

动物源性食品兽药残留监控要素分析及研究进展

李名路^{*}, 梁飞燕, 刘华文, 辛丽娜^{*}

(广西-东盟食品检验检测中心, 广西南宁 530021)

摘要: 动物源性食品兽药残留是影响食品安全、产业安全及国际贸易壁垒的重要因素。针对于动物源性食品兽药残留安全问题, 世界各国及各组织机构都进行了广泛的研究, 从多个领域制定相应的法规要求, 创新研发生产加工及检测技术, 旨在从兽药研制、动物生产养殖及监督控制等领域有效解决兽药残留食品安全问题。监管控制是解决动物源性食品兽药残留安全问题的关键环节和重要手段, 影响监控效果的因素主要涉及法律法规、品种范围、检验检测及风险分析等几个方面。该文对影响动物源性食品兽药残留监管控制的法规标准、涉及品种、前处理手段、分析检测技术及评价方法要素进行了对比、总结和探讨, 以期期为完善动物源性食品兽药残留监管控制体系, 更好解决兽药残留食品安全问题提供参考。

关键词: 动物源性食品; 兽药残留; 法规标准; 前处理; 分析检测; 风险评价

文章编号: 1673-9078(2025)04-382-395

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.4.0264

Analysis and Research Progress of Monitoring Factors of Veterinary Drug Residues in Animal-derived Foods

LI Minglu^{*}, LIANG Feiyan, LIU Huawen, XIN Lina^{*}

(Guangxi-Asean Food Inspection and Testing Center, Nanning 530021, China)

Abstract: The presence of veterinary drug residues in animal-derived foods is an important factor affecting food safety, industrial safety, and international trade barriers. In view of the safety issue related to the veterinary drug residues in animal-derived food, countries and organizations around the world have conducted extensive research, formulated corresponding regulatory requirements from a variety of fields, and innovatively developed veterinary drug production, processing and detection technologies, aiming to effectively solve the food safety problem of veterinary drug residues in the fields of veterinary drug research and development, animal production and breeding, supervision and control. Supervision and control represent the key link and important means to solve the safety issue related to the veterinary drug residues in animal-derived food, and the factors affecting the outcome of supervision and control mainly involve aspects such as laws and regulations, variety and scope, inspection and testing, and risk analysis. This article compares, summarizes and discusses the regulatory standards, varieties involved, pre-treatment methods, analysis and testing techniques, and evaluation methods that affect the supervision and control of veterinary drug residues in animal-derived foods, in order to provide a reference for improving

引文格式:

李名路,梁飞燕,刘华文,等.动物源性食品兽药残留监控要素分析及研究进展[J].现代食品科技,2025,41(4):382-395.

LI Minglu, LIANG Feiyan, LIU Huawen, et al. Analysis and research progress of monitoring factors of veterinary drug residues in animal-derived foods [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 382-395.

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 广西壮族自治区市场监督管理局科技计划项目(GXSJKJ2021-3); 广西壮族自治区市场监督管理局科技计划项目(GXSJKJ2024-15); 广西-东盟食品检验检测中心科学研究项目(KY202103)

作者简介: 李名路(1987-), 女, 博士, 工程师, 研究方向: 食品质量安全与食品功能性研究, E-mail: ming_lu_li@sina.com; 共同通讯作者: 辛丽娜(1982-), 女, 硕士, 副主任药师, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: xinlina2021@sina.com

the supervision and control system of veterinary drug residues in animal derived foods and better addressing the food safety issues related to veterinary drug residues.

Key words: animal-derived foods; veterinary drug residues; regulations and standards; pretreatment; analysis and detection; risk evaluation

随着社会的发展和进步, 食品安全已成为社会普遍关注的热点公共安全问题。随着动物源性产品逐渐成为日常饮食不可或缺的组成部分, 畜禽肉、水产品及蛋奶制品等主要动物源性食品的需求量与日俱增, 涉及到动物源性食品安全的问题受到了广泛的重视和研究^[1,2]。在动物源性食品产业链中, 保障动物健康及生产性能离不开兽药的研发及使用, 随之而来的兽药残留问题也成为了影响动物源性食品安全的重要因素之一^[3]。

兽药残留包括动物可食用部分所含的兽药类母体化合物或代谢物, 及与兽药有关的杂质。造成动物源性食品兽药残留的原因主要有以下几个方面, 一是为了预防和治疗动物疾病滥用药物、超量用药及使用违禁药品或添加剂, 二是为了经济效益违反休药期规定, 三是兽药企业为了自身利益违反标签规定, 四是使用兽药掩饰疾病临床症状以逃避检验, 五是兽药因生产质量问题混入其他污染物等^[4]。动物源性食品兽药残留对人体和经济造成了不可忽视的风险和影响, 其中包括长期摄入导致的人体毒性和过敏反应; 引发“致畸、致癌、致突变”问题, 破坏激素平衡影响人体的机能代谢及生殖发育; 诱导生成耐药菌株, 通过生物富集产生环境毒性; 引发国际贸易中非贸易性技术壁垒障碍, 造成巨大经济损失及冲击国际市场地位^[5]。

针对于动物源性食品兽药残留安全问题, 世界各国及各组织机构都对其进行了广泛的研究, 从多个领域制定相应的法规要求, 创新研发生产加工及检测技术, 旨在从兽药研制、动物生产养殖及监督控制等领域有效解决兽药残留食品安全问题^[6]。动物源性食品兽药残留的监控是解决兽药残留安全问题的关键环节, 影响监控效果的因素主要涉及法规标准、品种范围、检验检测及分析评价等几个方面。以兽药残留作为主题词或关键词检索中国知网 2010 年至 2023 年中外文文献, 统计对比结果如图 1 所示, 在近十年中兽药残留相关文献数量均保持在 350 篇以上, 2016-2021 年文献数明显增多, 其中 2017 年文献数接近 600 篇。此外, 兽药残留检测和法规标准相关文献占比较大, 分别为 56% 和 30%; 其次关于兽药残留的危害和

风险评价占比不足 10%。由此可见, 研究人员对于兽药残留食品安全问题关注度较高, 兽药残留检测技术的发展和法规标准的完善是研究的重点。

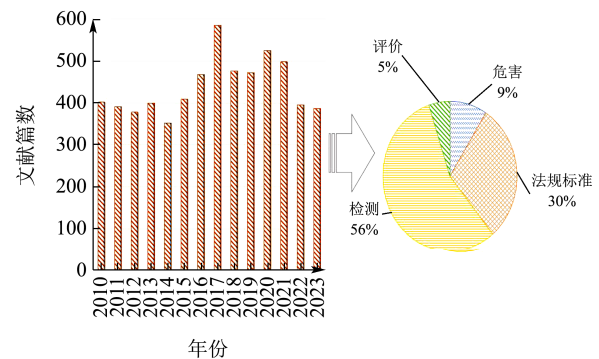


图 1 2010 年至 2023 年兽药残留文献对比

Fig.1 Comparison of literature on veterinary drug residues from 2010 to 2023

1 动物源性食品兽药残留法规标准

随着加快的世界经济贸易全球化进程, 美国、欧盟、中国、巴西及俄罗斯等主要的动物源性食品进出口国家相继推出并不断完善了关于兽药残留的法规和标准, 规定了动物源性食品中兽药最大残留限量^[7]。其他的经济发达国家例如日本、韩国、新加坡和澳大利亚等也相继基于兽药残留设置了国际贸易壁垒, 加大了对动物源性食品兽药残留的监管力度。与此同时, 欧盟、日本、加拿大及新加坡等国相关机构在网络构建了兽药残留数据库, 以方便国际交流及标准更新^[8]。此外, 随着进出口贸易的增加, 我国在颁布和实施食品安全国家标准的同时, 对于进出口动物源性食品中的兽药残留也发布了相关的规定及公告^[9,10]。由于地缘性及生态性差异, 各国畜牧养殖业发展不均衡, 不同生产地区的兽药使用情况不同, 导致动物源性食品兽药残留量及对应的法规标准参差不齐, 阻碍了相关食品的贸易流通^[11,12]。针对此情况, 国际食品法典委员会 (CAC) 组织开展兽药风险评估并测量出最大残留限量 (MRL) 的建议值, 发布了《食品中兽药最大残留限量 (MRL) 和风险管理建议 (RMR)》, 成为其他国家兽药残留标准的参考依据, 有利于打破

贸易壁垒, 解决国际贸易纠纷^[13]。虽然世界各国及相关组织对于兽药残留的关注和监管力度不断加大, 但地缘性障碍一直是难以逾越的壁垒, 即使是国际性组织志于统一或规范各区域的兽药残留限量

和标准, 但各国对于兽药残留监控的投入和政策性倾向导致动物源性食品中的兽药残留食品安全问题层出不穷。各国关于动物源性食品兽药残留法规标准制定情况如表 1 所示。

表 1 各国动物源性食品兽药残留法规标准现状

国家 / 区域	兽药残留法规	主要内容	文献
欧盟	关于兽药残留的 (EU) No 37/2010 号法规及修订单汇总 (持续更新)	规定了药理活性物质及其关于最大残留量限值 (MRL) 的分类及禁用物质	[14]
中国	国家市场监督管理总局发布 GB 31650-2019《食品安全国家标准 食品中兽药最大残留限量》及 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》中华人民共和国农业农村部公告第 250 号及 594 号	规定了动物性食品中首要的最大残留限量; 规定了允许用于食品动物, 但不需要制定残留限量的兽药; 规定了允许作治疗, 但不得在动物性食品中检出兽药规定了食品动物中禁止使用的样品及其化合物清单	[15-18]
日本	日本厚生劳动省发布《食品卫生法》日本食品化学研究基金会建立食品中农用化学品的最大残留限量 (MRL) 清单 (数据库)	规定了兽药最大残留限量和未经授权物质特定检测限	[19]
韩国	韩国食品药品安全部 (MFDS) 制定和发布韩国食品中兽药残留限量标准, 并收录于《食品卫生法》	规定了兽药最大残留限量标准并修订部分食品中农兽药最大残留限量。开设了“农兽药残留物质信息”网站, 提供开放式农药、兽药查询平台。	[20]
加拿大	加拿大卫生部发布食品中兽药最大残留限量 (MRL) 清单 (持续更新)	规定了在经过兽药处理的食用动物组织或食品中可以安全残留的残留物水平。它通过引用纳入《食品中兽药最大残留限量的上市许可》。	[21]
美国	美国食品和药物管理局 (FDA) 颁布 CFR-联邦法规守则第 21 条 FDA 建立家畜生肉上兽药残留的限定标准	规定动物性食品中兽药残留最高限量标准和相关法规	[22]
英国	英国食品标准局 (FSA) 颁布食品卫生法规, 对兽药残留监督公告	规定食品中兽药残留最高限量标准并通报数据报告	[23]
新加坡	新加坡《食品条例》附表 9 制定了农药的最大残留限量 (MRL) 对于附表 9 没有规定的最大残留限量的农药, 使用食品法典委员会 (Codex) 采用的最大残留限量 (持续更新)	评估各种食品中低水平兽药残留的风险建立目前既未根据附表 9 规定也未被法典采用的兽药最大残留限量	[24]
澳大利亚	澳大利亚农药和兽药管理局制定《农兽药残留限量标准》, 并收录于《澳新食品标准法典》	规定食品中农兽药和相关物质的最大残留限量以及标准适用的产品部位。不需要设定最大残留限量的农兽药及相应的使用方法。	[25]
新西兰	新西兰初级产业部发布农兽药残留限量标准新西兰初级产业部发布实验室应检验的动物产品项目清单 澳大利亚和新西兰签订食品标准互认协议, 共同建立澳大利亚-新西兰食品标准局	规定食品中农兽药和相关物质的最大残留限量。项目清单汇总各个国家各种动物及动物产品中兽药残留检测指标。	[26]
俄罗斯	俄罗斯联邦政府发布《食品质量与安全法》中央科学和方法兽医实验室 (FSBICNMVL) 制定并发布了关于农兽药残留取样方法和程序的指南	规定动物性食品中兽药残留最高限量标准和相关法规指南确定农兽药取样一般程序, 以提高活性物质的检出质量	[27]
巴西	巴西卫生监督局 (ANVISA) 公布动物源食品内兽药最大残留限量规定	根据适用于其区域的良好农业规范 (GAP) 制定最大限量, 决议草案规定动物源性食品中兽药最大残留限量和风险管理建议 (RMR)	[28]
印度	印度食品安全标准局 (FSSAI) 发布《食品安全和标准》及相关食品修订公告	规定动物性食品中兽药残留最高限量标准和相关法规	[29]
国际食品法典委员会 (CAC)	CAC/MRL 2-2018《食品中兽药的最大残留限量 (MRL) 和风险管理建议 (RMR)》	开展兽药的风险评估并测量出最大残留限量 (MRL) 的建议值, 成为其他国家兽药残留标准的参考依据, 利于解决国际贸易纠纷	[30]

2 动物源性食品兽药残留涉及的范围

为了保障动物源性食品的经济性，兽药及其他添加剂的使用不可避免，兽药残留涉及的品种及类别范围随着畜牧养殖的发展而逐渐加大。根据饮食结构及生活习惯的调整，涉及的动物品种由传统的猪、牛羊及鸡鸭等禽畜类拓展到兔、马、火鸡及水产品等；涉及的靶组织不仅仅局限于肌肉、内脏及蛋奶，还包括表皮、脂肪及副产物等可食用部分，产品种类也包含了生熟肉制品、蜂蜜、蛋奶制品等。涉及的兽药残留类别主要包括但不限于以下几大类，分别为抗/杀虫类、抗菌类、抗生素类、激素类、麻醉/镇静剂、抗炎类、 β -受体激动剂及其他，几乎涵盖了所有的食品动物及产品，其中包括部分在动物泌乳期或产蛋期禁用的化合物。现行的GB 31650-2019及GB 31650.1-2022是我国食品中兽药最大残留限量的强制性食品安全国家标准，此外农业农村部也发布相关公告，对部分兽药残留种类做了特别的规定^[15-18]。如图2所示，我国国家标准规定动物源性食品兽药残留涉及的品种及类别中抗生素占比最高，为总体的31%，涉及的化合物包括 β -内酰胺类、氨基糖苷类、四环素类、大环内酯类及氯霉素类等；其次是抗菌药类，占总体的24%，喹诺酮类、磺胺类及硝基咪唑类等均为主要监控的化合物；其余的例如抗虫/杀虫药、激素类、 β -受体激动剂、镇静麻醉剂及孔雀石绿等虽然占比较低，但也是兽药残留监控的重点。在我国动物源性食品兽药残留涉及的范围中，30%类别含有产蛋期或泌乳期禁用的化合物，常见的包含产蛋期禁用的阿莫西林、青霉素、地克珠利、多西环素、恩诺沙星、氟苯尼考及磺胺类等，以及泌乳期禁用的阿维菌素、环丙氨嗪、多西环素、氟苯尼考及托曲珠利等，可见在动物生育哺育敏感环节，兽药残留的监控更为严格。另外，我国动物源性食品兽药残留监控涉及的动物品种主要还是集中在百姓餐桌常见的家禽家畜和水产品上，家畜涉及的兽药残留品类明显高于其他品种，占比达到94%；由于水产养殖业的发展，水产品的需求量增大，涉及的兽药残留种类超过家禽，达到64%；随着饮食方式的转变，一些各品种项下明确规定的动物种类以外的其他所有食品动物也被列入了监控范围，兽药残留种类占比提升达到15%。我国为农产品生产及进出口大国，动物源性食品涉及的兽药残留随着畜牧产业及精加工产业的

发展规模不断扩大，也同时受到进出口贸易政策的影响。人为添加或环境带入使得动物源性食品兽药残留涉及的药物品种超出了兽药范围，往人用药物或农药等领域扩展。

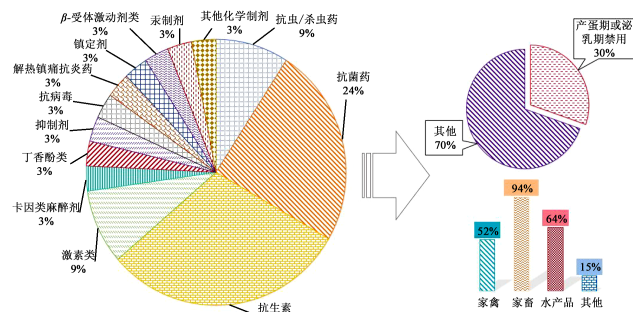


图2 我国动物源性食品兽药残留涉及的范围

Fig.2 Scope of veterinary drug residues in animal-derived foods in China

3 动物源性食品兽药残留的检验

由于动物源性食品兽药残留涉及的品种及类别广泛，兽药残留在基质中的浓度通常为微量乃至痕量，各区域及国家规定的动物源性食品兽药最大残留限量也与时俱进在逐渐降低。因此，建立高效准确、适用性广的兽药残留检验检测体系是应对兽药残留食品安全问题的关键步骤^[31]。基于动物源性食品基质的多样性以及兽药残留的差异性，兽药残留检验检测体系的研究主要集中在基质前处理和成分分析检测方面，尤其是适用于不同基质中多种兽药残留的高通量、高灵敏检验检测体系逐渐成为了最主要的研究发展趋势。相较于传统的实验室内检测，针对检验过程耗时耗力、成本昂贵，环境污染，化合物分解等问题，由现代技术引领的新型检验方法具有快速便捷、廉价高效、稳定安全等优势，得到广泛的研究和应用^[32]。

3.1 动物源性食品兽药残留前处理方法

相较于植物源性产品，动物源性食品包含丰富的脂肪、蛋白质、胶质及肌肉纤维等，基质更加复杂且干扰物质更多，分离和纯化的难度较大。兽药残留检验前处理包括提取与净化、浓缩与富集、化学衍生化等过程，最大程度地排除基质效应干扰，是兽药残留检验检测体系至关重要的环节^[2]。目前兽药残留检验前处理方法主要包括液液萃取、固相萃取、加速溶剂萃取法、QuEChERS法等。由传统的液液萃取法衍生出来的液相微萃取、盐析辅助液

液萃取及加压液体萃取等方法，都能有效减少试剂使用量，缩短萃取时间，提高萃取效率。固相萃取作为目前主流的前处理技术，其萃取装置和吸附材料是研究的重点。目前在现有的提取、纯化及浓缩基础上，开发出分子印迹固相萃取、固相微萃取、磁性固相萃取等针对性强、简易高通量的固相萃取技术。同时，加速溶剂萃取技术是指在高温高压环境下用有机溶剂对固体或半固体样品进行自动化萃取，能进一步降低基质效应，缩短萃取时间，特别适用于脂肪含量高的样品。QuEChERS 是基于基质固相分散技术 (MSPD) 建立起来的一种前处理方法，主要分为萃取和净化过程，可同时分散和萃取样品。QuEChERS 能有效减少消耗，节约人力，适用范围广泛，基于 QuEChERS 的兽药残留检验检测技术研究逐渐成为研究及应用的热点^[33]。此外，随着生命科学及材料学的进步，新型复合型材料的应用及多技术的耦合，具有更加简便快捷、灵敏度高、检测通量大、结果可靠性高等优势，在兽药残留检测前处理特别是快检领域有广阔的发展空间。

在固相萃取技术中，针对于兽药残留复杂的基质特性，纯化材料的选择及研究对于兽药残留前处理的效果及成分检测的准确性至关重要。随着研

究的深入，纯化材料种类逐渐增多，以适用于不同的兽药残留基质体系。其中，涉及到的净化吸附材料包含常见的硅胶基质填料 (C₁₈ 等非极性材料及 SiO₂ 等非极性材料)，硅胶基质的离子型填料 (强弱阴阳离子材料)，有机基质填料 (HLB 亲水亲脂平衡填料)，无机吸附型填料 (氧化铝和活性炭等)^[34]。此外，具有特异性结合目标物的分子印迹聚合物，高比表面积且稳定性强的石墨烯及碳纳米材料，扩散快、回收方便且灵敏度高的磁性材料等新型填料或吸附剂被相继研发应用于兽药残留前处理技术中^[35,36]。固相萃取填料和萃取模式的发展为种类繁多的兽药残留预富集和快速检测提供了新的思路和方法。随着兽药残留的规定越来越严格，衡量越来越严重，基质效应越来越明显，对兽药残留检验前处理提出了更高的要求，因此开发高特异性、高效便捷的前处理方法显得尤为重要^[37]。前处理方法的进步是推动动物源性食品兽药残留监控实现便捷化、快速化及高通量化不可忽略的关键步骤，新型材料的研发和利用又限制了兽药残留前处理的发展，未来科技的材料将有效助力兽药残留前处理技术的与时俱进。动物源性食品兽药残留主要前处理方法原理及优势分析如表 2 所示。

表 2 动物源性食品兽药残留前处理方法对比

Table 2 Comparison of pre-treatment methods for veterinary drug residues in animal-derived foods

前处理方法	原理	优势	适用范围	适用成分	文献
液液微萃取 (LPME)	利用不同溶剂之间的互溶性差异来实现分离。根据萃取模式不同可分为中空纤维液相微萃取 (HF-LPME)、分散液液微萃取 (DLLME) 和均相液液微萃取 (HLLLE) 等	实现液液萃取的微量化，减少有机溶剂使用量，操作简便、成本低廉，富集倍数高、环境友好	禽畜类可食用部分、乳及乳制品、蜂蜜	喹诺酮类、大环内酯类、阿维菌素类、磺胺类	[38]
液液萃取 (LLE)					
盐析辅助液液萃取 (SHLLE)	液液萃取混合溶剂中加入盐类物质产生盐析效应，增加极性有机化合物提取率	适用于亲水性物质，减少基质效应，避免离子抑制，实现自动化高通量处理	水产品、乳及乳制品、蜂蜜	双酚类、烷基酚类、邻苯二甲酸酯类、喹诺酮类、雌激素类	[39]
加速溶剂萃取 (ASE)	在高温高压条件下用有机溶剂对固体或半固体的样品进行自动化萃取	高温可以增加分析物溶解度，降低基质效应，高压可以使溶剂在高温下仍保持液态，保证挥发性物质不挥发，缩短萃取时间	动物可食用组织 (脂肪含量高) 及产品、乳及乳制品、蛋类	皮质类固醇类、激素类等脂溶性成分	[40]
超临界流体萃取 (SFE)	利用流体在温度或压力临界点密度大、粘度低及扩散系数大等特性，以超临界流体为提取溶剂实现选择性提取和分离	通过改变温度、压力或添加有机溶剂，优化萃取过程，同步萃取分离，传质快效率高，操作周期短，选择性高，经济环保	水产品、乳及乳制品、蛋类	孔雀石绿、结晶紫、氯霉素类、磺胺类、喹诺酮类	[41]

续表2

前处理方法	原理	优势	适用范围	适用成分	文献
分子印迹固相萃取 (MISPE)	利用分子印迹聚合物和模板分子在空间结构的互补配对目标物质进行分离、识别和富集	对目标化合物选择性高, 特异性结合能力强, 消除基质干扰, 分析准确度和灵敏度高	水产品、禽畜可食用部分	硝基咪唑类、氨基糖苷类	[42]
固相微萃取 (SPME)	根据平衡萃取和选择性吸附原理将目标分析物从样品中转移至萃取涂层中的; 萃取涂层和样品中的分析物达到萃取平衡即可检测	集提取、浓缩、进样一体, 提高萃取效率, 操作简单、有机溶剂用量少、易实现高通量自动化	水产品、牛奶、蜂蜜、乳及乳制品	磺胺类、激素类、苯并咪唑类、 β -受体激动剂类、大环内酯类、	[43]
固相萃取 (SPE) 磁性固相萃取 (MSPE)	直接添加磁性或可磁化材料吸附剂基质, 在强磁性作用下将组分分离以便于检测	常用于液体或者黏稠样品, 以及部分含有脂类的原料	水产品、禽畜肉、牛奶、鸡蛋	大环内酯类、头孢菌素类、磺胺类、四环素类、氯霉素类、 β -受体激动剂类、苯并咪唑类	[44]
分散固相萃取 (MSPD)	将由多种聚合物材料组成的涂渍与样品一起研磨, 得到半干状态的混合物作为填料, 用不同溶剂进行洗脱, 分离各组分	浓缩了均质、裂解、提取及净化等过程, 对样品结构及生物组织进行高度破坏和分散, 增大接触面积, 加快溶解速度, 减少处理步骤, 降低样品损失	禽畜可食用部分、水产品、乳及乳制品、蛋类	杀虫剂、磺胺类、四环素类、氯霉素类、喹诺酮类、硝基咪唑类	[45]
QuEChERS	以分散固相分散 (MSPD) 为基础, 包括萃取和净化过程, 可同时分散和萃取固体、半固体样品	融合提取、分离和净化等多个步骤, 减少样品、试剂和耗材消耗, 节约劳力时间, 适用范围广泛	牛乳及其制品、鸡蛋、禽畜可食用组织、动物组织药材	磺胺类、喹诺酮类、苯并咪唑类、阿维菌素类、大环内酯类、酰胺醇类	[46]
金属有机骨架材料 (MOFs)	是以无机金属离子 (离子簇) 为中心, 与有机配体 (羧酸类、杂环化合物) 通过配位键桥联形成的结构有序、孔径可调的多孔材料, 通过自身多孔结构的分子筛效应, π - π 共轭吸附, 氢键等分子间作用力与被吸附客体分子发生相互作用	具有比表面积大、热稳定性好、孔径尺寸可调控、孔大小分布均匀、表面修饰可调控等特性, 具备良好的热稳定性和生物相容性, 强大的选择性吸附和分离净化的能力	饲料、肉、蛋、奶、血液、尿液和组织器官	磺胺类、硝基咪唑类、四环素类、氯霉素及青霉素类	[47]
石墨烯材料	石墨烯是由碳原子组成六角型呈蜂巢晶格的平面薄膜, 具有巨大的比表面积, 特殊的 π - π 键结构, 基于多种萃取机理相互作用, 能够高效萃取和选择性富集不同类别的目标分析物	高的比表面积、大的 π 电子结构、优异的吸附性能、丰富的官能团和易于化学改性等	禽畜肉、牛奶、鸡蛋	四环素类、氟喹诺酮类、 β -受体激动剂类、喹噁啉类、酰胺醇类、磺胺类	[48]
磁性纳米复合材料 (甲壳素/壳聚糖材料)	磁性纳米复合材料是指综合有机高分子材料与无机磁性颗粒, 制造具有纳米磁学特性、生物相容性等特异性以及其他特殊结构的新型复合材料	官能团丰富、机械性能良好、耐水性强、无毒环保	禽畜肉、乳及乳制品、鸡蛋、水产品、蜂蜜	四环素类、氟喹诺酮类、 β -受体激动剂类、磺胺类、咪唑类、氯霉素类	[49]

表3 动物源性食品兽药残留分析检验技术

Table 3 Analysis and detection techniques for veterinary drug residues in animal-derived foods

检测方法	主要技术 / 原理	优势	适用范围	文献
液相色谱法 (LC)	高效液相色谱法 (HPLC) 超高效液相色谱法 (UPLC)	根据极性的差异, 通过保留时间的不同对组分进行分离和检测, 可进行多组分的同时分离和检测, 为常规通用方法	大部分有机成分	[57]
气相色谱法 (GC)	将组分气化, 根据极性的差异, 通过保留时间差异进行分析	定性、定量分析易挥发有机化合物; 通过高温裂解非挥发性的物质进行气化后分析	挥发性、易气化成分	[58]
色谱检测法 质谱联用法 (MS)	液相色谱-质谱法 (LC-MS) 液相色谱-串联质谱法 (LC-MS/MS) 气质联用法 (GC-MS) 气相色谱-串联质谱法 (GC-MS/MS) 超高效液相色谱-质谱法 (UPLC-MS/MS) 实时分析质谱 (DART-MS) 实时分析-高分辨质谱法 (DART-Q-Orbitrap HRMS) 液相色谱-高分辨率质谱法 (LC-HRMS) 液相色谱-四极杆飞行时间-质谱法 (LC-Q-TOF-MS)	将色谱的高效分离特点与质谱强大的定性能力完美结合, 是评价动物源性食品中兽药残留的常规技术手段; 在单次分析中鉴别、定量和确认复杂混合物中更多痕量级的化合物组成, 在不影响质谱灵敏度、质量分辨率或定量重现性的情况下, 获得极其可靠的分析结果	复杂成分 高通量分析	[59]
拉曼光谱 (RS)	拉曼光谱是通过拉曼散射效应, 对不同频率散射光分析以获得分子振动和转动信息的振动光谱技术。拉曼光谱与分子官能团一一对应, 可作为指纹光谱, 提供分子结构信息, 实现快速检测	具有所需样品量较少、可实现无损检测、不受水的干扰等优势	抗生素、抗菌素、染料类、激素类、 β -受体激动剂	[60]
	表面增强拉曼光谱 (SERS) 通过分子吸附在经过特殊处理且具有纳米结构的金属表面, 增强拉曼效应, 具有高灵敏性, 可应用分子结构分析以及痕量物质检测	克服了拉曼光谱弱信号限制, 特异性强、灵敏度高、前处理简单	抗生素、抗菌素、染料类、激素类	[61]
光谱检测法 近红外光谱 (NIRS)	利用基团对近红外光谱的吸收波长及强度的差异, 通过光谱扫描, 将化学计量学与成分性质进行数据关联建模, 实现定性定量分析	具有便携、快速、高效、重现性好、无损免污染等技术优点, 能够满足现场检测、多参数同时检测需求	抗生素、抗菌药	[62]
荧光分析	三维荧光指纹技术图谱包含有机物种类和浓度等信息, 荧光强度、荧光峰位置及荧光强度变化趋势可以直观完整地描述荧光物质特性	速度快、成本低、灵敏度高、专属性强、前处理简单、光谱信息全面、动态线性范围宽	抗生素、抗菌素、激素类	[63]
	量子点 (QDs) 即称半导体纳米颗粒, 由于自身的量子效应及尺寸限域体现出区别于宏观材料的光学性质, 可取代分子荧光团作为荧光探针	光谱更宽而且连续分布, 光稳定性强, 荧光寿命长, 表面化学可塑性强, 生物相容性好	抗生素、抗菌素、激素类	[64]
快筛试剂盒	示踪标记物为专属性物质或材料, 利用与蛋质等大分子物质结合产生抗原抗体反应达到检测目的	操作简单、反应灵敏、便捷直观、检测时间短, 为国际通用兽药快检方法	抗生素、抗菌药、染料类	[65]
快速筛选及微生物抑制法 快检试纸条	经特殊制备的试纸与待测成分进行反应, 所显示的变化用目视或仪器进行定性	操作简单、反应迅速、携带便捷、成本低廉、显示直观, 可满足现场初筛检测的需求	抗生素、抗菌药	[66]
微生物抑制分析	基于药物直接抑制特异微生物的数量来定性评价分析, 包括培养皿法、试管法及纸片法等	成本低、敏感性和精确度好, 适用于大规模样品的筛选	抗生素、抗菌素	[67]

续表3

检测方法	主要技术 / 原理	优势	适用范围	文献
酶联免疫吸附法 (ELISA)	抗原 - 抗体特异性结合酶高效催化反应, 通过改变抗原的化学组分和免疫吸附条件来实现受检物质的定性和定量	样品前处理简单, 纯化步骤少, 分析时间短, 适合于快检	抗生素、激素、生物毒素、抗菌素	[68]
胶体金免疫层析法 (GICA)	在弱碱环境下胶体金与蛋白质等生物大分子结合, 根据胶体金的物理性状及结合物的免疫和生物学特性, 对受检物质进行定性和定量	具有特异敏感、方便快捷、无需仪器和试剂辅助等特点, 已在初筛中得到广泛应用	性激素、抗生素、抗菌药、 β -受体激动剂	[69]
化学发光免疫分析法 (CLIA)	通过待测物浓度与化学发光强度在限定条件下的线性关系进行定量	灵敏度高、特异性强、稳定快速、线性范围宽、操作简单且自动化程度高	性激素、抗生素、抗菌素、 β -受体激动剂	[70]
免疫测定法 免疫分析法 (ISA)	以抗原或者抗体作为识别元件, 将抗原抗体的反应信号经物理或化学换能器转换为相应的电信号从而实现检测	抗原与抗体的结合具有很高的特异性, 从而减少了非特异性干扰。提高了灵敏度, 降低检出限, 简化了分析过程, 提高自动化程度	抗生素、生物毒素、 β -受体激动剂	[71]
时间分辨荧光免疫测定法 (TRFIA)	利用时间分辨技术测量镧系元素螯合物的荧光, 同时检测波长和时间两个参数进行信号分辨	非特异荧光干扰能有效地排除, 极大提高分析灵敏度	抗生素、抗菌药、生物毒素、 β -受体激动剂	[72]
生物(蛋白)芯片技术	以微阵列的形式集成了大量的生物分子, 通过靶分子与捕捉分子之间相互作用监测蛋白分子的变化	高通量、微型化和自动化, 快速准确地获取样品中大量的生物信息	激素、抗生素、抗菌药、 β -受体激动剂	[73]
生物传感器 生物传感器	主要以生物催化作用或亲和作用为基础, 识别元件为固定化的生物敏感材料作, 结合理化换能器及信号放大装置	具有快速、准确、灵敏度高和实时检测的特点	抗生素、激素、生物毒素、 β -受体激动剂	[74]
代谢组学 靶向 非靶向	对所有代谢物进行无偏向的定性与定量分析, 以核磁共振 (NMR) 技术和色谱-质谱联用技术为主, 包含数据库分析	高通量、高灵敏度、高分辨率分析, 数据库信息量大, 可实时监测生物体生理环境变化	抗生素、激素、 β -受体激动剂、生物毒素、代谢产物、毒性生物标志物	[75]

3.2 动物源性食品兽药残留分析检测技术

兽药残留的分析检测技术是兽药残留监管及研究的关键环节。随着色谱仪器和生化设备的研究和发展, 应用于兽药残留分析检测的技术日益增多且日渐成熟^[50]。色谱法是目前兽药残留分析检测的常规方法, 主要包括液相、气相及质谱联用法。液相色谱法根据待测物极性的差异, 通过保留时间的不同对多组分同时进行分离和检测。气相色谱法则可通过高温裂解将待测物进行气化后分析, 适用于易挥发有机化合物的定性、定量分析。作为检测动物源性食品中兽药残留的常规技术手段, 色谱-质谱联用法能将色谱高效分离特点与质谱强大定性能力相结合, 已逐步取代单纯液相色谱得到广泛应用。色谱-质谱联用能确认复杂体系中多种微量或痕量级化合物组成, 有效提高了灵敏度、分辨率和重现性, 获得更可靠的定性定量分析结果^[51]。目前, 随

着检测仪器的更新和研发, 色谱-质谱联用法的研究和应用主要类型包括各类质谱设备的联用, 均能实现兽药残留高通量、多组分、高灵敏度的分析检测。研究发现, 基质效应是影响色谱法灵敏度及准确性的主要因素, 通常采用同位素内标法、空白基质匹配标准曲线校正法、优化纯化过程及分离条件等措施来消除或补偿基质效应^[52]。

除了以色谱为主的实验室理化检验外, 微生物抑制分析、快筛检测的开发和应用也是兽药残留分析检测的热点方向, 主要适用于抗生素及抗菌素的分析测定; 光谱分析技术由于其灵敏迅速、无损便捷及专属高效等优点, 经过多年发展, 其中的拉曼光谱、近红外光谱及荧光光谱已广泛应用于食品安全兽药残留快检领域^[53]。随着生命科学研究的进步, 免疫测定法逐渐被应用于兽药残留的分析检测中。酶联免疫吸附法结合了抗原-抗体特异性反应与酶

高效催化反应, 适合于食品安全的快检; 胶体金免疫层析法以胶体金作为示踪标志物, 已在兽药残留检测的初筛中得到广泛研究与应用; 化学发光免疫分析法将化学发光测定与免疫反应相结合, 兼具灵敏度高、特异性强等特点; 免疫传感器分析法中抗原与抗体的结合具有高特异性, 减少了干扰; 时间分辨荧光免疫测定法能以镧系元素标记抗原或抗体, 同时配合时间分辨测定技术进行分析; 生物芯片技术(蛋白芯片)能通过靶分子和捕捉分子之间的相互作用来监测高通量监测蛋白分子作用^[54]。此外, 生物传感器法以生物催化作用或亲和作用为基础, 将生化反应与光电传导有机组合, 能实现更高效的实时监测^[55]。代谢组学作为目前生化领域的热点, 也将应用范围扩展到了兽药残留分析检测领域。代谢组学可实时监测包括代谢物种类和数量的变化在内的生理环境变化, 技术手段简便, 达到兽药残留监控的目的^[56]。动物源性食品兽药残留分析检验技术优势及适用范围如表3所示。动物源性食品兽药残留分析检验技术由传统的理化方法逐步发展到生物技术, 仪器由单一设备拓展到多设备联用, 分析现象也由表面颜色或理化反应衍生到分子结合和变化; 分析检验技术的不断更新意味着动物源性食品兽药残留的监控将逐步构建多学科技术融合的高效分析体系。

4 动物源性食品兽药残留评价方法

由于动物源性食品兽药残留涉及的动物品种及兽药类别繁多, 针对于复杂基质和多组分残留所采用的前处理方式和检测技术存在差异, 如何对结果参差不齐数据进行合理评价, 从而对兽药残留引起的食品安全问题进行有效风险评估, 也是动物源性食品兽药残留监管控制的重要环节。目前对动物源性食品兽药残留进行风险评估的方法可分为主观定性和客观定量。主观定性包含层次分析法、德尔菲法、模糊综合评价法及物元分析法等。其中层次分析法具有将评价指标分门别类、逐级分层等优点^[76]; 德尔菲法则是依赖征求及统一专家意见进行评价^[77]; 模糊综合评价法根据模糊数学隶属度和隶属函数理论将定性评价转化为定量评价, 弱化了主观性^[78]; 物元分析法利用多指标质量参数评定模型, 数值化和定量化评定结果, 能直观和完整地反映事物质量综合水平^[79]。由此可见, 兽药残留评价方法从主观定性向客观定量转化是发展的趋势。线性分

式模型在处理多目标规划时, 不仅可以转化为比例问题避免权重设置, 还为平衡目标之间的关系提供更多关键信息^[80]。食品安全指数模型作为常用的评价方法, 既可以评价单个物质风险, 也可以利用不同物质的食品安全指数可加和与平均属性系统地评价总体风险^[81]。内梅罗指数法是由单因子指数法发展而来, 计算过程简洁、物理概念清晰、可操作性强^[82]; 灰色关联评价法揭示因素间相互关联程度, 描述因素关系的强弱、大小和次序, 判断引起系统演化的主要和次要因素^[83]。熵权法是客观赋权法中常用方法, 通过计算直接得出权重来消除主观因素影响, 使指标评价结果更贴近实际结果^[84]。此外, 多属性综合评价类似于统计活动, 为定性定量相互转换的辩证认知过程, 针对复杂系统中多属性评价问题, 采用多维云模型对系统整体属性进行刻画, 同时对评价等级进行多级评语描述^[85]。

表4 动物源性食品兽药残留评价方法应用

Table 4 Application of evaluation methods for veterinary drug residues in animal-derived foods

涉及品类	兽药残留种类	评价方法	文献
	氯霉素、恩诺沙星、硝基呋喃类、孔雀石绿、磺胺类、氟苯尼考	食品安全指数法, “扇形模型”评价	[86]
水产品	36种药物(包含14种渔用禁药)	单因子污染指数法、综合污染指数法和目标危险系数法	[87]
	孔雀石绿、氯霉素、硝基呋喃、喹诺酮类	层次分析法	[88]
	硝基呋喃类、氯霉素、孔雀石绿、喹诺酮类	AHP-模糊综合评价法	[89]
	氯霉素	膳食暴露风险评估	[90]
猪肉	125种兽药残留	休哈特控制图构建风险预警体系	[91]
畜禽肉	帕特罗、赛庚啉等违禁兽药残留 ELISA 试剂盒的检测数据	双对数曲线模型	[92]
禽畜类、水产品	磺胺类	相对效能因子法, Bootstrap 与 Monte Carlo 大规模模拟评估	[93]
蜂蜜	甲硝唑、地美硝唑、诺氟沙星、恩诺沙星、环丙沙星、氧氟沙星	主客观综合的权重确定	[94]
梅花鹿、鹿茸	51种兽药残留	灰色关联度法	[95]

食品安全风险评估方法及动物源性食品兽药残留评价应用如表4所示。在实际应用中,研究人员使用食品安全指数法对广西水产品及山东省猪肉中的兽药残留进行了风险评价。在水产品兽药残留及其食用风险评价中,也可采用污染指数法、目标危险系数法、层次分析法以及AHP-模糊综合评价等手段进行分析。对于禽畜肉氯霉素残留的不确定度,可以采用数学模型和不确定度来源分析来评定;此外,对于鲜活水产品中的氯霉素残留,可以采用膳食暴露风险评估来加强监管力度。相对效能因子法结合Bootstrap与Monte Carlo大规模计算机模拟能够评估禽畜肉及水产品中磺胺类兽药残留风险。针对于蜂蜜产品,研究人员使用主客观综合的权重确定方法对多种兽药残留进行仿真风险优化评估。基于灰色关联度法评价梅花鹿鹿茸的品质,拓宽了兽药残留风险评估涉及范围,由常见的餐桌食品延伸到保健食品等领域。目前,动物源性食品兽药残留风险分析与评价方法尚未形成系统性评价体系,针对的动物源性食品种类和兽药品种相对单一,缺乏有机的结合。随着大数据时代的来临,动物源性食品兽药残留监控需要智慧型数据分析及风险预警平台,多维度的评价方法将成为兽药残留的研究热点之一。

通过动物源性食品兽药残留监控要素的分析,无论是法规标准、涉及品种、前处理手段、分析检测技术及评价方法都倾向于覆盖养殖-运输-销售-贮存-消费等环节,从生产源头到餐桌终端任何节点的监控及管理缺失将可能导致食品安全风险,引发社会恐慌或贸易壁垒。但就目前研究进展来看,动物源性食品兽药残留监控还是主要集中在消费环节,缺少过程监督,特别是针对水产品、蛋奶及蜂蜜等品类,为了保证品质在运输及储存过程中人为添加药物,增加了兽药残留食品安全风险。随着信息全球化及科技智能化的脚步,大数据环境下的食品安全监管逐步得到了关注,神经网络及AI智慧分析已经在食品设计、工艺改善及风险防控中得到了应用,但技术仍处于起步阶段,有待进一步的发展和研究^[96-98]。因此,保障动物源性食品的安全亟需加强兽药残留风险防控手段并向源头延伸;提升兽药残留快检或无损检测技术以保障产品品质;建立产品验证评价体系及追溯机制;构建大数据智慧型监控平台来支撑跨区域或跨产业兽药残留风险防控。

5 结语

综上所述,法规标准、品种类别、前处理方法、分析检测技术及评价体系方法是动物源性食品兽药残留监管控制的影响要素。随着国际贸易全球化进程的加快,不同国家地区及组织间关于动物源性食品兽药残留控制的交流与合作已逐步形成常态化,消除由兽药残留引起的贸易壁垒是维持国际农牧业商品贸易顺畅的重要保障。由于对动物源性食品的需求与日俱增,以上要素相互制约,相互影响,形成了兽药残留监管控制循环体系。但相较于兽药残留引起的食品安全风险发展趋势,目前动物源性食品兽药残留监管控制仍处于滞后状态,新材料和新技术在兽药残留检验分析领域的研究和应用尚待深入。如何快速有效地监控动物源性食品兽药残留,需要将多方面因素进行综合考虑及研究,开发高效的检验检测技术,运用合理的评价体系,加强各领域的合作交流,更好地解决控制动物源性食品兽药残留安全问题。

参考文献

- [1] BEYENE T. Veterinary drug residues in food-animal products: its risk factors and potential effects on public health [J]. *Journal of Veterinary Science & Technology*, 2015, 7(1): 1-7.
- [2] WU H, ZHAO J F, WAN J Q. A review of veterinary drug residue detection: recent advancements, challenges, and future directions [J]. *Sustainability*, 2023, 15(13): 1-12.
- [3] YANG Y, ZHANG H, ZHOU G Y, et al. Risk assessment of veterinary drug residues in pork on the market in the People's Republic of China [J]. *Journal of Food Protection*, 2022, 85(5): 815-827.
- [4] PRATIWI R, RAMADHANTI S P, AMATULLOH A, et al. Recent advances in the determination of veterinary drug residues in food [J]. *Foods*, 2023, 12(18): 1-25.
- [5] ATTA A H, ATTA S A, NASR S M, et al. Current perspective on veterinary drug and chemical residues in food of animal origin [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(11): 15282-15302.
- [6] ZENG Z L, YANG F, WANG L Q. Veterinary Drug Residues in China: Science, Technology, Management and Regulation [M]. *Food Safety in China*, 2017.
- [7] 李光辉. 俄罗斯、美国和欧盟成员国等关于动物性食品中兽药残留量监测的规定[J]. *国外畜牧学(猪与禽)*, 2020, 40(1): 31-35.
- [8] 田寒友,李家鹏,周彤,等. 我国与欧盟、美国、日本、

- CAC畜禽兽药残留限量标准对比研究[J].肉类研究,2012,26(2):43-46.
- [9] 程坚,娄鹏祥,李婷婷.中国和欧盟动物源性产品中药物残留限量差异性分析(二)[J].安徽农业科学,2018,46(11):140-143.
- [10] 程坚,李婷婷,娄鹏祥.中国和欧盟动物源性产品中药物残留限量差异性分析(一)[J].安徽农业科学,2017,45(36):69-71,160.
- [11] 贺兆源,卢阳,陈晋元,等.中国与美国、欧盟、日本和CAC猪组织中兽药残留限量标准的对比研究[J].中国畜牧兽医,2021,48(2):704-716.
- [12] 陈晋元,贺兆源,卢阳,等.中国与美国、日本、欧盟和国际食品法典委员会关于禽类产品中兽药最大残留限量标准的对比[J].江苏农业学报,2021,37(3):754-762.
- [13] 陈岩,刘雯雯,耿安静,等.基于兽药残留限量的GB 31650与CAC标准异同分析[J].现代食品科技,2022,38(5):270-277.
- [14] EUROPEAN UNION. The european commission on pharmacologically active substances and their classification regarding maximum residue limits in foodstuffs of animal origin [EB/OL]. (2009-11-22) [2024-1-16]<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02010R0037-20141112&qid=1705394171432>.
- [15] 中华人民共和国农业农村部.中华人民共和国农业农村部公告 第594号[EB/OL].(2022-9-20)[2024-1-16]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ncpzlaq/202209/t20220930_6412380.htm.
- [16] 中华人民共和国农业农村部.中华人民共和国农业农村部公告 第250号[EB/OL].(2019-12-27)[2024-1-16]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/xmsyj/202001/t20200106_6334375.htm.
- [17] GB 31650-2019,食品安全国家标准 食品中兽药最大残留限量[S].
- [18] 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[S].
- [19] The Japan Food Chemical Research Foundation. Maximum residue limits (MRLs)of agricultural chemicals, feed additives and veterinary drugs in foods [DB/OL]. <http://fffx562de2e23d6c46dd8c29285224996585hqxofp5cvuo5b6kpx.ffhh.www.gxstd.com/front/>.
- [20] Ministry Of Food And Drug Safety Of Korea. Standard for residues of veterinary drugs in Korean food [DB/OL]. <http://fffx89f9a8a59c6f4fdeba7846ef3b556316hqxofp5cvuo5b6kpx.ffhh.www.gxstd.com/index.do?mid=675&seq=40692>.
- [21] HEALTH CANADA. List of maximum residue limits (MRLs) for veterinary drugs in foods [DB/OL]. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/drugs-health-products/veterinary-drugs/maximum-residue-limits-mrls/list-maximum-residue-limits-mrls-veterinary-drugs-foods.html>.
- [22] Us Food And Drug Administration. CFR-code of federal regulations Title21 [DB/OL].<https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfCFR/CFRSearch.cfm?CFRPart=556%26showFR=1>.
- [23] Food Standard Agency Of Uk. The food hygiene (general) regulations[DB/OL]. <https://www.food.gov.uk/>.
- [24] Singapore Food Agency. Maximum residue limits established for pesticides andveterinary drugs previously not allowed in food [EB/OL]. (2022-4-20)[2024-1-16]. <http://law.foodmate.net/file/upload/202004/24/143507231372367.pdf>.
- [25] Australian Pesticides And Veterinary Medicines Authority. Pesticides and veterinary residues[DB/OL]. <https://www.apvma.gov.au/chemicals-and-products/pesticides-and-veterinary-residues>.
- [26] New Zealand Ministry For Primary Industries. Fertilisers, pesticides, hormones, and medicines in food [DB/OL]. <https://www.mpi.govt.nz/food-safety-home/safe-levels-of-chemicals-in-food/fertilisers-pesticides-hormones-and-medicines-in-food/>.
- [27] Inistry Of Agriculture Of The Russian Federation. On quality and safety of food products [DB/OL]. <http://www.mcx.ru/>.
- [28] Anvisa Brazilian Health Regulatory Agency. Draft normative instruction (Consulta Publica) number 659, 24 June 2019, regarding maximum residue limit (MRL) of veterinary drugs in food of animal origin [DB/OL]. <http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/5545276/CONSULTA+P%C3%9ABLICA+N+659+GGALI.pdf/9217b975-0ea5-4577-8f09-a4c150485646>.
- [29] Food Safety And Standards Authority Of India. Tandards for pollutants, harmful substances and pesticide residues (2011) [DB/OL]. <http://old.fssai.gov.in>.
- [30] Codex Alimentarius Commission. Codex alimentarius international food standards:maximum residue limits (MRLs) and risk management recommendations (RMRs) for residues of veterinary drugs in foods:CX/MRL 2-2018 [DB/OL]. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/en/>.
- [31] BISWAS A K, KONDAIAH N, ANJANEYULU A S R, et al. Food safety concerns of pesticides, veterinary drug residues and mycotoxins in meat and meat products [J]. Asian Journal of Animal Sciences, 2010, 4(2): 46-55.
- [32] RAHMAN M M, LEE D J, 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.
- [33] KIM L, LEE D, CHO H K, et al. Review of the QuEChERS method for the analysis of organic pollutants: persistent organic pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons, and

- pharmaceuticals [J]. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2019, 22: e00063.
- [34] ROSENDO L M, BRINCA A T, PIRES B, et al. Miniaturized solid phase extraction techniques applied to natural products [J]. Processes, 2023, 11(1): 1-32.
- [35] 李银龙, 聂雪梅, 杨敏莉, 等. 新型磁性固相萃取材料在食品样品前处理中的应用进展[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 295-305.
- [36] NAZARIO C E, FUMES B H, DA SILVA M R, et al. New materials for sample preparation techniques in bioanalysis [J]. Journal of Chromatography B, 2017, 1043: 81-95.
- [37] RAPOSO F, BARCELÓ D. Challenges and strategies of matrix effects using chromatography-mass spectrometry: An overview from research versus regulatory viewpoints [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2021, 134: 116068.
- [38] ZHANG C Y, DENG Y C, ZHENG J F, et al. The application of the QuEChERS methodology in the determination of antibiotics in food: A review [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2019, 118: 517-537.
- [39] 姜侃, 张慧, 曹慧, 等. 盐析辅助液液萃取-HPLC-MS_{MS}法检测液态乳中13种双酚类和烷基酚类物质[J]. 食品与机械, 2022, 38(12): 32-36, 225.
- [40] WANG B, ZHAO X, XIE X, et al. Development of an accelerated solvent extraction approach for quantitative analysis of chloramphenicol, thiamphenicol, florfenicol, and florfenicol amine in poultry eggs [J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(8): 1705-1714.
- [41] LIU L X, ZHANG Y, ZHOU Y, et al. The application of supercritical fluid chromatography in food quality and food safety: an overview [J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2020, 50(2): 136-160.
- [42] IBARRA I, MIRANDA J, PÉREZ-SILVA I, et al. Sample treatment based on molecularly imprinted polymers for the analysis of veterinary drugs in food samples: a review [J]. Analytical Methods, 2020, 12(23): 2958-2977.
- [43] AGATONOVIC-KUSTRIN S, GEGECHKORI V, KOBAKHIDZE T, et al. Solid-phase microextraction techniques and application in food and horticultural crops [J]. Molecules, 2023, 28(19): 1-14.
- [44] CAPRIOTTI A L, CAVALIERE C, LA BARBERA G, et al. Recent applications of magnetic solid-phase extraction for sample preparation [J]. Chromatographia, 2019, 82(8): 1251-1274.
- [45] ZHAO X, LU L, ZHU M, et al. Development of hydrophilic magnetic molecularly imprinted polymers for the dispersive solid-phase extraction of sulfonamides from animal-derived samples before HPLC detection [J]. Journal of Separation Science, 2021, 44(12): 2399-2407.
- [46] KAUFMANN A, BUTCHER P, MADEN K, et al. Assessment and validation of the p-QuEChERS sample preparation methodology for the analysis of >200 veterinary drugs in various animal-based food matrices [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2023, 40(3): 356-372.
- [47] 樊霞, 索德成, 肖志明, 等. 金属有机骨架材料(MOFs)在饲料和畜产品中兽药残留检测中的应用[J]. 饲料工业, 2022, 43(23): 1-6.
- [48] TRAN T T T, DO M N, DANG T N H, et al. A state-of-the-art review on graphene-based nanomaterials to determine antibiotics by electrochemical techniques [J]. Environmental Research, 2022, 208: 112744.
- [49] YU X, ZHONG T, ZHANG Y J, et al. Design, preparation, and application of magnetic nanoparticles for food safety analysis: a review of recent advances [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 70(1): 46-62.
- [50] ZHU T, CHEN Z Y, ANPO M, et al. Hazards and detection techniques of veterinary drug residues in animal-origin food [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 271: 1-9.
- [51] MAINERO ROCCA L, GENTILI A, PEREZ-FERNANDEZ V, et al. Veterinary drugs residues: a review of the latest analytical research on sample preparation and LC-MS based methods [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2017, 34(5): 766-784.
- [52] HOFF R B, RUBENSAM G, JANK L, et al. Analytical quality assurance in veterinary drug residue analysis methods: matrix effects determination and monitoring for sulfonamides analysis [J]. Talanta, 2015, 132: 443-450.
- [53] JIA M, E Z, ZHAI F, et al. Rapid multi-residue detection methods for pesticides and veterinary drugs [J]. Molecules, 2020, 25(16): 1-22.
- [54] AHMED S, NING J, PENG D, et al. Current advances in immunoassays for the detection of antibiotics residues: a review [J]. Food and Agricultural Immunology, 2020, 31(1): 268-290.
- [55] HUANG S Q, CHEN M W, XUAN Z, et al. Aptamer-based electrochemical sensors for rapid detection of veterinary drug residues [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(5): 4102-4116.
- [56] 沈央红, 方金玉, 朱军莉, 等. 代谢组学在食品质量安全领域的应用进展[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 282-289.
- [57] MOUDGIL P, BEDI J S, AULAKH R S, et al. Validation of HPLC multi-residue method for determination of fluoroquinolones, tetracycline, sulphonamides and chloramphenicol residues in bovine milk [J]. Food Analytical Methods, 2018, 12(2): 338-346.
- [58] AL-BUKHAITI W Q, NOMAN A, QASIM A S, et al. Gas chromatography: Principles, advantages and applications

- in food analysis [J]. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 2017, 6(1): 123-128.
- [59] MASIA A, SUAREZ-VARELA M M, LLOPIS-GONZALEZ A, et al. Determination of pesticides and veterinary drug residues in food by liquid chromatography-mass spectrometry: A review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2016, 936: 40-61.
- [60] GIRMATSION M, MAHMUD A, ABRAHA B, et al. Rapid detection of antibiotic residues in animal products using surface-enhanced Raman Spectroscopy: A review [J]. *Food Control*, 2021, 126: 108019.
- [61] LI M, ZHANG X. Nanostructure-based surface-enhanced raman spectroscopy techniques for pesticide and veterinary drug residues screening [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 107(2): 194-205.
- [62] 刘佳,李月,高婷,等.近红外光谱技术在兽药及兽药残留检测方面的应用进展[J].*中国兽药杂志*,2021,55(7):48-58.
- [63] LIU H, LIU W, HAN D H, et al. Three-dimensional fluorescence fingerprint technique for milk quality evaluation:antibiotic residual detection and heat-treated evaluation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 5: 1633-1639.
- [64] DING R, CHEN Y, WANG Q S, et al. Recent advances in quantum dots-based biosensors for antibiotics detection [J]. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2022, 12(3): 355-364.
- [65] 李菊,谢建军,王璐,等.基于质量评价的孔雀石绿快检试剂盒筛选策略[J].*食品安全质量检测学报*,2020,11(3): 875-882.
- [66] 董菡,张倩瑶,成玉梁,等.乳制品抗生素快检试纸条的研究进展[J].*中国乳业*,2020,224:67-72.
- [67] APPICCIAFUOCO B, DRAGONE R, FRAZZOLI C, et al. Microbial screening for quinolones residues in cow milk by bio-optical method [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2015, 106: 179-185.
- [68] DU B Y, WEN F, GUO X D, et al. Evaluation of an ELISA-based visualization microarray chip technique for the detection of veterinary antibiotics in milk [J]. *Food Control*, 2019, 106: 106713.
- [69] XIAO J X, YANG H F, QIN L N, et al. Rapid detection of fluoroquinolone residues in aquatic products based on a gold-labeled microwell immunochromatographic assay [J]. *Food Quality and Safety*, 2022, 6: 1-11.
- [70] 蒋艳,余姓鸿,谢礼,等.化学发光免疫方法在食品安全检测中的应用及展望[J].*食品安全质量检测学报*,2020, 11(20):7603-7609.
- [71] 张小雨,李木子,曹旭敏,等.基于单抗的免疫分析方法及其在兽药残留检测中的应用[J].*中国动物检疫*,2022, 39(6):100-106.
- [72] 孙坤秀,胡志刚,成玉梁,等.时间分辨荧光分析技术在食品污染物检测中的应用进展[J].*食品研究与开发*,2021, 42(13):214-218.
- [73] 孟东,陈蕾,王波,等.可视化蛋白芯片在食品安全检测中的应用[J].*食品工业*,2022,43(3):338-341.
- [74] TAO X, PENG Y, LIU J. Nanomaterial-based fluorescent biosensors for veterinary drug detection in foods [J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2020, 28(4): 575-594.
- [75] LIU S J, WU Y N, CHAN L. Application of metabonomics approach in food safety research-a review [J]. *Food Reviews International*, 2019, 36(6): 547-558.
- [76] 周元,薛瑞楠,魏颖,等.食品安全综合评价指标体系构建与应用[J].*食品与机械*,2022,38(10):69-81.
- [77] LAMM K W, RANDALL N L, DIEZ-GONZALEZ F. Critical food safety issues facing the food industry: a delphi analysis [J]. *Journal of Food Protection*, 2021, 84(4): 680-687.
- [78] ZHAO Y W, TALHA M. Evaluation of food safety problems based on the fuzzy comprehensive analysis method [J]. *Food Science and Technology*, 2022, 42: 1-9.
- [79] 斗海峰,陈谊,武彩霞,等.基于改进物元可拓模型的肉制品中化学污染物风险评估方法[J].*食品科学*,2023, 44(11):1-7.
- [80] 王鹏杰,祁智慧,张海洋,等.多元线性分析在储粮真菌生长预测中应用研究[J].*中国粮油学报*,2020,35(1):107-112,120.
- [81] 李太平,刘静.中国食品安全指数的初步测度[J].*食品科学*,2018,39(19):247-251.
- [82] 包先雨,蔡伊娜,闫毅宣,等.基于改进内梅罗指数的食品安全评价研究[J].*合肥工业大学学报(自然科学版)*,2019, 42(11):1485-1489.
- [83] 于家斌,范依云,王小艺,等.基于优化的灰色关联分析-极限制学习机食用油污染物风险评价模型研究[J].*食品科学*,2023,44(3):88-97.
- [84] 沈海军,徐子昂,王文琪,等.基于熵权法、灰色关联度法和低场核磁共振检测的苹果品质评价[J].*食品工业科技*,2024,45(1):231-238.
- [85] 郝志刚,秦丽.基于多属性综合评价的食品安全标准引用网络重要节点发现方法[J].*计算机应用*,2022,42(4):1178-1185.
- [86] 盘正华,覃攀.应用食品安全指数法对广西水产品兽药残留风险评价[J].*食品安全质量检测学报*,2020,11(14): 4926-4932.
- [87] 罗钦,钟茂生,朱品玲,等.3种养殖淡水鱼兽药残留及其食用健康风险评价[J].*食品安全质量检测学报*,2020,11(22): 8254-8259.
- [88] 韩建欣,魏建华,刘碧琳,等.应用层次分析法对水产品中兽药残留进行风险评价[J].*标准科学*,2014,10:39-41.
- [89] 魏建华,许如苏,李冠斯.兽药残留在水产品的对外贸易中的风险评价[J].*食品研究与开发*,2016,37(18):193-197.

- [90] 田甜,巫剑,文金华,等.广西北部湾鲜活水产品中氯霉素残留的膳食暴露风险评估[J].现代食品科技,2021,37(5):310-318.
- [91] 田怀香,陈彬,于海燕,等.生鲜乳中兽药残留的快速筛查与风险预警体系构建[J].农业工程学报,2020,36(7):324-332.
- [92] 郁达义,张鑫,顾欣.双对数曲线模型用于多种兽药残留ELISA检测数据的计算与分析[J].畜牧与兽医,2017,49(7):60-64.
- [93] 胡祥娜,曹爱巧,岳帅,等.深圳市动物源产品中磺胺类兽药含量调查与居民膳食暴露风险评估[J].农产品质量与安全,2022,2:76-82.
- [94] 戴月,刘翠玲,陈兰珍,等.关于蜂蜜兽药残留风险优化评估仿真[J].计算机仿真,2017,34(5):376-380.
- [95] 黄胜广,毕融冰,赵卉,等.基于灰色关联度法评价梅花鹿鹿茸品质[J].特产研究,2020,42(3):59-68.
- [96] 陶启,李伟,丁红卫,等.食品大数据应用综述[J].食品与生物技术学报,2020,39(12):1-5.
- [97] 孟庆杰,尧海昌.大数据环境下基于神经网络技术的食品安全监管[J].食品与机械,2021,37(1):104-147.
- [98] 杜琳,温圣军,袁刚.大数据在食品安全监管风险预警中的应用[J].食品与机械,2022,38(11):82-85,124.