DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260119004
引用格式: 陈琪, 黄昫昕, 孙唤, 等. 动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留前处理方法与检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 230–237.
CHEN Q, HUANG HX, SUN H, *et al*. Research progress on pretreatment methods and detection techniques of quinolone antibiotic residues in animal derived food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 230–237. (in Chinese with English abstract).

动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留前处理方法与检测技术研究进展

陈 琪*, 黄昫昕, 孙 唤, 桂华泽*, 严俊辉

(湘潭市疾病预防控制中心, 湘潭 411100)

摘 要: 喹诺酮类抗生素是一类被广泛应用于畜禽和水产养殖等领域的广谱抗菌药物, 使用剂量大、半衰期长, 导致其在动物源性食品中的残留量易超标, 严重威胁人类健康。然而, 动物源性食品构成复杂且基质中的蛋白质、脂肪、色素等物质会对抗生素的提取和检测造成干扰, 难以准确掌握其中喹诺酮类抗生素残留情况。因此, 发展高效、灵敏、准确的动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留前处理方法与检测技术极其关键。本文归纳和总结了近年来动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留前处理方法和相关检测技术的研究进展, 探讨了各类方法的优缺点及适用性, 并分析了当前研究存在的问题和未来发展趋势, 以期为动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留检测技术的优化与应用提供参考。

关键词: 动物源性食品; 抗生素残留; 前处理方法; 检测技术

Research progress on pretreatment methods and detection techniques of quinolone antibiotic residues in animal derived food

CHEN Qi*, HUANG Hu-Xin, SUN Huan, GUI Hua-Ze*, YAN Jun-Hui

(*Xiangtan Center for Disease Control and Prevention*, *Xiangtan* 411100, *China*)

ABSTRACT: Quinolone antibiotics are broad-spectrum antimicrobial agents widely used in livestock, poultry and aquaculture. Because of their extensive application and relatively prolonged half-lives, their residues in animal derived foods may exceed the maximum residue limits, posing significant risks to human health. However, the complex composition of animal derived foods matrices, particularly the presence of proteins, lipids and pigments, can interfere with the extraction and detection of antibiotics, making accurate determination of quinolone residues more challenging. Therefore, developing efficient, sensitive and reliable pretreatment methods and analytical techniques for quinolone residue detection in animal-derived foods is great importance. This review summarized and concluded

收稿日期: 2026-01-19
基金项目: 湘潭市科学技术局指导性科技计划项目(SF-ZDJH20241055)
第一作者/*通信作者: 陈琪(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为污染物检测与分析。E-mail: 514977878@qq.com
***通信作者:** 桂华泽(1999—), 男, 医师, 主要研究方向为污染物检测与分析。E-mail: 2646832520@qq.com

recent advances in pretreatment methods and related analytical techniques for the determination of quinolone antibiotic residues in animal derived foods. It also evaluated the advantages, limitations and applicability of different methods and discussed current challenges and future trends, with the aim of providing guidance for method optimization and practical application in quinolone residue analysis.

KEY WORDS: animal derived food; antibiotic residues; pretreatment methods; detection techniques

0　引　言

抗生素类新污染物因具有潜在毒性、环境持久性及生态风险, 近年来受到广泛关注[1–2]。其中, 喹诺酮类抗生素因其价格相对低廉、组织穿透能力强且抗菌谱广, 被广泛用于畜禽和水产养殖业中感染性疾病的预防与治疗。该类抗生素半衰期较长, 在动物体内难以完全代谢, 常在动物源性食品中频繁检出[3–4]。研究表明, 太湖流域水产养殖季节鱼类肌肉组织中喹诺酮类抗生素的检出率高达95.69%[5]。LIU 等[6]发现, 水产样品中环丙沙星、诺氟沙星等喹诺酮类抗生素残留超标现象较为普遍。此外, FEI 等[7]通过对中国 25 个省份猪肉和鸡肉样品进行分析发现, 两类样品中喹诺酮类抗生素的检出率分别为 1.69%和 3.99%。人类若长期摄入含喹诺酮类抗生素的食品, 可能会造成肝肾功能损伤, 并增加抗生素耐药性产生的风险。为此, 我国已针对食品抗生素残留限值制定了严格的标准, 最新发布的 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, 明确规定了各类食品中氧氟沙星、诺氟沙星、达氟沙星等喹诺酮类抗生素的最大残留限值。因此, 建立灵敏、准确、高效的喹诺酮类抗生素残留前处理与检测技术, 对于保障动物源性食品质量安全、完善残留监测体系具有重要意义。

随着动物源性食品消费量的持续增加, 喹诺酮类抗生素残留问题已成为食品安全监管和公共卫生风险防控工作的关注重点。然而, 动物源性食品样品构成复杂、分离提纯难度大, 基质中的脂肪、蛋白质、碳水化合物等组分会干扰仪器检测的准确性[8–9], 动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留分析不仅要求检测方法具有较低的检出限和较高的准确性, 还要求样品前处理过程能够有效克服复杂基质干扰, 实现目标物的高效富集与净化。随着检测需求的不断提高, 相关前处理技术逐渐由传统萃取方法向快速化、高效化、绿色化及选择性提取方向发展, 主要包括液-液萃取法(liquid-liquid extraction, LLE)[10]、固相萃取法(solid-phase extraction, SPE)[11]、QuEChERS 法[12]和基质分散固相萃取法(matrix solid-phase dispersion extraction, MSPD)[13]等; 检测手段则逐渐形成了以高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)[14]和高效液相色谱-串联质谱法(high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS)为主[12], 荧光分析法、酶联免疫法、电化学传感法等快速检测技术为补充的技术体系[15]。由于动物源性食品基质复杂, 而喹诺酮类抗生素残留水平通常较低, 不同前处理方法和检测技术在净化效率、灵敏度、选择性、适用范围及现场应用能力等方面仍存在一定差异。因此, 有必要对相关研究进展进行系统梳理与总结。基于此, 本文综述了动物源性食品喹诺酮类抗生素残留的前处理方法和检测技术, 比较了不同方法在灵敏度、选择性和适用基质等方面的特点, 分析了当前研究中面临的主要问题与挑战, 并展望了动物源性食品喹诺酮类抗生素残留检测领域未来的发展趋势, 以期为相关检测方法的优化以及食品安全监管提供参考。

1　动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留样品的前处理方法

由于动物源性食品样品组成复杂, 且喹诺酮类抗生素残留水平通常较低, 在进行检测前需要对样品进行适当的前处理, 以实现目标物富集、降低基质干扰, 并提高检测分析的效率和准确性。目前, 常用的样品前处理方法主要包括 LLE、SPE、QuEChERS、MSPD 等(表 1), 下面将对上述前处理技术分别进行介绍。

1.1　LLE

LLE 是利用喹诺酮类抗生素在不同溶剂相中的分配系数差异, 将其从提取液转移至萃取剂中的过程[16]。例如,

表 1　动物源性食品喹诺酮类抗生素前处理方法

Table 1　Pretreatment methods for quinolones antibiotics in animal-derived food

前处理方法	优点	缺点	参考文献
LLE	萃取原理简单, 技巧性要求低, 稳定性较好	有机溶剂用量大, 操作烦琐, 效率低	[16–17]
SPE	有机溶剂用量少, 可实现自动化批量处理, 重复性较好	提取时间长, 成本较高, 萃取柱易堵塞	[18–19]
QuEChERS	操作简单, 适用范围广, 有机溶剂用量少, 回收率较高	过程烦琐, 基质效应显著, 处理通量不高	[12,18]
MSPD	操作简单, 可与仪器联用实现自动化, 有机溶剂用量少	应对复杂基质能力有限, 需要二次净化	[20–21]

李少晖等[22]采用 LLE 成功提取了猪肝中 14 种喹诺酮类抗生素残留，但萃取过程较为烦琐且有机溶剂用量偏高。唐艳红等[23]通过盐辅助 LLE 对猪肉和牛肉中残留的环丙沙星、恩诺沙星、诺氟沙星等喹诺酮类抗生素进行提取，在保证萃取效率的同时有效降低了有机溶剂的用量，具有萃取速度快和效果稳定等特点。目前，LLE 常用的萃取溶剂体系主要有乙酸乙酯/水、甲醇/己烷、甲醇溶液/二氯甲烷等。然而，LLE 在提取食品抗生素残留时，所使用的有机溶剂可能会造成环境污染，当样品中脂肪、蛋白质等干扰物质含量较高时的提取效果一般，难以满足复杂食品基质中痕量抗生素残留分析的需求[17]。

1.2 SPE

SPE 是利用固相吸附材料对目标抗生素的选择性吸附作用，通过富集、分离和纯化等过程实现待测抗生素与干扰物质有效分离的前处理方法[18]。与 LLE 相比，SPE 所需要的有机溶剂量更少、自动化程度和萃取效率更高，能有效降低样品基质干扰[24]。SPE 常用萃取填料主要有硅胶、氧化铝等，其基本操作流程通常包括活化、上样、淋洗、洗脱和再生等步骤(图 1)[25]。近年来，多种新型吸附剂被陆续开发并应用于动物源性食品抗生素残留提取。例如，SU 等[26]采用共价有机框架的分子印迹作为吸附剂，用于鸡、鱼、虾和猪肉中喹诺酮类抗生素的提取，经富集、分离和净化后，检出限低至 0.003~0.05 ng/mL，相对标准偏差小于 3.5%。SPE 的分离效果虽好，但多以固体小柱形式使用，处理体积过大或基质复杂的动物源性食品样品时，容易出现吸附剂饱和、净化效率下降以及柱子堵塞等问题[19]。

1.3 QuEChERS

QuEChERS 作为一种快速、简单、便宜、高效、耐用和安全的样品前处理技术，最初主要用于果蔬中农药残留的快速检测，此后逐渐拓展至食品抗生素残留分析领域。该方法的核心在于涡旋振荡与离心分离的协同作用，通过物理力场实现对待测物的高效萃取与净化[27]，主要操作步骤包括样品均质化、有机溶剂提取、盐析分层和分散 SPE(图 2)，常以乙腈或酸化乙腈作提取剂，无水 NaCl 和 $MgSO_4$ 作为萃取盐。例如，YE 等[28]采用 QuEChERS 技术对羊奶样品进行预处理，实现了羊奶中 19 种喹诺酮类抗生素的定量分析。尽管该技术可减弱样品基质带来的干扰，但实际应用中的萃取效率仍显不足，尤其对痕量组分的富集较为困难[19]。同时，喹诺酮类抗生素分子中的特定官能团可能与萃取盐发生相互作用，从而影响净化效果。针对上述局限，吸附剂改性以及萃取条件优化等已成为改善 QuEChERS 提取效果的有效措施。如陈兴连等[29]通过优化提取次数和净化方式，显著提高了鸡肉和鸡蛋中喹诺酮类等抗生素的提取效率，增强了检测结果的准确性。

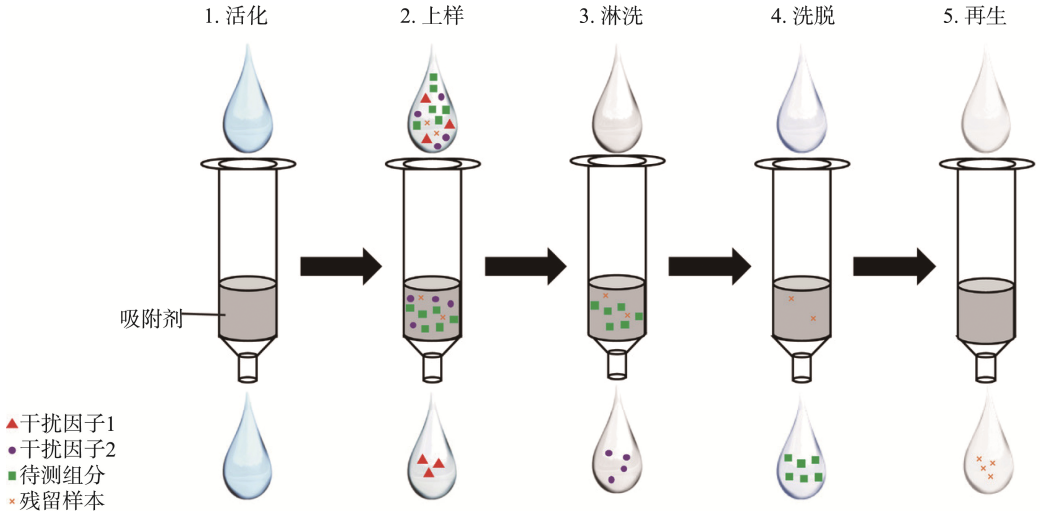
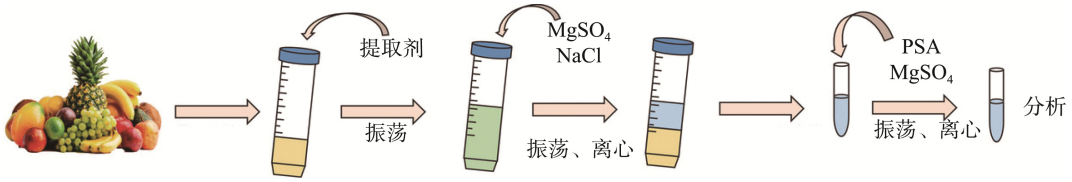


图 1 SPE 的操作流程[25]

Fig.1 Technical processes of SPE[25]



注：乙二胺-N-丙基硅烷(ethylenediamine-N-propylsilane, PSA)。

图 2 QuEChERS 法的操作流程[17]

Fig.2 Technical processes of QuEChERS[17]

1.4　MSPD

MSPD 是将萃取填料(如 C_{18}、氧化铝等)与样品混合研磨, 使目标物从样品基质中释放并分散于吸附材料表面, 随后通过适宜溶剂淋洗将目标抗生素分离与富集的样品前处理技术。该方法省去了离心、沉淀等步骤, 在一定程度上减少了样品损失, 具有操作流程简单、溶剂和样品用量少等优势[20–21]。例如, 杨盛茹等[30]以氨丙基硅胶为净化剂, 成功从鹌鹑蛋及肉中提取了多种喹诺酮类抗生素, 并在一定程度上克服了吸附材料与基质分离困难的问题, 回收率在 60%以上。萃取材料是影响回收率的重要因素之一, 其对喹诺酮类抗生素的吸附性能直接影响检测结果的稳定性和重现性, 实际应用时需充分考虑待测抗生素的理化性质[31]。近年来, 磁性萃取材料由于能借助外部磁场实现吸附剂与样品溶液的快速分离, 在操作便捷程度和富集效率方面展现出显著的优势, 磁性石墨相复合材料[32]、磁性分子印迹聚合物[33]等新型材料相继被开发, 并应用于动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留检测。

2　食品中喹诺酮类抗生素残留检测技术

动物源性食品组成复杂, 基质干扰效应较为显著, 这使得对喹诺酮类抗生素残留检测技术方法提出了更高要求。因此, 发展高精度、快速化和实时化的检测技术, 对于提升食品中喹诺酮类抗生素残留监测效率以及风险防控能力具有重要意义。当前, 动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留检测技术主要包括仪器分析法、微生物检测法和快速检测法等(表 2)。

2.1　仪器分析技术

2.1.1　HPLC

HPLC 依据待测组分在固定相和流动相间分配系数的差异实现分离, 是目前食品中喹诺酮类抗生素残留定性和定量分析的常用技术手段[34–35]。该类化合物分子含 4-喹诺酮母核及共轭双键体系, 具备较强的紫外吸收与荧光特性, HPLC 常与紫外检测器(ultraviolet detector, UVD)或荧光检测器(fluorescence detector, FLD)联用进行检测, 因 FLD 可通过特定激发/发射波长有效屏蔽非荧光基质干扰, 其检测灵敏度与选择性通常优于 UV。HPLC 多采用 C_{18} 或苯基键合硅胶柱作为固定相, 以乙腈/甲醇-水(常添加少量酸抑制羧基解离)为流动相体系。在实际检测中, 样品中含有多种喹诺酮类抗生素时, 因其结构相似易导致保留时间重叠, 通过优化色谱柱类型、洗脱程序以及流动相比例等方式可有效改善色谱峰的分离效果, 实现多组分同步检测。例如, 黄瑞鸿[45]通过优化 HPLC 条件参数成功从乌鸡中同时分离检测出了沙拉沙星、环丙沙星、恩诺沙星和达氟沙星等 4 种喹诺酮类抗生素, 检出限低于 4.849 μg/kg。但当基质复杂且喹诺酮类抗生素种类过多时, HPLC 的分离效率和通量易受制约, 通常需要较长的分析时间, 同时还会增加有机溶剂的消耗。总体而言, HPLC 具有选择性较好、灵敏度较高和稳定性强等特点, 可满足常规检测需求, 在面对痕量残留检测或更严格限量要求时仍存在一定局限, 尤其在高背景基质条件下的检测信噪比将会明显下降[46]。

2.1.2　HPLC-MS/MS

HPLC-MS/MS 是一种结合了 HPLC 分离能力与串联质谱定性、定量功能的检测技术, 具有检出限低、分辨率高和选择性强等特点, 在复杂基质样品中仍有较高的准确度, 已成为动物源性食品中抗生素残留检测的重要技术手段[36–37]。例如, DAI 等[47]通过 HPLC-MS/MS 从鱼类样品中检出了恩诺沙星和环丙沙星等喹诺酮类抗生素, 检出限低至 0.1 μg/kg, 并表现出良好的线性关系和回收率。此外, HPLC-MS/MS 能够在同时检测多种抗生素的情况下保持较高的灵敏度和准确度, 较好的满足动物源性食品样品中多组分、低残留水平的喹诺酮类抗生素的检测需求[38]。相比于 HPLC, HPLC-MS/MS 的检测灵敏度通常可提高 5~10 倍, 在痕量残留检测和复杂基质分析中优势更为突出。由于 HPLC-MS/MS 依赖质谱离子化和质量分析过程, 应避免使用难气化的流动相, 实际应用中

表 2　动物源性食品喹诺酮类抗生素残留检测方法

Table 2　Detection methods for quinolones antibiotics in animal-derived food

检测方法	优点	缺点	适用场景	参考文献
HPLC	选择性和灵敏度较高, 稳定性好, 不受限于试样挥发性	对痕量样品灵敏度有限, 复杂基质条件下的检测能力不足	已知抗生素残留的定量检测	[34–35]
HPLC-MS/MS	灵敏度极高, 抗干扰能力强, 对未知抗生素的鉴定能力强	仪器昂贵, 运行维护成本高, 对操作人员要求高	抗生素鉴定以及痕量与超痕量残留检测	[36–37]
微生物检测	操作简单, 成本低, 检测通量高	灵敏度和特异性差, 难以准确定量, 易受环境和微生物状态影响	抗生素残留的广谱性初筛, 阳性样品确诊	[38–39]
免疫检测	特异性好, 成本低, 耗时短且灵敏度高, 对检测人员要求低	易出现假阳性, 过程较为烦琐	大批量筛查, (半)定量检测	[40–42]
电化学传感检测	灵敏度高, 便携性好, 响应速度快, 操作较为简单	电极修饰过程烦琐, 抗干扰能力有待加强	实时检测, 定量检测	[43–44]

常采甲酸与乙腈的溶液组合。尽管该技术具有准确度高、检出限低和稳定性好等优势，但进行检测前需要对样品进行复杂的前处理步骤，而且仪器的养护和运行成本较高，对检测人员的仪器操作水平有一定要求，故在一定程度上限制了该检测技术在食品中喹诺酮类抗生素检测的大规模推广[48]。

2.2 微生物检测技术

微生物检测技术是利用特定抗生素对特定微生物的生长抑制作用，通过微生物的生长抑制效果来确定某种抗生素的存在及其残留水平，具有操作简单、成本低、检测通量高等优势，适用于大宗食品样品的初筛检测[39]。在一定条件下，抑菌圈的形成及其直径大小与抗生素浓度呈正相关关系[49]，可据此实现对目标抗生素的半定量或定量分析。高晓月等[50]以大肠埃希氏菌作为指示菌，检测了畜禽肉中恩诺沙星、环丙沙星、达氟沙星以及司帕沙星等喹诺酮类抗生素的残留浓度，检出限为 60~180 μg/kg，并结合 HPLC-MS/MS 进一步排除了假阴性样品的存在。WU 等[51]以嗜热嗜脂肪地芽孢杆菌 C953 为指示菌，成功筛查和鉴定了牛奶、鸡蛋和蜂蜜等食品中喹诺酮类抗生素残留，其检出限与欧盟规定最大残留限量相当。虽然微生物检测技术在动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留方面具有设备要求低、使用成本低和适合大批量样品快速初筛等优势，但存在检测耗时长、菌种筛选难以及特异性相对不足以及易受样品基质、培养条件和其他抑菌物质干扰等问题，阳性或可疑样品通常仍需结合色谱或质谱等确证方法进行进一步验证[38]。

2.3 快速检测技术

2.3.1 免疫检测技术

免疫检测是利用抗原-抗原特异性反应来对动物源性食品中抗生素残留进行定性或定量分析，主要包括酶联免疫吸附检测、荧光免疫检测、胶体金免疫层析检测等[40–42]。该方法操作简单、检测成本低、耗时短且灵敏度高，适用于大规模筛查以及现场快速检测。然而，在实际检测过程中受抗体交叉反应或样品基质干扰等因素影响，可能出现假阳性结果。抗原合成是实现喹诺酮类抗生素免疫检测的关键，对于不具备免疫原性的半抗原(即分子量小于 5000 的化合物)，则需通过碳化二亚胺法、戊二醛法和混合酸酐法等，将其与载体蛋白偶联后才能诱导机体产生特异性抗体。由于操作过程中无需使用大型仪器，酶联免疫吸附法非常适合大批量食品抗生素残留样品的快速筛查与检测[52]。例如，贾萌等[53]利用碳二亚胺/N-羟基琥珀酰亚胺法，以卵清蛋白作为包被原制备了达氟沙星-卵清蛋白特异性识别抗原，用于牛奶中达氟沙星残留快速检测，检出限为 0.89 ng/mL。由于抗原-抗体反应的高度特异性，酶联免疫法多用于单一或同类抗生素残留的检测，在多种抗生素同步检测方面仍存在一定局限。荧光免疫检测法则是在抗原-抗体特异性识别的基础上，引入荧光标记物或荧光探针，通过荧光信号强弱变化实现对目标抗生素的定性或定量分析。例如, HU 等[54]利用辣根过氧化物酶偶联碳量子点作为荧光探针，检测了牛奶、鸡肉、猪肉和鲈鱼等动物源性食品中的诺氟沙星残留，检出限低至 0.20 μg/L，回收率为 88.11%~108.16%。胶体金免疫层析法则是利用胶体金标记的抗体充当示踪标志物，通过抗原-抗体特异性识别反应实现对抗生素残留的快速检测，常被制成免疫层析试纸条，非常适合用作食品抗生素残留样品的现场快速筛查。刘卫华等[55]利用柠檬酸三钠还原法所制得的胶体金标记氟甲喹(喹诺酮类抗生素衍生物)后用于脱脂牛奶、虾肉、牛肉和猪肉等动物源样品中氟甲喹残留的检测，最低检出限可达 40 μg/L。但在实际动物源性食品样品中往往同时含有多种喹诺酮类抗生素，单一特异性识别模式难以充分满足多残留同步检测，并且复杂基质可能影响抗原-抗体结合效率，导致检测结果偏差。因此，开发高灵敏、广谱识别、抗基质干扰能力强且可同步检测多种喹诺酮类抗生素残留的免疫检测技术，将更具实际应用价值[43]。

2.3.2 电化学传感检测技术

如图 3 所示，电化学传感检测是利用待测抗生素在电极材料表面发生的氧化还原反应，通过测量所产生的电流或电压变化实现对抗生素的定量或定性分析[44]。与其他传统检测技术相比，电化学传感检测技术具有简单快速、便

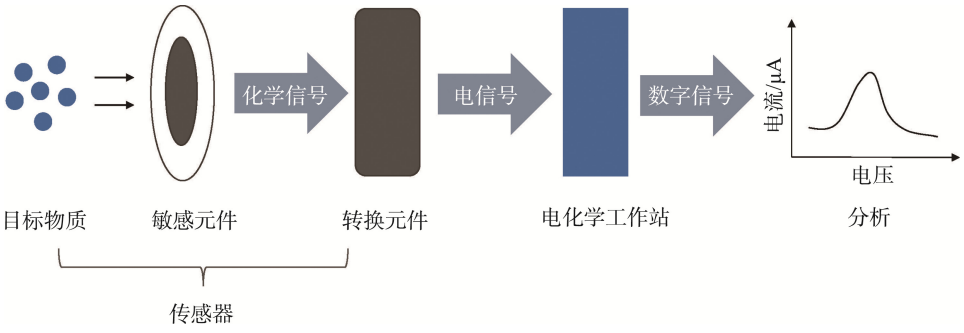


图 3 电化学传感检测法的工作原理[42]

Fig.3 Mechanism of the electrochemical sensing detection method[42]

携、灵敏度高以及低成本等优势, 在食品抗生素残留的现场分析和快速检测方面愈发受到重视。电极修饰材料作为电化学传感器的关键组成部分, 其性质直接影响抗生素检测的灵敏度和检出限, 目前常用的电极修饰材料主要包括碳材料、贵金属、金属氧化物和导电聚合物等[56]。例如, 曹功勋等[57]将金纳米颗粒@氮掺杂碳点复合材料修饰于玻碳电极表面, 采用循环伏安法对左氧氟沙星进行检测, 检出限可达 1.0×10^{-6} mol/L, 线性范围为 2.5×10^{-6}~1.0×10^{-4} mol/L。而在实际样品中抗生素残留水平通常较低且基质复杂, 传统碳材料和贵金属修饰电极的电化学传感方法在灵敏度、选择性和抗干扰能力方面仍存在一定局限。近年来, 金属有机框架材料因具有较大的比表面积、可调控的孔道结构以及较多的活性位点, 在增强电化学响应方面表现出较好的潜力, 其修饰电极也逐渐成为动物源性食品中痕量抗生素残留检测的研究热点[54]。例如, 陈宏等[58]利用钴-对苯二甲酸金属有机骨架材料修饰玻碳电极, 构建了用于草鱼肉中环丙沙星残留检测的电化学传感器, 检出限为 1.0×10^{-9} mol/L, 加标回收率为 95.0%~101.9%。

3　结束语

肉、蛋、奶及水产品等动物源性食品是人类日常膳食的重要组成部分, 其质量安全水平与人体健康密切相关。但在畜禽和水产养殖过程中, 喹诺酮类抗生素的使用较为普遍, 由此带来的残留风险也逐渐受到关注。因此, 加强动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留检测对于保障食品安全和公众健康具有重要意义。现有技术虽能够基本满足动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留的筛查、定量分析等检测需求, 但面对基质复杂的样品时, 仍会受到方法通用性不强、基质干扰等限制。因此, 开发成本低、适用范围广、回收率高的前处理方法, 是实现喹诺酮类抗生素残留高效检测的关键。分子聚合物、纳米复合磁性材料等新型吸附剂与多种前处理方法形成有效组合, 在实际检测中展现出显著优势。相较于传统吸附剂, 这类新型材料在一定程度上解决了选择性差和洗脱不充分等问题, 提高了目标物富集效率和检测结果的准确性。后续研究应重视吸附剂在复杂基质中的适配性、通用性以及作用机制解析, 同时推进标准化、自动化前处理设备与配套组件的开发, 以提高后续检测的稳定性、重现性和回收率。就检测手段而言, 以 HPLC-MS/MS 为代表的仪器分析方法仍是喹诺酮类抗生素残留检测的主流技术。快速检测技术虽然在缩短检测时间、提高筛查效率和现场检测方面展现出较大潜力, 但面对组分复杂的动物源性基质时, 其抗干扰能力和结果准确度仍逊色于大型仪器, 部分快检平台还受限于识别元件稳定性不足、批间一致性差异较大和定量结果重复性差等问题。检测手段研究重心不应仅限于提高检测速度和便携性, 还应重视识别元件创新、检测平台微型化集成以及检测数据智能化处理。如适配体和分子印迹聚合物等新型仿生识别材料, 具有良好的选择性和稳定性, 将其与电化学传感芯片、微流控芯片等微型化检测平台相结合, 有望构建兼具高灵敏度、高特异性和低样品消耗的新型检测体系。随着人工智能技术的快速发展, 人工智能的信号判读、异常识别和质量控制将会成为未来动物源性食品中喹诺酮类抗生素残留检测的重要发展方向。

参考文献

[1] OKOYE CO, NYARUABA R, ITA RE, *et al*. Antibiotic resistance in the aquatic environment: Analytical techniques and interactive impact of emerging contaminants [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2022, 96: 103995.

[2] JIANG S, SHI B, ZHU D, *et al*. Cross-contamination and ecological risk assessment of antibiotics between rivers and surrounding open aquaculture ponds [J]. Environmental Pollution, 2024, 344: 123404.

[3] LI M, JIA L, ZHAO X, *et al*. Machine learning-assisted ratiometric fluorescence sensor array for recognition of multiple quinolones antibiotics [J]. Food Chemistry, 2025, 478: 143722.

[4] SHEN HT, HAN JL, XU XM, *et al*. Quinolones, tetracyclines, and amphenicols in animal-derived food products from Southeast China: Distribution and health risk estimation [J]. Food Control, 2026, 183: 111890.

[5] SONG C, ZHANG C, KAMIRA B, *et al*. Occurrence and human dietary assessment of fluoroquinolonesantibiotics in cultured fish around tai lake, China [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2017, 36(11): 2899–2905.

[6] LIU X, STEELE JC, MENG XZ. Usage, residue, and human health risk of antibiotics in Chinese aquaculture: A review [J]. Environmental Pollution, 2017, 223: 161–169.

[7] FEI Z, SONG S, YANG X, *et al*. Occurrence and risk assessment of fluoroquinolone residues in chicken and pork in China [J]. Antibiotics (Basel), 2022, 11(10): 1192.

[8] COBOS Á, DIAZ O. Chemical composition of meat and meat products [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

[9] DAI Q, TANG S, DAI C. Recent advances in pretreatment methods and detection techniques for veterinary drug residues in animal-derived foods [J]. Metabolites, 2025, 14(4): 233.

[10] HU S, ZHAO M, WANG Z, *et al*. Development of a pH-dependent homogeneous liquid-liquid extraction by cold-induced phase separation in acetonitrile/water mixtures for determination of quinolone residues in animal-derived foods [J]. Journal of Chromatography A, 2021, 1649: 462235.

[11] ZHANG M, CHEN J, ZHAO F, *et al*. Determination of fluoroquinolones in foods using ionic liquid modified Fe_3O_4/MWCNTs as the adsorbent for magnetic solid phase extraction coupled with HPLC [J]. Analytical Methods, 2020, 12(36): 4457–4465.

[12] BAO R, ZHUO R, ZHONG Z, *et al*. Response surface-optimized QuEChERS-UPLC-MS/MS method for multi-antibiotic determination and dietary risk assessment in animal-derived foods [J]. Food Chemistry, 2026, 514(15): 149084.

[13] WANG GN, ZHANG L, SONG YP, *et al*. Application of molecularly

imprinted polymer based matrix solid phase dispersion for determination of fluoroquinolones, tetracyclines and sulfonamides in meat [J]. Journal of Chromatography B, 2017, 1065: 104–111.

[14] VERMA MK, AHMAD AH, PANT D, *et al*. Screening of enrofloxacin and ciprofloxacin residues in chicken meat by high-performance liquid chromatography [J]. Journal of Pharmaceutical Research International, 2020, 32(21): 64–69.

[15] 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.

[16] SUN Q, ZHANG S, CHEN Q, *et al*. Salting-out assisted liquid-liquid extraction for the simple and rapid determination of veterinary antibiotic residues in aquatic products by HPLC-MS/MS [J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140775.

[17] RIDGWAY K, LALLJIE SPD, SMITH RM. Sample preparation techniques for the determination of trace residues and contaminants in foods [J]. Journal of Chromatography A, 2007, 1153(1-2): 36–53.

[18] MENG LS, WANG XL, WANG X, *et al*. Hydroxyl-containing triazine-based conjugated microporous polymers for solid phase extraction of fluoroquinolone antibiotics in the environment and food samples [J]. Food Chemistry, 2024, 447: 138867.

[19] WEI XW, ZHANG Y, ZHOU Y, *et al*. A review on pretreatment and analysis methods of polyether antibiotics in complex samples [J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2024, 54(8): 3453–3477.

[20] VERGARA-LUIS I, BAEZ-MILLAN JC, BACIERO I, *et al*. Comparison of conventional and dispersive solid phase extraction clean-up approaches for the simultaneous analysis of tetracyclines and sulfonamides in a variety of fresh vegetables [J]. Talanta, 2023, 254: 124192.

[21] ALICHI M, MOVASSAGHGHAZANI M, MOGADDAM MRA. Dispersive solid phase extraction of some sulfonamide antibiotics from milk combined with dispersive liquid-liquid microextraction [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 135: 106631.

[22] 李少晖, 任丹丹, 谢云峰, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定猪肝中 14 种喹诺酮类药物残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(4): 851–857.
LI SH, REN DD, XIE YF, *et al*. Determination of 14 kinds of quinolones residues in pig liver by ultraperformance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(4): 851–857.

[23] 唐艳红, 罗双群, 杨梦冉, 等. 动物源性食品中抗生素残留、耐药细菌的分布及耐药基因的水平传播[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(20): 227–235.
TANG YH, LUO SQ, YANG MR, *et al*. Antibiotic residue, distribution of antibiotic resistant isolates and horizonal transfer of resistance genes in foods of animal origin [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(20): 227–235.

[24] ROSTAMI-JAVANROUDI S, KHODADADI A, FATHI AA, *et al*. Application of continuous magnetic solid phase extraction in the extraction of tetracycline antibiotics from honey samples [J]. Microchemical Journal, 2024, 201: 110525.

[25] MOGA A, VERGARA-BARBERAN M, LERMA-GARCIA MJ, *et al*. Determination of antibiotics in meat samples using analytical methodologies: A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(2): 1681–1716.

[26] SU LH, QIAN HL, YANG CY, *et al*. Surface imprinted-covalent organic frameworks for efficient solid-phase extraction of fluoroquinolones in food samples [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 459(5): 5132031.

[27] ZHANG C, DENG Y, ZHENG J, *et al*. The application of the QuEChERS methodology in the determination of antibiotics in food: A review [J]. TrAC-Trends in Analytical Chemistry, 2019, 118: 517–537.

[28] YE SB, HUANG Y, LIN DY, *et al*. QuEChERS sample pre-processing with UPLC-MS/MS: A method for detecting 19 quinolone-based veterinary drugs in goat's milk [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131466.

[29] 陈兴连, 李倩, 王志飞, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定鸡肉和鸡蛋中 25 种兽药残留[J]. 质谱学报, 2021, 42(6): 1046–1058.
CHEN XL, LI Q, WANG ZF, *et al*. Simultaneous determination of multiple veterinary medicine residuesin chicken and eggs by UPLC-MS/MS [J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2021, 42(6): 1046–1058.

[30] 杨盛茹, 姚喜梅, 丁长河, 等. 采用分散固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法同时测定鹌鹑蛋及肉中多种喹诺酮类药物残留[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 57–63.
YANG SR, YAO XM, DING CH, *et al*. Simultaneous determination of quinolones residues in quail eggs and tissue by dispersive solid-phase extraction and ultra performance liquid chromatography combined with tandem mass spectrometry [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(4): 57–63.

[31] DUBE S, NCUBE S, MADIKIZELA LM, *et al*. Surface imprinting polymerization for synthesis of a molecularly imprinted polymer and its application in ultrasound-assisted dispersive solid-phase microextraction of selected tetracycline antibiotics in wastewater [J]. Chemical Papers, 2025, 79: 8987–9002.

[32] 秦烨. 磁性石墨烯固相萃取-HPLC-MS/MS 在水产品药残检测中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2016.
QIN Y. Magnetic graphene solid-phase extraction coupled with high perflormance liquid chromatography/tandem mass spectrometry for determination of residues in aquatic products [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2016.

[33] 张静. 表面光引发聚合制备功能化磁性微球及选择性萃取奶样中兽药残留[D]. 保定: 河北大学, 2016.
ZHANG J. Synthesis of functional magnetic microspheres by surface photo-initiated polymerization for selective extraction of veterinary drug residues from milk samples [D]. Baoding: Hebei University, 2016.

[34] VERCELLI C, AMADORI M, GAMBINO G, *et al*. A review on the most frequently used methods to detect antibiotic residues in bovine raw milk [J]. International Dairy Journal, 2023, 144: 105695.

[35] XU F, ZHANG Z, SHI Q, *et al*. Rapid determination and risk evaluation of multi-class antibiotics in aquatic products by one-step purification process coupled with ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Talanta, 2024, 277: 126421.

[36] 王锦略, 李佩佩, 卓寒璐. 高效液相色谱在食品兽残中的检测运用研究[C]. 重庆: 2025 人工智能与工程管理学术交流会论文集, 2025.
WANG JL, LI PP, ZHUO HL. Research on the application of high-performance liquid chromatography (HPLC) in the detection of veterinary drug residues in food [C]. Chongqing: 2025 Conference on Artificial Intelligence and Engineering Management, 2025.

[37] ZHANG C, WANG H, MU Y, *et al*. A method for simultaneously and accurately quantify seven quinolones in matrix reference materials by HPLC-MS [J]. Microchemical Journal, 2024, 204: 110984.

[38] 王珂. 两种微生物抑制法检测抗生素残留优化与改良的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
WANG K. Research on optimization and improvement of two kinds of microbial inhibition methods to detect antibiotic residues [D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.

[39] DAS S, KUMAR N, VISHWESWARAIAH RH, *et al*. Microbial based assay for specific detection of *β*-lactam group of antibiotics in milk [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(6): 1161–1166.

[40] HU G, LIU Z, ZHANG Y, *et al*. Fluorescence quenching biomimetic ELISA based on quantum dots for enrofloxacin detection in animal-derived foods [J]. Microchemical Journal, 2024, 201: 110589.

[41] XU J, ZHANG Y, LI Y, *et al*. Multifunctional dual-channel fluorescent nanoprobe for visual fluorescence detection of pathogenic bacteria and excessive antibiotics in food safety [J]. Journal of Luminescence, 2024, 266: 120303.

[42] PRAKASHAN D, KOLHE P, GANDHI S. Design and fabrication of a competitive lateral flow assay using gold nanoparticle as capture probe for the rapid and on-site detection of penicillin antibiotic in food samples [J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138120.

[43] WU Y, SUN J, HUANG X, *et al*. Ensuring food safety using fluorescent nanoparticles-based immunochromatographic test strips [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 658–678.

[44] XIE M. Progress in graphene-based electrochemical sensors for antibiotic residue detection [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(7): 6020–6034.

[45] 黄瑞鸿. 高效液相色谱法测定乌鸡中氟喹诺酮类药物残留量[J]. 食品安全导刊, 2025, 18: 98–101.
HUANG RH. Detection of fluoroquinolone residues in black-boned chicken using high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025, 18: 98–101.

[46] LIU Y, LUO Y, LI W, *et al*. Current analytical strategies for the determination of quinolone residues in milk [J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137072.

[47] DAI J, WANG Y, LIN H, *et al*. Residue screening and analysis of enrofloxacin and its metabolites in real aquatic products based on ultrahigh-performance liquid chromatography coupled with high resolution mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134757.

[48] LI W, DANG Y, WANG R, *et al*. Fabrication of magnetic functionalized layered double hydroxide nanomaterials for detecting trace fluoroquinolones residues in meat integrated with HPLC-MS/MS [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 135: 106672.

[49] WU Q, LIU X, DUN X, *et al*. The screening and identification of six commonly used antibiotics in swine kidney by a microbiological inhibition method [J]. Microchemical Journal, 2021, 161: 105796.

[50] 高晓月, 范维, 陈淑敏, 等. 微生物显色法检测禽畜肉中混合抗生素残留[J]. 肉类研究, 2019, 33(4): 36–41.
GAO XY, FAN W, CHEN SM, *et al*. Residue analysis of antibiotics in livestock and poultry meat by microbial chromogenic assay [J]. Meat Research, 2019, 33(4): 36–41.

[51] WU Q, SHABBIR MAB, PENG D, *et al*. Microbiological inhibition-based method for screening and identifying of antibiotic residues in milk, chicken egg and honey [J]. Food Chemistry, 2021, 363: 130074.

[52] SHAN S, LV X, XIAO X, *et al.* Integrated double signal amplification systems with ELISA assay for sensitive detection of tylosin in food [J]. Food and Agricultural Immunology, 2024, 35(1): 2292971.

[53] 贾萌, 柳鑫, 常超, 等. 传统酶联免疫吸附法检测牛奶中的达氟沙星[J]. 武汉轻工大学学报, 2025, 44(4): 43–48.
JIA M, LIU X, CHANG C, *et al*. The traditional enzyme-linked immunosorbent assay for detection of danofloxacin in milk [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2025, 44(4): 43–48.

[54] HU G, SU D, YU Q, *et al*. Sensitive fluorescence immunoassay on the basis of the fluorescence quenching effects of quantum dots for the determination of norfloxacin in animal-origin foods [J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103681.

[55] 刘卫华, 于文龙, 杨茜, 等. 胶体金标免疫固相膜检测动物性食品中氟甲喹[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(5): 177–183.
LIU WH, YU WL, YANG X, *et al*. Colloidal gold labeled solid phase membrane-based immunoassay to detect flumequine in animal foods [J]. Food Research and Development, 2020, 41(5): 177–183.

[56] 王麟, 韩双, 陈吉平, 等. 基于金属有机框架的电化学传感技术在抗生素检测中的研究进展[J]. 分析化学, 2025, 53(4): 535–546.
WANG L, HAN S, CHEN JP, *et al*. Application progress of metal-organic frameworks in electrochemical sensing of antibiotics residues Chinese [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2025, 53(4): 535–546.

[57] 曹功勋, 刘翠娥, 满珊, 等. 基于 Au@N-CDs 纳米复合材料电化学传感器检测左氧氟沙星[J]. 分析科学学报, 2022, 38(4): 405–412.
CAO GX, LIU CE, MAN S, *et al*. An electrochemical sensor based on Au@N-CDs nanocomposite for determination of levofloxacini [J]. Journal of Analytical Science, 2022, 38(4): 405–412.

[58] 陈宏, 王悦, 张文婷, 等. 金属有机骨架材料构建环丙沙星电化学传感器的研究[J]. 化学通报, 2021, 84(2): 167–171.
CHEN H, WANG Y, ZHANG WT, *et al*. Determination of ciprofloxacin by electrochemical sensor based on metal organic framework material [J]. Chemistry, 2021, 84(2): 167–171.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)