

刘书余, 郭亚文, 汤亚云, 等. 禽组织和禽蛋中兽药残留快速检测技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(15): 482–491. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110105

LIU Shuyu, GUO Yawen, TANG Yayun, et al. Research Progress on Rapid Detection Technology of Veterinary Drug Residues in Poultry Tissues and Eggs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(15): 482–491. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110105

· 专题综述 ·

# 禽组织和禽蛋中兽药残留快速检测 技术研究进展

刘书余<sup>1,2</sup>, 郭亚文<sup>1,2</sup>, 汤亚云<sup>1,2</sup>, 高鹏飞<sup>1,2</sup>, 管凡荀<sup>1,2</sup>, 朱雅丽<sup>1,2</sup>, 谢恺舟<sup>1,2,\*</sup>

(1.扬州大学动物科学与技术学院, 江苏扬州 225009;

2.教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室, 江苏扬州 225009)

**摘要:**快速检测技术操作简单、能够快速检测得出检测结果, 因此得到迅速发展。本文综述了目前禽组织和禽蛋中常见的兽药残留种类及危害, 从快速检测技术实际应用的角度进行分析, 比较了不同快速检测技术之间的优缺点, 探讨了酶联免疫法、胶体金免疫层析法、生物芯片技术、化学发光免疫分析法、生物传感器、表面增强拉曼光谱等检测技术在禽组织和禽蛋中的未来发展趋势和应用价值, 并提出了新型功能材料的拓展研发, 如核酸适配体、亲和体和基因工程抗体等; 利用现代网络技术与不同检测技术的相互融合提高快速检测技术的灵敏度和准确度等策略, 旨在提升快速检测技术在禽类食品安全管理中的应用效果, 以期对兽药残留评估、检测和监管提供新的思路。

**关键词:**快速检测技术, 兽药残留, 禽组织, 禽蛋, 免疫学技术

中图分类号: S859.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)15-0482-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110105

本文网刊:



## Research Progress on Rapid Detection Technology of Veterinary Drug Residues in Poultry Tissues and Eggs

LIU Shuyu<sup>1,2</sup>, GUO Yawen<sup>1,2</sup>, TANG Yayun<sup>1,2</sup>, GAO Pengfei<sup>1,2</sup>, GUAN Fanxun<sup>1,2</sup>, ZHU Yali<sup>1,2</sup>, XIE Kaizhou<sup>1,2,\*</sup>

(1.College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2.Joint International Research Laboratory of Agriculture & Agri-Product Safety, Yangzhou University,  
Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** Rapid detection technology developed rapidly due to its simple operation and ability to quickly detect test results. This paper reviews the types and negative effects of veterinary drug residues commonly found in poultry tissues and eggs. The pros and cons of various rapid detection techniques are compared from the point of view of their practical application. The future development trends and application values of detection techniques (e.g., enzyme-linked immunosorbent assay, colloidal gold immunochromatography, biochip technology, chemiluminescent immunoassay, biosensor, and surface-enhanced Raman spectroscopy) in poultry tissues and eggs are discussed. Finally, the development of new functional materials (e.g., nucleic acid aptamers, affinity bodies, and genetically engineered antibodies) is proposed to improve the sensitivity and accuracy of rapid detection technology through the fusion of modern network technology with various detection technologies. The goal is to improve the applications and effects of rapid detection technology in poultry food safety management and to provide new ideas for the evaluation, detection, and supervision of veterinary drug residues.

**Key words:** rapid detection technology; veterinary drug residues; poultry tissues; eggs; immunology technology

收稿日期: 2022-11-11

基金项目: 国家现代农业产业技术体系专项资助 (CARS-41); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD); 2022 年江苏省研究生科研创新计划项目 (KYCX22\_3526)。

作者简介: 刘书余 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品品质与安全, E-mail: MZ120211479@stu.yzu.edu.cn。

\* 通信作者: 谢恺舟 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品品质、安全与兽药残留检测方法, E-mail: yzxkz168@163.com。

禽肉和禽蛋是人类非常重要的蛋白质来源。肉组织和蛋中的兽药残留会对人类健康产生严重影响(如抗菌素耐药性和致癌性)<sup>[1]</sup>,这使得控制兽药残留成为确保消费者健康的重要参数。在家禽生产中常用兽药主要有生长促进剂<sup>[2]</sup>、驱虫剂<sup>[3]</sup>和抗生素<sup>[4]</sup>等,用来提高动物机体免疫力和快速增长。虽然兽药在防治禽病、促进家禽生长和提高饲料转化率方面发挥了一定的积极作用,但伴随着国内肉鸡养殖逐渐向着集约化、规模化的方向发展,养殖场所产生的污水、禽类粪便都对周边的养殖环境产生了很大影响,所以造成禽类养殖环境中病原微生物多,禽类抗病力弱,养殖者不得不加大兽药的使用量,导致兽药残留在家禽组织、器官和食用产品中,从而危害消费者的健康。目前已经报道了测定动物源性食品中兽药的分析方法,其中大多数使用液相色谱或气相色谱-串联质谱<sup>[5-9]</sup>。然而,尽管这些方法通常被验证用于确证分析目标化合物,但这些仪器方法需要昂贵的设备、耗时的样品处理和经验丰富的人员,很难满足食品安全快速检测的需要。因此,为解决畜禽食品安全这一具体问题,开发简单快速、灵敏度高、准确的方法来检测禽组织和禽蛋中兽药残留物是当务之急。大多数国家也开始为食品安全提出更高的要求,检测技术趋于高科技、序列化、快速测量、便携式和商业化<sup>[10]</sup>。本文综述了近十年来禽组织和禽蛋中兽药残留快速检测技术的研究进展,比较了不同快速检测技术在应用方面的优缺点,探讨了多种快速检测技术在禽组织和禽蛋中的未来发展趋势,以期为禽类食品中兽药残留评估、检测和监管提供理论基础。

1 兽药残留种类及危害

1.1 常见残留兽药种类

兽药残留是指饲料中添加被摄入后以及用药后蓄积或存留于畜禽机体和产品(如鸡蛋、肉品等)中原型药物及其代谢产物,包括与兽药有关的杂质残留。禽组织和禽蛋中常见兽药残留种类如表 1。畜牧中兽药主要被用于各种动物疫病防治和临床研究,若过度使用,容易造成药物在动物体内残留,使动物具有耐受性,在人体食用这些有药物残留的动物后,

药物被人体吸收,从而影响人体内部环境<sup>[11-12]</sup>。《中国食品安全发展报告(2019)》指出 2018 年食品抽检中农兽药残留不符合标准占不合格样品总量的 15.4%,主要是禽类产品和鲜蛋中检测出禁用和限用兽药,其中鲜蛋的不合格率为 3.9%<sup>[13]</sup>。2020 年实施的 GB 31650 2019《食品安全国家标准 食品中兽药最大残留限量》中规定,产蛋期禁用达氟沙星、二氟沙星、恩诺沙星、沙拉沙星、氟甲喹、噁喹酸这六种喹诺酮类药物<sup>[14]</sup>,2021 年江苏省市场监管局通报 1 批鸡蛋中恩诺沙星超标<sup>[15]</sup>,同年,山西大同市抽检出鸡肉样品中恩诺沙星超标;山东省和安徽省分别抽检出 2 批次和 1 批次鸡蛋中氟苯尼考残留超标<sup>[16]</sup>,由此可见,禽组织、禽蛋中药物残留问题严峻,建立快速的检测方法用于检测禽组织和禽蛋中的药物残留迫在眉睫。

1.2 危害

畜禽养殖中的不合理使用兽药、不遵守停药期等滥用现象导致禽组织和禽蛋中药物残留超标,兽药残留会使细菌产生耐药性、导致人体中毒、肠道内菌群失调、发生过敏反应、三致作用以及环境污染。2016 年,英国经济学家 O'Neill 发表的《全球抗菌药物耐药回顾:报告及建议》中指出细菌耐药性导致每年死亡 70 万人<sup>[26]</sup>。根据相关研究报道,每生产 1 kg 鸡肉会消耗 148 mg 抗菌药物<sup>[27]</sup>,中国每年生产的抗菌药物有近一半都用于畜牧养殖业<sup>[28]</sup>,当摄入含有抗菌药物的动物源性食品时,人体内肠道菌群与抗菌药相互作用破坏体内菌群的动态平衡,影响肠道吸收,进而引发各种疾病。长期摄取含有兽药残留物的动物源性食品,会在人体内不断蓄积并引起中毒和过敏反应,中毒产生的症状如头晕乏力、恶心呕吐、腹泻等,严重者呼吸困难、昏迷、休克、骨头坏死<sup>[29]</sup>;过敏反应如皮肤出现红斑、丘疹、糜烂,更严重会出现脓包、水疱等<sup>[30]</sup>。同时还会使人类有致畸、致癌、致突变的风险,硝基呋喃类药物会对人体肝和肾等器官造成损伤,严重危害人们的生活安全,此类药物已被我国和其他多个国家禁止使用<sup>[31]</sup>。其次,各种药物与代谢物会随着动物的粪便、尿液等排泄物排出体外,一些化学成分会对土壤结构造成破坏,污染水环境,进

表 1 禽组织和禽蛋中常见药物残留种类  
Table 1 Types of common drug residues in poultry tissues and eggs

| 兽药种类                     | 名称                                                            |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 大环内酯类抗生素 <sup>[17]</sup> | 红霉素、吉他霉素、罗红霉素、泰乐霉素、泰万霉素、林可霉素、竹桃霉素、多拉菌素、伊维菌素、替米考星              |
| 四环素类 <sup>[18]</sup>     | 四环素、多西环素、金霉素、土霉素                                              |
| 磺胺类 <sup>[19]</sup>      | 磺胺嘧啶、磺胺二甲氧嘧啶、磺胺间甲氧嘧啶、磺胺甲基嘧啶、磺胺二甲嘧啶、磺胺甲噁唑                      |
| 喹诺酮类 <sup>[20]</sup>     | 恩诺沙星、诺氟沙星、环丙沙星、氧氟沙星、氟罗沙星、洛美沙星、沙拉沙星、达氟沙星、氟甲喹、萘啶酸、培氟沙星、二氟沙星、奥喹酸 |
| 酰胺类 <sup>[21]</sup>      | 阿莫西林、萘夫西林、头孢噻吩、氟苯尼考、氨苄西林、甲砷霉素、氯霉素                             |
| 氨基糖苷类 <sup>[22]</sup>    | 链霉素、大观霉素、新霉素                                                  |
| 硝基咪唑类 <sup>[23]</sup>    | 甲硝唑、地美硝唑                                                      |
| 硝基呋喃类 <sup>[24]</sup>    | 呋喃唑酮、呋喃它酮、呋喃西林、呋喃妥因                                           |
| 抗病毒药物 <sup>[25]</sup>    | 金刚烷胺                                                          |

而威胁当地畜牧业稳定发展<sup>[32]</sup>。

## 2 快速检测技术的定义及种类

兽药残留快速检测技术, 又称快检技术, 是化学仪器分析和验证检测技术中一种比较简单的操作, 快速灵敏、检测时间比较短、仪器条件要求不高、易于现场完成目标成分分析。快速检测技术的目的是从大量具有未知风险的食品样品中快速筛选可疑样品。该技术的特点是快速、灵敏, 适合大批量样品的初步筛选。兽药残留检测中常用的快检技术的特征对比如表 2 所示。

快速检测技术方法根据分子生物学原理划分, 主要包括了免疫学技术、生物传感器技术、表面增强拉曼光谱技术、微生物抑制分析技术等。检测对象基本上覆盖了农药残留、兽药残留、饲料添加剂残留、生物毒素、违禁化学添加物、激素、病原与微生物毒素等。根据产品形式被分为检测卡、试纸法、试剂盒、快速检测仪等。根据检测项目结果可以分为定性检测、限量检测、半定量检测以及定量检测<sup>[33]</sup>。

### 2.1 免疫学技术

免疫学技术因具有对抗原抗体交叉结合酶的高度特异性, 因此在抗体分析研究上具有快速、灵敏的优点, 并且它操作极其简便、无须配置昂贵的仪器设备就可以做到在现场即时采样即时分析。免疫学方法主要包括酶联免疫吸附法、胶体金免疫技术、生物芯片技术、化学发光免疫分析法等<sup>[34]</sup>。

**2.1.1 酶联免疫吸附法** 酶联免疫吸附法(Enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)是指一种设备简便且易人工操作、检测结果快, 灵敏度稳定和准确度高, 能实现现场样品快速检测等一系列特点的新型检测方法。其原理是利用抗原抗体分子的特异性结构与蛋白竞争性抗原结合, 以其作为反应标记物并显示该反应后的检验结果, 从而能进行快速定性及定量测定。其检测原理如图 1, 检测成本较仪器检测低, 能够充分弥补没有大型实验仪器的空缺, 适用于小批量样品快速筛选检测。目前此研究方法已被广泛应用于禽组织和禽蛋中的兽药残留快速检测。

杨建中<sup>[35]</sup>用酶联免疫吸附法测定鸡肉、鸭组织中残留的金刚烷胺类药物。在鸡肉、鸭肉样品中的检测回收率在 84%~112% 之间, 具有较好的准确度和精密度。为鸡肉和鸭肉等肉类中金刚烷胺类药物及代

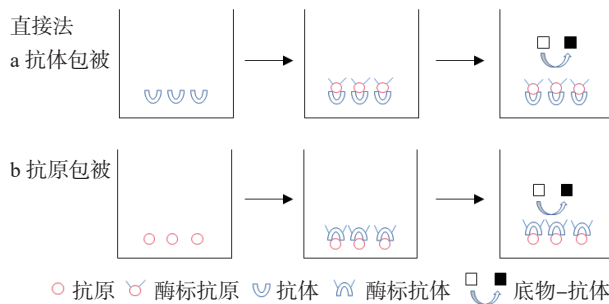


图 1 酶联免疫测定法原理图

Fig.1 Schematic diagram of ELISA

谢物残留的鉴别和筛选提供了新的思路。李建鲲等<sup>[36]</sup>采用酶联免疫吸附法测定鸡蛋中氟喹诺酮类药物残留, 回收率在 90.0%~102.0% 之间, 最低残留检测限为 3.2 ng/g。He 等<sup>[37]</sup>建立了一种灵敏的酶联免疫吸附法用于食品样品中甲苯咪唑的分析, 所得鸡肉样品中添加甲苯咪唑的平均回收率为 84.31%~104.96%, 与高效液相色谱法的测定结果一致。基于抗原和抗体的特异性结合, 使得 ELISA 法定量检测鸡蛋中氟喹诺酮类药物特异性极强, 且相比其他方法更为简单, 灵敏度高, 检测限一般可达 ng 甚至 pg 级别<sup>[38]</sup>, 并且仪器水平要求不高, 用酶标仪就可以进行检测, 检测分析结果相对可靠、稳定, 能够满足初检和筛选分析要求, 方便生产现场的快速检测。目前已研制出多种携带方便的 ELISA 快速检测试剂盒, 加快了 ELISA 试剂盒商业化和标准化进程, 使越来越多的学者研究改良和完善这种方法。该试剂盒检测速度快, 试剂的保存时间比较长, 自动化程度高且使用的有机溶剂较少, 对环境造成的污染大大降低。酶联免疫吸附技术已成为一种不可或缺的兽药残留检测的常规手段, 以确保我们的食品安全。

ELISA 技术具有多重优点, 但同时也有一定的局限性, ELISA 法检测结果会受到一些其他不明因子的干扰, 不可避免地出现定性假阳性与假阴性。对于不稳定的和分子量较小的化合物难以分析, 并且不能同时分析检测样品中多种成分。要实现酶联免疫吸附技术替代传统检测技术, 研究者们还需要做大量的工作, 相信未来通过与色谱技术、质谱技术相结合使用来弥补一些局限性, 从而提高检测结果的精准性, 继而使食品安全问题得到有效解决。

### 2.1.2 免疫层析技术 免疫层析技术法(Immunochromatography)

表 2 常用兽药残留快检技术特点

Table 2 Characteristics of commonly used rapid detection techniques for veterinary drug residues

| 技术名称       | 特点                                                             |
|------------|----------------------------------------------------------------|
| 酶联免疫吸附技术   | 设备简便且易人工操作、检测结果快, 灵敏度稳定和定量准确度高, 能实现现场定量快速检测样品                  |
| 胶体金免疫层析技术  | 价格比较低、体积小, 可现场定性及半定量检测, 检测结果可靠, 重复性好                           |
| 化学发光免疫技术   | 检测范围宽、检测特异性程度比较高、操作与过程简单易学                                     |
| 生物芯片技术     | 高通量、高检测灵敏度                                                     |
| 表面增强拉曼光谱技术 | 快速检测、抗水干扰、光学灵敏度高                                               |
| 生物传感器技术    | 灵敏度高, 专一性强, 样品检出限低, 一般可达 ng 级别; 分析样品速度快, 一般在几秒内即可完成检测; 操作更简单便捷 |
| 微生物抑制分析技术  | 样品前处理简单、重现性好、成本低                                               |



romatographic assay, ICA)是由分子色谱层析技术和现代免疫诊断技术相结合而发展起来的一项快速检测技术。该方法具有操作简单、反应速度快、成本较低、高通量等优点<sup>[39-40]</sup>,其中胶体金技术已被广泛应用<sup>[41]</sup>。

胶体金免疫技术是指一种以胶体金颗粒为特异性标记物,基于抗原抗体特异性反应的快速检测方法,可以通过人工目测的方式判断试验结果的有效性<sup>[42]</sup>。其原理是利用化学还原法将氯金酸溶液制备成粒子直径从几纳米扩大至几十倍纳米半透明性胶体溶液,胶体溶液电荷一般带负电,能均匀稳定并迅速吸附蛋白质,且不需要改变蛋白质粒子的生物活性,并制成金标抗体或抗体蛋白,当这些特殊金标蛋白粒子迅速大量聚集载体时,使待检样品中相应的抗体或抗原在载体的特定部位发生特异性反应而显色。胶体金免疫层析条是一种快速、灵敏、准确的固相标记检测技术,具有价格低廉、操作简便、检测快速、特异性高等优点,有效解决了传统检测方法在医学、兽医、动植物病毒检测、农药残留检测等领域检测时间长、设备不便、专业性要求高的缺点。其免疫层析试纸条检测如图 2,利用这一特性制备的胶体金免疫层析试纸条被广泛应用,可现场定性和半定量检测,重复性好,可用于药物残留的快速初筛,适合临床及大规模样品检测<sup>[43]</sup>。

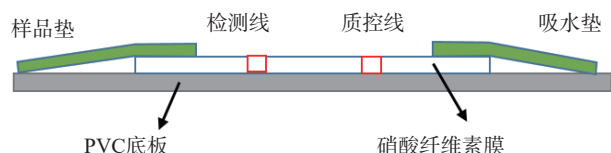


图 2 免疫层析试纸条检测示意图

Fig.2 Detection schematic diagram of immunochromatographic test strip

孙晓峥等<sup>[44]</sup>开发了一种能够检测氟喹诺酮类化合物及其它类抗生素的试纸条,检测了河北省的鸡肉样品 3414 份,所得样品平均阳性检出率约占 0.76%,有 10 种氟喹诺酮类抗生素残留检测出阳性,该试纸条可实现对氟喹诺酮类化合物的快速筛选。高素敏<sup>[45]</sup>建立了一种胶体金免疫层析新方法,用于检测鸡肌肉中的磺胺嘧啶,在 100 份鸡肉样品共检出 3 份阳性样品,采用高效液相色谱法进行了逐一复检,各项结果保持一致,该方法准确稳定。栗慧等<sup>[46]</sup>研制出的土霉素胶体金免疫层析试纸条,5~10 min 内即可得出检测结果,极大地缩短了现场样品的检测时间,加快了现场分析的效率,适合国内相关执法部门

对土霉素药物残留问题的现场检测。胶体金标记免疫层析技术作为一种新型的免疫学快速诊断和检测技术,由于成本低、检测时间短、操作简便等特点,适合基层和现场使用。从长远发展来看,胶体金试纸条作为一种快速筛查手段,对建立更敏感、更快捷的兽药检测方法将起到积极的促进作用,为畜禽产品中兽药残留的监测打下坚实的基础,该技术将在动物源性食品安全与质量控制方面发挥越来越重要的作用,实现其理想的价值。

虽然胶体金免疫层析技术具有检测准确、快速等优点,但其自身仍有一些方面不足而亟待改善。如简单快速的市售胶体金试纸只能进行定性或半定量检测,检测能力弱,实验结果假阴性<sup>[47]</sup>。面对此问题,Wang 等<sup>[41]</sup>建立了将试纸与便携式光热读卡器相结合的光热试纸测定法,实现了对 13 种兽药和农药的定量检测,具有优异的检测能力,有着较好的发展潜力及应用前景。

2.1.3 生物芯片技术 生物芯片(Biochip)技术根据抗原识别和特异性抗体结合反应的免疫学原理,采用荧光标记免疫竞争法测定样品中的兽药残留含量。该分析方法具有高通量、高灵敏度等特性。近几年,我国研究者在此特性方面又取得了一系列的技术进步,已经自行研发并成功应用了兽药残留分析的生物芯片技术平台<sup>[48]</sup>。生物芯片技术分别包括为生物基因芯片、蛋白质芯片、细胞芯片技术等<sup>[49]</sup>。其中蛋白质芯片检测结果灵敏度更高,满足欧盟和世界大多数国家及组织对蛋白质产品兽药残留检测要求。图 3 为蛋白质芯片技术检测步骤图,蛋白试剂盒还可以直接实现对各种食用动物如鸡肉、鸡肝等食品中的兽药残留检测,如磺胺类、链霉素、恩诺沙星以及氯霉素等快速检测。

生物芯片技术具有灵敏度高、特异性强、样品前处理程序简单,检测分析更为快速等一系列优点,还能同时对体内多种兽药进行连续分析,有效地节省了检测费用,缩短了整个检测过程的时间,提高了检测效率<sup>[50]</sup>。陈爱亮等<sup>[51]</sup>开发了一种晶芯兽药残留蛋白芯片检测系统,可在 3~5 h 内完成鸡肉和鸡肝中恩诺沙星、链霉素等兽药的快速检测。郭志红等<sup>[52]</sup>应用蛋白芯片技术建立了鸡肉和鸡肝中磺胺二甲基嘧啶、恩诺沙星、链霉素的高通量筛选方法,各药物在鸡肉和鸡肝中的回收率均在 80%~106% 之间,与色谱法作比较分析,结果表明蛋白质芯片检测前处理方法简单快速,结果可靠,可用于这两种组织中对应兽药的

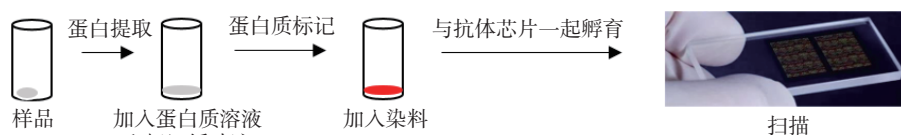


图 3 蛋白质芯片技术原理示意图

Fig.3 Protein chip technology principle diagram

残留检测。

博奥生物芯片公司开发了一个兽药残留蛋白芯片检测平台,通过此平台能够在几小时内完成肉食品中 10 种兽药残留的定量分析<sup>[53]</sup>,具有操作简单、结果准确、检测速度快等优点,可广泛应用于食品安全检测领域。

**2.1.4 化学发光免疫分析法** 化学发光免疫分析法 (Chemiluminescent immunoassay, CLIA) 分为化学发光酶免疫分析法和电化学发光免疫分析法,是在近 20 年来发展起来的另一种新型免疫技术,其原理图见图 4。该方法能将原来具有高灵敏度特点的传统化学发光分析法与具有高特异性的生物免疫荧光分析法有机结合起来,这种新型技术具有多种优点,如检测范围宽、检测特异性高、操作与过程简单易学等,对于提高免疫分析法的灵敏度方面有独特优势,并且它不存在放射性污染,是一种有潜力的实验室免疫学检测方法<sup>[54]</sup>。

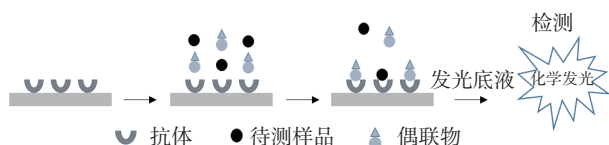


图4 CLIA 技术原理图

Fig.4 Technical schematic diagram of CLIA

吕月霞<sup>[55]</sup>建立了一种化学发光酶免疫分析检测鸡肉中的硝基咪唑类药物,试验回收率在 79%~106% 之间,该方法特异性强,灵敏度高。陶晓奇<sup>[56]</sup>建立了一种用于定量检测鸡肉样品中的氯霉素的化学发光免疫法,其检测限为 0.0010  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,回收率 87.6%~118.8%,还建立了鸡肉样品中氟苯尼考和氟苯尼考胺的化学发光免疫分析法,其检测限分别为 1.63 和 1.18  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,回收率在 70.3%~102.0% 范围内,该检测分析方法灵敏度高,检测限、回收率以及稳定性等指标均满足我国和欧盟兽药残留分析的要求。Tao 等<sup>[57]</sup>基于化学发光酶免疫分析建立了对鸡肉中氟苯尼考和氟苯尼考胺的检测方法,鸡肉中提取的氟苯尼考和氟苯尼考胺的检测限分别为 0.526 和 0.453  $\text{ng}/\text{mL}$ ,回收率为 71.8%~102% 和 70.3%~100%。化学发光免疫法在畜禽产品兽药残留检测中有良好的应用潜力,是一种优秀的快检方法。

## 2.2 生物传感器技术

生物传感器技术 (Biosensor) 是指传感器能够将生物分子体内分离的某些酶、组织、免疫系统、细胞凋亡等过程传导下的一些生化反应迅速转化为电、热或光信号,并同时通过这种信号的细微变化来检测各种目标化合物的智能设备<sup>[58]</sup>。如图 5 所示,其技术主要原理是先将一个抗原片段或一组抗体片段固定插入到适当的传感器上,利用其抗原-抗体反应的特异性和在抗原抗体片段上的标记物产生的信号放大等机制来实现检测<sup>[59]</sup>。抗原和抗体在结合过程中

会发生物理化学参数间的变化,这种变化实时通过传感器被转换和放大,从而提供了更高的检测灵敏度和高选择性。

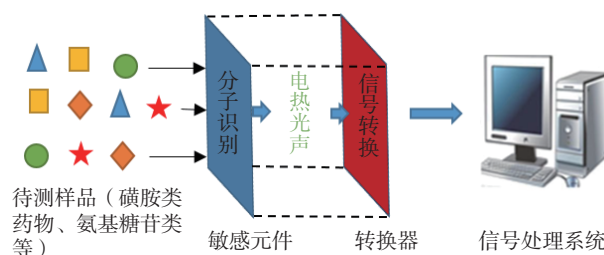


图5 生物传感器技术原理图

Fig.5 Technical schematic diagram of biosensor

生物传感器技术操作简单、可重复性好、易于现场快速检测,且检测成本低,在禽类食品安全检测方面有着广泛的应用前景。李孝君等<sup>[60]</sup>制备了一种高灵敏电流型青霉素免疫传感器,对鸡肉中残留的青霉素进行定量检测,该传感器对鸡肉中青霉素的最低检出限为 1.90  $\text{ng}/\text{g}$ ,可用于青霉素在实际鸡肉样品的检测。Chen 等<sup>[61]</sup>开发了一种基于荧光的复合生物传感器,用于检测鸡肉和鸡肝中残留的恩诺沙星,每个组织样品中平均回收率在 77%~99% 范围内。Karaseva 等<sup>[62]</sup>研制了一种基于电生聚合物的压电免疫传感器,用于检测鸡蛋中微量的氯霉素,使用半抗原-蛋白偶联物和单克隆抗体以竞争形式进行检测,检测限为 0.2  $\text{ng}/\text{mL}$ 。Stevenson 等<sup>[63]</sup>开发设计了一种直接检测肉类样品中的头孢噻呋残留的新型电化学生物传感器方法,在 15 min 内自动完成检测,在火鸡肉样品分析中的最高检测限为约 10  $\text{ng}/\text{mL}$ 。基于某种特异性反应的生物传感器,保持了生物活性物质的特异性强、灵敏度高的优势,并且极大地简化了禽肉中兽药残留分析过程,提升了检测通量;传感器体积小,便于携带,有利于野外作业和现场实时检测,这些特征都使生物传感器技术在兽药检测领域有了较为深入的研究。未来,食品中兽药残留生物传感检测技术的研究仍将集中在纳米技术的应用、换能检测方法的创新和改进,多通路自动化检测方案的实现等方面。

## 2.3 表面增强拉曼光谱技术

随着光电技术的迅速发展,拉曼检测技术也有长足的进步,结合纳米技术,传统的拉曼检测技术已逐步开始向表面增强拉曼光谱技术领域迈进。如图 6 所示,表面增强拉曼光谱技术 (Surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS) 的工作基本原理是将一些表面粗糙金属经过特殊处理后作为活性基底,受测的物质分子或官能团直接地吸附到该金属表面,使得被测的物质分子或者官能团所发射来的拉曼散射信号提高  $10^5 \sim 10^6$  倍<sup>[64]</sup>。

表面增强拉曼光谱在食品安全领域具有很强的应用潜力和实用价值,因为它具有快速检测、抗水干扰以及提供目标指纹结构信息的能力等技术优势<sup>[65-66]</sup>。彭义杰<sup>[67]</sup>基于纳米金胶的 SERS 快速检测



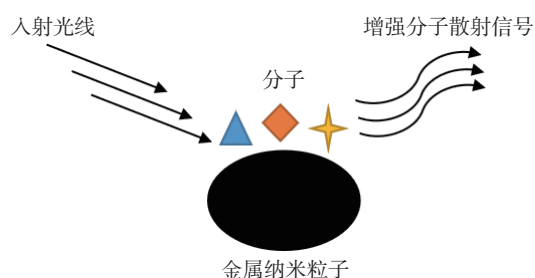


图 6 表面增强拉曼光谱技术原理图

Fig.6 Technical schematic diagram of SERS

技术分别对鸭肉中萘夫西林、阿莫西林的残留进行初步定性检测与定量分析。研究表明,药物的最低检测限为 0.2 mg/L,平均回收率为 90%~139%,建立快速定量检测方法基本上是稳定可行且有效的,能够实现快速准确测定鸭肉中的青霉素类的残留,可为 SERS 快速检测技术在定量检测禽组织中的抗生素残留的实际应用提供研究基础。王婷<sup>[68]</sup>采用 SERS 技术进行鸡肉和鸭肉中的强力霉素、泰乐菌素、氧氟沙星和诺氟沙星抗生素残留进行检测,在鸡肉样本建立了 PCA-LDA 鉴别模型,鸭肉样本建立了 PCA-SVM 鉴别模型,经过预测集验证两个模型分类准确率,其准确率达到 93% 以上。以上结果说明了利用 SERS 技术结合多种化学计量学方法可以快速、准确地鉴别出禽肉中强力霉素、泰乐菌素、氧氟沙星和诺氟沙星抗生素残留。该方法具有很好的效果,已被应用于禽组织中相关药物残留快速检测,具有良好的应用前景。

郭红青<sup>[69]</sup>应用表面增强拉曼光谱技术对鸡肉、鸭肉中残留的两种硝基呋喃类代谢物进行快速检测研究,所得鸡肉、鸭肉中硝基呋喃及代谢物回收率为 75%~122%,说明应用表面增强拉曼光谱技术可以有效地对禽组织中残留的两种硝基呋喃类代谢物进行检测。Muhammad 等<sup>[70]</sup>制备 SiO<sub>2</sub>@Au 核壳纳米颗粒基底,可用于鸡蛋中氟虫腈的简便和无标记快速检测,实现了基于 SERS 的鸡蛋中氟虫腈的检测,为快速检测鸡蛋或其他食品中的氟虫腈污染提供了一种实用的解决方案。

## 2.4 微生物抑制分析技术

微生物活性抑制测定法是指根据一种药物本身能够直接抑制的特异微生物数量来对生物样品中出现的药物残留进行定性评价分析。培养皿法和试管法是微生物抑制方法的两个子类型。与培养皿法相比,试管法更适用于动物食品中抗菌药物残留的高通量筛选,因为它既不耗时也不费力。微生物显色法检测步骤如图 7 所示,当样品中没有抗生素残留或残留量低于检出限时,指示菌快速生长产酸,使检测液 pH 下降,指示剂变色。反之,则会抑制指示菌生长,使得检测液 pH 基本不变,指示剂不会变色。微生物检测方法成本低、敏感性和精确度好,适用于大规模样品的筛选。目前国内已广泛地将其作为一种快速初筛兽药残留检测方法投入应用<sup>[71]</sup>。

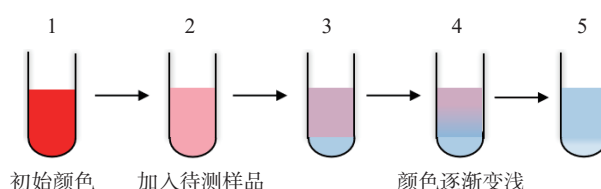


图 7 微生物显色法检测步骤图

Fig.7 Microbial color method detection steps

Wu 等<sup>[72]</sup>建立了一种可用于高效快速筛选鸡蛋制品中的四环素类、磺胺类、大环内酯类、和喹诺酮类等抗生素的广谱微生物抑制方法。该方法对鸡蛋中各种抗生素的检测限均低于欧盟的最大残留限。此外,该试剂盒的假阳性率和假阴性率均为 0%,所以该方法对样品中目标化合物残留的筛查是可靠的。杨修镇等<sup>[73]</sup>建立了一种兽药散剂中氟喹诺酮类、四环素类、大环内酯类、磺胺类的微生物管碟快速检测方法,其中的检测限范围在 1.5~3.5 mg/g,该方法简单易行,快速可靠,满足大多数兽药中非法添加抗菌药物的检测需求。王志强等<sup>[74]</sup>建立了一种微生物纸片法快速检测鸡肉中抗生素残留的方法,该方法的最低检出限均达到我国农业部第 235 号文件《动物源性食品中兽药最高残留限量》的限量要求。沈翠香<sup>[75]</sup>采用微生物抑制法对鸡肉中恩诺沙星进行检测,检测限为 0.015 μg/mL,回收率 80% 以上,通过液相色谱法验证 40 份可疑阳性样品鸡肉,其假阳性率为 5%,检测结果基本一致,符合我国农业部、欧盟等规定的残留分析方法的要求。刘兴泉等<sup>[76]</sup>采用微板检测方法测定鸡蛋中土霉素、四环素、金霉素,以嗜热脂肪芽孢杆菌为检测菌,在一个板上进行多个样品检测,可以有效检测出兽药残留,并且每个孔的检测成本极低,是一种简单快速的微生物检测方法,适用于基层推广使用。其未来的发展方向主要是:克服现有分子生物学方法的缺点,绘制各种菌落图谱,开发在线检测软件,能定量测定微生物细胞特征和性能,简化采集、培养等程序,提高检测效率。使兽药残留的检测方法向自动化、快速化、特异性强、重复性好,试验条件标准化及检测的高精度和高灵敏度发展。

## 3 小结

目前,酶联免疫吸附法在兽药残留的快速检测中发展得相对成熟,是国内外动物源性食品中兽药残留快速检测技术的重要方法。酶联免疫吸附法与传统仪器方法相比最显著的优势是其高灵敏度和特异性、样品制备简单、高通量,因此每个样品的成本低。虽然胶体金免疫技术可以在几分钟内得到检测结果,但又因这种检测方法精度限制得过高,容易导致检测出现假阳性和假阴性结果,因此还需要借助实验室更加精密的仪器进行定性和定量检测。化学发光免疫测定法在家禽兽药检测中展现出高特异性和高灵敏度,未来可能扩大该方法在临床诊断、食品安全和环境监测中的应用,特别是在同时分析多种标

志物的情况下。生物芯片技术作为生物技术和芯片技术的整合,显示出优异的高通量、快速响应和便携性,在家禽兽药检测中已应用广泛。除了以上快检技术以外,越来越多的关注集中在使用便携式和自动化仪器(如微流体设备和智能手机)实施创新的生物传感方法,以赋予生物传感器更实用、集成、自动化和便携的功能。它在灵敏度、特异性和准确性方面优于传统实验室检测,并在快速响应和潜在便携性方面显示出优势,是最适用于现场的快速检测方法之一。此外,随着信息技术的发展,结合大数据分析和人工智能的生物传感器很可能成为一种新趋势,以更有效地监测和预测整个食品供应链中的药物污染,确保食品安全。SERS在兽药残留的检测中表现出优异的灵敏度、简单的采样和快速的测试速度。通过简单的设计,SERS基底具有灵活性、适应性强、成本效益高、适合大规模生产等优点。随着纳米技术的发展和仪器的改进,SERS可以为兽药残留物分析提供一种常规且成本效益高的检测方法。微生物抑制法检测食品中兽药残留操作简单、快速灵敏、成本低廉,适合养殖场使用,作为兽药筛检方法将成为我国未来检测发展的趋势。

虽然与国内外大型实验室仪器检测法相比,上述这些快速检测方法相对耗时要短,成本低,但由于我国长期以来缺乏统一快速检测技术标准和试剂耗材的生产标准,市场上常见的快检产品质量参差不齐。厂商应根据食品药品监管总局发布的《食品快速检测方法评价技术规范》的相关要求对食品中农兽药残留、食品添加剂、污染物质等快速检测方法及相关产品技术进行评估,同时完善国内标准化的快速检测产品的审核程序,有利于我国规范快速检测产品市场,更好地服务于食品安全监督,确保食品安全和公众的生命健康。

## 4 展望

当前,兽药滥用问题严重,残留物超标甚至是多倍超标现象屡见不鲜。传统的小规模、检测周期长的检测技术已经无法满足当前的需求,要从定性和定量两方面出发,开发出快速、便捷、准确且能短时间内出具较为准确检测结果的技术已成为未来的发展趋势,这也必然是食品安全快速检测的发展方向。

随着科技的进步和社会经济的快速发展以及学科交叉的日益紧密,兽药残留快速检测技术也越来越趋于高通量、便携性和智能化。可以设计和获得具有广泛特异性和对多种目标的高亲和力的识别元件,同时新型便携式仪器的设计和新型功能材料的合成有助于促进具有更多目标分析物和更高灵敏度的新检测方法的发展。对于兽药残留快速检测,可以加强试剂原材料的研发,如核酸适配体、亲和体、基因工程抗体等新型识别材料。大力发展生物传感器、抗体芯片等新型信号输出技术和免疫亲和层析柱、其他基于石墨烯、碳纳米管、超分子材料等样品前处理

技术。另一方面,提高设备研发水平,优化仪器效能,结合现代网络及人工智能技术,实现检测设备的互联互通。同时检测的对象与数据也逐渐扩大,将重点放在不同类型多种药物残留同时分析检测,并通过不同技术的相互融合来提高技术的灵敏度和准确性,确保检测效率,将手机作为可视化终端,提高产品的便捷性,降低检测成本,建立更完善的检测体系,为现阶段的食物安全提供强有力的保障。

## 参考文献

- [1] 赵书河. 浅谈禽类产品中兽药残留的危害[J]. 畜牧兽医科技信息, 2022(2): 177-178. [ZHAO S H. Harm of veterinary drug residues in poultry products[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2022(2): 177-178.]
- [2] 丁健, 胡艳, 邵丹. 抗生素类生长促进剂对畜禽肠道屏障功能的调节研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(12): 47-52. [DING J, HU Y, SHAO D. Advance in the regulation of antibiotic growth promoters on intestinal barrier function of livestock[J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2019, 55(12): 47-52.]
- [3] SOARES V M, PEREIRA J G, BARRETO F, et al. Residues of veterinary drugs in animal products commercialized in the border region of brazil, argentina, and uruguay[J]. Journal of Food Protection, 2022, 85(6): 980-986.
- [4] MUJAZ K, RIAZ M, AKHTAR S, et al. Antibiotic residues in chicken meat: Global prevalence, threats, and decontamination strategies: A review[J]. Journal of Food Protection, 2018, 81(4): 619-627.
- [5] XIE H, YANG J, FENG S, et al. Simultaneous quantitative determination of sanguinarine, chelerythrine, dihydrosanguinarine and dihydrochelerythrine in chicken by HPLC-MS/MS method and its applications to drug residue and pharmacokinetic study[J]. Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci, 2015, 985: 124-30.
- [6] WEI L, XUE X, WU C, et al. Determination of ten aminoglycoside residues in eggs by mixed-mode ion exchange liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Se Pu, 2021, 39(12): 1374-1381.
- [7] WANG B, LIU J, ZHAO X, et al. Determination of eight coccidiostats in eggs by liquid-liquid extraction-solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Molecules, 2020, 25(4): 987-995.
- [8] 张培杨, 王旭堂, 刁志祥, 等. 超高效液相色谱荧光法检测猪肉中甲砒霉素残留[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2019, 40(4): 5. [ZHANG P Y, WANG X T, DIAO Z X, et al. Determination of thiamphenicol residues in pork by ultra performance liquid chromatography with fluorescence detection[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2019, 40(4): 5.]
- [9] 丁丽军, 沈建新, 陈长宽, 等. 气相色谱-串联质谱法检测猪肉中大观霉素和林可霉素的残留量[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2019, 40(6): 93-99. [DING L J, SHEN J X, CHEN C K, et al. Determination of spectinomycin and lincomycin residues in pork by gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2019, 40(6): 93-99.]
- [10] YU W, ZHANG T, MA M, et al. Highly sensitive visual detection of amantadine residues in poultry at the ppb level: A colorimetric immunoassay based on a Fenton reaction and gold nanoparticles aggregation[J]. Analytica Chimica Acta, 2018, 1027: 130-136.



- [11] PATEL T, MARMULAK T, GEHRING R, et al. Drug residues in poultry meat: A literature review of commonly used veterinary antibacterials and anthelmintics used in poultry[J]. *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics*, 2018, 41(6): 761-789.
- [12] 莫迎, 盘正华, 蒋湘, 等. 多壁碳纳米管 QuEChERS 结合超高效液相色谱-串联质谱法测定鸡蛋中兽药多残留[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(16): 5443-5452. [MO Y, PAN Z H, JIANG X, et al. Determination of veterinary drug residues in eggs by multiwalled carbon nanotube quenchers combined with ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(16): 5443-5452.]
- [13] 郑建玲. 中国食品安全发展报告(2019): 我国食品安全面临五类风险挑战[J]. *中国食品*, 2020(3): 160-160. [ZHENG J L. China food safety development report (2019): China's food safety faces five risk challenges[J]. *China Food*, 2020(3): 160-160.]
- [14] 国家卫生健康委员会. GB 31650-2019 食品安全国家标准食品中兽药最大残留限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. [National Health Commission of the People's Republic of China. GB 31650-2019 National food safety standard maximum residue limits for veterinary drugs in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.]
- [15] 江苏省市场监督管理局. 省市场监管局发布 2021 年度产品质量、食品安全抽检情况[OL/J]. (2022.3.10) [2022.11.2]. [http://scjgj.jiangsu.gov.cn/art/2022/3/10/art\\_70154\\_10373830.html](http://scjgj.jiangsu.gov.cn/art/2022/3/10/art_70154_10373830.html). [Jiangsu Market Supervision and Administration Bureau. Provincial market supervision bureau issued 2021 annual product quality, food safety sampling[OL/J]. (2022.3.10) [2022.11.2]. [http://scjgj.jiangsu.gov.cn/art/2022/3/10/art\\_70154\\_10373830.html](http://scjgj.jiangsu.gov.cn/art/2022/3/10/art_70154_10373830.html).]
- [16] 安徽省市场监督管理局. 安徽省市场监督管理局关于 2 批次不合格食品的公告(第 9 期)[OL/J]. (2019.3.11) [2022.11.2]. <http://amr.ah.gov.cn/public/5248926/116998942.html>. [Anhui Market Supervision and Administration Bureau. Notice of Anhui Province market supervision and management bureau on the second batch of unqualified food (ninth)[OL/J]. (2019.3.11) [2022.11.2]. <http://amr.ah.gov.cn/public/5248926/116998942.html>.]
- [17] 洪茜. 基于表面增强拉曼光谱的鸭肉中大环内酯类抗生素残留检测研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015. [HONG Q. Study on detection of macrolide antibiotics residue in duck meat based on SERS[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015.]
- [18] 苏霞, 王绪根, 李云, 等. 畜禽产品中四环素类抗生素残留检测方法研究进展[J]. *今日畜牧兽医*, 2022, 38(7): 8-9. [SU X, WANG X G, LI Y, et al. Research progress on detection methods of tetracycline antibiotics residues in livestock and poultry products[J]. *Today Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2022, 38(7): 8-9.]
- [19] 秦立得, 张小雨, 赵思俊, 等. 畜禽养殖业中磺胺类药物对农田土壤的影响及降解措施研究进展[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2022(20): 25-30, 35. [QIN L D, ZHANG X Y, ZHAO S J, et al. Action mechanism of acidifier and its application in healthy livestock and poultry breeding[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022(20): 25-30, 35.]
- [20] 冯腾垒, 宋瑞, 高景报, 等. 畜禽产品中氟喹诺酮类药物残留检测进展[J]. *今日畜牧兽医*, 2022, 38(2): 3-4. [FENG T L, SONG R, GAO J B, et al. Progress in the detection of fluoroquinolones residues in livestock and poultry products[J]. *Today Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2022, 38(2): 3-4.]
- [21] 龚兰, 赵航, 栾枫婷, 等. 改进的 PRiME HLB 法联合高效液相色谱-串联质谱法快速测定鸡肉中 37 种兽药残留[J]. *农产品质量与安全*, 2020(6): 54-62, 68. [GONG L, ZHAO H, LUAN F T, et al. Rapid determination of 37 multi-residue veterinary drugs in chicken by modified PRiME HLB combined with liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2020(6): 54-62, 68.]
- [22] 梁飞燕, 曾坚, 韦植元, 等. 食品中氨基糖苷类残留检测技术难点及解决对策研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(8): 3258-3265. [LIANG F Y, ZENG J, WEI Z Y, et al. Research progress on technical difficulties and countermeasures of detection of aminoglycoside residues in food[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(8): 3258-3265.]
- [23] 刘得贵, 张应龙, 杜国辉, 等. 动物性产品中硝基咪唑类药物残留检测研究进展[J]. *山东畜牧兽医*, 2020, 41(3): 68-71. [LIU D G, ZHANG Y L, DU G H, et al. Research progress in the detection of nitroimidazole drug residues in animal products[J]. *Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2020, 41(3): 68-71.]
- [24] 呼念念. 鸡肉中硝基咪唑类兽药残留检测质量控制基体标准物质的研制与应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021. [HU N N. Development of matrix reference material for quality control in determination of nitrofurantoin veterinary drug residues in chicken[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2021.]
- [25] 熊雯, 易路遥, 吉伟佳, 等. 食品中金刚烷胺类化合物检测方法的研究[J]. *食品安全导刊*, 2019(27): 178-181. [XIONG W, YI L Y, JI W J, et al. Study on the detection method of amantadine compounds in food[J]. *China Food Safety Magazine*, 2019(27): 178-181.]
- [26] O'NEILL J. Tackling drug-resistant infections globally: Final report and recommendations[M]. London England: Wellcome Trust, 2016.
- [27] VAN BOECKEL T P, BROWER C, GILBERT M, et al. Global trends in anti-microbial use in food animals[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(18): 5649-5654.
- [28] 高锋, 李欣南, 韩鹄竹, 等. 动物源细菌耐药性的形成、影响、现状及建议[J]. *饲料博览*, 2021(12): 7-12, 18. [GAO D, LI X N, HAN J Z, et al. Formation, influence, current, situation, and suggestion of antibiotic resistance in zoonotic bacteria[J]. *Feed Review*, 2021(12): 7-12, 18.]
- [29] 焦凤琴. 畜禽产品兽药残留危害现状与分析[J]. *甘肃畜牧兽医*, 2018, 48(6): 34-38. [JIAO F Q. Current situation and analysis of veterinary drug residue harm in livestock and poultry products[J]. *Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2018, 48(6): 34-38.]
- [30] FALOWO A B, AKIMOLADUN O F. Veterinary drug residues in meat and meat products: Occurrence, detection and implications[M]. *Veterinary Medicine and Pharmaceuticals*, 2019.
- [31] POMBA C, RANTALA M, GREKO C, et al. Public health risk of antimicrobial resistance transfer from companion animals[J]. *Antimicrob Chemother*, 2017, 72(4): 957-968.
- [32] 周迎春, 刘少博, 华向美. 我国动物源性食品中兽药残留的危害及现状[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(6): 18-20. [ZHOU Y C, LIU S B, HUA X M, et al. The hazard and status quo of veterinary drug residues in animal derived food in China[J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(6): 18-20.]
- [33] 陈爱亮. 食品安全快速检测技术现状及发展趋势[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(2): 411-414. [CHEN A L. Advancements in rapid-testing technology in food safety[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(2): 411-414.]
- [34] 吕珍珍, 蒋小玲, 刘金钊, 等. 免疫分析技术在兽药残留检测



- 中的应用[J].农产品质量与安全,2012(1):76-79. [LÜ Z Z, JIANG X L, LIU J C, et al. Application of immunoassay technology in detection of veterinary drug residues[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2012(1): 76-79.]
- [35] 杨建中. 用酶联免疫吸附法测定鸡肉、鸭肉中金刚烷胺药物残留[J]. 新疆畜牧业, 2021, 36(4): 19-22. [YANG J Z. Determination of amantadine residues in chicken and duck meat by enzyme-linked immunosorbent assay[J]. Xinjiang Animal Husbandry, 2021, 36(4): 19-22.]
- [36] 李建鲲, 徐泽权, 刘晓蓉, 等. 酶联免疫吸附法测定鸡蛋中氟喹诺酮类药物效果探讨[J]. 新疆畜牧业, 2018, 33(6): 22-24. [LI J K, XU Z Q, LIU X R, et al. Effect of enzyme-linked immunosorbent assay for determination of fluoroquinolones in egg[J]. Xinjiang Animal Husbandry, 2018, 33(6): 22-24.]
- [37] HE J, ZHENG Y, CHEN X, et al. Development of an enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of mebendazole in chicken and mutton[J]. *Anal Methods*, 2021, 13(14): 1740-1746.
- [38] 郑丽丽. 呋喃它酮和呋喃妥因酶联免疫检测方法的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2013. [ZHENG L L. Study of enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of furaltadone and furantoin[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2013.]
- [39] WU H, XU X, LIU L, et al. Gold-based immunochromatographic assay strip for the detection of quinclorac in foods[J]. *Analyst*, 2021, 146(22): 6831-6839.
- [40] LIU J, XU X, WU A, et al. An immunochromatographic assay for the rapid detection of oxadixyl in cucumber, tomato and wine samples[J]. *Food Chemistry*, 2022, 379: 132131.
- [41] WANG Y, WANG T, WANG M, et al. Photothermal card reader assay using the commercial colloidal gold test strip for the rapid quantitative detection of food hazards[J]. *Mikrochimica Acta*, 2022, 189(3): 112.
- [42] ZHANG B, NAN T G, XIN J, et al. Development of a colloidal gold-based lateral flow dipstick immunoassay for rapid detection of chlorogenic acid and luteoloside in *Flos Lonicerae Japonicae*[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2019, 170: 83-88.
- [43] 徐颖. 胶体金免疫层析技术在食品检测中的应用研究[J]. 现代食品, 2022, 28(2): 69-71. [XU Y. Application of colloidal gold immunochromatography in food detection[J]. Modern Food, 2022, 28(2): 69-71.]
- [44] 孙晓峰, 任柯潼, 胡叶军, 等. 肉鸡组织中氟喹诺酮类抗生素快速检测的胶体金技术研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018(19): 208-213. [SUN X Z, REN K T, HU Y J, et al. Study on colloidal gold technology for rapid detection of fluoroquinolone antibiotics in broiler tissues[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2018(19): 208-213.]
- [45] 高素敏. 胶体金免疫层析法在畜禽产品兽药残留检测中的应用[J]. 当代畜牧, 2017(35): 63-64. [GAO S M. Application of colloidal gold immunochromatographic assay in detection of veterinary drug residues in livestock and poultry products[J]. Contemporary Animal Husbandry, 2017(35): 63-64.]
- [46] 栗慧, 于苗, 刘培, 等. 胶体金免疫层析法快速检测动物源性食品中土霉素残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(5): 1524-1530. [LI H, YU M, LIU P, et al. Rapid detection of oxytetracycline residues in animal derived foods by colloidal gold immunochromatography[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(5): 1524-1530.]
- [47] 闫灵芝. 免疫层析试纸条技术在食品安全领域的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 397-404. [YAN L Z. Research progress of immunochromatographic strip technique in food safety[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 397-404.]
- [48] LIU J, JASIM I, ABDULLAH A, et al. An integrated impedance biosensor platform for detection of pathogens in poultry products[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16109.
- [49] BARRASSO R, BONERBA E, SAVARINO A E, et al. Simultaneous quantitative detection of six families of antibiotics in honey using a biochip multi-array technology[J]. *Journal of Veterinary Science*, 2018, 6(1): 1-10.
- [50] XIAO J, WEI N, WU S, et al. The Simultaneous detection of multiple antibiotics in milk and pork based on an antibody chip biosensor[J]. *Biosensors (Basel)*, 2022, 12(8): 578-586.
- [51] 陈爱亮, 王国青, 王艳, 等. 兽药残留蛋白芯片检测系统的研制和应用[J]. 中国医疗器械信息, 2008(8): 33-36. [CHEN A L, WANG G Q, WANG Y, et al. Development and application of protein chip detection system for veterinary drug residues[J]. China Medical Device Information, 2008(8): 33-36.]
- [52] 郭志红, 王国青, 王艳. 蛋白芯片检测鸡猪组织中磺胺二甲嘧啶等4种兽药的残留[J]. 中国兽药杂志, 2010, 44(10): 42-45. [GUO Z H, WANG G Q, WANG Y, et al. Residue detection for sulfadimidine and other 3 veterinary drugs by protein chip in pork and chicken tissues[J]. *Chinese Journal of Veterinary Drug*, 2010, 44(10): 42-45.]
- [53] 唐先明, 何志一, 刚宏林. 蛋白质芯片技术在肉制品分析检测中的应用[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(11): 120-122. [TANG X M, HE Z Y, GANG H L. Application of protein chips technology in meat products safety detection[J]. Food Research and Development, 2014, 35(11): 120-122.]
- [54] 张燕, 杨金易, 曾道平, 等. 化学发光免疫分析技术及其在食品安全检测中的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(5): 1421-1427. [ZHANG Y, YANG J Y, ZENG D P, et al. Research progress on chemiluminescence immunoassay technique and its application in food safety detection[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2013, 4(5): 1421-1427.]
- [55] 吕月霞. 食品中呋喃它酮代谢物酶免疫分析方法的研究[D]. 太原: 山西大学, 2015. [LÜ Y X. Study of enzyme immunoassay for detection of furaltadone metabolite in food[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2015.]
- [56] 陶晓奇. 动物性食品中酰胺醇类残留化学发光检测技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. [TAO X Q. Chemiluminescent immunoassays for determination of amphenicol residues in animal-derived food[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.]
- [57] TAO X, JIANG H, YU X, et al. Development and validation of a chemiluminescent ELISA for simultaneous determination of florfenicol and its metabolite florfenicol amine in chicken muscle[J]. *Analytical Methods*, 2012, 4(12): 4083-4090.
- [58] LV M, LIU Y, GRNG J, et al. Engineering nanomaterials-based biosensors for food safety detection[J]. *Biosens Bioelectron*, 2018, 106: 122-128.
- [59] 窦博鑫, 张云亮, 王艳, 等. 生物传感器在食品检测领域的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(3): 845-851. [DOU B X, ZHANG Y L, WANG Y, et al. Advances in the application of biosensors in the field of food detection[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(3): 845-851.]
- [60] 李孝君, 李兰, 马洁, 等. 电化学免疫法测定鸡肉组织中青霉素[J]. 应用化学, 2009, 26(6): 716-720. [LI X J, LI L, MA J, et al. Determination of residual penicillin in chicken muscle by an elec-

- trochemical immunosensor[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2009, 26(6): 716–720. ]
- [ 61 ] CHEN A, WANG G, QIN C, et al. Development of an antibody hapten-chip system for detecting the residues of multiple antibiotic drugs[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2010, 54(4): 953–960.
- [ 62 ] KARASEVA N A, ERMOLAEVA T N. A piezoelectric immunosensor for chloramphenicol detection in food[J]. *Talanta*, 2012, 93: 44–48.
- [ 63 ] STEVENSON H S, SHETTY S S, THOMAS N J, et al. Ultrasensitive and rapid-response sensor for the electrochemical detection of antibiotic residues within meat samples[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(4): 6324–6330.
- [ 64 ] LIANG J F, PENG C, LI P, et al. A review of detection of antibiotic residues in food by surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2021, 81(80): 1–16.
- [ 65 ] ZONG C, XU M, XU L J, et al. Surface-enhanced Raman spectroscopy for bioanalysis: Reliability and challenges[J]. *Chemical Reviews*, 2018, 118(10): 4946–4980.
- [ 66 ] 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(7): 108019.
- [ 67 ] 彭义杰. 应用表面增强拉曼光谱检测鸭肉中青霉素类抗生素残留的研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016. [ PENG Y J. Study on detection of penicillin residues using SERS in duck meat[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2016. ]
- [ 68 ] 王婷. 基于化学计量学法的禽肉中典型抗生素残留的 SERS 快速鉴别研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021. [ WANG T. Study on SERS rapid identification of typical antibiotic residues in poultry meat based on stoichiometry[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021. ]
- [ 69 ] 郭红青. 基于表面增强拉曼光谱的禽肉中硝基呋喃类代谢物残留的快速检测研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018. [ GUO H Q. Study on rapid detection of nitrofur metabolites residues in poultry meat based on SERS[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018. ]
- [ 70 ] MUHAMMAD M, YAO G, ZHONG J, et al. A facile and label-free SERS approach for inspection of fipronil in chicken eggs using SiO<sub>2</sub>@Au core/shell nanoparticles[J]. *Talanta*, 2019, 207: 120324.
- [ 71 ] 马青超. 鸡蛋中兽药残留的检测方法及防控措施[J]. *现代畜牧科技*, 2017(8): 153–153. [ MA Q C. Detection methods and prevention and control measures of veterinary drug residues in eggs[J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2017(8): 153–153. ]
- [ 72 ] WU Q, PENG D P, LIU Q Y, et al. A novel microbiological method in microtiter plates for screening seven kinds of widely used antibiotics residues in milk, chicken egg and honey[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 436.
- [ 73 ] 杨修镇, 李有志, 徐思民, 等. 微生物管碟法快速检测中兽药散剂中非法添加抗菌药物[J]. *中兽医医药杂志*, 2020, 39(5): 49–52. [ YANG X Z, LI Y Z, XU E M, et al. Determination of antibacterial drugs illegally adulterated in Chinese veterinary medicine powder by cylinder-plate method[J]. *Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine*, 2020, 39(5): 49–52. ]
- [ 74 ] 王志强, 胡国媛, 李志勇, 等. 微生物抑制法快速检测动物源性食品多种抗生素残留[J]. *中国卫生检验杂志*, 2008, 18(9): 1732–1734. [ WANG Z Q, HU G Y, LI Z Y, et al. Rapid determination of antibiotics residues in animal derived food by microbial inhibition method[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2008, 18(9): 1732–1734. ]
- [ 75 ] 沈翠香. 微生物抑制法检测动物性食品中喹诺酮类药物残留的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010. [ SHEN C X. Residue analysis of quinolones drugs in animal derived food by microbiological inhibition assay[D]. Wulumuqi: Xinjiang Agricultural University, 2010. ]
- [ 76 ] 刘兴泉, 冯震, 姚蕾, 等. 采用高通量微生物法检测四种抗生素在鸡蛋中的残留[J]. *现代食品科技*, 2011, 27(4): 465–467, 460. [ LIU X Q, FENG Z, YAO L, et al. Analysis of tetracycline and neomycin antibiotic residues in eggs using throughout microbial assay[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2011, 27(4): 465–467, 460. ]