DOI:10.12441/spyswjs.20251125001 [文章编号] 1673-1689(2026)07-0024-08

食品中5-羟甲基糠醛检测方法研究进展

蒋彩云[1,2] 王 新[1,2] 李丹阳[3] 练鸿振[4,5*]

(1. 江苏经贸职业技术学院健康学院,江苏 南京 211168; 2. 江苏省食品安全工程技术研究开发中心,江苏 南京 211168; 3. 江苏省环境科学学会,江苏 南京 210019; 4. 南京大学化学化工学院,江苏 南京 210023; 5. 生命分析化学全国重点实验室,江苏 南京 210023)

摘要:5-羟甲基糠醛(5-HMF)主要由含糖食品在热处理或长期贮存过程中,经焦糖化反应或美拉德反应生成。当5-HMF摄入量超过75 mg/kg时,易产生细胞毒性、遗传毒性、致突变性和致癌性,因此5-HMF被视为食品中的内源性污染物。作者综述了5-HMF的检测方法,包括光谱法、色谱法、电化学法和生物学方法等,阐述了各类方法的基本原理、技术特点及其在食品质量分析领域的应用现状,并对5-HMF检测技术的发展趋势进行了展望,以期为食品安全评价体系与加工工艺的建立与完善提供依据。

关键词:5-羟甲基糠醛;内源性污染物;光谱法;色谱法

Research Progress in Detection of 5-Hydroxymethylfurfural in Foods

JIANG Caiyun[1,2] *WANG Xin*[1,2] *LI Danyang*[3] *LIAN Hongzhen*[4,5*]

(1. School of Health, Jiangsu Vocational Institute of Commerce, Nanjing 211168, China; 2. Jiangsu Engineering Research and Development Center of Food Safety, Nanjing 211168, China; 3. Jiangsu Society for Environmental Sciences, Nanjing 210019, China; 4. School of Chemistry & Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 5. State Key Laboratory of Analytical Chemistry for Life Science, Nanjing 210023, China)

Abstract: 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF) is mainly produced through the caramelization reaction or Maillard reaction that occurs during heat treatment or long-term storage of sugary foods. When the intake amount of 5-HMF exceeds 75 mg/kg, it is prone to produce cytotoxicity, genotoxicity, mutagenicity, and carcinogenesis. Therefore, 5-HMF has been identified as an endogenous pollutant in foods. The author reviews various analytical methods for 5-HMF, including spectroscopic, chromatographic, electrochemical, and biological methods. It summarizes the basic principles, characteristics, and recent applications of these methods in food quality analysis, and makes an outlook on the development trend of 5-HMF detection technology, aiming to provide reference for the establishment and improvement of food safety quality evaluation systems and processing technology standards.

Keywords: 5-hydroxymethylfurfural; endogenous pollutant; spectroscopic method; chromatographic method

5-HMF是糖类物质在高温、弱酸等条件下脱水生成的一种具有呋喃环结构的糠醛类化合物,广泛存在于蜂蜜、咖啡、面包、啤酒、果汁、果干等食品中,其含量会随加工温度升高或贮存时间延长而上升,这与含糖食品在热处理或长期贮存过程中发生的焦糖化反应与美拉德反应密切相关[1]。

5-HMF对健康的影响具有明显的剂量依赖性:低剂量条件下,其具有抗氧化、抗过敏、降血

基金项目:国家自然科学基金面上项目(21874065,22176085);江苏省高校优秀科技创新团队项目;江苏省第六期“333人才”培养资助项目;江苏省农业自主创新资金项目(CX(23)3045)。

通信作者:练鸿振(1963—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事色谱分离与分析研究。E-mail: hzlian@nju.edu.cn

收稿日期:2025-11-25 **修回日期:**2026-01-15

糖、抑制镰状红细胞形成及促进血液流动等多种药理活性；当剂量高于75 mg/kg时，会对眼部、上呼吸道、皮肤产生刺激，同时具有致敏性、肾毒性、致癌性、遗传毒性和致突变性[2]。因此，严格控制其在食品中的含量具有重要意义。联合国粮食及农业组织（FAO）与世界卫生组织（WHO）联合发布的《国际食品法典》规定，蜂蜜中5-HMF质量分数不得超过40 mg/kg，对于产自热带气候国家或地区的蜂蜜，该限量值可放宽至80 mg/kg[3]；国际果汁加工联合会（IFFJP）建议果汁中5-HMF的最大残留量为5~10 mg/L，浓缩果汁中为25 mg/L。由此可见，5-HMF检测是食品质量控制的关键环节，可用于评价食品加工工艺、贮存条件适宜性与新鲜度，从而保障食品安全。

目前，食品中5-HMF的检测方法主要包括紫外-可见分光光度法、高效液相色谱法及色谱-质谱联用法。近年来，随着检测技术不断进步及市场对高效、快速检测方法的需求增长，电化学法、生物学方法等快速检测方法得到了迅猛发展。尽管这些快速检测方法在灵敏度、特异性和稳定性方面仍存在局限性，但凭借成本低廉、操作简便、适用于现场实时检测、可满足大规模样本快速筛查等优势，在食品安全检测领域展现出广阔的应用前景。

1 检测方法

1.1 光谱法

1.1.1 紫外-可见分光光度法

紫外-可见分光光度法（UV-Vis）是利用5-HMF在284 nm的特征吸收峰，且其吸光度与浓度呈线性关系，从而实现定量检测。但在复杂基质样品的实际检测中，该方法易受共存色素及结构类似物的干扰，特异性较差，通常需要进行样品前处理以提升方法的选择性和灵敏度。Baş等[4]在十二烷基硫酸钠（SDS）存在条件下，使3,7-二氨基-5-苯基吩嗪-5-鎓氯化铵（PSF^+）与5-HMF选择性形成席夫碱加成物和离子对，借助表面活性剂Triton X-114完成提取富集，经乙醇稀释后于532 nm测定吸光度。该方法回收率为95%~99%，相对标准偏差（RSD）为3.0%~4.2%。综上，该方法具有操作简便、检测快速、成本低廉的优点。

1.1.2 衰减全反射傅里叶变换红外光谱

衰减全反射傅里叶变换红外光谱（ATR-FTIR）是一种结合衰减全反射技术与傅里叶变换红外光谱技术的分析方法，进行定量分析时一般需要结合化学计量学模型。Stöbener等[5]以蜂蜜中110 μg/g的5-HMF为研究对象，探究ATR-FTIR结合化学计量学模型用于痕量化合物定量分析的可行性。结果发现，预测均方根误差低至13 μg/g，证实了ATR-FTIR用于痕量化合物定量分析的可行性。该方法具有操作简便、样品用量少、检测快速、无需复杂前处理且环境友好等优点，但存在灵敏度不足、基质干扰严重、定量精度有限等缺点，限制了其在复杂样品中的应用。

1.1.3 表面增强拉曼散射光谱

表面增强拉曼散射光谱（SERS）是通过增强拉曼散射效应获取分子结构信息的技术。食品中5-HMF的SERS检测原理为：5-HMF吸附于粗糙金属表面时，表面等离子体共振效应会显著放大局部电磁场，增强5-HMF的拉曼散射信号，通过建立5-HMF浓度与SERS信号强度的线性关系，即可实现5-HMF的定量检测。Zhang等[6]采用经典溶剂热还原法合成胶体金纳米颗粒（AuNPs）作为增强基底，利用SERS技术对奶酪中的5-HMF进行检测，并结合密度泛函理论完成5-HMF振动峰的确认及AuNPs基底的表面增强效应的解析。结果显示，在0.1~75.0 mmol/L范围内，5-HMF在AuNPs基底上具有良好的线性响应，检测限（LOD）为75 μmol/L。SERS具有灵敏度高、非破坏性、分析速度快等优点，但由于其增强效果受基底材料结构及目标物与增强基底间距离等因素的影响，该方法在选择性、稳定性和重现性方面存在一定的局限性[7]。

1.1.4 火焰原子吸收光谱法

火焰原子吸收光谱法（FAAS）多用于溶液中金属元素的定量检测，检测水平通常为μg/g至ng/g量级。FAAS检测原理为：待测元素形成气态自由原子后，在特定波长的照射下吸收光子跃迁至高能级，再经非辐射跃迁快速回到基态，通过检测吸收光的强度实现目标元素的定量。Gürkan[8]建立了超声辅助浊点萃取法（UA-CPE），用于蜂蜜和果酱样品中痕量5-HMF的分离与富集。该方法以SDS为反离子和灵敏度增强剂（离子对辅助配体），与Triton X-45复配形成混合表面活性剂，在pH 9.0的条件下提取Mn（II）与羟胺、5-HMF生成的

螯合物，将富含表面活性剂的胶束相用酸性丙酮稀释至0.5 mL，再通过FAAS检测与5-HMF含量呈线性关系的Mn(II)含量，从而间接实现5-HMF的测定。该方法线性范围为4~240 μg/L，LOD达1.27 μg/L，回收率>90.5%，RSD<7.5%。FAAS具有选择性高、灵敏度高、操作简便等优点，但该间接检测方法需要筛选可与5-HMF特异性结合的配位反应体系，样品需转化为液态，且对稀土元素等难挥发元素的检测灵敏度较低。

1.2 色谱法

1.2.1 薄层色谱法

薄层色谱法(TLC)属于固-液吸附色谱，依靠吸附剂对不同极性组分的吸附能力差异实现样品分离。Mehdiyeva等[9]采用QuEChERS方法提取市售的缺铁性贫血(IDA)膳食补充剂——糖蜜中的5-HMF，依据分离后5-HMF斑点信号与含量之间的线性关系完成定量分析，并从选择性、线性范围、检测限、定量限、准确度、精密度等方面开展方法学验证。结果表明，该方法的5-HMF线性范围为50~400 ng/mL，相关系数为0.997 7，平均回收率为85.75%~103.04%，RSD<6.08%。作为平面色谱技术，TLC具有成本低廉及操作简便、快速的优点，但对于成分复杂或组分性质相近的混合物，分离效果有限，且环境友好性较差。

1.2.2 气相色谱法

气相色谱法(GC)依靠样品组分在气相和固定相之间的分配平衡实现分离，组分含量与检测器响应信号(如峰面积或峰高)呈正比，以此完成挥发性化合物的定性和定量分析。Raofie等[10]建立了一种超临界流体萃取与直接浸入式固相微萃取-毛细管气相色谱联用技术，用于测定枣中的5-HMF。该方法配备火焰离子化检测器，检测限为1.28~5.92 μg/kg，线性范围为4.54~500.00 mg/kg，相关系数>0.999 5。作为柱色谱法，GC凭借高效、灵敏等优势在分析化学领域占有重要地位，但在实际应用中需要根据样品特性优化色谱条件，或与其他技术联用来弥补自身局限性。因此，在现有文献中，采用GC检测5-HMF的研究相对较少。

1.2.3 高效液相色谱法

高效液相色谱法(HPLC)依靠不同物质在固定相与流动相之间分配系数的差异实现分离，结合紫外、二极管阵列等检测器完成测定。HPLC具有分离效率高、适用范围广等优点，在色谱分析实际应用中占比超过80%。在5-HMF的HPLC检测中，以基于疏水性差异的反相高效液相色谱法(RP-HPLC)为主。黄丹丹等[11]采用甲醇提取酱油、食醋、甜面酱、豆瓣酱等发酵调味品中的5-HMF，利用RP-HPLC在285 nm波长处进行定量分析。结果显示，5-HMF的加标回收率为99.2%~104.8%。采用该方法对常见的酱油、食醋、甜面酱、豆瓣酱等进行5-HMF污染水平评价，发现甜面酱因原料淀粉含量较高，5-HMF平均质量分数高达207.38 mg/kg，食醋中5-HMF质量分数为2.99~132.68 mg/kg，豆瓣酱、酱油中5-HMF质量分数均低于5 mg/kg。吴菲菲[12]选用Agilent ZORBAX Eclipse XDB-C18色谱柱，以甲醇-体积分数0.1%磷酸水溶液(体积比15∶85)为流动相，在284 nm检测酒地黄中的5-HMF，该方法在5.0~100.0 μg/mL范围内线性关系良好。另外，当炮制温度由70 ℃升至100 ℃时，5-HMF质量分数增加3.52倍；当炮制时间由0 h延长至12 h时，5-HMF质量分数增加17.4倍，整体呈S形累积趋势。Godoy等[13]同样采用RP-HPLC配备二极管阵列检测器(DAD)，以2,5-呋喃二甲酸(FDCA)为内标，分析巴西不同来源的蜂蜜样品中的5-HMF质量分数。结果表明，蜂巢原蜜中5-HMF质量分数较低(<36.92 mg/kg)，养蜂场蜂蜜中5-HMF质量分数≤10 mg/kg，商业蜂蜜中5-HMF质量分数差异较大(0~157.34 mg/kg)。相较于GC，HPLC条件温和，适用于高沸点、难挥发、热不稳定等组分，是5-HMF检测的主流技术。

1.2.4 胶束电动毛细管色谱法

毛细管电泳是以毛细管为分离通道、高压直流电场为驱动力，依据样品组分的淌度或分配行为的差异实现分离，依靠迁移时间或峰面积与浓度的对应关系进行定量分析。胶束电动毛细管色谱法(MEKC)无静态固定相，而是将胶束作为准固定相，胶束可在分离通道内迁移，属于色谱-电泳联用分离模式；既可利用准固定相与分析物的相互作用，也可借助带电组分在电场中的迁移行为差异实现分离[14-15]。徐蕊等[16]建立了微波辅助离子液体分散液微萃取-MEKC联用方法，实现了食用油中丙烯酰胺(AA)与5-HMF的同步检测。该研究系统优化了离子液体种类、萃取条件、色谱分离条件等参数。在最佳条件下，5-HMF在0.5~50.0 μg/mL范围

内线性关系良好（R^2≥0.997 1），LOD为0.70 μg/mL，加标回收率为77.9%~95.9%，RSD为1.7%~4.9%。实际样品检测结果显示，3种市售芝麻香油和1种自制花椒油中5-HMF质量浓度为1.1~3.3 μg/mL。该方法操作简便、经济环保，适用于食用油中5-HMF的快速检测。

1.2.5 气相色谱-质谱联用法

气相色谱-质谱联用法（GC-MS）结合了GC对复杂基质的高分离能力与MS的高选择性、高灵敏度及结构鉴定能力，广泛应用于食品、药物和环境样品中复杂成分分析。我国出入境检验检疫行业标准SN/T 1859—2007《饮料中棒曲霉素和5-羟甲基糠醛的测定方法 液相色谱-质谱法和气相色谱-质谱法》采用GC-MS测定饮料中的5-HMF[17]。Wu等[18]建立了QuEChERS前处理结合气相色谱-三重四极杆串联质谱（GC-MS/MS）的分析方法，同步测定奶粉中包含5-HMF在内的7种糠醛类化合物。在最优检测条件下，奶粉基质中7种糠醛类化合物在一定质量浓度范围内均具有良好的线性关系。其中5-HMF的LOD、LOQ分别为0.001、0.003 mg/kg，回收率为92.06%~106.19%，日内RSD与日间RSD分别为0.01%~3.32%和0.09%~1.58%。对34份实际样品的检测发现，低聚半乳糖和果糖会显著提高奶粉中5-HMF质量分数，且2（5*H*）-呋喃酮水平与碳水化合物占比呈正相关，证实了该方法在实际样品分析中的可靠性和实用性。与GC相比，GC-MS和GC-MS/MS具有更优的灵敏度与可靠性，已成为多种基质中痕量目标化合物定性与定量分析的有效手段。

1.2.6 高效液相色谱-质谱联用法

高效液相色谱-质谱联用法（HPLC-MS）以液相色谱为分离系统，质谱为检测系统，样品经色谱分离后发生离子化，质谱的质量分析器按质荷比对离子碎片进行分离，最终经检测器得到质谱图。González等[19]采用固-液萃取（SLE）结合固相萃取（SPE）前处理，以功能化介孔硅材料为吸附剂，利用高效液相色谱-串联质谱法（HPLC-MS/MS）测定谷物与昆虫棒中的5-HMF，发现样品中5-HMF质量分数较高，为336~962 mg/kg。该方法性能优异，LOD与LOQ分别为11、38 μg/kg，重现性好（RSD<8%），准确性高（回收率为99%~102%）。Long等[20]建立了超高效液相色谱-串联质谱法（UHPLC-MS/MS），可同步检测饼干、麻花、猫耳朵及带壳花生中的9种霉菌毒素、丙烯酰胺和5-HMF。该方法采用增强型脂质去除吸附剂（EMR-lipid）进行分散固相萃取（d-SPE）净化，选用C18-PFP色谱柱实现目标物的有效分离。方法学验证结果表明，各目标物线性关系良好（R^2>0.99），回收率为70.67%~104.88%，RSD<12.49%，满足多组分残留检测要求。HPLC-MS/MS凭借高灵敏度、良好重现性等优势，已成为当前5-HMF检测中权威性高、应用最广泛的技术之一。但受食品基质复杂性限制，样品在进入HPLC-MS/MS分析前，一般需完成提取、富集等前处理操作。

1.3 核磁共振波谱法

核磁共振波谱法（NMR）是一种基于核磁共振现象的谱学技术，可解析分子结构、研究物质动态过程，还能够进行定量分析，其中氢核磁共振（^{1}H NMR）和碳核磁共振（^{13}C NMR）的应用最广泛。Nordin等[21]将^{1}H NMR与统计总相关光谱（STOCSY）、分辨率增强STORM（RED-STORM）方法相结合，对7种市售咖啡样品进行分析。结果显示，所有样品均未检出乙醇，100 mg速溶咖啡样品中糠醇和5-HMF质量分别为0.817、0.055 μg。NMR分辨率高，单次检测即可获取样品中多种化合物的特征信号，从而实现复杂体系中目标物的同步结构鉴定与定量分析。但该技术灵敏度较低，要求样品浓度不低于0.1 mmol/L，且设备购置与维护成本较高，限制了其广泛应用。

1.4 电化学法

电化学法凭借成本低、响应快、操作简便、检测限低等优势[22]，已逐步应用于5-HMF的检测。该类方法基于5-HMF在纳米材料修饰电极表面的催化转化反应（如生成2,5-二甲基呋喃或FDCA），通过监测电流、电位等信号变化实现定量分析。

1.4.1 伏安法

伏安法通过测定体系电流随施加电位的变化进行检测。用于5-HMF检测的伏安法主要包括线性扫描伏安法（LSV）、循环伏安法（CV）、方波伏安法（SWV）、差分脉冲伏安法（DPV）和脉冲安培检测法（PAD）。

1）LSV：LSV通过对工作电极施加一个线性变化的电位，同时采集响应电流。通过解析电流-电位曲线，既可研究反应过程，也可实现目标

物的定性与定量分析。Ye 等[23]采用电沉积法制备铜镍微颗粒电极（Cu-Ni MP/CuE），利用 LSV 和 CV 考察该电化学传感器对黄酒、白酒、啤酒、酱油、食醋及蜂蜜中 5-HMF 的检测性能。LSV 和 CV 的线性检测范围分别为 0.4~10.0 mmol/L 和 0.000 1~11.000 0 mmol/L，LOD 分别为 3.51 μmol/L 和 0.043 μmol/L。同时采用标准加入法评估方法的准确性，回收率为 90.0%~110.0%，表明该电化学传感器具备良好的检测准确性。

2）CV：CV 与 LSV 的工作原理基本相同，区别在于 CV 增加了电位回扫过程。Turan 等[24]构建了石墨烯量子点掺杂 $NiAl_2O_4$（GQDs-$NiAl_2O_4$）纳米复合材料的分子印迹电化学传感器，该方法的线性检测范围为 1.0~10.0 ng/L，LOD 为 0.30 ng/L，对咖啡样品中 5-HMF 的检测表现出较高选择性。

3）SWV：SWV 是一种高灵敏度的脉冲伏安技术，其原理是在基础电位上叠加方波电位扰动以检测法拉第电流，从而降低背景电容电流的干扰，适用于微量物质的检测与快速电极过程研究。Laolue 等[25]采用氧化镍和炭黑（NiO-CB）修饰自制的丝网印刷碳电极（SPCE），实现了蜂蜜中 5-HMF 的快速检测。定量范围为 10.0~200.0 mg/kg，LOD 与 LOQ 分别为 5.4、18.0 mg/kg。Khonyoung 等[26]开发了氧化镍纳米颗粒修饰丝网印刷碳电极（NiONPs/SPCE）电化学传感器，用于蜂蜜中 5-HMF 的快速检测。在 0.1 mol/L 的 BR 缓冲液（pH 13）中完成参数优化，检测范围为 0.5~5.0 μg/g，LOD 为 0.24 μg/g，重现性（RSD=2.94%）与稳定性（RSD=3.14%）均较好。

4）DPV：DPV 是通过在工作电极上施加阶梯式变化电压并叠加脉冲电压，测定脉冲前后的电流差值，以此降低背景干扰、提升信噪比，目前广泛用于痕量物质的检测与定量分析。Zhang 等[27]构建了一种金纳米颗粒-石墨烯水凝胶复合修饰电极（AuNPs-GH/GCE），用于食品与兽药注射液中 5-HMF 的直接电化学检测。DPV 检测条件下，目标物在 0.01~10.00 mmol/L 范围内线性关系良好，LOD 为 2.13 μmol/L。Francisco 等[28]将盐析辅助液液萃取与分子印迹法相结合，采用 DPV 检测咖啡中的 5-HMF。该方法线性回归相关系数（R^2）为 0.998 6，LOD 和 LOQ 分别为 0.372、1.240 mg/L，重复性和重现性分别为 6%、10%，加标回收率为 97%~101%。

5）PAD：PAD 通过施加周期性电位脉冲实现电活性物质的检测，常用的电位脉冲通常包括工作电位、清洗电位和还原电位。Xu 等[29]将 SPE 与氨基捕获柱-脉冲安培检测联用，实现饮料中 5-HMF 等物质的同步分析。该方法的 LOQ 为 0.300 mg/L，线性关系良好（R^2=0.998），检测出可乐中 5-HMF 质量浓度为 1.07~4.47 mg/L。

1.4.2 光电化学传感法

光电化学传感法（PEC）融合了光化学与电化学原理，主要研究分子或离子在基态与激发态之间发生氧化还原反应时，光电活性物质因电荷分离、电荷转移产生的光电转换现象。该技术通过记录识别元件与目标物相互作用引发的光电流信号变化，建立信号变化与目标物浓度间的定量关系，进而实现目标物的定性或定量分析。He 等[30]结合 SiO_2 模板法、溶胶-凝胶法与碱液刻蚀工艺成功制备了锐钛矿相的空心 TiO_2 纳米球，并以此构建用于 5-HMF 检测的 PEC 传感器。结果表明，以氧化铟锡（ITO）玻片为基底构建的 h-TiO_2 电极探针，在 5-HMF 浓度为 1×10^{-11}~1×10^{-7} mol/L 范围内线性关系良好（R^2=0.998 0），LOD 低至 0.001 nmol/L。在 5×10^{-4} μmol/L 的 5-HMF 体系中开展连续 800 s、共计 20 次光照开-关循环测试，h-TiO_2 电极探针光电流峰值的 RSD 为 2.4%。凭借灵敏度高、设备简单、易于微型化等优势，PEC 已成为极具应用潜力的新型分析方法。

1.5 生物学方法

1.5.1 酶联免疫吸附测定法

酶联免疫吸附测定法（ELISA）是检测食品中 5-HMF 含量的主要生物学方法。该方法将抗原或抗体固定于固相载体表面，基于抗原抗体的特异性结合作用，利用标记在抗体或抗原上的酶催化特定底物发生显色反应，实现对目标物的免疫分析。Li 等[31]采用 ELISA 与 HPLC 对市售褐色发酵乳中的美拉德反应产物（MRPs）进行对比分析，并重点考察了 5-HMF 在 4 ℃贮存 21 d 内的动态变化。结果表明，样品中 5-HMF、乙二醛（GO）及甲基乙二醛（MGO）总质量分数由 6.70 mg/kg 提升至 7.56 mg/kg，表明在贮存过程中 MRPs 持续生成。ELISA 具有操作简便、灵敏度高、成本低等优势，但在复杂样本分析、高通量快速检测或未知物筛查过程中易出现假阳性或假阴性结果，因此需与其他检测技术（如质谱、化学发光等）联合使用。

1.5.2 生物传感技术

生物传感技术（biological sensing technology）通过集成生物识别元件与物理信号转换机制，实现对待测物的快速、高灵敏检测。Liu等[32]构建了基于分裂DNA酶辅助信号放大的超灵敏石英晶体微天平（QCM）检测平台，用于5-HMF的测定。其检测机制为：5-HMF与分裂DNA酶的氨基端结合，抑制DNA酶重组，使AuNPs-ssDNA探针保持完整；随后该探针与金芯片上的捕获DNA杂交，引发QCM频率改变。频率偏移值与5-HMF浓度的对数值在5.0×10^{-3}~5.0×10^{0} μmol/L范围内呈线性关系，LOD为1.0 nmol/L。生物传感技术分析速度快、操作简单，适用于现场实时检测。然而，蛋白质、核酸等生物识别元件易受温度、pH、湿度、化学试剂等环境因素的影响而变性失活，导致传感器使用寿命受限；此外，筛选对5-HMF具有高特异性、高亲和力的生物识别元件也是该领域的核心技术难点。

1.6 其他传感技术

为满足5-HMF的快速检测需求，各类新型传感技术得到不断开发。Veríssimo等[33]在压电石英晶体的金电极表面涂覆多金属氧酸盐来构建声波传感器（AWS），用于5-HMF的定量分析，LOD和LOQ分别为3.4、11.4 μg/g。Jia等[34]制备Eu^{3+}功能化Hf-based MOF荧光传感器Eu@1，可对牛奶、蜂蜜和果汁中的5-HMF实现高选择性检测，LOD低至8.46 μmol/L。Jiang等[35]基于链置换（SDR）反应结合磁分离技术开发比率荧光传感器，线性检测范围为5×10^{-3}~5×10^{0} μmol/L，回收率为95%~110%，相对误差<5%。Luo等[36]以CaF_2和CdTe量子点为基础构建了新型分子印迹比率荧光传感器（MIR），在0.1~6.0 μg/mL范围内线性关系良好，LOD为0.043 μg/mL。Li等[37]将电子鼻（EN）、电子舌（ET）与化学计量学建模结合，建立了苹果汁中5-HMF的快速检测方法，基于偏最小二乘法（PLS）建立的定量预测模型表现良好，电子鼻、电子舌模型的决定系数（R^2）分别为0.926、0.914，表明电子鼻与电子舌可用于苹果汁中5-HMF的快速检测。

2 检测方法的比较

食品中5-HMF的检测方法众多，各方法的优缺点见表1。在实际应用时，需要根据食品基质和检测要求选择合适的检测方法。

表1 食品中5-HMF检测方法的优缺点

Table 1 Comparison of the main analytical methods for 5-HMF in foods

类别	检测方法	优点	缺点
光谱法	紫外-可见分光光度法	操作简单、快速、成本低	易受样品中其他色素干扰、灵敏度较低
	衰减全反射傅里叶变换红外光谱	操作快速便捷、样品需求量少	基质干扰严重，限制了其在复杂样品中的应用
	表面增强拉曼散射光谱	灵敏度高、非破坏性及检测快速	受增强基底影响大，在稳定性和重现性方面存在局限性
	火焰原子吸收光谱法	选择性高、灵敏度高、操作简便	需要能够特异性结合5-HMF的配位反应体系
色谱法	薄层色谱法	成本低、操作简便	分离效果不理想、环境友好性差
	气相色谱法	分离效率高、灵敏度高	需衍生化、前处理烦琐
	高效液相色谱法	分离效率高、准确性高、灵敏度高	仪器昂贵、前处理相对复杂
	胶束电动毛细管色谱法	分离效率高、试剂消耗少	方法重现性相对较差
	气相色谱-质谱联用法	灵敏度高、抗干扰能力强	样品前处理复杂、仪器成本高
	高效液相色谱-质谱联用法	灵敏度高、抗干扰能力强、无需衍生化	对操作人员专业性要求高、仪器成本高
核磁共振波谱法	核磁共振波谱法	定性能力强、非破坏性分析	灵敏度低、设备及维护成本高
电化学法	伏安法	分析速度快、成本低、易于微型化与便携化	选择性差、重现性差
	光电化学传感法	灵敏度高、设备简单、成本低	重现性和标准化不足
生物学方法	酶联免疫吸附测定法	操作简单、易于自动化、适合大规模样本的快速筛查	存在假阳性和假阴性的风险
	生物传感技术	分析速度快、灵敏度高、操作简单、易于自动化与微型化	传感器的使用寿命短、重现性和稳定性不足

3 展望

作者对近年来食品中5-HMF的检测方法进行了总结。现有检测方法种类较多，各有优劣。其中紫外-可见分光光度法与高效液相色谱法是检测5-HMF的常用方法，但紫外-可见分光光度法用于成分复杂样品检测时，检测结果易受干扰。HPLC、HPLC-MS及GC-MS发展较为成熟，可同步完成样品的分离、定性与定量分析，是5-HMF检测的重要手段。然而，这些光谱法与色谱法存在样品前处理烦琐、检测周期长、设备成本高等问题。基于功能化纳米材料的样品前处理技术对复杂体系中微量5-HMF的分离和富集至关重要，是实现灵敏、精准检测必不可少的技术方案。

随着快速筛查与现场检测需求的日益增长，各类快速检测技术不断发展。电化学分析法、生物学方法及各类传感技术凭借操作简便、检测速度快等特点，正逐步成为5-HMF检测的重要补充手段。尤其是基于纳米材料的生物传感器，结合了纳米材料的高比表面积、优异的电化学性能及生物识别元件等优势，大幅提升了检测灵敏度与选择性。但此类快速检测方法的稳定性与重现性仍有待进一步提升，要成为标准检测方法尚有一定差距。未来，随着人工智能技术的快速发展，具备高检测效率和准确性的智能化、自动化检测平台，将逐步成为5-HMF检测领域的重要工具。

参考文献

[1] Martins F C O L, Alcantara G M R N, Silva A F S, et al. The role of 5-hydroxymethylfurfural in food and recent advances in analytical methods[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133539.

[2] 李恩灿，贺玖明，靳洪涛，等. 5-羟甲基糠醛的药理和毒理研究进展[J]. 中国药物警戒，2018(4)：210-215.
Li E C, He J M, Jin H T, et al. Research progress of pharmacological activity and toxicity of 5-hydroxymethylfurfural[J]. Chinese Journal of Pharmacovigilance, 2018(4): 210-215.(in Chinese)

[3] CXS 12—1981 Standard for honey[S].

[4] Baş S D, Gürkan R. Selective extraction and enrichment of 5-hydroymethylfurfural from honey, molasses, jam and vinegar samples prior to sensitive determination by micro-volume UV-vis spectrophotometry[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 95: 103664.

[5] Stöbener A, Naefken U, Kleber J, et al. Determination of trace amounts with ATR FTIR spectroscopy and chemometrics: 5-(hydroxymethyl) furfural in honey[J]. Talanta, 2019, 204: 1-5.

[6] Zhang J H, Li Y Z, Lv M X, et al. Determination of 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) in milk products by surface-enhanced Raman spectroscopy and its simulation analysis[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 279: 121393.

[7] 刘会俏，付金金，王思甜，等. 表面增强拉曼散射光谱在miRNAs检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析，2024，44(8)：2111-2119.
Liu H Q, Fu J J, Wang S T, et al. Research progress of surface-enhance Raman scatting spectrum for miRNAs detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(8): 2111-2119.(in Chinese)

[8] Gürkan R. A new enrichment method for quantification of 5-hydroxymethylfurfural by indirect flame atomic absorption spectrometry in honey and jam samples[J]. Journal of AOAC International, 2021, 104(3): 682-692.

[9] Mehdiyeva L, Arslan Z, Kadem S N, et al. Levels of 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) in molasses used as iron deficiency anemia supplement retailed in Türkiye[J]. JPC-Journal of Planar Chromatography-Modern TLC, 2024, 37(5): 427-435.

[10] Raofie F, Falsafi Z. Development of a bimetal-organic framework-polypyrrole composite as a novel fiber coating for direct immersion solid phase microextraction *in situ* supercritical fluid extraction coupled with gas chromatography for simultaneous determination of furfurals in dates[J]. Analytical Methods, 2021, 13(41): 4941-4948.

[11] 黄丹丹，张倩钰，候美玲，等. 高效液相色谱法测定发酵调味品中5-羟甲基糠醛[J]. 中国食品添加剂，2022，33(11)：186-190.
Huang D D, Zhang Q Y, Hou M L, et al. Determination of 5-hydroxymethylfurfural in fermented condiments by high performance liquid chromatography[J]. China Food Additives, 2022, 33(11): 186-190.(in Chinese)

[12] 吴菲菲. 基于HPLC检测酒地黄中5-羟甲基糠醛含量变化的研究[J]. 实验室检测，2025，3(18)：35-37.
Wu F F. Study on the change of 5-hydroxymethylfurfural content in rehmannia glutinosa based on HPLC[J]. Laboratory Testing, 2025, 3(18): 35-37.(in Chinese)

[13] Godoy C A, Valderrama P, Boroski M. HMF monitoring: storage condition and honey quality[J]. Food Analytical Methods, 2022, 15(11): 3162-3176.

[14] Salido-Fortuna S, Castro-Puyana M, Marina M L. Chiral micellar electrokinetic chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1626: 461383.

[15] 李丹凤，黄罗健，朱健萍，等. 胶束电动色谱法测定五维他口服溶液中维生素B_1、B_2、B_6、烟酰胺、泛酸钙与苯甲酸钠[J]. 分析测试学报，2020，39(9)：1155-1159.
Li D F, Huang L J, Zhu J P, et al. Simultaneous determination of vitamin B_1, B_2, B_6, nicotinamide, calcium

pantothenate and sodium benzoate in five vitamins oral solution by micellar electrokinetic chromatography[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(9): 1155-1159.(in Chinese)

[16] 徐蕊,高仕谦,吴友谊,等. 无分散剂微波辅助离子液体分散液液微萃取/胶束电动色谱检测食用油中丙烯酰胺和5-羟甲基糠醛残留[J]. 分析测试学报,2020,39(6):722-728.
Xu R, Gao S Q, Wu Y Y, et al. Determination of acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural residues in edible oils by micellar electrokinetic chromatography with dispersive solvent-free microwave-assisted ionic liquid dispersive liquid-liquid microextraction[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(6): 722-728.(in Chinese)

[17] SN/T 1859—2007 饮料中棒曲霉素和5-羟甲基糠醛的测定方法 液相色谱-质谱法和气相色谱-质谱法[S].

[18] Wu Q, Shi X M, Ren D D, et al. A rapid and sensitive method for simultaneous quantification of seven furfural compounds in milk powder based on GC-MS/MS combined with QuEChERS method[J]. Food Science and Technology Research, 2021, 27(4): 671-679.

[19] González L, Morante-Zarcero S, Pérez-Quintanilla D, et al. Hydroxymethylfurfural determination in cereal and insect bars by high-performance liquid chromatography-mass spectrometry employing a functionalized mesostructured silica as sorbent in solid-phase extraction[J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1622: 461124.

[20] Long Y, Huang Y S, Zhu M T, et al. Development of QuEChERS clean-up based on EMR-lipid for simultaneous analysis of 9 mycotoxins, acaylamide and 5-hydroxymethylfurfural in biscuit by UHPLC-MS/MS[J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135265.

[21] Nordin N, Hasbullah N H, Abu Bakar N. Comprehensive analysis of alcohol compounds in commercial instant coffee: a validated ^{1}H NMR spectroscopy study within the Islamic paradigm[J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140236.

[22] 吴迪,陈松民,许文慧,等. 银离子电化学检测研究进展[J]. 分析测试学报,2025,44(5):947-955.
Wu D, Chen S M, Xu W H, et al. Progress in electrochemical detection of silver ions[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(5): 947-955.(in Chinese)

[23] Ye Y K, Zhang H W, Kahaljan G, et al. Electro-oxidation and determination 5-hydroxymethylfurfural in food on co-electrodeposited Cu-Ni bimetallic microparticles modified copper electrode[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130659.

[24] Turan H E, Medetalibeyoglu H, Polat İ, et al. Graphene quantum dots incorporated $NiAl_2O_4$ nanocomposite based molecularly imprinted electrochemical sensor for 5-hydroxymethyl furfural detection in coffee samples[J]. Analytical Methods, 2023, 15(15): 1932-1938.

[25] Laolue P, Lerdsri J. Development of square wave voltammetry method using working electrodes modified with nickel oxide and carbon black for determination of 5-hydroxymethylfurfural in honey[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 124: 105699.

[26] Khonyoung S, Upan J, Mool-am-kha P, et al. A rapid and reliable electrochemical determination of 5-hydroxymethylfurfural in honey exploiting nickel oxide nanoparticles modified electrode[J]. Talanta, 2024, 268: 125373.

[27] Zhang C L, Zhang H W, Wang S P, et al. Direct detection of 5-hydroxymethyfurfural using a gold-nanoparticles doped graphene-hydrogel based electrochemical sensor [J]. Microchemical Journal, 2025, 213: 113899.

[28] Francisco K C A, Lobato A, Tasić N, et al. Determination of 5-hydroxymethylfurfural using an electropolymerized molecularly imprinted polymer in combination with Salle [J]. Talanta, 2022, 250: 123723.

[29] Xu X B, Liu D B, Yu S J, et al. Separation and determination of 4-methylimidazole, 2-methylimidazole and 5-hydroxymethylfurfural in beverages by amino trap column coupled with pulsed amperometric detection[J]. Food Chemistry, 2015, 169: 224-229.

[30] He X, Jiang C Y, Yang J, et al. Sensitive photoelectric sensing for 5-HMF detection[J]. Analytical Methods, 2024, 16(23): 3766-3773.

[31] Li H B, Zhang Y Y, Li C S, et al. Content and evolution of Maillard reaction products in commercial brown fermented milk during storage[J]. International Dairy Journal, 2022, 129: 105343.

[32] Liu M K, Li P, Yang H T, et al. Detection of 5-hydroxymethylfurfural based on split-DNAzyme assisted signal amplification *via* quartz crystal microbalance [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 352: 131031.

[33] Veríssimo M I, Gamelas J A, Evtuguin D V, et al. Determination of 5-hydroxymethylfurfural in honey, using headspace-solid-phase microextraction coupled with a polyoxometalate-coated piezoelectric quartz crystal[J]. Food Chemistry, 2017, 220: 420-426.

[34] Jia Y H, Yan B. Eu^{3+}-Functionalized MOFs for the simple and rapid 5-hydroxymethylfurfural determination in food[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2023, 302: 123062.

[35] Jiang N, Li P, Sun S H, et al. A ratiometric fluorescence sensor for 5-hydroxymethylfurfural detection based on strand displacement reaction[J]. Talanta, 2022, 238: 123029.

[36] Luo K, Chen H C, Zhou Q, et al. A sensitive and visual molecularly imprinted fluorescent sensor incorporating CaF_2 quantum dots and β-cyclodextrins for 5-hydroxymethylfurfural detection [J]. Analytica Chimica Acta, 2020, 1124: 113-120.

[37] Li Z, Yuan Y H, Yue T L, et al. Detection of 5-HMF in apple juice with artificial sensing systems [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(9): 2679-2689.