

动物源性食品中氯霉素类药物残留 分析方法研究进展

Research progress in the detection technology of chloramphenicol residues in animal derived food

袁 喆^{1,2,3} 彭茂民^{1,2} 刘 丽^{1,2} 彭西甜^{1,2} 夏 虹^{1,2}

YUAN Zhe^{1,2,3} PENG Maomin^{1,2} LIU Li^{1,2} PENG Xitian^{1,2} XIA Hong^{1,2}

(1. 湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 湖北 武汉 430064; 2. 农产品营养品质与
安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430064; 3. 长江大学, 湖北 荆州 434023)

(1. Research Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Hubei Academy of
Agricultural Science, Wuhan, Hubei 430064, China; 2. Hubei Key Laboratory of Nutritional Quality and
Safety of Agro products, Wuhan, Hubei 430064, China; 3. Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

摘要:氯霉素类药物是一种常见的杀菌剂和高效广谱的
抗生素,被广泛应用于水产和畜禽养殖领域。为保障人
类健康,动物源性食品中氯霉素类药物残留的检测日益
受到重视。文章介绍了氯霉素类药物的性质、动物源性
食品中氯霉素类药物的限量标准和危害,阐述了常用的
氯霉素类药物检测方法,总结了不同检测方法的优缺点,
探讨了如何提高氯霉素类药物检测效率和精密度的方
法,并展望了开发新兴先进的检测技术和分析方法的前
景。

关键词:氯霉素类; 分析方法; 动物源性食品; 食品安全;
检测

Abstract: Chloramphenicol is a widely used bactericide and highly
effective antibiotic in aquaculture and livestock breeding. To
protect human health, detecting chloramphenicol residues in
animal-derived food products has become increasingly important.
This review introduces the properties of chloramphenicol, the
limit standards, and the hazards of residual chloramphenicol in
animal-derived food products. Furthermore, it describes

commonly used chloramphenicol detection methods. In addition,
the review thoroughly analyzes and summarizes the advantages
and disadvantages of different detection methods, outlining
methods to improve the efficiency and precision of
chloramphenicol detection to ensure the quality and safety of
animal-derived food products. Finally, the prospects for
developing advanced detection techniques and analytical methods
are prospected.

Keywords: chloram phenicols; analytical method; animal derived
foods; food safety; detection

氯霉素类药物(chloram phericols, CAPs)是一种杀菌
剂,也是高效广谱的抗生素,被广泛应用于动物疾病治疗
中。但氯霉素类药物滥用会导致动物源性食品中药物残
留超标,对人体健康可能造成潜在危害,例如,可以引起
过敏反应,呼吸系统损伤,肝、肾等器官损伤,甚至导致癌
症等严重健康问题。此外,动物养殖业和食品行业的生
产实践往往未能防止氯霉素类药物残留的发生,这给公
众的健康带来潜在的风险,同时也加剧了食品行业的信
誉问题。因此,通过建立科学、有效的检测方法和限量标
准,保证食品中氯霉素类药物残留的安全水平十分重要。
文章拟综述近年来有关氯霉素类药物的研究,对氯霉素
类药物种类、限量标准及其对机体健康的相关影响进行
论述,从现有检测技术出发阐述动物源性食品中氯霉素
类药物的检测方法,并总结各检测技术的优缺点,讨论如
何提高氯霉素类药物检测精度和效率的措施,以期为开
辟动物源性食品中氯霉素类药物检测新方法提供参考。

基金项目:湖北省自然科学基金项目(编号:2021CFB387);武汉
市知识创新专项项目(编号:2022020801020345)

作者简介:袁喆,女,湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术
研究所研究实习生,学士。

通信作者:夏虹(1969—),女,湖北省农业科学院农业质量标准与
检测技术研究所研究员,学士。

E-mail: 870189737@qq.com

刘丽(1988—),女,湖北省农业科学院农业质量标准与
检测技术研究所副研究员,博士。

E-mail: liuli@hbaas.ac.cn

收稿日期:2023-06-07 **改回日期:**2023-11-14

1 氯霉素类药物性质

1.1 氯霉素类药物种类和理化性质

氯霉素类药物主要包括氯霉素、甲矾霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺等,其结构式如图 1 所示。其中,氯霉素为白色或无色至微带黄绿色,针状或片状结晶,易溶于甲醇、乙醇、丙酮、丙二醇及乙酸乙酯,其分子式为 $C_{11}H_{12}Cl_2N_2O_5$;甲矾霉素为白色或类白色结晶性粉末或晶体,易溶于二甲基甲酰胺中,是氯霉素的同系结构物,以甲磺酰基(H_3C-SO_2)替代了氯霉素结构中的硝基($-NO_2$);氟苯尼考为白色或类白色粉末,极易溶于二甲基甲酰胺中,在甲醇中溶解,氟苯尼考在结构上以 F 原子取代了氯霉素、甲矾霉素中丙烷链 3C 位置上的羟基($-OH$);氟苯尼考胺为白色固体粉末,易溶于水,不溶于有机溶剂,氟苯尼考中的二氯乙醛基被 H 取代即为氟苯尼考胺,氟苯尼考胺为氟苯尼考的主要代谢产物。

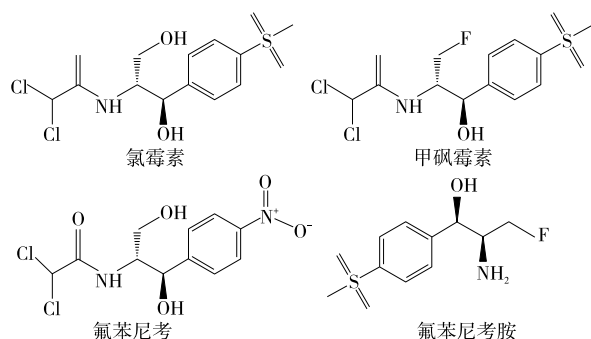


图 1 氯霉素、甲矾霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺的结构式

Figure 1 The structural formula of chloramphenicol, thiamphenicol, florfenicol and florfenicol amine

1.2 氯霉素类药物毒性和残留限量

氯霉素类药物属于广谱抗生素,可对大多数革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌产生一定的抑制作用。其中,氯霉素在药物市场上问世时间较早,且具有稳定性和低成本的优点,因此被广泛应用于畜牧业。氯霉素是一种可逆地与细菌细胞内结合的的药物,其杀菌机理是抑制细菌肽链的形成,导致蛋白质无法合成,从而使得细菌因缺乏必需的营养物质供给而死亡。长期食用氯霉素超标的动物源性食品会给人体生命健康带来巨大危害,因此,氯霉素在国际上被相继禁止使用^[1]。氯霉素结构中芳香环上对位硝基是引起再生障碍性贫血的主要基团,而当硝基被甲磺酰基所取代时,不会产生再生障碍性贫血的不良反应。因此,在动物疾病防治上,尤其是食品动物,甲矾霉素逐渐替代氯霉素,具有广阔的应用前景。但甲矾霉素免疫抑制作用比氯霉素强,仍然存在着较大的危害^[2]。

相较于这两种药物,氟苯尼考具有毒性较低的特点,不会产生质粒介导的耐药性,并不存在再生障碍性贫血的问题。此外,氟苯尼考仍然对许多氯霉素耐药菌株具有敏感性。但需要注意的是,氟苯尼考会轻度抑制生殖激素的产生,用药后会出现腹泻等副作用,同时也具有胚胎毒性^[3]。

根据《动物性食品中兽药最高残留限量》中华人民共和国农业部公告第 235 号的规定,氯霉素被禁止用于所有食品动物。而 GB 31650—2019《食品安全国家标准食品中兽药最大残留限量》则规定,甲矾霉素在牛、羊、猪、鱼等家禽各部分靶组织中的最大残留限量均为 $50 \mu\text{g/kg}$,在家禽产蛋期禁用。氟苯尼考在鱼的皮和肉中最大残留限量为 $1\,000 \mu\text{g/kg}$,而在牛、羊的泌乳期以及家禽的产蛋期均禁止使用。如何控制动物源性食品中的氯霉素类药物残留是政府监管部门所面临的主要难题,加强动物源性食品中氯霉素类药物残留的检测和监控是必然的趋势。

2 氯霉素类药物残留测定方法

氯霉素作为一种广泛用于动物养殖和畜禽养殖业中的抗生素,其残留会对人类健康造成潜在危害。因此,建立快速可靠的氯霉素类药物残留检测体系对于保障食品安全具有重要意义。目前,随着科技的不断进步,已经开发出了多种快速、准确、灵敏的氯霉素类药物残留检测方法,包括微生物法、免疫分析法、气相色谱法、气相色谱—串联质谱法、液相色谱法和液相色谱—串联质谱法等。这些方法的出现与广泛应用,保障了动物源性食品中氯霉素类药物检测的安全有效性。

2.1 样品的前处理

为了提高氯霉素类药物残留的检测效率和减少基质对检测结果的影响,在进行检测前通常需要对动物源性样品进行提取和净化。氯霉素类药物微溶于水,溶于有机溶剂,常用乙腈和乙酸乙酯等有机溶剂进行提取^[4]。曹丽丽等^[5]对比了氨化乙腈、乙酸乙酯和甲醇等在鸡蛋基质中对氯霉素类药物的提取效果,结果显示,使用乙腈和乙酸乙酯可以减少基质效应,使得提取效果满足检测要求。在采用有机溶剂对动物源性食品样品进行提取时,同时会提取出大量的脂质或类脂物质。因此,在动物源性食品样品中,将固相萃取技术运用于氯霉素类药物残留检测前处理,可以除去脂溶性杂质,降低基质对样品提取的影响,达到浓缩纯化的目的^[6]。杨方等^[7]发现,对于复杂基质的样品(如烤鳗等),使用正己烷脱脂的净化效果不佳;使用 C_{18} 固相萃取小柱对氟苯尼考胺的检测无净化作用;PSA 固相萃取小柱对氟苯尼考胺的净化效果不错,但对于甲矾霉素和氟苯尼考的净化效果不佳;采用

串联的 C_{18} 固相萃取柱和 PSA 固相萃取柱进行样品净化可以取得较好的效果,并且可以同时检测多种氯霉素类药物。由此可见,动物源性食品样品成分复杂,分析过程存在显著的基质干扰,影响分析结果的准确性,故对样品的提取和净化均有较高的要求。

2.2 分析方法

2.2.1 微生物法 微生物法是一种常用的氯霉素类药物残留检测方法,其原理是利用样品中的氯霉素类药物对培养基中的细菌形成抑菌圈的作用,通过观察抑菌圈的形态特征来判断检测结果。微生物法的种类较多,包括发光细菌法、杯碟法等。其中,发光细菌法是微生物检测中较为常用的检测方法之一,通过利用发光杆菌建立水产品中氯霉素残留筛选方法,检测灵敏度可以达到 0.1 ng/mL [8]。杯碟法则被广泛应用于肌肉组织中氯霉素残留的检测,该方法抗干扰能力强,结果准确可靠 [9]。微生物法具备操作简单、经济快捷等优点,适合基层检测和大批量筛查,但其准确性和灵敏度受到同族抗生素干扰较大,无法确定药物残留的具体量。因此,在高精度测量方面存在限制,需要结合其他检测方法进行综合判断。

2.2.2 免疫分析法 放射免疫分析法 (radioimmunoassay, RIA) 是一种利用同位素标记的抗原与未标记的抗原竞争同抗体结合进行定量测定的微量分析方法 [10]。氯霉素的放射免疫检测法于 1985 年建立,该方法对奶类基质最低检出限为 $0.2 \text{ } \mu\text{g/kg}$,回收率达 95% 以上 [11]。但是,放射免疫分析法使用放射性同位素进行微量分析,存在放射性污染的风险,可能会对周围人员和环境造成危害。此外,该方法也存在交叉反应、假阳性等缺点,在氯霉素类药物残留检测领域的发展也受到了一定限制。

酶联免疫分析法 (enzyme linked immunosorbent assay, ELISA) 是一种将特定的抗体或抗原与酶标记结合,并通过检测酶标记来检测样品中目标物质的方法 [12-13]。梁娟等 [14] 采用 ELISA 检测方法检测了虾、蟹、参、鱼等基质苗种中氯霉素类药物残留,结果显示该方法具有高回收率和良好的重复性,回收率为 $71.2\% \sim 113.5\%$,相对标准偏差为 $3.3\% \sim 9.2\%$ 。许小炫等 [15] 采用碳酸钾和乙酸乙酯作为提取试剂,建立了间接竞争化学发光酶联免疫分析法,在 $0.010 \sim 0.179 \text{ } \mu\text{g/L}$ 线性范围内,氯霉素的平均添加回收率为 $92.00\% \sim 112.50\%$,检出限为 $0.009 \text{ } \mu\text{g/L}$ 。酶联免疫法灵敏快捷、高精密度,且操作简便,为工作中的检测提供了很大的便利。

胶体金免疫层析法 (colloidal gold immunochromatography assay, GICA) 是一种基于胶体金标记技术和免疫层析技术建立的生物分析方法。该方法利用胶体金作为荧光物质,在特异性抗原-抗体反应中

实现检测功能,待测物通过毛细作用流过层析膜上的检测线 (T 线) 与质控线 (C 线) 时,与上面标记的特异性抗原或抗体结合,通过观察 C 线与 T 线的颜色变化,实现样品定性或半定量检测。李倩等 [16] 使用胶体金免疫层析法来检测带鱼中氯霉素残留,样品采用水和乙酸乙酯提取后,用正己烷去脂,正相硅胶固相萃取小柱净化浓缩,缓冲液复溶,最后用快速检测卡显色,检测结果与传统的液相色谱-质谱法一致。胶体金免疫层析法不需要昂贵的仪器和专业人员的操作,结果直观,适合作为初筛手段,被广泛应用于基层现场检测。

2.2.3 色谱法 气相色谱法 (gas chromatography, GC) 是一种基于气体流动相的色谱法。通常在采用气相色谱法检测氯霉素类药物残留时,需要对样品进行衍生化预处理,以提高检测的灵敏度和准确度。杨秋红等 [17] 对水产品中氯霉素、甲砒霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺进行了固相萃取结合气相色谱法的研究,采用不同的萃取剂、固相萃取柱、洗脱剂和定容试剂进行比较试验,在最佳试验条件下,氟苯尼考胺、氯霉素、氟苯尼考和甲砒霉素的检出限分别为 $1.0, 0.3, 1.0, 1.0 \text{ } \mu\text{g/kg}$,定量限分别为 $3.0, 1.0, 3.0, 3.0 \text{ } \mu\text{g/kg}$,该方法具有较好的准确度和回收率。

与气相色谱法相比,高效液相色谱法 (high performance liquid chromatography, HPLC) 操作简便、迅速且不需要衍生化,因而备受推崇 [18-19]。王安伟等 [20] 应用高效液相色谱法检测罗非鱼中氯霉素残留量,发现在 $0.1 \sim 5.0 \text{ } \mu\text{g/mL}$ 的质量浓度范围内,氯霉素浓度和峰面积呈较好的线性关系,且具有很好的精密度和回收率,检测限为 $0.02 \text{ } \mu\text{g/g}$ 。章琦等 [21] 将分子印迹技术引入样品前处理,采用表面沉淀聚合法制备氯霉素磁性分子印迹聚合物,用于样品中氯霉素的富集提取,结合高效液相色谱法对牛奶基质中的氯霉素进行分析检测。该方法的平均加标回收率为 $97.3\% \sim 104.3\%$,检出限为 $2.7 \text{ } \mu\text{g/kg}$,定量限为 $8.9 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 。

2.2.4 质谱法 现代色谱和质谱技术的结合在动物源性食品质量控制和安全监管中发挥重要作用 [22-23]。邵会等 [24] 建立了一种基于气相色谱-串联质谱法 (gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS) 的方法,用于检测水产品中氯霉素、甲砒霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺多残留。在样品提取溶剂、净化方法、衍生化方式及定容试剂相同的试验条件下,该方法的检测限和定量限均比气相色谱法更低,其中氯霉素的检测限为 $0.2 \text{ } \mu\text{g/kg}$,定量限为 $0.5 \text{ } \mu\text{g/kg}$,甲砒霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺的检测限为 $1.0 \text{ } \mu\text{g/kg}$,定量限为 $3.0 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 。在此基础上,劳哲等 [25] 开发了一种在线凝胶渗透色谱-气相色谱串联质谱法,用于测定动物源性食品中的氯霉素,该方法优化了各种条件,检测限可以进一步降低至 $0.05 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 。

张伟玮等^[26]使用液相色谱—串联质谱方法(LC-MS)检测鸡肌肉中氯霉素、甲砒霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺等药物残留。这项研究采用了具有强阳离子交换和反相交换双重作用机理的 Oasis MCX 固相萃取柱对样品进行净化处理,在酸性溶液中,氟苯尼考胺以离子状态存在,被保留在 Oasis MCX 柱上,而氯霉素、甲砒霉素和氟苯尼考则通过反相交换机理也被保留在 Oasis MCX 柱上,以提高检测效率和准确性。崔悦等^[27]比较了不同流动相,如乙酸铵溶液—乙腈或甲醇,在液相色谱—串联质谱分析中的效果。结果表明,使用浓度为 10 mmol/L 的乙酸铵溶液—乙腈作为流动相可以提高离子化效率,并得到较好的色谱峰形。

超高效液相色谱—串联质谱法(ultra performance liquid chromatograph mass spectrometer, UPLC-MS)具有更高的分离速度、分辨率、灵敏度和选择性^[28-29]。陆郑红等^[30]使用 UPLC-MS 系统,建立了一种同时测定猪肉、鸡肉和鱼肉中氯霉素、甲砒霉素、氟苯尼考及氟苯尼考胺的分析方法。该方法对氯霉素、甲砒霉素和氟苯尼考的检出限均为 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$,对氟苯尼考胺的检出限为 0.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。李龙^[28]优化了流动相,采用梯度洗脱程序,建立了在 0.1~10.0 $\mu\text{g}/\text{L}$ 浓度范围内检测水产品中氯霉素类药物残留的 UPLC-MS 检测分析方法,对氯霉素、甲砒霉素和氟苯尼考的检出限均为 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$,平均回收率 99.8%~112.5%。同时,常波^[31]使用 QuEChERS/固相萃取/液质联用法测定鱼基质中氯霉素的方法,在 0.2~10.0 ng/mL 线性范围内,平均添加回收率在 100%~115%,方法操作简单、灵敏度高,适合大批量水产品中氯霉素残留的筛查。此外,辛晓晨等^[32]将提取液采用 Captiva EMR-Lipid 直通式固相萃取柱净化,优化了样品前处理过程的同时降低了鸡蛋样品基质干扰,提高了测定结果准确性,在 0.2~5.0 $\mu\text{g}/\text{L}$ 线性范围内,氟苯尼考胺、氟苯尼考和氯霉素的检出限分别为 0.04, 0.01, 0.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$,定量限分别为 0.12, 0.03, 0.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$,平均回收率 92.3%~109.6%。

2.2.5 其他方法 近年来,一些新型的检测技术也开始被逐渐应用于动物源性食品中氯霉素类药物残留的检测。生物传感器技术是其中一种。生物传感器技术利用生物体系对氯霉素药物的特异性反应,实现了快速、灵敏、准确的药物残留检测^[33-35]。程慧等^[33]基于氯霉素与适配体—磁珠复合体的竞争反应(氯霉素的特异性结合可解离适配体与 DNA 酶的结合,从而抑制 DNA 酶与血红素结合催化显色反应活性),建立了一种用于鸡蛋中氯霉素残留检测的方法,该方法通过引入 DNA 酶及磁性纳米微球,简化操作的同时减少了假阳性结果的产生。此外,也有一些研究者^[36-38]尝试开发了一些新型化学分析

方法,如磁性化学发光酶免疫法、分子印迹电致化学发光传感器等,用于检测动物源性食品中氯霉素的残留。王玲等^[36]基于磁性纳米粒子建立了一种用于猪肉中氯霉素残留检测的磁性化学发光酶免疫方法。该方法将磁性微球替代酶标板作为固定相,降低了空间位阻,使免疫反应进行得更加充分,方法检出限为 0.013 $\mu\text{g}/\text{kg}$,回收率为 85.24%~93.57%。艾晨昊等^[37]以硫化镉作为发光试剂,结合分子印迹技术,构建了一种用于测定蜜蜂样品中氯霉素残留检测的分子印迹电致化学发光分析方法,该方法的检出限为 6.1×10^{-13} mol/L,用于实际样品添加回收时,回收率为 95.0%~109.0%。这些新型检测技术还处于研究和探索阶段,在食品安全检测行业具有广阔的应用前景和发展潜力^[39-40]。

综上所述,动物源性食品中氯霉素类药物残留的检测方法主要包括微生物法、免疫学方法、色谱法、质谱法等。微生物法无需复杂的仪器设备,但操作复杂、耗时长且结果易受到环境因素和操作人员技术水平的影响。免疫学方法操作简单、成本低,但常存在检测结果误差大、检测限高、易受样品基质和其他抗生素药物的干扰。色谱法具有高灵敏度和准确性,但前处理过程复杂且需要高级仪器,对技术水平的要求也比较高。色谱—质谱联用方法是目前测定氯霉素类药物残留的主流方法,具有高灵敏度和准确度。新型基于材料化学的检测技术在该领域引起研究人员的广泛关注,但仍然缺乏深入的研究和应用,同时简单、快速和准确、灵敏的检测方法仍然是未来需要突破的技术瓶颈。

3 总结与展望

目前,评估动物源性食品中氯霉素类药物残留的检测方法包括高效液相色谱法、液相色谱—串联质谱法和气相色谱—串联质谱法。而前处理方法主要有固相萃取法和液液萃取法等。这些方法准确度高、精密度好,但是也存在一些问题,比如样品前处理的复杂性、净化过程的繁琐和耗时性、所需的仪器设备昂贵、技术人员要求熟练以及分析周期较长等。为了弥补这些缺点,新型的基于材料化学的检测技术应运而生。这些新技术是实验室常规检测方法的有益补充,特别是新版《食品安全法》和《农产品质量安全法》均认可了快速检测方法对食品或农产品质量安全监督抽检的结果,极大地推动了快速检测技术的发展。然而,在快速检测技术快速发展的同时,问题也逐渐显现,自主创新技术、产品质量均一性和稳定性不足,研发和应用脱节,快检产品难以满足市场监管和用户需求。目前中国对快速检测方法和仪器的有效性评价还缺乏统一的标准,严重影响结果的可靠性,特别是在监督执法的场合。为满足市场监管需求,研究和应用动物源

性食品中的氯霉素类药物残留快速检测技术和方法的同时,发展和完善传统实验室定量检测分析方法具有重要意义,建立快速检测标准化体系也是未来氯霉素类药物残留检测的一个重要发展方向。

参考文献

- [1] 李昊. 中国水产品质量安全政策对比研究[J]. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(4): 54-61.
LI H. Chinese aquatic products quality safety and policies comparative study[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2021, 11(4): 54-61.
- [2] 罗昭军, 陈幸, 单乃荣, 等. 高效液相色谱法检测鸡蛋中氯霉素类药物残留[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2018, 34(3): 72-74.
LUO Z J, CHEN X, SHAN N R, et al. Determination of chloramphenicol drugs in eggs by UPLC[J]. China Abstract Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2018, 34(3): 72-74.
- [3] 李广. 氟苯尼考及氟苯尼考胺药物残留检测方法及应用[J]. 辽宁农业科学, 2019(5): 59-62.
LI G. Method and application of florfenicol and florfenicol drug residue detection [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2019 (5): 59-62.
- [4] 林敏霞, 徐媛原, 钟仕花. 优化高效液相色谱—串联质谱法检测水产品中酰胺醇类药物残留[J]. 现代食品, 2022, 28(1): 209-212.
LIN M X, XU Y Y, ZHONG S H. Optimization of high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the detection of amide alcohol drug residues in aquatic products[J]. Modern Food, 2022, 28(1): 209-212.
- [5] 曹丽丽, 张书芬, 邢家深, 等. 超高效液相色谱—串联质谱结合谱库检索快速测定鸡蛋中氯霉素、氟苯尼考和甲砒霉素残留[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 197-203.
CAO L L, ZHANG S F, XING J L, et al. Fast determination of chloramphenicol, florfenicol, thiamphenicol in eggs by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry combined with library search[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(14): 197-203.
- [6] 王东鹏, 叶诚, 李小莎. Captiva EMR-Lipid 固相萃取结合高效液相色谱—串联质谱法同时测定猪肉中氯霉素类药物残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(19): 7 660-7 666.
WANG D P, YE C, LI X S. Simultaneous determination of chloramphenicol drugs residues in pork by Captiva EMR-Lipid solid phase extraction combined with high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(19): 7 660-7 666.
- [7] 杨方, 方宇, 刘正才, 等. 液相色谱荧光检测法检测水产品中甲砒霉素、氟甲砒霉素及代谢物氟甲砒霉素胺残留[J]. 中国兽药杂志, 2008(8): 13-16.
YANG F, FANG Y, LIU Z C, et al. Determination of thiamphenicol, florfenicol and florfenicol amine residues in aquatic products by HPLC with fluorescence detection[J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2008(8): 13-16.
- [8] 王亚群, 王静雪, 林洪, 等. 发光细菌法检测水产品中氯霉素体系的建立[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(1): 66-70.
WANG Y Q, WANG J X, LIN H, et al. The establishment of chloramphenicol in aquatic products was detected by photobacterial method[J]. Journal of Ocean University of China, 2009, 39 (1): 66-70.
- [9] 焦彦朝, 何家香, 梅先芝. 微生物检定法测定鲤鱼肌肉组织残留氯霉素[J]. 中国饲料, 2000(5): 22-24.
JIAO Y Z, HE J X, MEI X Z. The microbiological assay method was used to determine the residual chloramphenicol of carp muscle [J]. China Feed, 2000(5): 22-24.
- [10] 徐美英, 孟庆勇. 养殖对虾中氯霉素残留的放射免疫分析[J]. 广州食品工业科技, 2003, 19(3): 66-67.
XU M Y, MENG Q Y. Application of RIA method for the determination of remained chloramphenicol in breed prawn [J]. Guangzhou Food Science and Technology, 2003, 19(3): 66-67.
- [11] ARNOLD D, SOMOGYI Á. Trace analysis of chloramphenicol residues in egg, milk and meat: Comparison of gas chromatography and radioimmunoassay[J]. Association of Official Analytical Chemists, 1985, 68(5): 984-989.
- [12] 刘智宏, 黄耀凌, 汪霞, 等. 水产品中甲砒霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺酶联免疫多残留测定[J]. 中国兽药杂志, 2010, 44(12): 1-5.
LIU Z H, HUANG Y L, WANG X, et al. Multi-residue determination of thiamphenicol, florfenicol and florfenicol in aquatic products by ELISA[J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2010, 44(12): 1-5.
- [13] 区兑鹏, 卢义博, 严忠雍, 等. 酶联免疫法快速检测水产品中硝基呋喃类代谢物、氯霉素及氟苯尼考[J]. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(1): 27-33.
OU D P, LU Y B, YAN Z Y, et al. Enzyme-linked immunoassay for the rapid detection of furan, chloramphenicol and florfenicol in aquatic products[J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2021, 11(1): 27-33.
- [14] 梁娟, 张倩玉, 魏海英, 等. 酶联免疫法测定水产苗种中氯霉素残留量[J]. 水产养殖, 2022, 43(3): 49-52.
LIANG J, ZHANG Q Y, WEI H Y, et al. Determination of chloramphenicol residues in aquatic seedlings by enzyme-linked immunoassay[J]. Journal of Aquaculture, 2022, 43(3): 49-52.
- [15] 许小炫, 苏晓娜, 谭庶, 等. 间接竞争化学发光酶联免疫分析方法检测禽肉中金刚烷胺和氯霉素残留[J]. 食品科学, 2021, 42(4): 305-312.
XU X X, SU X N, TAN S, et al. Determination of amantadine and chloramphenicol residues in poultry meat by indirect competitive chemiluminescence enzyme-linked immunosorbent assay[J]. Food

- Science, 2021, 42(4): 305-312.
- [16] 李倩, 陈煜, 阎婷婷. 胶体金免疫层析法检测带鱼中氯霉素残留的前处理方法研究[J]. 现代食品, 2022, 28(20): 182-184.
- LI Q, CHEN Y, YAN A T. Study on the pretreatment method for the detection of chloramphenicol residues in hairtail by colloidal gold immunochromatography [J]. Modern Food, 2022, 28(20): 182-184.
- [17] 杨秋红, 艾晓辉, 李荣, 等. 固相萃取—气相色谱法同时检测水产品中的氯霉素、甲砒霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺[J]. 分析试验室, 2015, 34(5): 533-537.
- YANG Q H, AI X H, LI R, et al. Simultaneous determination of chloramphenicol, thiamphenicol, florfenicol and florfenicol-amine in aquatic products by gas chromatographic method with solid phase extraction[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2015, 34(5): 533-537.
- [18] 庄姜云, 刘建芳, 李红权, 等. 内标液相色谱—串联质谱法测定蜂蜜中氯霉素、甲砒霉素和氟苯尼考残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(5): 1 966-1 971.
- ZHUANG J Y, LIU J F, LI H Q, et al. Determination of chloramphenicol, sulfoxycin and fluorphenicol residues in honey by liquid chromatography-tandem mass spectrometry with interior label[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(5): 1 966-1 971.
- [19] 刘洋, 邢海艳, 苏晶, 等. 液相色谱—串联质谱法测定鸡蛋中氯霉素和氟苯尼考残留量的研究[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(5): 101-106.
- LIU Y, XING H Y, SU J, et al. Determination of chloramphenicol and florfenicol residues in eggs by liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. China Food Additives, 2021, 32(5): 101-106.
- [20] 王安伟, 覃锐, 刘天密, 等. 高效液相色谱法检测罗非鱼中氯霉素的残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(7): 1 665-1 668.
- WANG A W, QIN R, LIU T M, et al. Determination of chloramphenicol residues in tilapia by high performance liquid chromatography[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(7): 1 665-1 668.
- [21] 章琦, 赵薇, 韩迎红. 氯霉素磁性分子印迹聚合物的合成及应用[J]. 分析科学学报, 2020, 36(2): 212-216.
- ZHANG Q, ZHAO W, HAN Y H. Preparation and application of chloramphenicol magnetic molecular imprinted polymers [J]. Journal of Analytical Science, 2020, 36(2): 212-216.
- [22] 王安伟, 刘天密, 覃锐, 等. 水产品中氯霉素残留检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(11): 4 259-4 264.
- WANG A W, LIU T M, QIN R, et al. Research progress on the detection of chloramphenicol residues in aquatic products [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(11): 4 259-4 264.
- [23] 刘进玺, 王铁良, 胡京枝, 等. QuEChERS 结合 HPLC-MS/MS 同时测定鱼肉中多种兽药残留[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 252-257.
- LIU J X, WANG T L, HU J Z, et al. Determination of veterinary drug residues in fish by QuEChERS method with HPLC-MS/MS method with HPLC-MS/MS[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(19): 252-257.
- [24] 邵会, 冷凯良, 周明莹, 等. 水产品中氯霉素、甲砒霉素、氟苯尼考、氟苯尼考胺多残留的同时测定-GC/MS 法[J]. 渔业科学进展, 2015, 36(3): 137-141.
- SHAO H, LENG K L, ZHOU M Y, et al. Simultaneous determination of residuchloramphenicol, thiamphenicol, florfenicol and florfenicol amine es in aquatic products with gas chromatography/mass spectrometry [J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(3): 137-141.
- [25] 劳哲, 江恩源, 朱国强. 在线凝胶渗透色谱—气相色谱串联质谱法测定动物源性食品中氯霉素[J]. 分析试验室, 2020, 39(6): 726-730.
- LAO Z, JIANG E Y, ZHU G Q. Determination of chloramphenicol in animal derived food by on-line gel permeation chromatography-gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2020, 39(6): 726-730.
- [26] 张伟玮, 曾明华, 许世富, 等. 高效液相色谱—串联质谱法同时测定鸡肉中氯霉素类药物及其代谢物残留方法的建立[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(4): 641-645.
- ZAHNG W W, ZENG M H, XU S F, et al. Development of method for simultaneous determination of chloramphenicol, thiamphenicol, florfenicol and florfenicol amine residues in chicken tissues by LC-MS/MS[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2012, 39(4): 641-645.
- [27] 崔悦, 刘墨一, 曹冬, 等. 液相色谱—串联质谱法检测蜂蜜中氟苯尼考及其代谢物残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(7): 2 695-2 700.
- CUI Y, LIU M Y, CAO D, et al. Determination of florfenicol and its metabolite residues in honey by liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(7): 2 695-2 700.
- [28] 李龙. UPLC-MS/MS 法快速测定水产品中氯霉素、甲砒霉素、氟苯尼考残留量[J]. 食品安全导刊, 2022(34): 67-70.
- LI L. Rapid determination of chloramphenicol, thiamphenicol, and florfenicol residues in aquatic products by UPLC-MS/MS method [J]. China Food Safety Magazine, 2022(34): 67-70.
- [29] 张贵会, 金定, 高友汉, 等. 超高压液相色谱—串联四极杆质谱法检测鸡蛋中氯霉素的残留量[J]. 现代食品, 2023, 29(5): 208-211.
- ZHANG G H, JIN D, GAO Y H, et al. Determination of chloramphenicol residues in eggs by ultra-high pressure liquid chromatography tandem quadrupole mass spectrometry[J]. Modern Food, 2023, 29(5): 208-211.
- [30] 郑陆红, 张慧琼, 陈茹, 等. 超高效液相色谱—串联质谱法同时测定动物组织中氯霉素、甲砒霉素、氟苯尼考和其代谢产物氟苯尼考胺残留量[J]. 现代食品, 2022, 28(20): 198-203.

- ZHENG L H, ZHANG H Q, CHEN R, et al. Determination of chloramphenicol, thiamphenicol, florfenicol and its metabolite florfenicol amine residues in animal tissues by UHPLC-MS/MS[J]. *Modern Food*, 2022, 28(20): 198-203.
- [31] 常波. QuEChERS-UPLC-MS/MS 法快速测定水产品中氯霉素[J]. *食品安全导刊*, 2023(3): 92-94.
- CHANG B. Using QuEChERS-UPLC-MS/MS for rapid determination of chloramphenicol in aquatic products[J]. *China Food Safety*, 2023(3): 92-94.
- [32] 辛晓晨, 卫瑾瑾, 鹿尘, 等. 通过式固相萃取/超高效液相色谱—串联质谱法测定鸡蛋中氯霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺残留[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(9): 1 297-1 303.
- XIN X C, WEI J J, LU C, et al. Determination of chloramphenicol, florfenicol and florfenicol amine residues in hen eggs by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry with pass-through solid extraction[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(9): 1 297-1 303.
- [33] 程慧, 刘顺, 黎波, 等. 基于 DNA 酶催化反应建立适配体比色法检测鸡蛋中氯霉素[J]. *食品与机械*, 2021, 37(11): 61-66.
- CHEN H, LIU S, LI B, et al. An aptamer colorimetric method was established to detect chloramphenicol in eggs based on DNase-catalyzed reaction[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(11): 61-66.
- [34] 戴小辉. 基于镍—金属有机框纳米酶活性的氯霉素核酸适配体传感器构建和应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(13): 4 265-4 272.
- DAI X H. Construction and application of chloramphenicol aptasensor based on the nanozyme activity of nickel-metal-organic framework[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(13): 4 265-4 272.
- [35] 熊威威, 汪鹏, 李文恒, 等. 基于染料标记的核酸适配体对氯霉素的比率定量检测[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2022, 68(4): 405-412.
- XIONG W W, WANG P, LI W H, et al. Ratiometric quantitative detection of chloramphenicol based on dye-labeled aptamer[J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2022, 68(4): 405-412.
- [36] 王玲, 管笛, 周欣, 等. 磁性化学发光酶免疫法检测猪肉中的氯霉素[J]. *食品科学*, 2017, 38(10): 305-309.
- WANG L, GUAN D, ZHOU X, et al. Development of magnetic bead-based chemiluminescent enzyme immunoassay for chloramphenicol detection in swine muscle[J]. *Food Science*, 2017, 38(10): 305-309.
- [37] 艾晨昊, 吴叶宇, 谭学才, 等. 基于 CdS 量子点的电致化学发光—分子印迹传感器检测氯霉素[J]. *分析试验室*, 2019, 38(5): 513-518.
- AI C H, WU Y Y, TAN X C, et al. A molecularly imprinted polymer electrochemiluminescence sensor based on CdS quantum dots for detection of chloramphenicol [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2019, 38(5): 513-518.
- [38] 王鑫, 刘河冰, 陶晓奇. 基于核酸适配体检测动物性食品中氯霉素残留的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(18): 254-262.
- WANG X, LIU H B, TAO X Q. Research progress on detection of chloramphenicol residues in animal food based on nucleic acid aptamer[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(18): 254-262.
- [39] 詹峰萍, 吴杨仪, 戴小辉, 等. 基于 Fe(III)-2-氨基对苯二甲酸金属有机框架的免标记氯霉素电化学传感器的构建及应用[J]. *分析化学*, 2023, 51(4): 539-548.
- ZHAN F P, WU Y Y, DAI X H, et al. Construction and application of Fe(III)-2-aminoterephthalic acid metal-organic framework-based label-free chloramphenicol electrochemical sensor [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(4): 539-548.
- [40] 崔乃元, 赵义良, 马立才, 等. 水产品中氯霉素时间分辨荧光免疫层析定量检测方法[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 241-245.
- CUI N Y, ZHAO Y L, MA L C, et al. Quantitative determination of chloramphenicol in aquatic products by time-resolved fluorescence immunochromatography [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(24): 241-245.
- (上接第 182 页)
- [31] 田丝竹, 李绪文, 藏爽, 等. 10 种野生植物果实对 α -淀粉酶和酪氨酸酶的抑制作用及其酚类化合物含量和抗氧化活性研究[J]. *分析化学*, 2021, 49(3): 449-459.
- TIAN S Z, LI X W, ZANG S, et al. Investigation of α -amylase and tyrosinase inhibitory activities, phenolic compounds, and antioxidant activity in ten kinds of wild fruits [J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 49(3): 449-459.
- [32] LIZARDO R C M, CHO H D, WON Y S, et al. Fermentation with mono- and mixed cultures of *Lactobacillus plantarum* and *L. casei* enhances the phytochemical content and biological activities of cherry silverberry (*Elaeagnus multilora* Thunb.) fruit[J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100: 3 687-3 696.
- [33] PINO J A, ALMORA K, MARBOT R. Volatile components of papaya (*Carica papaya* L., Maradol variety) fruit[J]. *Flavour and Fragran Journal*, 2003, 18(6): 492-496.
- [34] GOMES B L, FABI J P, PURGATTO E. Cold storage affects the volatile profile and expression of a putative linalool synthase of papaya fruit[J]. *Food Research International*, 2016, 89(1): 654-660.
- [35] 孔祥瑞, 施瑞城, 张彦军, 等. 气相色谱质谱联用技术分析热处理前后番木瓜汁挥发性香气[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(1): 189-194.
- KONG X Q, SHI R CH, ZHANG Y J, et al. HS-SPME/GC-MS analysis of the aromatic components of papaya juice before and after the heat treatment[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(1): 189-194.