

食品中兽药残留检测技术研究及监管体系优化路径—— 基于 2025 年政策与技术的双重视角

于华 李建良

伊犁州食品药品检验所，新疆伊宁市，835000；

摘要：本文以“十四五”食品安全规划与 2025 年技术发展预测为背景，系统分析兽药残留检测技术的演进规律，探讨新型快速检测技术与智能化监管体系的协同发展路径。研究发现，生物传感技术、区块链溯源系统与 AI 辅助决策的深度融合将重构兽药残留防控格局，而政策法规的适应性调整是技术转化的关键保障。

关键词：兽药残留；快速检测；监管体系；区块链；人工智能

DOI：10.69979/3041-0673.25.07.085

1 兽药残留防控现状与挑战

1.1 残留危害的多维性表征

根据 WHO《全球食品安全监测报告（2023）》，抗生素耐药性（AMR）问题中 21% 的病例与食品源兽药残留直接相关^[1]。我国农业农村部 2022 年监测数据显示，禽畜产品中磺胺类、喹诺酮类残留超标率仍达 3.8%，呈现区域性聚集特征^[2]。2025 年新疆市场监管局抽检结果显示，10 批次不合格食品中，农兽药残留超标占比显著^[3]。残留物通过食物链积累，可能引发抗生素耐药性、内分泌紊乱等健康风险，同时影响我国畜牧产品国际贸易竞争力。

1.2 现行兽药残留检测技术的现状

1.2.1 液相色谱-质谱联用技术（LC-MS/MS）

液相色谱-质谱联用技术（LC-MS/MS）通过结合色谱的高效分离能力与质谱的高灵敏度、高特异性检测能力，成为兽药残留分析的“金标准”。

（1）多残留同步检测：LC-MS/MS 可同时分析数十种甚至上百种兽药及其代谢物，例如福建省科学技术厅研究建立的 LC-MS/MS 方法，实现了动物源性食品中 16 种兽药的同步检测，检出限低至 $0.5\text{--}1.0\text{ }\mu\text{g/kg}$ ^[4]。

（2）痕量检测能力：LC-MS/MS 技术具有极高的灵敏度，能够检测到极低的浓度水平。LC-MS/MS 的检测限可达 ng/kg 级甚至 pg/kg 级。这种高灵敏度使得 LC-MS/MS 能够准确检测出兽药残留，确保食品安全。

（3）LC-MS/MS 技术的抗基质干扰能力：通过优化前处理技术（如 QuEChERS、固相萃取）和内标法定量，显著降低样品基质效应的影响。例如，福建省科技厅在研究中采用内标法使回收率稳定在 71.2%–119.6%，相对标准偏差控制在 1.8%–10%^[4]。

（4）广泛的应用范围：LC-MS/MS 适用于多种兽药残留的检测，包括氟喹诺酮类、卡巴氧等。这种广泛的应用范围使得 LC-MS/MS 成为兽药残留检测的重要工具，能够检测目前大多数兽药残留物。

基于以上特点，液相色谱-质谱联用技术（LC-MS/MS）成为各类兽药残留检测标准的首选方法。

1.2.2 基于免疫分析的快速检测技术

（1）免疫胶体金试纸条定量法

免疫层析试纸条定量检测基于抗原-抗体特异性结合原理，通过光学信号转换实现目标物定量分析。相较于传统检测方法，该技术兼具快速响应（15 分钟内完成检测）、抗基质干扰性强及现场即时检测等优势。以兽药残留监测为例，李超辉课题组利用胶体金标记免疫层析技术，成功实现猪尿与猪肉样本中克伦特罗残留的痕量检测，验证了其在 β -受体激动剂监控中的实用性^[5]。实际应用中，通过优化样本前处理流程（如离心过滤或稀释纯化），配合试纸条显色信号判读系统，可在无专业设备的基层单位完成检测，显著提升监管时效性。

（2）酶联免疫吸附法（ELISA）

ELISA 技术通过酶促显色反应放大检测信号，其灵敏度较胶体金法提升 1–2 个数量级。研究显示，针对四环素类、磺胺类等兽药残留的 ELISA 试剂盒检测限可达 $0.1\text{--}1.0\text{ }\mu\text{g/kg}$ ，适用于实验室批量样本筛查。但需注意，复杂样本基质可能引发非特异性吸附，需通过封闭剂优化或增设洗涤步骤降低假阳性率。

1.2.3 生物传感与纳米材料融合检测体系

生物传感器通过固定化生物识别元件与信号转换模块的协同作用，实现目标物的高选择性捕获与信号输出。2025 年技术进展主要体现在：

纳米材料增效：金纳米颗粒、量子点等材料修饰电极表面，增强电子传递效率。例如，基于二硫化钼纳米

片的电化学传感器对氯霉素的检测限降至 $0.05 \mu\text{g/kg}$ ，较常规方法灵敏度提升 8 倍。

多模态传感开发：结合表面增强拉曼光谱（SERS）与分子印迹技术，构建可识别多种兽药的阵列式传感器，在鸡肉中氟喹诺酮类残留检测中展现出 95% 以上的回收率。

1.2.4 高通量蛋白芯片检测技术

蛋白芯片技术通过微阵列集成多种抗体探针，实现多靶标同步检测。最新研发的兽药残留检测试剂盒具有以下突破：

检测范围扩展：支持猪肉、鸡肝等 4 类动物组织及猪尿样本中恩诺沙星、链霉素等 5 类兽药的半定量检测，覆盖 β -内酰胺类、氨基糖苷类药物；**操作流程革新：**整合固相萃取与芯片孵育步骤，将前处理时间从传统方法的 4 小时压缩至 30 分钟；**成本效益优化：**单个芯片可并行检测 12 个样本，较液相色谱法降低 60% 试剂消耗。

技术对比：与单指标检测的胶体金试纸条相比，蛋白芯片技术的多指标同步检测能力使其更适合进出口检验、大型养殖场自检等场景，但其设备投入成本较高，严重地制约了其在基层的推广。

1.3 现行兽药残留检测技术效能瓶颈

当前兽药残留检测技术虽已取得显著进展，但仍面临以下核心效能瓶颈：

（1）灵敏度与通量的矛盾

色谱-质谱联用技术（如 LC-MS/MS、GC-MS）虽能实现痕量检测（检出限低至 0.07ng/mL ），但设备成本高且操作复杂，难以满足基层大规模筛查需求。同时，高通量检测技术虽能同步分析多类兽药，但受限于质谱驻留时间限制，灵敏度随目标物数量增加而下降，导致低浓度残留漏检风险。

（2）快检技术局限性突出

胶体金试纸条、ELISA 等免疫分析法虽具备快速筛查优势，但存在假阳性率高、目标物单一等问题。国家现行快检方法仅覆盖 15 项，远低于实际需监测的数百种兽药，且多数方法仅能单靶标检测，难以应对新型兽药代谢物的快速迭代。

（3）标准化与监管体系滞后

检测标准更新速度远低于新兽药研发节奏，没有统一的检验标准及判定标准，为检验工作带来比较大的阻力。此外，区域检测能力失衡，西部地区基层实验室设备落后，依赖传统色谱法，检测效率不足发达地区的 30%。

（4）基质干扰与成本限制

动物源性样品往往富含蛋白质和脂肪，就导致前处

理步骤复杂、基质效应显著。QuEChERS 等净化技术虽能部分解决，但耗时仍长达 30 分钟以上，且试剂消耗成本高。生物传感器技术虽成本较低，但商业化稳定性不足，易受环境温湿度影响。

综上，技术瓶颈主要体现在高精度与高效率难以兼容、标准体系滞后、复杂基质干扰及成本约束等方面，亟需通过智能化检测设备开发、多技术联用及标准化动态更新机制突破现有局限。

2 2025 年检测技术发展前瞻

2.1 分子印迹-表面增强拉曼光谱（MIPs-SERS）技术突破

分子印迹技术（MIPs）与表面增强拉曼光谱（SERS）的协同创新，成为 2025 年兽药残留检测领域的标志性突破。该技术通过纳米压印工艺在基底表面构建特异性分子识别位点，结合贵金属纳米结构的局域表面等离子共振效应，实现了对目标分子的双重锁定与信号放大。以 β -内酰胺类抗生素检测为例，清华大学团队开发的便携式 SERS 检测仪采用 Au@Ag 核壳纳米结构作为增强基底，其电磁场强度较传统金纳米颗粒提升 12 倍，检测灵敏度达到 $0.01 \mu\text{g/kg}$ ，较常规 ELISA 方法提升 3 个数量级。

相关技术优势与创新点：

（1）特异性捕获机制：通过分子印迹聚合物（MIPs）模板法合成纳米空腔，可精准匹配 β -内酰胺类抗生素的分子构型，有效避免磺胺类、喹诺酮类药物的交叉干扰，特异性识别率高达 98.7%。

（2）信号增强体系优化：中科院最新专利（CN114720448B）提出采用半导体氧化物纳米颗粒修饰贵金属纳米锥阵列，通过化学增强与电磁增强的协同作用，使拉曼信号增强因子突破 10^{14} ，检测限低至阿摩尔每升（ 10^{-18}mol/L ）。

（3）网络化与智能化：设备集成微型拉曼探头与 AI 算法，支持现场 15 分钟内完成样本前处理-检测-数据分析全流程，并通过云端数据库实时比对光谱特征，减少人为误判风险。在 2024 年新疆兽药残留抽检中，该技术成功筛查出 3 批次恩诺沙星超标猪肉，溯源效率较传统方法提升 40%。

新技术的应用场景拓展：

（1）复杂基质检测：针对动物内脏等高脂样本，开发磁性分子印迹材料，结合磁固相萃取技术，可将前处理时间从 4 小时压缩至 30 分钟。

（2）多残留同步分析：通过多孔微阵列芯片设计，单次检测可覆盖 β -内酰胺类、四环素类等 5 大类兽药，检测通量提升至 120 样本/小时。

2.2 微流控芯片与物联网 (IoT) 集成系统

中国农业科学院 2024 年发布的“智慧肉检”平台,标志着微流控芯片技术与物联网的深度融合进入产业化阶段^[6]。该平台以微流控芯片为核心检测单元(通道尺寸 $\leq 500\text{ }\mu\text{m}$),集成 5G 通信模块与边缘计算节点,实现从养殖场到零售终端的全链条数据闭环管理。

多功能检测单元: 芯片内嵌纳米酶催化反应室与 SERS 检测区,通过微阀控制液流路径,完成样本裂解、净化和信号采集一体化操作,检测灵敏度达到色谱法水平的 90%。

抗污染涂层: 采用仿生疏水材料修饰芯片表面,减少蛋白质吸附导致的信号衰减,使循环使用次数从 50 次提升至 200 次。

3 监管体系优化的双重路径

3.1 政策维度: 动态标准调整机制构建

兽药残留监管标准的动态调整是应对新型兽药滥用与代谢物风险的关键。参考美国 FDA《兽药残留限量年度修订指南》,我国亟需构建以毒理学数据(ADI 值)与暴露评估模型联动的动态标准体系,具体路径如下:

(1) 科学驱动的限制标准更新机制

毒理学数据整合: 基于每日允许摄入量(ADI)与最大残留限量(MRLs)的关联性,建立兽药代谢产物的风险评估模型。

暴露评估模型优化: 结合膳食消费量数据与残留监测结果,采用蒙特卡罗模拟预测高风险人群暴露量。2024 年农业农村部抽检显示,动物内脏中氟苯尼考胺残留超标率较 2023 年上升 12%,暴露模型可针对性调整限量阈值。

(2) 动态响应与多方协同

年度修订与快速响应: 借鉴 FDA 的“加速修订通道”,对新型兽药(如新型 β -内酰胺酶抑制剂)设立临时限量标准,并通过专家委员会动态评估其安全性。FDA 在基因疗法审批中采用的“单臂研究”灵活性可为高风险兽药评估提供参考。

利益冲突规避机制: 参考美国 FDA 外聘专家利益冲突声明制度,建立由独立委员会主导的标准修订流程,要求参与专家披露经济利益(如兽药企业咨询收入)及研究偏倚风险,确保决策客观性。

3.2 技术维度: 区块链赋能的智慧监管

基于 Hyperledger Fabric 架构的区块链技术,为兽药残留监管提供了去中心化、可追溯的解决方案,其核心突破体现在以下方面:

(1) 全链条溯源与智能合约联动

多节点数据上链: 养殖场、屠宰企业、检测机构等作为区块链节点,分别上传兽药使用记录、检测报告及流通信息。内蒙古试点中,基于 Fabric 的“智慧肉检”平台实现数据实时同步,节点间通过 Kafka 共识机制确保吞吐量达 1000 笔/秒^[7]。

(2) 隐私保护与权限控制

通道隔离技术: 通过 Fabric 的私有通道功能,实现监管部门、企业及公众的数据分级访问。养殖企业的用药记录仅对监管节点开放,而检测结果通过公开通道向消费者透明化。

(3) 风险预警与决策支持

大数据分析模块: 整合区块链数据与 AI 模型,预测兽药滥用热点区域。例如,广东试点中,系统通过分析历史抽检数据,提前识别湛江地区 3 家养殖场的磺胺类药物超标趋势,并启动定向抽检。

跨部门协同治理: 区块链平台与市场监管总局、农业农村部的数据库对接,实现抽检计划自动生成与资源调配。2025 年新疆抽检中,该系统将基层检测覆盖率从 58%提升至 92%。

政策与技术的融合可形成“标准-执行-反馈”闭环:动态标准为区块链提供规则输入,而区块链实时数据反哺标准修订。

4 结论

面向 2025 年的兽药残留防控体系需实现“技术-政策-产业”三维协同,建议设立国家食品安全科技专项基金,重点支持纳米材料检测器件研发,同时修订《农产品质量安全法》强化数字化监管工具的法律效力。

参考文献

- [1]WHO. Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS) Report 2023. Geneva: WHO Press, 2023
- [2]农业农村部. 2022 年度畜禽产品质量安全监测报告. 北京: 中国农业出版社, 2023.
- [3]新疆 10 批次食品抽检不合格事件[N]. 新京报, 2025.
- [4]福建省科学技术厅. 动物源性食品中 10 种禁限用兽药残留高效液相色谱-串联质谱检测方法研究. 2024.
- [5]李超辉. 胶体金免疫层析试纸条定量检测猪尿以及猪肉中的克伦特罗残留. 南昌大学. 2014.
- [6]中国农业科学院. 肉类智能快检技术白皮书. 北京: 中国农业科技出版社, 2024.
- [7]李晓东等. 基于区块链的肉品质量追溯系统设计. 计算机工程与应用, 2023, 59(18): 213-220.