

凝胶渗透色谱—高效液相色谱法测定预制菜中 5 种荧光增白剂

李冰冰^{1,2} 王春蕾^{1,2} 黄珍珍^{1,2} 戴丽^{1,2} 王坤^{1,2}

(1. 盐城市疾病预防控制中心, 江苏 盐城 224000; 2. 江苏省食品安全风险监测重点实验室, 江苏 盐城 224000)

摘要: [目的] 建立预制菜中 5 种荧光增白剂的凝胶渗透色谱结合高效液相色谱检测方法。[方法] 预制菜样品均质后, 经乙腈超声提取, 凝胶渗透色谱净化、复溶, 过膜后进入高效液相色谱仪测定。以乙腈—水为流动相, Waters Symmetry Shield RP-C₁₈ (4.6 mm × 250 mm, 5.0 μm) 为色谱柱进行梯度洗脱。[结果] 预制菜中 5 种荧光增白剂在 2~500 μg/L 范围内线性关系良好, 相关系数均 > 0.999; 检出限为 0.016~0.233 μg/kg, 定量限为 0.05~0.78 μg/kg。在低、中、高 3 个加标水平下, 5 种荧光增白剂回收率为 75.3%~97.1%, 相对标准偏差 (RSD) 为 0.3%~5.0%。[结论] 试验方法准确可靠, 灵敏度高, 适用于预制菜中荧光增白剂含量测定。

关键词: 凝胶渗透色谱; 高效液相色谱; 预制菜; 荧光增白剂

Determination of five fluorescent whitening agents in prepared dishes by gel permeation chromatography-high performance liquid chromatography

Li Bingbing^{1,2} Wang Chunlei^{1,2} Huang Zhenzhen^{1,2} Dai Li^{1,2} Wang Kun^{1,2}

(1. Center for Disease Control and Prevention of Yancheng, Yancheng, Jiangsu 224000, China;

2. Yancheng Center of Jiangsu Food Safety Risk Monitoring, Yancheng, Jiangsu 224000, China)

Abstract: [Objective] To establish a method for the determination of five fluorescent whitening agents (FWAs) in prepared dishes using gel permeation chromatography combined with high-performance liquid chromatography (GPC-HPLC). [Methods] The prepared dish samples were homogenized, ultrasonically extracted with acetonitrile, purified and reconstituted by GPC, then filtered before being analyzed by HPLC. The separation was performed on a Waters Symmetry Shield PR-C₁₈ column (4.6 mm × 250 mm, 5.0 μm) using acetonitrile and water as the mobile phase with gradient elution. [Results] The five FWAs in the prepared dishes showed good linearity within the range of 2~500 μg/L, with correlation coefficients greater than 0.999. The limits of detection (LODs) ranged from 0.016 to 0.233 μg/kg, and the limits of quantification (LOQs) ranged from 0.05 to 0.78 μg/kg. At three spiked levels (low, medium, and high), the recoveries for the five FWAs were between 75.3% and 97.1%, with relative standard deviations (RSDs) ranging from 0.3% to 5.0%. [Conclusion] The developed method is accurate, reliable, and highly sensitive, making it suitable for the determination of FWAs in prepared dishes.

Keywords: gel permeation chromatography; high-performance liquid chromatography; prepared dishes; fluorescent whitening agents

荧光增白剂 (FWAs) 是一类能吸收紫外光并激发出蓝紫色荧光的化合物, 被广泛用于造纸、纺织、塑料等行业以提升产品白度和亮度^[1-3]。由于其成本低廉、增白效

果显著, 部分食品接触材料中可能违规添加该类物质。荧光增白剂具有潜在的生物毒性, 长期摄入可能对肝脏、肾脏及生殖系统造成损害, 甚至存在致癌、致畸风险^[4-6]。

基金项目: 江苏省食品安全风险监测重点实验室 (编号: 苏卫疾控[2023]6号); 盐城市科技计划项目 (编号: YCBE202466)

通信作者: 王坤 (1976—), 男, 盐城市疾病预防控制中心主任技师。E-mail: 1059452181@qq.com

收稿日期: 2025-06-09 **改回日期:** 2025-12-09

引用格式: 李冰冰, 王春蕾, 黄珍珍, 等. 凝胶渗透色谱—高效液相色谱法测定预制菜中 5 种荧光增白剂[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 77-82.

Citation: Li Bingbing, Wang Chunlei, Huang Zhenzhen, et al. Determination of five fluorescent whitening agents in prepared dishes by gel permeation chromatography-high performance liquid chromatography[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 77-82.

因此,GB 9685—2016 明确规定 FWAs 禁止用于食品生产加工过程。

预制菜作为现代快节奏生活催生的新兴食品品类,因便捷性、标准化特点迅速占据消费市场^[7]。然而,其复杂供应链涉及的多环节包装接触,如塑料容器、淋膜纸盒、保鲜膜等,可能存在 FWAs 迁移污染食品,构成潜在的安全隐患。目前,有关食品接触材料中 FWAs 研究较多,但有关复杂基质的食品体系相关报道较少,主要集中于食用油^[8]、大米^[9]、面粉^[10]、菌菇^[11]等。王春蕾等^[12]和邱月等^[13]采用超高效液相色谱—串联质谱法(UPLC-MS/MS)分别测定了现制饮料和火锅底料中的 FWAs,该仪器在基层的低普及率限制了方法的推广。高效液相色谱—荧光检测法(HPLC-FLD)具有高选择性、高灵敏度、操作相对简单,特别适用于痕量荧光物质的定性定量分析^[14-16]。传统前处理方法如液液萃取、固相萃取等难以有效去除油脂、色素及蛋白质干扰,可能存在回收率低、基质效应明显等缺陷。凝胶渗透色谱(GPC)具有依据分子尺寸分离、高效去除大分子干扰物的特点。因此,二者联用可望实现预制菜等复杂基质中多组分 FWAs 的精准测定。

试验拟聚焦预制菜中 5 种高风险荧光增白剂,构建 GPC-HPLC/FLD 联用分析方法。通过优化 HPLC 分离条件、筛选提取溶剂、确定 GPC 净化参数等突破基质干扰瓶颈,建立一种灵敏、准确的检测体系,为监管部门提供科学的技术支撑和参考价值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

FWA140、FWA162、FWA199:纯度 $\geq 97.6\%$,坛墨质检标准物质中心;

FWA135、FWA185:纯度 $\geq 91.3\%$,上海安谱瑾世标准技术服务有限公司;

乙腈、甲醇、乙酸乙酯、环己烷:色谱纯,安徽天地高纯溶剂有限公司;

N,N-二甲基甲酰胺(DMF):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

预制菜:市售。

1.2 仪器与设备

高效液相色谱仪配置荧光检测器:Agilent 1260II 型,美国 Agilent 公司;

自动凝胶渗透色谱仪:J2 Accuprep 型,美国 J2 Scientific 公司;

纯水仪:IQ 7000 Milli-Q 型,德国 Merck 公司;

高速冷冻离心机:ST 16R 型,美国 Thermo Scientific 公司;

涡旋振荡仪:Multi Reax 多点型,德国 Heidolph 公司;

超声仪:KQ-500DE 型,昆山超声仪器有限公司;

全自动氮吹浓缩仪:NE-24basic 型,深圳新锐精仪科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 标准溶液配制 称取 FWA135、FWA140、FWA162、FWA185 和 FWA199 各 1.0 mg,用 DMF 定容,得各标准储备溶液(质量浓度 100 mg/L);取 1 mL 各标准储备溶液,用 DMF 定容,得混合标准中间溶液(质量浓度 1 mg/L);分别取 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 μ L 混合标准中间溶液,用 DMF 定容,配成质量浓度为 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 μ g/L 标准系列工作溶液。

1.3.2 样品前处理 准确称取 2.00 g 均质后预制菜样品,加入 10 mL 乙腈,超声提取 10 min, 6 000 r/min 离心 5 min,上层清液转移至塑料离心管中,残渣加入 5 mL 乙腈,超声复提 5 min,离心后合并上清液,氮吹至近干,加入 5.0 mL 乙酸乙酯—环己烷混合物($V_{\text{乙酸乙酯}}:V_{\text{环己烷}}=1:1$)复溶,用凝胶渗透色谱仪(GPC)进行分离,取 22~34 min 洗脱组分,浓缩后用 1.0 mL DMF 复溶,过 0.22 μ m 有机滤膜后上机检测。

1.3.3 凝胶渗透色谱条件 GPC 净化柱为 S-X3 Bio-Beads(填料聚苯乙烯凝胶,400 mm $\times$ 25 mm);流动相为乙酸乙酯—环己烷混合物($V_{\text{乙酸乙酯}}:V_{\text{环己烷}}=1:1$);等度洗脱;流速 5 mL/min;进样量 5 mL;净化程序:弃去 0~22 min 的洗脱液,收集 22~34 min 的洗脱液;浓缩程序:40 $^{\circ}$ C 氮吹浓缩 240 s,48 $^{\circ}$ C 氮吹浓缩 180 s,50 $^{\circ}$ C 氮吹浓缩 240 s,用 1.0 mL DMF 定容。

1.3.4 液相色谱条件 色谱柱为 Waters Symmetry Shield RP-C₁₈柱(4.6 mm $\times$ 250 mm, 5.0 μ m);流动相 A 为乙腈,流动相 B 为水;柱温 30 $^{\circ}$ C;流速 1.0 mL/min;进样体积 10 μ L;梯度洗脱程序:0~5.0 min, 20% A;5.0~20.0 min, 20%~90% A;20.0~28.0 min, 90% A;28.0~29.0 min, 90%~20% A;29.0~30.0 min, 20% A;激发波长 365 nm,发射波长 440 nm。

1.3.5 数据处理 基于 Agilent OpenLab CDS Data Analysis 系统进行数据处理,通过 Excel 2019 软件进行数据分析与可视化。

2 结果与分析

2.1 液相色谱条件优化

2.1.1 色谱柱的选择 基于 5 种 FWAs 的疏水性差异及苯环取代基的结构特性,以乙腈—水为流动相,比较 Agilent HC-C₁₈、Waters Spherisorb ODS2-C₁₈、Waters ZORBAX Eclipse Plus-C₁₈、Waters XBridge BEH-C₁₈、Agilent ZORBAX Eclipse XDB-C₁₈ 和 Waters Symmetry Shield RP-C₁₈ 6 种色谱柱(4.6 mm $\times$ 250 mm, 5.0 μ m)的分离效果。由图 1 可知,以 RP-C₁₈ 柱(4.6 mm $\times$ 250 mm,

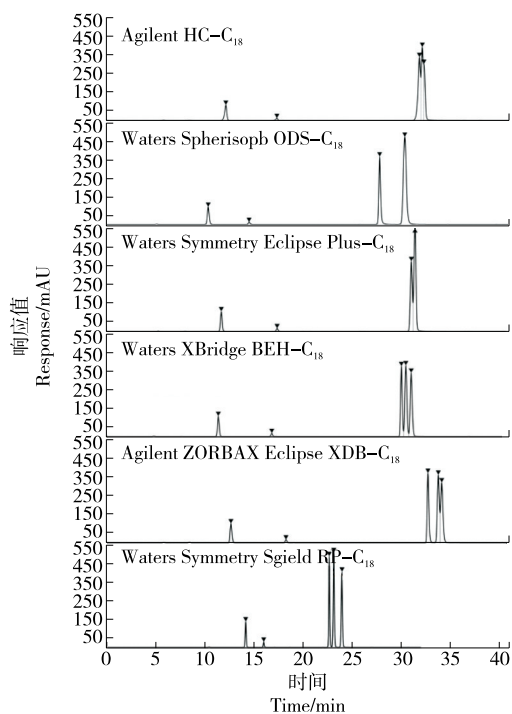


图1 不同色谱柱比较

Figure 1 Comparison of different chromatographic columns

5.0 μm)作为分离载体时,分离度最高($R>1.0$)、柱效稳定性最好($\text{RSD}<0.5\%$, $n=5$)、峰对称性及响应强度表现最佳,可满足复杂基质中多组分FWAs的同步分析需求,因此选用 Waters Symmetry Shield RP-C₁₈ 柱(4.6 mm $\times$ 250 mm, 5.0 μm)为色谱柱。

2.1.2 流动相的优化 在乙腈—水流动相体系下,考察洗脱程序(TD1: 0~5.0 min, 30% A; 5.0~20.0 min, 30%~90% A; 20.0~25.0 min, 90% A; 25.0~26.0 min, 90%~30% A; 26.0~30.0 min, 30% A。TD2: 0~5.0 min, 30% A; 5.0~35.0 min, 30%~90% A; 35.0~40.0 min, 90% A; 40.0~42.0 min, 90%~30% A; 42.0~47.0 min, 30% A。TD3: 0~5.0 min, 30% A; 5.0~21.0 min, 30%~90% A; 21.0~26.0 min, 90%~30% A; 26.0~28.0 min, 30% A; 28~29 min, 30%~90% A; 29.0~31.0 min, 90% A; 31.0~32.0 min, 90%~30% A; 32.0~37.0 min, 30% A)对FWAs分离度的影响。由图2可知,当乙腈体积分数为20%,15 min内体积分数由20%线性提升至90%(对应梯度斜率约为4.67%/min)时,分离效果最佳,此条件下,5种FWAs的分离度(R)均 >1.5 ,满足良好分离的要求;同时,理论塔板数均超过 5×10^4 ,表明色谱柱效能优异。基于上述优化结果,最终确定的洗脱程序为TD4: 0~5.0 min, 20% A; 5.0~20.0 min, 20%~90% A; 20.0~28.0 min, 90% A; 28.0~29.0 min, 90%~20% A; 29.0~30.0 min, 20% A。

2.1.3 检测波长的选择 通过对5种FWAs混合标准溶

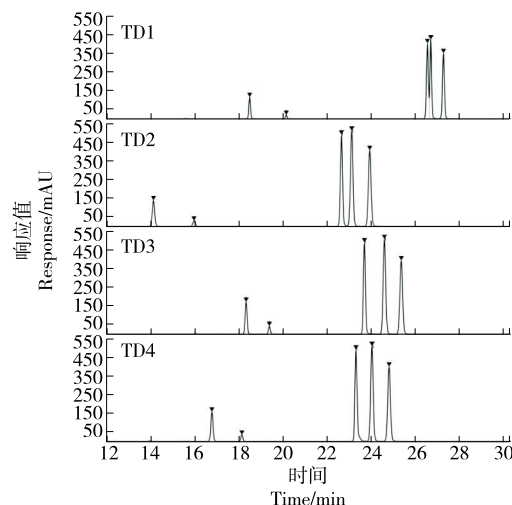


图2 流动相不同梯度比对

Figure 2 Comparison of different gradient ratios of the mobile phase

液进行全光谱扫描,以确定各目标化合物的最大激发波长和最大发射波长。由表1可知,5种FWAs的最大激发波长集中在360~376 nm,最大发射波长分布在434~469 nm。为了在单次分析中兼顾所有FWAs的最大响应,且考虑到实际检测的兼容性与信号强度,最终选择激发波长365 nm,发射波长440 nm作为荧光检测器的检测条件。在此条件下,所有目标FWAs均表现出较高的荧光响应信号,从而确保方法的检测灵敏度和适用性。

表1 5种荧光增白剂的最大激发波长和发射波长

Table 1 Maximum absorption excitation wavelength and emission wavelength of the 5 FWAs

化合物	最大激发波长/nm	最大发射波长/nm
FWA162	370	469
FWA140	376	465
FWA199	370	440
FWA135	360	437
FWA185	365	434

2.2 提取溶剂的选择

基于5种FWAs的极性特征及后续渗透凝胶色谱(GPC)净化步骤对提取液兼容性的要求,评价了甲醇、乙腈、乙酸乙酯、环己烷、乙酸乙酯—环己烷混合物5种提取溶剂的提取效率。由图3可知,乙腈的提取效率(90.1%~104.8%)显著高于其他溶剂。此外,在提取过程中,乙腈表现出优异的沉淀能力,能有效去除预制菜样品中的脂质和蛋白质组分,减少GPC后续净化负担。因此,采用乙腈作为提取溶剂。

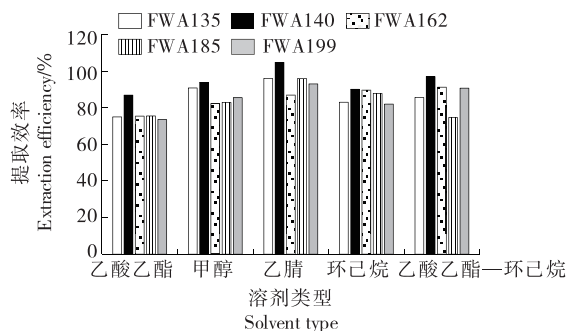


图3 不同提取溶剂提取效率的比较

Figure 3 Comparison of the extraction efficiency in different extraction solvents

2.3 凝胶渗透色谱分离条件优化

针对预制菜样品基质复杂,所含蛋白质、脂质及色素等大分子物质可能会干扰FWAs检测的问题,引入凝胶渗透色谱(GPC)技术进行深度净化,以实现FWAs与干扰物的有效分离。GPC基于分子排阻效应,通过色谱柱填料的孔径筛分机制,依据相对分子质量大小差异进行分离,相对分子质量较大的干扰物质如蛋白质、脂质、色素等在柱外体积处优先洗脱,而相对分子质量较小的FWAs则进入填料孔隙被保留,从而延迟洗脱。此原理有效避免了传统液液萃取(LLE)或固相萃取(SPE)中因吸附竞争或共萃取导致的回收率损失与基质效应等问题。此外,采用的在线GPC系统集成自动化进样、馏分收集、在线浓缩为一体,可避免离线净化中溶剂挥发与交叉污染风险。

为优化GPC净化条件,以实现目标FWAs的高效回收与复杂基质干扰物的有效排除,对GPC的洗脱行为和收集窗口进行了系统性考察。由图4可知,5种FWAs在21~35 min的洗脱窗口内完全流出。为评估大分子物质对FWAs收集的潜在干扰,选取具有代表性的高脂肪、高蛋白的红烧肉预制菜作为空白基质,在与标准品相同的GPC条件下进行洗脱试验,并于254 nm处记录其吸收信号。样品中大量的蛋白质、脂质等主要大分子干扰物在9~24 min流出,此洗脱时间与FWAs的洗脱窗口存在差异

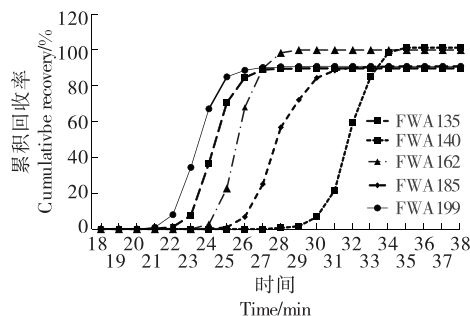
但也有重叠。结合FWAs标准品与空白基质中大分子干扰物的洗脱行为,为保证FWAs最大回收率的同时,最大限度减少基质干扰,最终确定GPC的收集窗口为22~34 min。此收集窗口不仅能确保5种FWAs的累积回收率均达到90%以上,还能高效避免大分子化合物的干扰。此外,为验证GPC净化方法的稳定性和精密度,进行了连续5次的重复测定。结果显示,5种FWAs的回收率相对标准偏差(RSD)均<5%,证明GPC净化方法在预制菜基质中对于FWAs分析的适用性、高回收率以及稳定性。

2.4 GPC在不同预制菜基质中的应用效果

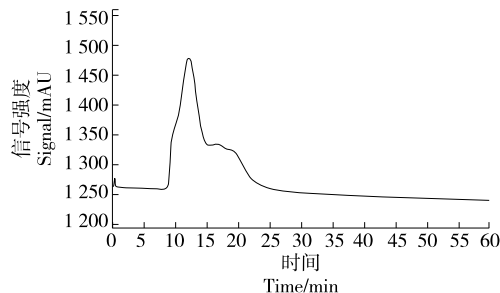
为评估GPC前处理方法的适用范围,选取招牌红烧肉、萝卜丝肉丸以及清脆双笋3种典型的预制菜进行考察,其分别代表高脂高蛋白、复合菜肴和植物基质,通过对比净化前后的HPLC-FLD色谱图来评估GPC的净化性能。由图5可知,3种基质的样品提取液在净化前均表现出高且不稳定的荧光背景及大量复杂杂峰,相比之下,经GPC方法净化后,所有样品的色谱基线均变得平稳、洁净,基质干扰得到彻底去除。结果表明,该方法具有一定的基质耐受性,其净化效能不易受样品中脂肪、蛋白质等主要成分的影响。原因在于,该前处理方法所依赖的分子排阻色谱原理主要依据分子尺寸而非化学亲和性进行分离,因此能稳定地将小分子的目标物(FWAs)与大分子的基质干扰物有效分离。因此,试验方法展现出广泛的适用性,可为不同种类预制菜中FWAs的检测提供可靠的前处理技术支持。

2.5 线性关系、相关系数、检出限与定量限

使用DMF将混合标准溶液稀释成系列标准溶液,用高效液相色谱仪进行检测。以标准工作溶液质量浓度为横坐标,各化合物峰面积为纵坐标绘制标准曲线,5种荧光增白剂在2~500 $\mu\text{g/L}$ 质量范围内线性良好,相关系数均>0.999。以加标基质的3倍信噪比($S/N=3$)为检出限,10倍信噪比($S/N=10$)为定量限,按照GB/T 27417—2017方法计算,5种荧光增白剂检出限为0.016~0.233 $\mu\text{g/kg}$,定量限为0.05~0.78 $\mu\text{g/kg}$ (见表2)。



(a) 累积回收率—时间曲线图



(b) 空白基质中大分子物质紫外洗脱谱图(254 nm)

图4 基于FWAs与基质干扰物洗脱行为的GPC收集窗口优化

Figure 4 Optimization of the GPC collection window based on the elution behaviors of FWAs and matrix interferences

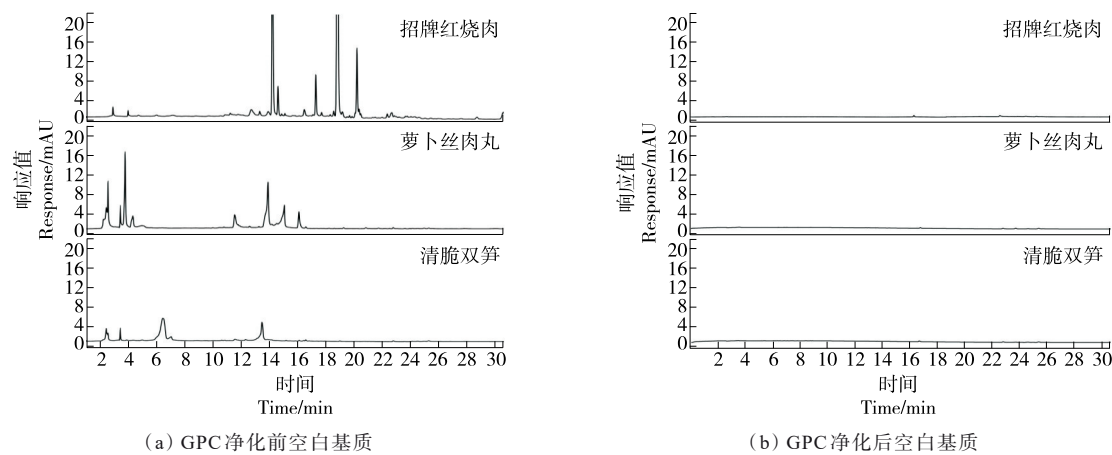


图5 HPLC-FLD 色谱图对比

Figure 5 Comparison of the HPLC-FLD chromatograms

表2 5种荧光增白剂的线性方程、相关系数、检出限和定量限

Table 2 Linear equations, correlation coefficients, limits of detection (LODs), and limits of quantification (LOQs) of the 5 FWAs

化合物	线性方程	相关系数	检出限/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	定量限/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
FWA135	$y=3.624\ 8x+2.859\ 9$	0.999 92	0.032	0.11
FWA140	$y=0.518\ 5x+0.251\ 1$	0.999 95	0.233	0.78
FWA162	$y=0.740\ 1x+0.269\ 7$	0.999 95	0.169	0.56
FWA185	$y=3.026\ 1x+2.182\ 4$	0.999 95	0.032	0.11
FWA199	$y=3.178\ 0x+2.985\ 5$	0.999 92	0.016	0.05

2.6 回收率与相对标准偏差

由表3可知,6次平行测试的平均回收率为75.3%~97.1%,相对标准偏差(RSD)为0.3%~5.0%,表明试验方法的回收率和稳定性均符合要求。

2.7 方法的实际应用

选取市售的20份预制菜进行测定,结果检出FWA135共2份(0.76~0.78 $\mu\text{g}/\text{kg}$),FWA140共4份(1.00~

2.10 $\mu\text{g}/\text{kg}$),FWA162共4份(1.04~5.83 $\mu\text{g}/\text{kg}$),FWA185共2份(0.52~0.80 $\mu\text{g}/\text{kg}$),FWA199共3份(0.97~1.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。该检测结果表明,FWAs污染的主要来源可能是生产供应链中的无意迁移,而非非法添加。尽管样品检出率高,且种类多达5种,但所有检出质量浓度均处于0.52~5.83 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的痕量范围,不符合非法添加通常导致的单一、高浓度模式。因此推测,某类食品接触材料(如包装袋、标签)含有不同类型的FWAs,在加工和贮藏过程中向预制菜中发生了迁移。

3 结论

结果表明,试验建立的凝胶色谱—高效液相色谱法测定预制菜中5种荧光增白剂,5种目标物可以达到较好的分离度、准确度、精密度;方法的线性良好,稳定准确,灵敏度高,该方法可扩展至预制菜中其他添加剂的定量研究。目前,该方法只测定了5种荧光增白剂,后续可增加荧光增白剂的种类,提高检测效率。

参考文献

[1] 李扬动, 赵鹏程, 王宗兴, 等. 超高效液相色谱法检验复印纸中荧光增白剂及其在文件真实性鉴定中的应用研究[J]. 分析测试学报, 2024, 43(9): 1 398-1 408.

Li Y D, Zhang P C, Wang Z X, et al. Determination of fluorescent whitening agent in copy paper by UHPLC and its application in authentication of documents[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2024, 43(9): 1 398-1 408.

[2] 任洁芳, 王瑾, 唐纱丽, 等. 婴童纺织品中可迁移性荧光增白剂的定性方法及迁移规律[J]. 印染, 2025, 51(1): 71-74.

Ren J F, Wang J, Tang S L, et al. Qualitative methods and migration patterns of migratory fluorescent whitening agents in textile products for infants and children[J]. China Dyeing & Finishing, 2025, 51(1): 71-74.

[3] 章宦胜, 魏小春, 唐玉红. 食品接触材料中荧光增白剂的研究

表3 5种荧光增白剂加标回收率和相对标准偏差

Table 3 Recoveries and relative standard deviations (RSDs) of the 5 FWAs ($n=6$)

化合物	低(1 $\mu\text{g}/\text{kg}$)		中(50 $\mu\text{g}/\text{kg}$)		高(250 $\mu\text{g}/\text{kg}$)	
	回收率/%	RSD/%	回收率/%	RSD/%	回收率/%	RSD/%
FWA135	75.3	2.0	90.0	0.6	88.8	1.1
FWA140	79.6	4.0	91.7	0.5	96.4	0.5
FWA162	85.4	3.1	83.1	0.3	88.7	0.4
FWA199	92.1	1.1	85.6	1.6	97.1	0.5
FWA185	92.8	5.0	88.0	0.7	84.3	0.5

- 进展[J]. 食品安全导刊, 2025(7): 178-180.
- Zhang H S, Wei X C, Tang Y H. Research progress of fluorescent brighteners in food contact materials[J]. China Food Safety Magazine, 2025(7): 178-180.
- [4] Zhao X Y, Yang D Q, Pang Y H, et al. Quaternary ammonium salt ion pair reagent sensitizing for determination of fluorescence whitening agent 85 in paper food packaging[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 231: 118125.
- [5] 张虹艳, 石晓峰, 王小乔, 等. 面膜中荧光增白剂的透皮吸收特性及对皮肤刺激性的实验研究[J]. 日用化学工业, 2022, 52(3): 322-327.
- Zhang H Y, Shi X F, Wang X Q, et al. Study on transdermal absorption and skin irritation of fluorescent whitening agents in facial mask[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2022, 52(3): 322-327.
- [6] Gu Y X, Yang J Q, Pan S Y, et al. Determination of fluorescent whitening agents in cosmetics and liquid detergent by high-performance liquid chromatography with diode array detector in tandem with fluorescence detector[J]. Journal of Cosmetic Science, 2018, 69(4): 279-291.
- [7] 张辉, 张晓燕, 冯冬梅. 预制菜产业发展面临的挑战与应对策略研究[J]. 食品安全导刊, 2025(13): 140-142.
- Zhang H, Zhang X Y, Feng D M. Research on the challenges and coping strategies of prepared dishes industry[J]. China Food Safety Magazine, 2025(13): 140-142.
- [8] 张云, 陈泽宇, 吕水源, 等. 高效液相色谱法测定食用油中 10 种荧光增白剂迁移量[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 82-84.
- Zhang Y, Chen Z Y, Lv S Y, et al. Simultaneous determination of 10 species of fluorescent whitening agent migration in edible oil by high performance liquid chromatography[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(24): 82-84.
- [9] 张水锋, 潘项捷, 施元旭, 等. 基质分散液-液微萃取结合高效液相色谱-串联质谱法测定商品大米中的 8 种荧光增白剂[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1 156-1 163.
- Zhang S F, Pan X J, Shi Y X, et al. Determination of 8 kinds of fluorescent whitening agents in commercial rice by matrix synchronous dispersive liquid-liquid microextraction combined with high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(4): 1 156-1 163.
- [10] 谢江宁, 许海棠, 覃昆飞, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定面粉中 8 种荧光增白剂[J]. 职业与健康, 2025, 41(6): 750-755.
- Xie J N, Xu H T, Tan K F, et al. Determination of 8 fluorescent whitening agents in flour by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Occupation and Health, 2025, 41(6): 750-755.
- [11] 王天娇, 吴平谷, 胡争艳, 等. 应用 UPLC-FLD 技术检测食用菌荧光增白剂[J]. 预防医学, 2018, 30(10): 1 007-1 010.
- Wang T J, Wu P G, Hu Z Y, et al. Application of UPLC-FLD technology to detection of fluorescent whitening agents in edible fungi[J]. Preventive Medicine, 2018, 30(10): 1 007-1 010.
- [12] 王春蕾, 黄珍珍, 李冰冰, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定现制茶饮中 11 种荧光增白剂[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(12): 1 333-1 341.
- Wang C L, Huang Z Z, Li B B, et al. Determination of 11 fluorescent whitening agents in fresh tea drinks by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(12): 1 333-1 341.
- [13] 邱月, 刘小玉, 向东, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法测定火锅底料中 14 种荧光增白剂[J]. 食品科技, 2025, 50(3): 329-337.
- Qiu Y, Liu X Y, Xiang D, et al. Determination of 14 kinds of fluorescent whitening agents in hot pot condiment by QuEChERS-ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(3): 329-337.
- [14] 胡云, 邹勇平, 周元元, 等. 高效液相色谱法测定聚乳酸吸管中甲醛迁移量[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 51-56, 90.
- Hu Y, Zou Y P, Zhou Y Y, et al. Migration quality of formaldehyde in the polylactic acid straw detected by HPLC [J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 51-56, 90.
- [15] 李绮淇, 黄嘉乐, 穆姝夷, 等. 柱前衍生-高效液相色谱荧光检测法测定乳制品中 6 种母乳寡糖[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 54-58.
- Li Q Q, Huang J L, Mu Z Y, et al. Determination of six human milk oligosaccharides in dairy product by precolumn derivatization high performance liquid chromatography with fluorescence detection[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 54-58.
- [16] 姚誉阳, 徐曼, 潘春燕, 等. 全自动固相萃取-高效液相色谱法测定现制饮料中 7 种合成着色剂[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 82-88, 94.
- Yao Y Y, Xu M, Pan C Y, et al. Determination of 7 synthetic colorants in freshly prepared beverages by high performance liquid chromatography dual wavelength method with automatic solid phase extraction[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 82-88, 94.