

# 液相色谱技术在食品检测领域的应用研究

吴文轩 金晓敏

伊犁州食品药品检验所，新疆伊宁市，835000；

**摘要：**液相色谱技术（Liquid Chromatography, LC）因其高灵敏度、高分离效能和广泛适用性，已成为食品安全检测的核心技术之一。本文系统综述了高效液相色谱（HPLC）及联用技术在食品污染物检测、营养成分分析及质量控制中的应用现状，并深入探讨其技术优势、面临的挑战及发展方向，为食品检验工作及食品安全监管工作提供理论支持。

**关键词：**高效液相色谱；食品安全检测；联用技术；食品污染物；智能化分析

**DOI:** 10.69979/3041-0673.25.08.027

## 引言

食品安全是全人类关心的话题。据世界卫生组织统计，全球每年因食品污染导致的疾病案例超过 6 亿例，其中发展中国家占比超过 90%。液相色谱技术作为目前最主要的食品检验技术，成为检测食品中农药残留、兽药残留及非法添加剂的关键手段。随着联用技术的发展，检测限已降至纳克级别，进一步提升了检测精度。

## 1 液相色谱技术的基本原理与优势

### 1.1 技术原理

液相色谱技术是一种基于物理化学分配原理的分离分析技术。其核心机制是样品中的各组分在通过色谱柱时，因为固定相与流动相之间的相互作用差异，导致不同组分在色谱柱中的迁移速度不同，从而实现分离。

#### 1.1.1 进样与流动相驱动

液态样品通过高压泵系统注入色谱柱入口，流动相在高压下推动样品通过色谱柱。例如，高效液相色谱（HPLC）通过高压泵显著提升了分离效率，使传统液相色谱的分离时间从数小时缩短至数十分钟<sup>[1]</sup>。

#### 1.1.2 固定相与分离机制

固定相通常为表面修饰的微球填料。极性较弱的组分与 C18 固定相亲和力强，保留时间较长；而极性较强的组分则更快被流动相洗脱。例如，分离多环芳烃（PAHs）时，反相色谱柱可通过调整乙腈比例实现 16 种 PAHs 的基线分离。

#### 1.1.3 检测与信号输出

分离后的组分依次进入检测器，通过记录吸光度、荧光强度或质荷比（m/z）生成色谱峰，峰面积或峰高

与组分浓度成正比。以维生素 C 检测为例，紫外检测器在 245nm 波长下可精准定量果蔬提取液中的维生素 C 含量，检测限达 0.1 μg/mL。

### 1.2 技术优势

#### 1.2.1 高灵敏度与低检测限

**痕量分析能力：**现代 HPLC 系统结合高灵敏度检测器，可检测食品中 ng/g（十亿分之一）至 pg/g（万亿分之一）级别的目标物。例如，HPLC-MS/MS 联用技术对肉类中恩诺沙星的检测限为 0.5 ng/g。

**抗基质干扰能力：**通过优化流动相梯度与色谱柱选择，可有效减少食品基质对目标物的干扰。如检测牛奶中三聚氰胺时，采用亲水作用色谱（HILIC）柱可排除乳脂影响，回收率超过 95%<sup>[1]</sup>。

#### 1.2.2 高分离效能与选择性

**复杂组分分离：**HPLC 可在单次运行中分离数十种结构相似的化合物。例如，反相色谱柱结合梯度洗脱程序，可在 20 分钟内分离食用油中的 8 种生育酚，分辨率均大于 1.5。

**选择性检测模式：**通过切换检测器类型，可针对特定化合物实现高选择性检测。如荧光检测器在激发波长 280 nm/发射波长 325 nm 下，可特异性检测黄曲霉毒素 B1，避免其他杂质的信号干扰。

#### 1.2.3 广泛的适用性

**目标物覆盖范围广：**液相色谱可分析从极性到非极性、从小分子到大分子的各类化合物。

#### 1.2.4 高通量与自动化

**快速分析能力：**采用超高效液相色谱与亚 2 μm 填料色谱柱，单次分析时间可缩短至 5 分钟以内。例如，

检测饮料中的苯甲酸、山梨酸等防腐剂时，UHPLC 的分析速度比传统 HPLC 快 3 倍。

自动化操作：配备自动进样器与数据处理软件的液相色谱系统可实现 24 小时连续运行，单日可处理 200 个以上样品，适用于大规模食品安全筛查。

#### 1.2.5 定量精准性与重复性

高精度定量：通过外标法或内标法校准，液相色谱的定量相对标准偏差（RSD）通常小于 2%。例如，HPLC-UV 测定婴幼儿奶粉中的维生素 D3 时，日内与日间精密度分别为 1.3% 和 1.8%。

方法稳定性：标准化操作条件下，色谱柱寿命可达 1000 次进样以上，保留时间偏差小于 0.1 分钟，确保长期检测结果的一致性。

## 2 液相色谱在食品检测中的应用

液相色谱技术凭借其高灵敏度和多目标物检测能力，被广泛应用于食品污染监测、营养成分分析及质量真实性鉴别等领域。

### 2.1 食品污染物检测

#### 2.1.1 农药残留分析

多类农药同步检测：HPLC-MS/MS 联用技术可一次性检测蔬菜、水果中 200 余种农药残留。例如，我国 2023 年发布的《GB 23200.121-2021》标准中，采用 HPLC-MS/MS 法测定茶叶中吡虫啉、毒死蜱等 89 种农药，检测限低至 0.001-0.01 mg/kg，满足欧盟 EC 396/2005 法规的严格要求<sup>[2]</sup>。

有机磷与氨基甲酸酯类农药：采用 HPLC-荧光检测器结合柱后衍生技术，可精准检测大米中甲胺磷（检测限 0.005 mg/kg）和克百威（检测限 0.002 mg/kg）。2022 年某省抽检发现，市售菠菜中敌敌畏残留超标 3 倍（检出值 0.15 mg/kg vs. 国标 0.05 mg/kg），触发产品下架<sup>[2]</sup>。

#### 2.1.2 兽药残留与非法添加剂

抗生素检测：HPLC-紫外检测器可定量分析肉类中的四环素类（如土霉素、金霉素）和磺胺类药物。例如，欧盟规定禽肉中恩诺沙星残留限量为 100 μg/kg，HPLC 法可在 15 分钟内完成检测，回收率达 92%-105%<sup>[3]</sup>。

检测食品中的非法添加剂：通过二极管阵列检测器，可同时测定饮料中的苯甲酸、山梨酸和糖精钠，检测限分别为 0.5 mg/L、0.3 mg/L 和 0.2 mg/L。

### 2.2 食品营养成分分析

#### 2.2.1 维生素与矿物质

脂溶性维生素：HPLC 法可同时测定乳制品中的维生素 A、D、E、K。例如，婴幼儿配方奶粉中维生素 D3 的检测限为 0.1 μg/100g。

水溶性维生素：采用离子对色谱法测定果汁中的维生素 C，检测限为 0.5 mg/100mL。

#### 2.2.2 脂肪酸与氨基酸

脂肪酸组成分析：HPLC-ELSD（蒸发光散射检测器）可测定食用油中 12 种脂肪酸（如油酸、亚油酸）。

必需氨基酸检测：邻苯二甲醛（OPA）柱前衍生-HPLC 法可定量婴幼儿米粉中的赖氨酸、色氨酸等，检测限为 0.01 g/100g。

#### 2.2.3 功能性成分

多酚类物质：HPLC-DAD 法可测定绿茶中的表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG），检测限 0.1 mg/g。

活性肽与蛋白质：凝胶过滤色谱（GFC）用于检测乳清蛋白粉中 α-乳白蛋白与 β-乳球蛋白的比例。

### 2.3 食品质量控制与真实性鉴别

#### 2.3.1 加工过程监控

热处理产物检测：HPLC 法可测定油炸食品中的丙烯酰胺（2A 类致癌物），检测限 10 μg/kg。

发酵产物分析：酱油中的 4-甲基咪唑（焦糖色素副产物）可通过 HPLC-UV 检测，检测限 0.1mg/kg。

#### 2.3.2 食品掺假鉴别

蜂蜜掺糖浆检测：HPLC-RID（示差折光检测器）可分析蜂蜜中糖分组成，天然蜂蜜的果葡比通常为 1.0-1.2。

地沟油鉴别：通过 HPLC 检测胆固醇与特定脂肪酸标志物（如 C18:3n6），可定性定理分析鉴别地沟油。

## 3 液相色谱技术挑战与改进方向

### 3.1 现有技术挑战

#### 3.1.1 样品前处理复杂性与基质干扰

前处理耗时耗力：食品基质中脂肪、蛋白质及色素等成分易污染色谱柱，需通过多步提取与净化。例如，检测蜂蜜中农药残留时，需先去除高浓度糖分，前处理时间占整个分析流程的 70%以上。

基质效应影响准确性：复杂基质可能抑制或增强目标物信号。如 HPLC-MS 检测植物油中塑化剂时，甘油三

酯会降低邻苯二甲酸酯的离子化效率，导致回收率偏差达 20%–30%。

### 3.1.2 检测效率与通量限制

单次分析时间长：传统 HPLC 分析单个样品需 30–60 分钟，例如检测果蔬中多菌灵时，色谱柱平衡与洗脱耗时 45 分钟，难以满足突发食品安全事件的快速响应需求<sup>[4]</sup>。

多目标物同步检测难度大：食品中污染物种类繁多，现有方法常需多次进样或切换色谱条件。某实验室为检测乳制品中 50 种抗生素，需分 3 批次完成，效率低下。

### 3.1.3 检测成本与设备依赖性

高端联用设备成本高昂：HPLC-MS/MS 系统单价超过 50 万美元，中小型检测机构难以承担。尤其是偏远地区、欠发达地区检验检测机构，在购买及后期维护保养方面，存在比较大的经济压力。

色谱柱寿命与维护成本：基质比较复杂食品在前处理不完全的时候，易导致色谱柱堵塞或固定相流失。检测含高脂肪的肉类样品时，C18 柱使用寿命缩短至 300 次进样，年更换成本超 1 万美元。

### 3.1.3 方法标准化与法规差异

国际标准不统一：各国对同一污染物的检测方法存在差异。例如，欧盟采用 EN 15662:2018 (QuEChERS-HPLC-MS 法) 检测农药残留，而美国 FDA 指南要求使用 AOAC 2007.01 方法，导致跨境贸易检测结果互认困难。

标准物质覆盖率不足：新型污染物（如新型抗生素、纳米材料）缺乏认证标准物质。2023 年某研究显示，全球仅 35% 的食品添加剂拥有可溯源的 HPLC 检测标准品。

## 3.2 技术改进方向

### 3.2.1 前处理技术创新

简化提取与净化流程：QuEChERS 方法优化：通过改良吸附剂，可将食用油中农药残留的净化步骤从 4 步缩减至 1 步，回收率提升至 85%–110%。

自动化前处理设备：集成式样品处理工作站可自动完成均质、离心、过滤等步骤，将前处理时间从 2 小时缩短至 20 分钟，人力成本降低 80%。

### 3.2.2 提升检测效率与通量

超高效液相色谱 (UHPLC)：采用亚 2  $\mu\text{m}$  填料色谱柱，在 40 MPa 压力下，分离速度提升 3 倍。例如，检测饮料中 8 种合成色素的分析时间从 18 分钟缩短至 6 分钟<sup>[5]</sup>。结合表面多孔颗粒技术，柱效达 25 万理论塔板

数，可在 10 分钟内分离食用油中 15 种抗氧化剂。

多维色谱联用技术：二维液相色谱 (2D-LC) 通过正交分离模式，单次运行可检测牛奶中 120 种兽药残留，通量较传统 HPLC 提高 4 倍。

在线固相萃取 (Online SPE) 与 HPLC 联用，实现样品净化与分析的自动化衔接，适用于连续检测 200 个水样中的微塑料污染物。

### 3.2.3 降低检测成本与提升普适性

微型化与便携式设备开发：微流控芯片液相色谱 (Microfluidic LC) 将泵、进样器与检测器集成于手掌大小设备中，有效降低成本，可用于现场快速检测肉类新鲜度。纸基色谱技术结合智能手机图像分析，可半定量检测果汁中苯甲酸，检测限 1mg/L，适用于资源匮乏地区。

色谱柱技术创新：耐污染色谱柱采用双层层状硅胶填料，抗脂肪吸附能力提升 50%，使用寿命延长至 1500 次进样。高温色谱 (HTLC) 在 80° C 条件下运行，可减少流动相中有机溶剂比例（乙腈用量降低 40%），年溶剂成本节省超 5000 美元。

### 3.2.4 标准化与智能化升级

统一检测方法：ISO 20638:2023 新标准将 HPLC-MS/MS 法列为婴幼儿奶粉中氯丙醇酯的全球统一检测方法，减少国际贸易技术壁垒。欧盟“地平线欧洲”计划资助开发开放式 HPLC 方法数据库，已收录 2000 种污染物的标准化检测参数。

人工智能辅助分析：深度学习算法可自动识别复杂基质中的共流出峰。某研究显示，AI 处理 HPLC-MS 数据的假阳性率比人工判读降低 60%。智能方法开发软件通过机器学习推荐最优色谱条件，将方法开发周期从 3 个月压缩至 1 周。

## 4 液相色谱技术的未来展望

### 4.1 智能分析系统的深度整合

人工智能驱动全流程优化：基于深度学习的算法将实现从方法开发到结果解析的全链条自动化。例如，AI 可通过分析历史数据自主优化梯度洗脱程序，将色谱峰分离度提升 20% 以上，同时预测未知污染物的保留行为。

实时动态监测与预警：结合物联网 (IoT) 技术，液相色谱设备可接入食品生产链的云端监控平台。例如，乳品工厂通过在线 HPLC 系统实时监测原奶中抗生素残留，异常数据（如恩诺沙星 > 10  $\mu\text{g/kg}$ ）将触发自动

报警并暂停生产线，响应时间缩短至 5 分钟内。

#### 4.2 多组学技术协同应用

代谢组学与食品检测联用：整合 HPLC-MS 与代谢组学数据库，可解析食品污染物的生物代谢路径。例如，通过追踪赭曲霉毒素 A 在人体内的代谢产物，构建毒性效应模型，为风险评估提供分子层面依据。

蛋白质组学与食品检测联用：结合液相色谱与高分辨质谱，建立食品蛋白质“指纹图谱库”。如鉴别燕窝真伪时，可通过特征肽段（如 EGF 表皮生长因子）的相对丰度差异，区分正品与猪皮仿制品，准确率超过 99%。

#### 4.3 绿色检测技术的革新

超临界流体色谱（SFC）替代传统 LC：以 CO<sub>2</sub> 为主要流动相的 SFC 技术可减少 90% 有机溶剂消耗，同时提升脂溶性物质的分离效率。

生物降解材料应用：开发可降解色谱柱填料，减少固废污染。荷兰 UniQure 公司已推出首款生物基 C18 柱，使用寿命达 800 次进样，废弃后可在 6 个月内自然分解。

### 5 结论

液相色谱技术以其自身种种优点，已成为食品安全领域的核心技术。随着联用技术、标准化与智能化的推进，液相色谱技术在食品检测中的应用将更加精准、高效，为全球食品安全保障提供持续动力。

#### 参考文献

- [1] 王洋洋. 高效液相色谱技术在食品检测中的具体应用研究. 现代食品. 2018, 23 (3) : 129-131
- [2] 代锐. 气相液相色谱技术在食品安全检测中的应用研究. 现代食品. 2018, 12 (3) : 61-63
- [3] 龙四红, 黄家岭. 液相色谱在食品检测中的运用研究. 现代食品. 2021, 11 (3) : 147-149
- [4] 李军军. 高效液相色谱技术在食品安全检测中的挑战与改进. 现代食品. 2018, 17 (3) : 61-63
- [5] 苗辰. 液相色谱法在食品检测中的应用进展. 食品安全导刊. 2017, 12 (1) : 105