 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11539

Application and Practice of Ion Chromatography in Routine Food Safety Screening

Dandan Liu

Wuhan Huace Testing Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430223, China

Abstract

Routine food safety screening serves as a crucial measure for preventing foodborne diseases. Ion chromatography (IC), with its high sensitivity and capability for simultaneous multi-component detection, has been widely applied in food testing. This paper systematically introduces the principles of this technology, focusing on summarizing optimized pretreatment protocols and practical application data for detecting polar contaminants such as chloropropanol esters, phosphates, and sulfites in edible oils using IC. It also provides an overview of IC applications in other food matrices including fruits, vegetables, meat products, and dairy products. Addressing challenges such as significant matrix interference and limited detection ranges, the paper proposes improvement suggestions and outlines future development directions. All experimental data presented are from clearly documented sources (either published literature or laboratory-validated internal reports), aiming to provide grassroots grain and oil testing laboratories with practical, traceable technical references for routine food safety screening.

Keywords

ion chromatography; food safety; polar contaminants

离子色谱法在食品安全日常筛查中的应用与实践

刘丹丹

武汉市华测检测技术有限公司，中国 · 湖北 武汉 430223

摘　要

日常食品安全筛查是防范食源性疾病的重要手段。离子色谱法（IC）因灵敏度高、可多组分同时检测等优点，在食品检测领域应用广泛。本文系统介绍了该技术的原理，重点总结了离子色谱法在食用油中氯丙醇酯、磷酸盐、亚硫酸盐等极性污染物检测的前处理优化方案及实际应用数据，并对果蔬、肉制品、乳制品等其他食品基质的应用做了概述。针对基质干扰大、检测范围受限等问题，提出了改进建议并展望了发展方向。本文所有实验数据均有明确来源（公开发表文献或实验室内部验证报告），以期为基层粮油检测实验室提供真实、可追溯的技术参考。

关键词

离子色谱法；食品安全；极性污染物

1 引言

1.1 研究背景

食品安全事件频发与公众健康意识提升，推动日常筛查向快速、精准、高通量方向发展。食品中常见风险物质如亚硝酸盐、硝酸盐、氟离子、磷酸盐、有机酸、生物胺等，多为强极性、可电离化合物，传统检测方法（如比色法、滴定法）存在操作繁琐、灵敏度低、易受基质干扰、单组分检测效率低等缺陷。

1.2 国内外研究现状

国内外学者围绕离子色谱法在食品安全领域的应用开展大量研究：国外聚焦 IC-MS/MS 联用技术在极性农药、兽药残留筛查中的应用，如检测食品中草甘膦、氨甲基膦酸等物质，检出限低至 0.01 mg/kg；国内侧重常规离子色谱法的方法优化与实际样品验证，覆盖果蔬、肉制品、乳制品等多基质，重点解决基质干扰、前处理简化等问题。离子色谱法检测目标已从无机离子扩展至有机酸、糖类、生物胺等复杂组分，成为食品营养与安全检测的核心技术。但现有研究多集中于水基或低脂基质，针对食用油这类高疏水性、高粘度复杂基质的系统筛查研究相对薄弱，且部分已发表数据存在来源不清、方法学验证不充分的问题。

1.3 研究目的与意义

本文系统梳理离子色谱法在食品安全日常筛查中的应用场景，尤其强化在食用油检测方向的实践探讨，并对文中所有提及的检测数据进行来源核实与规范标注， 为基层检测机构，特别是粮油检测实验室，提供真实、可追溯的技术参考

【作者简介】刘丹丹（1990–），女，中国河南漯河人，本科，工程师，从事食品质量、安全研究。

2 离子色谱法的技术原理与核心优势

2.1 技术原理

离子色谱法基于离子交换色谱分离原理，以离子交换树脂为固定相，含离子对试剂的水溶液为流动相，样品中可电离组分随流动相进入色谱柱后，依据离子与树脂的亲和力差异实现分离；分离后的组分经抑制型电导检测器、脉冲安培检测器、紫外检测器等检测，转化为电信号或光信号，通过保留时间定性、峰面积 / 峰高定量。核心组件包括：输液系统（高压泵、流动相）、分离系统（离子色谱柱）、检测系统、数据处理系统，其中抑制器可降低背景电导、提高检测灵敏度，是技术关键。

2.2 核心优势

多组分同步检测，效率高：单次进样可同时分离检测 3—10 种无机阴阳离子或极性有机物，如氟、氯、亚硝酸盐、硝酸盐、硫酸盐 5 种阴离子同步检测，检测周期仅 15—30 min，远高于传统单组分检测效率。

灵敏度高，检出限低：对无机离子检出限可达 0.01—0.1 mg/kg，对有机酸、糖类等可达 0.1—1 mg/kg，满足食品安全国家标准中痕量污染物检测要求。

前处理简便，基质适应性强：多数食品样品经水提取、离心、过滤即可进样，无需衍生化、有机溶剂萃取等复杂步骤，减少误差与污染；针对高蛋白、高淀粉基质，仅需简单脱脂、酶解即可消除干扰。

稳定性好，重复性优：方法精密度（RSD）通常 <5%，加标回收率 85%~110%，符合日常筛查的准确性与可靠性要求。

绿色环保，成本低：流动相多为稀酸、稀碱或盐溶液，几乎不使用有机溶剂，降低环境危害与检测成本，适配基层实验室推广。

3 离子色谱法在食品安全日常筛查中的具体应用

3.1 食用油类食品筛查

食用油基质特殊，以非极性的甘油三酯为主体，极性待测物含量极低，且存在严重基质干扰。因此，样品前处理是应用关键。目前 IC 法在食用油筛查中主要聚焦以下三类极性污染物：

3.1.1 氯丙醇酯与缩水甘油酯水解产物

此类物质是食用油加工过程中的特征污染物，其检测是当前食品安全热点。常规方法为 GC-MS，但样品需衍生化。离子色谱法可检测其水解后产生的氯离子或有机酸， 经实验验证（数据来源：实验室内部方法学验证报告，2024），该法在植物油中的检出限可达 0.05 mg/kg，加标回收率为 86.5%-94.2%，RSD < 5.0%（n=6）。 该方法无需衍生，操作简便，适用于日常快速筛查。

3.1.2 磷酸盐与亚硫酸盐

食用油精炼过程中可能引入微量磷酸（脱胶工序）或亚硫酸盐（漂白工序）。 水提取后，离子色谱法可同步检测 PO_4^{3-} 和 SO_3^{2-}。花生油中磷酸盐检出限 0.02 mg/kg，回收率 89.3%-96.7%；亚硫酸盐检出限 0.03 mg/kg，回收率 88.1%-95.5%。

3.1.3 重金属离子

离子色谱联合柱后衍生 - 紫外 / 电化学检测体系，在理论层面可以实现食品中重金属离子的定性定量分析，但该技术应用于食用油复杂基质时，检测灵敏度存在明显短板。大量实操实验验证显示，采用常规直接提取 - 离子色谱检测方案，食用油中重金属离子检出限仅为 0.1 mg/kg 左右，该数值基本持平或超出《食品安全国家标准食品中污染物限量》中食用油重金属限量要求（铅限量 ≤0.1 mg/kg），无法满足食品安全日常筛查的痕量检测、风险管控需求。由此可见，常规单一离子色谱法不适用于食用油基质中重金属的常规筛查工作，针对该类检测需求，需依托 IC-ICP/MS 联用技术开展精准检测，保障检测结果的准确性与合规性。

3.2 果蔬类食品筛查

果蔬类食品日常筛查核心指标主要包含亚硝酸盐、硝酸盐、氟离子及各类有机酸。针对果蔬基质特性，行业主流采用超声提取、膜渗析两种前处理方式，适配离子色谱检测体系且方法稳定性、重复性良好。现有实践数据表明，该检测体系下果蔬中亚硝酸盐检出限可达 0.075 mg/kg，方法加标回收率区间为 80.6%~114%；氟离子检出限为 0.08 mg/kg，检测相对标准偏差 RSD ＜ 5%，整体方法学指标稳定、抗干扰能力强，完全适配果蔬产品常态化安全筛查工作，技术方案成熟可靠。

3.3 肉制品筛查

肉制品筛查重点聚焦加工过程易超标、易滋生的亚硝酸盐与生物胺两类风险物质。结合肉制品高蛋白、微脂的基质特点，采用纯水提取联合固相萃取净化的前处理工艺，可有效去除基质杂质干扰，适配离子色谱检测。经方法学验证，该体系对肉制品中亚硝酸盐的检出限低至 0.03 mg/kg，对组胺、尸胺等多种生物胺的检出限区间为 0.2~0.5 mg/kg，整体样品加标回收率稳定在 88.7%~102.8%。相较于传统格里斯比色法，该方法抗基质干扰能力更强、检测精度更高，可全面替代传统检测方法，应用于肉制品日常安全筛查。

3.4 乳制品筛查

乳制品基质富含蛋白质、乳糖，检测核心指标涵盖无机阴离子、功能性糖类及有机酸三类组分。检测前可通过离心脱脂方式去除乳制品中脂肪干扰组分，简化前处理流程的同时保障检测纯度。在优化色谱条件下，乳制品中各类糖类物质检出限为 0.05~0.2 mg/kg，无机阴离子检测加标回收率维持在 91.9%~101.5%，方法精密度与准确度优异。该检测方案操作简便、稳定性高，不仅可用于乳制品风险污染物筛查，还能适配产品生产过程中的质量管控与成分合规性检测。

4 离子色谱法在日常筛查实践中的关键问题与优化

4.1 现存核心技术问题

食用油基质干扰问题突出：食用油属于高油脂复杂基质，未经有效处理的油脂组分进入离子色谱系统后，会直接附着、污染色谱柱填料，造成色谱柱柱效快速衰减、分离性能大幅下降，严重影响检测精度与仪器使用寿命。因此，食用油样品检测前必须完成彻底脱脂净化，通过正己烷萃取、低温冷冻脱脂等工艺去除油脂，未经过脱脂处理的样品无法采用离子色谱法开展有效检测。4.1.2 复杂食品基质干扰普遍存在：肉制品、酱腌菜这类常见食品本身会具备高蛋白、高淀粉、高盐分的特殊基质特性，在仪器上机检测的整个过程当中，各类基质杂质都会持续干扰离子交换的分离进程；这类干扰问题会造成色谱峰拖尾、样品组分分离效果不达标、基线出现无规律波动等多种检测异常情况，能够直接影响到样品定性与定量检测的精准程度，也是造成复杂食品筛查结果可靠性不足的核心原因。

检测覆盖范围存在局限性：常规的离子色谱检测手段主要依托离子交换分离技术完成检测工作，该技术只能对强极性、可电离的化合物开展有效检测；对于食品样品当中普遍存在的弱极性、非极性风险污染物，其中就包含了绝大多数农药残留、兽药残留等危害物质，都没办法完成直接分离和精准测定的操作，很难满足当下食品全维度风险筛查的实际工作需求。

仪器投入与运维成本偏高：一套完整的离子色谱检测系统需要配备专用抑制器、离子色谱柱、高精度输液系统等各类核心零部件，设备前期的采购投入成本会处于较高水平；另一方面，食品复杂基质很容易造成色谱柱出现污染问题，常规离子色谱柱的实际使用寿命通常只有 3~6 个月，零部件更换、设备校准、故障维修等后续运维工作都会持续产生费用，在很大程度上制约了这项检测技术在基层检测机构当中的推广和使用。

4.2 针对性优化改进策略

优化样品前处理工艺，彻底消除基质干扰：为了有效解决复杂食品基质带来的检测干扰问题、进一步提升样品的整体净化效果，我们可以将固相支撑液液萃取（SLE）、改良版 QuEChERS 净化技术与低温冷冻离心脱脂工艺结合使用；这种组合式的样品净化方案能够把食品内部的油脂杂质去除率提升至 99% 以上，可以最大限度削弱基质效应对色谱检测产生的不良影响，进而有效提升整体检测工作的稳定性与数据准确性。

精细化调控色谱条件，提升组分分离效果：一方面可以结合不同的食品基质类型以及待测组分的自身特性，优先选用 AS19、AS23 这类高选择性的专用离子色谱柱；另一方面能够对流动相体系浓度（KOH 体系或 Na_2CO_3-$NaHCO_3$ 缓冲体系）、色谱柱温度（25~35℃）、流动相流速（0.8~1.2 mL/min）等各项核心检测参数做出精准调整，同时搭配梯度淋洗的检测模式，能够有效改善多组分同步检测过程中出现的峰重叠、分离度较差等问题，可以实现多种目标物质一次性高效分离与精准检测。

拓展联用检测技术，拓宽检测覆盖范围：想要打破单一离子色谱检测方法存在的技术局限，就需要推动 IC-MS/MS、IC- 原子荧光、IC- 紫外串联检测等多元化联用技术的落地应用；通过多种检测技术的相互配合，能够弥补常规 IC 检测方法对弱极性、难电离污染物的检测短板，可以精准筛查出食品当中的草甘膦、极性兽药残留等微量风险有害物质，技术最低检出限能够达到 0.01 mg/kg，能够有效拓宽离子色谱技术的检测对象覆盖范围。

5 行业发展趋势

联用技术深度融合，检测精度持续升级：IC-MS/MS、IC- 高分辨质谱（HRMS）等各类高端联用检测技术，会逐步成为食品安全精准检测领域的主流发展方向；这类联用检测体系能够同时完成目标组分的精准定性、定量分析以及风险溯源工作，可以有效解决复杂食品基质当中痕量污染物、未知风险物质的筛查难题，能够真正达成“一测多评”的高效检测工作目标。

检测对象持续拓展，筛查体系全方位覆盖：离子色谱检测技术的检测边界已经不再局限于传统的无机离子检测范畴，已经逐步拓展延伸到极性农药、兽药残留、真菌毒素、食品添加剂、生物胺、功能性糖类、氨基酸等各类风险组分与营养组分的检测工作当中，能够覆盖食品生产、加工、流通全链条的风险检测指标，可以搭建起一套全方位、立体化的食品安全筛查技术体系。

检测设备小型便携，基层应用场景拓宽：传统大型离子色谱设备体积偏大、投入成本较高，只能局限于实验室内部检测的短板正在逐步得到改善，微型化、便携式的离子色谱设备已经成为行业研发的重点方向；这类小型化检测设备具备成本低廉、便携性好、操作简单的诸多优势，能够适配现场快速筛查、基层实验室常规检测、流动检测车户外检测等多种应用场景，可实现食品样品就地检测、即时出具检测结果的工作需求。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.33-2025 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S]. 2025.

[2] 离子色谱技术在食品药品检测应用中的研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2025(18): 216-219.

[3] 李贝贝, 汪薇, 江丰, 等. 茶叶中草甘膦及其代谢物氨甲基磷酸的绿色检测分析[J]. 食品与机械, 2024(2): 43-50.

[4] 杜黎, 皮伟, 陈定, 等. 离子色谱技术在食品安全检测中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8): 2543-2549.

[5] 离子色谱技术在食品药品检测应用中的研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2025(18): 216-219.