 在兽药残留的高通量筛查和定性快速检测等方面发挥出巨大潜力。相较于传统的GC-MS和三重四极杆液相色谱-串联质谱法,

离子阱质谱法和高分辨质谱法联用在非靶向筛查、未知化合物识别以及可疑阳性结果的结构确证等方面具有独特优势: 其强大的多级碎裂能力可提供丰富的结构信息, 有效区分基质干扰与目标物, 显著提升鉴定的准确性与可靠性, 尤其适用于复杂基质(如鸡蛋)中新型或未预期兽药残留的发现与确认[49]。

在提升定性准确性方面, 超高效液相色谱-三重四极杆线性离子阱复合质谱法通过获取目标物的增强离子扫描谱图, 能够准确区分结构相近的黏菌素 A 与 B, 有效降低假阳性风险[50]。同时, 该技术体系在跨类别多残留筛查方面亦表现出强大潜力, 显示出强大的通用性。例如 CASTELLANI 等[51]开发了一种高选择性、灵敏度的高效液相色谱-四极杆静电场轨道阱高分辨质谱法, 用于检测离子载体抗生素(拉沙洛西、马杜拉霉素等)和合成球孢子菌素(地克珠利、常山酮、尼卡巴嗪等)等 12 种抗球虫药物残留, 检出限为 1 μg/kg。李云飞等[52]构建了包含保留时间、精确质量数与二级谱图的超高效液相色谱-四极杆静电场轨道阱高分辨质谱库, 实现了对苯并咪唑类、硝基咪唑类、激素类中 33 种兽药残留的定性筛查, 进一步拓展了多残留检测的应用范围。

这些研究进展表明, 高分辨质谱技术正在推动兽药残留检测从传统的靶向分析向非靶向筛查转变, 为鸡蛋等动物源性食品中药物残留的精准监管提供了有力的技术支撑。

2.3 快速检测技术

在现代食品安全监管体系中, “从农田到餐桌”的全链条管理理念对兽药残留检测的及时性提出了更高要求, 推动了快速检测技术的持续创新与优化。与传统实验室检测侧重于高精度定性与定量分析不同, 快速检测方法主要面向大规模、高通量初筛需求, 旨在快速识别疑似阳性样品, 为后续精准确证提供靶向筛选依据[53]。当前, 鸡蛋兽药残留检测正逐步从传统实验室检测走向现场实时检测与实验室检测相结合的模式。“快速检测高效筛查初筛—实验室分析精准确证”的联动监管模式的建立极大地提升了市场监管效率。山东省 2022 年应用胶体金技术开展了鸡蛋快速检测计划, 大幅增加抽检数量, 技术赋能精准执法, 提升了问题查处的及时率[54]。

目前常用的快速检测技术主要有显色法、胶体金法等。显色法是基于特定兽药与显色试剂发生特征颜色反应的原理进行判断。该方法特异性有限, 假阳性率高, 目前应用范围已非常狭窄。胶体金法是目前市场上最常见的快检形式, 其核心机制是利用胶体金作为标记物, 通过抗原-抗体反应实现目标物的定性检测[55]。

目前, 兽药残留快速检测技术正处于快速发展阶段, 其发展脉络体现为从传统方法向基于新材料的先进技术演进[56]。纳米材料和传统检测技术的融合极大地推动了食品安全检测领域的创新, 为兽药残留的快速、高灵敏度筛查提供了多样化解决方案[57−58]。张富生等[59]将纳米材料技术与免疫层析技术相结合, 构建了量子点微球免疫层析试纸条, 可以在 10 min 内完成鸡蛋中恩诺沙星的快速检测(定量检出限为 2.5 μg/kg)。磁性纳米粒子与免疫层析技术相结合构建的检测微孔板, 可以在 9 min 内完成鸡蛋中金刚烷胺的检测, 检出限可达 1.0 μg/kg[60]。此外, WU 等[61]利用表面增强拉曼光谱(surface enhanced Raman spectroscopy, SERS)与多元分析相结合构建预测性能优异的定量模型可以快速、精确地识别蛋清中的氧氟沙星残留, 为拉曼光谱的深层次应用提供了新的思路。

2.4 未来的发展方向

随着检测技术向智能化、集成化与现场化方向演进, 微流控芯片、人工智能(artificial intelligence, AI)赋能的谱学解析、便携式质谱仪以及多技术联用平台正成为引领分析科学变革的关键方向。这些技术不仅提升了检测的灵敏度、速度和自动化水平, 也逐步打破了实验室分析与现场筛查之间的壁垒。

微流控芯片技术通过将样品前处理、反应、分离与检测等单元集成在 cm 甚至 mm 尺度的芯片上, 实现对 μL 乃至 pL 级流体的精确操控, 显著降低了试剂消耗与分析时间, 提高了分析的集成度和通量[62]。该技术目前已广泛应用于生命科学、临床诊断、环境监测等领域。

基于 AI 的光谱解析方法则致力于解决复杂基质中信号重叠、信噪比低的传统难题。通过卷积神经网络、支持向量机等机器学习算法对海量谱学数据(如拉曼光谱、近红外光谱、质谱等)进行训练, AI 能够有效提取特征信号、识别物质成分, 甚至预测未知物结构, 大幅提升了解析的准确性与效率[63]。光谱与 AI 的深度融合, 正推动分析化学从“经验解读”向“智能预测”转变。

便携式质谱仪的发展使原本局限于实验室的大型分析设备走向现场成为可能。近年来, 通过在进样技术、离子阱质量分析器等核心部件上的突破, 便携式质谱仪在保持高灵敏度和稳定性的同时, 实现了设备的小型化、轻量化与快速响应, 支持在应急监测、公共安全、现场诊断等多场景下的实时检测[64]。

未来最具系统性与前瞻性的方向是构建多技术联用平台。其核心在于将微流控芯片的样品处理能力、便携质谱的高灵敏度检测能力与 AI 算法的智能解析能力通过硬件接口和软件算法进行深度耦合, 形成“样品进—结果出”的一体化智能分析系统。例如, 微流控芯片可完成复杂样品的自动预处理, 便携质谱进行快速定性与定量, AI 模型则对检测信号进行实时解析与决策反馈, 从而实现优势互补, 解决单一技术难以应对的复杂实际样品检测问题[65]。这类平台不仅是技术上的整合, 更是面向应用场景的系统工程, 有望在精准医疗、环境监测、食品安全等领域发挥关键作用。

3　结束语

鸡蛋中兽药残留限量标准体系的构建与完善，是一项复杂的系统性工程，具有渐进性、阶段性与长期性的特点。需要结合我国养殖实际情况及食品安全风险评估的结果持续完善禽蛋中兽药残留的限量指标。我们要在立足国内农业生产实际的同时，放眼国外，着眼于发达国家对于鸡蛋中兽药残留控制要求严于我国的部分以及在国际贸易中出现的问题，对于我国的兽药残留限量标准进行实时的更新，从制度建设层面，提升我国以鸡蛋为代表的食用农产品的安全水平和质量，推动我国优质鸡蛋产品走向国际市场。

随着检测技术的发展和便携式快速检测设备的普及，鸡蛋的兽药残留检测将在技术创新、行业实践等多个维度实现突破，逐步形成快速检测初筛—实验室检测的快速响应体系，提升市场监管的效率。今后应进一步聚焦绿色、高效、智能化的检测技术研发。重点发展微流控芯片技术、基于人工智能的光谱解析方法、适用于现场筛查的便携式质谱仪以及多技术联用平台，实现从样本前处理到结果分析的全流程自动化与智能化，显著提升检测通量与准确性。

总之，随着检测项目与限量指标的不断细化、多种高通量快速检测方法的推广、监管力度的不断加强、养殖人员和消费者的食品安全意识不断提升，我国鸡蛋的安全性将得到进一步的提升，从而做到让放心蛋回归餐桌，共同守护舌尖上的安全。

参考文献

[1] WANG J, LIAO W, NIMALARATNE C, *et al*. Purification and characterization of antioxidant peptides from cooked eggs using a dynamic in vitro gastrointestinal model in vascular smooth muscle A7r5 cells [J]. NPJ Science of Food, 2018, 2: 7.

[2] PAN X, YANG J, LIPWORTH LP, *et al*. Cholesterol and egg intakes with cardiometabolic and all-cause mortality among Chinese and low-income black and white Americans [J]. Nutrients, 2021, 13(6): 2094.

[3] JIANG C, CHEN R, SHI X, *et al*. Effects of breeds on the content of functional nutrition in eggs [J]. Animals, 2023, 13(19): 3066.

[4] 张硕晗, 刘一帆, 谢兵红, 等. 南方主要地方鸡品种蛋品质及营养成分研究[J]. 中国畜牧兽医, 2025, 52(8): 3642–3650.
ZHANG SH, LIU YF, XIE BH, *et al*. Study on egg quality and nutrient components of major local chicken breeds in Southern China [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 52(8): 3642–3650.

[5] Food and Agriculture Organization of the United Nations. World food and agriculture-statistical yearbook 2024 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024.

[6] LI F, CHENG S, YU H, *et al*. Waste from livestock and poultry breeding and its potential assessment of biogas energy in rural China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126: 451–460.

[7] 朱静, 李婷婷, 施寿荣, 等. 我国消费者禽产品营养价值与质量安全认知及其对消费的影响——以鸡蛋为例[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2025(7): 166–174.
ZHU J, LI TT, SHI SR, *et al*. Chinese consumers' perceptions of the nutritional value and quality safety of poultry products and their impact on consumption: A case study of eggs [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2025(7): 166–174.

[8] RANA MS, LEE SY, KANG HJ, *et al*. Reducing veterinary drug residues in animal products: A review [J]. Food Science of Animal Resources, 2019, 39(5): 687–703.

[9] 季宝成, 杨澜瑞, 韩雨, 等. 动物源性食品兽药多残留检测中基质净化与液相色谱-质谱联用技术研究进展[J]. 轻工学报, 2023, 38(5): 8–16.
JI BC, YANG LR, HAN Y, *et al*. Research progress on matrix purification combined with LC-MS method for the detection of veterinary drug residues in animal-derived foods [J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(5): 8–16.

[10] CUPIC V, IVANOVIC S, BOROZAN S, *et al*. Antimicrobial agents in laying hens [J]. Matica Srpska Journal for Natural Sciences, 2022(142): 61–71.

[11] 孙志轩, 李苗, 黄婧洁, 等. 非甾体类抗炎药前处理及检测方法研究进展[J]. 中国兽药杂志, 2023, 57(7): 77–86.
SUN ZX, LI M, HUANG JJ, *et al*. Research progress on pretreatment and detection methods of nonsteroidal anti-inflammatory drugs [J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2023, 57(7): 77–86.

[12] 敖蒙蒙, 魏健, 陈忠林, 等. 四环素类抗生素环境行为及其生态毒性研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(2): 314–324.
AO MM, WEI J, CHEN ZL, *et al*. Research progress on environmental behaviors and ecotoxicity of tetracycline antibiotics [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(2): 314–324.

[13] 李明珠, 王雅蓉, 卢立志, 等. 欧盟与中国禽蛋食品安全农兽药残留限量对比分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(5): 260–268.
LI MZ, WANG YR, LU LZ, *et al*. Comparative analysis of pesticide and veterinary drug residue limits for food safety of poultry eggs in European Union and China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(5): 260–268.

[14] 中华人民共和国农业农村部农产品质量安全监管司. 中华人民共和国农业农村部公告第 906 号[EB/OL]. (2025-08-11) [2025-08-17]. https://jgs.moa.gov.cn/nybz/202508/t20250811_6476398.htm
Department of Agricultural Product Quality and Safety Supervision, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Announcement No.906 of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China [EB/OL]. (2025-08-11) [2025-08-17]. https://jgs.moa.gov.cn/nybz/202508/t20250811_6476398.htm

[15] RAHMAN MM, LEE DJ, JO A, *et al*. Onsite/on-field analysis of pesticide and veterinary drug residues by a state-of-art technology: A review [J]. Journal of Separation Science, 2021, 44(11): 2310–2327.

[16] WU H, ZHAO J, WAN J. A review of veterinary drug residue detection: Recent advancements, challenges, and future directions [J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10413.

[17] ZHAO L, LUCAS D, LONG D, *et al*. Multi-class multi-residue analysis of veterinary drugs in meat using enhanced matrix removal lipid cleanup and liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2018, 1579: 47–55.

[18] TANG ZT, LIU F, FANG F, *et al*. Solid-phase extraction techniques based on nanomaterials for mycotoxin analysis: An overview for food and agricultural products [J]. Journal of Separation Science, 2022, 45(13): 2273–2300.

[19] 康福帅. 固相萃取技术在防腐剂和甜味剂检测中的应用研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2025.
KANG FS. Application of solid phase extraction technology in the

detection of preservatives and sweeteners [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2025.

[20] CHERIAN G. Nutrition and metabolism in poultry: Role of lipids in early diet [J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2016, 7(3): 312–320.

[21] CAMPOS AM, RICARDO F, ALVES E, *et al*. Lipidomic investigation of eggs' yolk: Changes in lipid profile of eggs from different conditions [J]. Food Research International, 2016, 89: 177–185.

[22] 中国疾病预防控制中心营养与健康所. 中国食物成分表标准版第 6 版第二册[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2019.
National Institute for Nutrition and Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention. China food composition table standard edition 6th edition volume 2 [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2019.

[23] 张维谊, 丰东升, 龚海燕, 等. 鸡蛋中硝基咪唑类药物残留量的测定超高效液相色谱-串联质谱法[J]. 中国动物传染病学报, 2023, 31(6): 104–113.
ZHANG WY, FENG DS, GONG HY, *et al*. Determination of nitroimidazole residues in eggs by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Animal Infectious Diseases, 2023, 31(6): 104–113.

[24] WEI F, WANG X, MA H, *et al*. Rapid profiling and quantification of phospholipid molecular species in human plasma based on chemical derivatization coupled with electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. Analytica Chimica Acta, 2018, 1024: 101–111.

[25] 冯月超, 丁奇, 王建凤, 等. 快速柱-液相色谱/质谱联用法同时检测鸡蛋中 52 种兽药残留[J]. 分析试验室, 2021, 40(11): 1298–1303.
FENG YC, DING Q, WANG JF, *et al*. Determination of 52 veterinary drugs in eggs by fast SPE using ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2021, 40(11): 1298–1303.

[26] ZENG Y, YANG Q, LI X, *et al*. Simultaneous determination of 61 veterinary drug residues in animal derived food by clean-up LPAS combined with LC-MS/MS [J]. American Journal of Analytical Chemistry, 2025, 16(4): 1–15.

[27] 许旭, 吕佳, 杨澜瑞, 等. 基于还原氧化石墨烯改性三聚氰胺海绵的改良 QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法快速测定鸡蛋中 32 种兽药残留[J]. 分析化学, 2024, 52(1): 121–135.
XU X, LU J, YANG LR, *et al*. Rapid determination of 32 veterinary drug residues in eggs by improved QuEChERS-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry based on modified melamine sponge with reduced graphene oxide [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2024, 52(1): 121–135.

[28] SANTANA-MAYOR A, RODRÍGUEZ-RAMOS R, HERRERA-HERRERA AV, *et al*. Updated overview of QuEChERS applications in food, environmental and biological analysis (2020-2023) [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2023, 169: 117375.

[29] LEHOTAY SJ, ANASTASSIADES M, MAJORS RE. The QuEChERS revolution [J]. LC-GC Europe, 2010, 23(9): 500–511.

[30] GARCIA CV, GOTAH A. Application of QuEChERS for determining xenobiotics in foods of animal origin [J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2017, 2017: 1–13.

[31] 刘薇, 白富宇, 毋婷, 等. QuEChERS-液相色谱-串联质谱法测定鸡蛋中 9 种糖皮质激素 [J/OL]. 中国饲料, 1-6. [2025-10-03]. https://doi.org/10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.2025020041-05
LIU W, BAI FY, WU T, *et al*. Simultaneous determination of 9 glucocorticoids in eggs by QuEChERS-liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J/OL]. Chinese Feed, 1-6. [2025-10-03]. https://doi.org/10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.2025020041-05

[32] 陈容, 刘育形, 王泽林, 等. QuEChERS/超高效液相色谱-串联质谱法测定禽蛋中 90 种禁用药物残留[J]. 分析测试学报, 2023, 42(10): 1291–1300.
CHEN R, LIU YX, WANG ZL, *et al*. Determination of 90 prohibited drugs residues in poultry eggs by QuEChERS/ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2023, 42(10): 1291–1300.

[33] GUO Y, HONG L, GAO P, *et al*. Development of a QuEChERS-HPLC-FLD procedure for the simultaneous detection of residues of florfenicol, its metabolite florfenicol amine, and three fluoroquinolones in eggs [J]. Molecules, 2024, 29(1): 252.

[34] 朱万燕, 张鸿伟, 车立志, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定禽蛋中 31 种产蛋期禁用兽药[J]. 色谱, 2024, 42(5): 420–431.
ZHU WY, ZHANG HW, CHE LZ, *et al*. Simultaneous determination of 31 banned veterinary drugs during egg-laying period in poultry eggs by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2024, 42(5): 420–431.

[35] ISLAS G, IBARRA IS, HERNANDEZ P, *et al*. Dispersive solid phase extraction for the analysis of veterinary drugs applied to food samples: A review [J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2017, 2017: 1–16.

[36] HERRERO-LATORRE C, BARCIELA-GARCÍA J, GARCÍA-MARTÍN S, *et al*. Magnetic solid-phase extraction using carbon nanotubes as sorbents: A review [J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 892: 10–26.

[37] JIA W, LIU Y, XU X, *et al*. Comprehensive multiplexed analysis of risky drugs in eggs based on magnetic zeolitic imidazolate frameworks and UHPLC Q-Orbitrap HRMS [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2021, 29(3): 490–501.

[38] SAJJAD M, ALMUFARIJ R, ALI Z, *et al*. Magnetic solid phase extraction of aminoglycosides residue in chicken egg samples using Fe_3O_4-GO-agarose-chitosan composite [J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137092.

[39] XIAO D, DRAMOU P, XIONG N, *et al*. Preparation of molecularly imprinted polymers on the surface of magnetic carbon nanotubes with a pseudo template for rapid simultaneous extraction of four fluoroquinolones in egg samples [J]. Analyst, 2013, 138(11): 3287–3296.

[40] 覃国顺, 吴丹, 龙欣琦, 等. 超分子溶剂-微萃取技术在食品及环境污染物检测中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 128–138.
QIN GS, WU D, LONG XQ, *et al*. Progress in the application of supramolecular solvent-microextraction technology in detection of food and environmental pollutants [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 128–138.

[41] HERGHELEGIU MC, PĂNESCU VA, BOCOȘ-BINȚINȚAN V, *et al*. Simultaneous determination of steroids and NSAIDs, using DLLME-SFO extraction and HPLC analysis, in milk and eggs collected from rural Roma communities in Transylvania, Romania [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2023, 29(1): 96.

[42] 关正萍, 赵小红, 王凯敏, 等. 鸡蛋中头孢氨苄和头孢噻呋抗生素残留检测方法的建立[J]. 食品科技, 2021, 46(9): 302–310.
GUAN ZP, ZHAO XH, WANG KM, *et al*. Establishment of a method for determination of cefalexin and ceftiofur antibiotic residues in eggs [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(9): 302–310.

[43] KHALED A. Automated high-throughput analysis of multi-class

multi-residue pharmaceutical drugs in animal tissue using solid phase microextraction [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2020.

[44] LAN H, LI X, WU Z, *et al*. Detection of veterinary drugs in food using a portable mass spectrometer coupled with solid-phase microextraction arrow [J]. Foods, 2024, 13(20): 3337.

[45] TOMASZEWSKI CA, BARRETO F, BARNET LS, *et al*. Multi-residue methodology for quantification of antiparasitic in hen eggs by LC-MS/MS: Development, validation and application to 348 samples from Brazil [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2022, 39(8): 1412–1423.

[46] VEIGA-DEL-BAÑO JM, ANDREO-MARTÍNEZ P, PÉREZ-LUCAS G, *et al*. Overview of the evolution and trends of the QuEChERS sample preparation procedure [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2024, 262(1): 22.

[47] CAPRIOTTI AL, CAVALIERE C, LA-BARBERA G, *et al*. Recent applications of magnetic solid-phase extraction for sample preparation [J]. Chromatographia, 2019, 82(8): 1251–1274.

[48] KARIMI-ZEVERDEGANI S, MOHEBIAN Z, KHORSHIDIKIA S. Introduction and review of techniques, applications, and limitations of solid phase microextraction method [J]. Health System Research, 2023. DOI: 10.48305/jhsr.v19i1.1482

[49] 宣彤, 祝军, 李巧莲, 等. 三重四极杆复合线性离子阱质谱联用技术在农兽药残留检测中的研究进展[J]. 化学通报, 2023, 86(4): 451–457.
XUAN T, ZHU J, LI QL, *et al*. Research Progress of triple quadrupole-linear ion trap mass spectrometry for determination of pesticides and veterinary drugs [J]. Chemistry Bulletin, 2023, 86(4): 451–457.

[50] 尹晖, 王亦琳, 叶妮, 等. 超高效液相色谱-三重四极杆/线性离子阱复合质谱法测定鸡蛋中黏菌素残留的研究[J]. 中国兽药杂志, 2021, 55(7): 14–21.
YIN H, WANG YL, YE N, *et al*. Determination of colistin residue in eggs by LC-QTRAP [J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2021, 55(7): 14–21.

[51] CASTELLANI F, RICCI M, COLAGRANDE MN, *et al*. Development and validation of a confirmatory method for the determination of 12 coccidiostat residues in eggs and muscle by means of liquid chromatography coupled to hybrid high resolution mass spectrometry [J]. Separations, 2023, 10(3): 202.

[52] 李云飞, 张薇, 高燕, 等. 超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法测定动源性食品中 33 种兽药残留及质谱库的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(2): 629–635.
LI YF, ZHANG W, GAO Y, *et al*. Detection of veterinary drug residues in animal-derived foods by ultraperformance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry and establishment of mass library [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(2): 629–635.

[53] 覃浩, 鲍蕾. 食品安全快速检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(24): 3–9.
HAO Q, LEI B. Research progress on rapid detection methods for food safety [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(24): 3–9.

[54] 农业农村部农产品质量安全监管司. 山东创新开展鸡蛋快速检测大幅提升监管效能 [EB/OL]. (2022-11-11) [2025-08-17]. http://www.jgs.moa.gov.cn/jyjc/202211/t20221111_6415257.htm
Department of Agricultural Products Quality and Safety Supervision, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Shandong innovates to carry out rapid detection of eggs and greatly improves the supervision efficiency [EB/OL]. (2022-11-11) [2025-08-17]. http://www.jgs.moa.gov.cn/jyjc/202211/t20221111_6415257.htm

[55] 宫艳艳, 李亚维, 成群, 等. 食品快速检测技术的发展与应用分析[J]. 食品科技, 2024, 49(10): 346–351.
GONG YY, LI YW, CHENG Q, *et al*. Development and application analysis of food rapid detection technology [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(10): 346–351.

[56] JIA M, E Z, ZHAI F, *et al*. Rapid multi-residue detection methods for pesticides and veterinary drugs [J]. Molecules, 2020, 25(16): 3590.

[57] 郎爽, 贾丽, 周慧娟, 等. 基于金纳米粒子的比色法在食品安全检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(17): 5586–5594.
LANG S, JIA L, ZHOU HJ, *et al*. Application of colorimetric method based on gold nanoparticles in food safety detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(17): 5586–5594.

[58] SHEN H, FANG Y, LI X, *et al*. Recent advances in nanozyme-based sensors for the detection of veterinary drug residues in food [J/OL]. Food Analytical Methods, 2025: 1-14. [2025-08-17]. https://doi.org/10.1007/s12161-025-02895-8

[59] 张富生, 王宇宸, 卢礼生, 等. 量子点微球免疫层析试纸条检测鸡蛋中恩诺沙星的性能评价[J]. 食品与机械, 2023, 39(9): 32–37.
ZHANG FS, WANG YS, LU LS, *et al*. Evaluation of the performance of enrofloxacin in the detection of egg by quantum dot microsphere immunochromatography strip [J]. Food & Machinery, 2023, 39(9): 32–37.

[60] LI H, LU Y, ZHANG L, *et al*. Highly sensitive magnetic-nanoparticle-based immunochromatography assay for rapid detection of amantadine in chicken and eggs [J]. Biosensors, 2024, 14(1): 23.

[61] WU Y, ZHOU R, HUANG J, *et al*. Exploring surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) methods for rapid determination of ofloxacin residues in egg white: Preprints [Z]. Preprints, 2025.

[62] 秦潇潇, 张忠, 孙晓琳, 等. 微流控纸芯片在食品安全快速检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(23): 7715–7724.
QIN XX, ZHANG Z, SUN XL, *et al*. Application of microfluidic paper chip in rapid detection of food safety [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(23): 7715–7724.

[63] 李欢, 费湘伟, 董荣建. 食品快速检测技术与人工智能在食品安全领域的协同应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 246–253.
LI H, FEI XW, DONG RJ. Collaborative application of rapid food detection technology and artificial intelligence in the field of food safety [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 246–253.

[64] 牟炳霖. 基于碳量子点萃取和便携式质谱的农兽药残留现场检测方法研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2023.
MOU BL. Research on field detection method of pesticide and veterinary drug residues in food based on carbon quantum dot extractor and portable mass spectrometry [D]. Ningbo: Ningbo University, 2023.

[65] MU W, KLETER GA, BOUZEMBRAK Y, *et al*. Making food systems more resilient to food safety risks by including artificial intelligence, big data, and internet of things into food safety early warning and emerging risk identification tools [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13296.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)