共价有机骨架涂层固相微萃取-气质联用测定邻苯二甲酸酯

万梦雅，张晨晴，李立新*，胡锴*
(河南中医药大学 中医药科学院，河南 郑州 450046)

摘要：本研究制备了共价有机骨架（COF）涂层的固相微萃取纤维，结合气相色谱-串联质谱（SPME-GC-MS）方法，用于测定金银花露中 7 种邻苯二甲酸酯（PAEs）残留，为中药液体制剂中 PAEs 的安全检测提供了可靠的技术手段。采用溶剂热法合成 NTB-TP-COF 多孔材料，将其作为 SPME 涂层，经优化得到最佳参数为萃取温度 50℃、萃取时间 30 min、盐浓度 2.5%、解吸时间 3 min、解吸温度 280℃、转速 400 r/min，结合 GC-MS 技术对金银花露样品中 7 种 PAEs 进行定量检测。成功得到具有多孔结构的 NTB-TP-COF 涂层材料，在最优条件下，7 种 PAEs 在线性范围内具有良好的线性关系（相对系数（R^2）均大于 0.99），检出限在 0.033 ~ 0.33 ng/mL，将此方法应用于金银花露样品中的 PAEs 检测，加标回收率为 76.06% ~ 123.19%，相对标准偏差在 0.69% ~ 14.29%。该研究所建立的基于 NTB-TP-COF 涂层对目标 PAEs 表现出良好的萃取富集性能，可有效实现复杂基质中 PAEs 的分离检测。合成的 NTB-TP-COF 材料可作为固相微萃取吸附涂层，结合 GC-MS 方法用于金银花露中 PAEs 残留检测，该方法具有操作简便、灵敏度较高等优点，为中药液体制剂中 PAEs 的监测提供一种新方法。

关键词：共价有机骨架；固相微萃取；气质联用；邻苯二甲酸酯；金银花露
DOI：10.13822/j.cnki.hxsj.2026.0214

Determination of Phthalate Esters by Covalent Organic Framework-Coated Solid-Phase Microextraction Coupled with Gas Chromatography-Mass Spectrometry *WAN Meng-ya, ZHANG Chen-qing, LI Li-xin*, HU Kai** (Academy of Chinese Medical Sciences, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The migration of phthalate esters (PAEs) from plastic packaging into solid and liquid formulations of traditional Chinese medicines poses health risks, including endocrine disruption. In particular, liquid formulations such as honeysuckle oral liquid have complex matrices and low concentrations of target compounds, making direct detection of PAEs difficult. Therefore, this study aimed to establish a solid-phase microextraction (SPME)-gas chromatography-tandem mass spectrometry method based on a covalent organic framework (COF) coating for the determination of seven PAE residues in honeysuckle oral liquid. Using 4,4′,4″-(1,3,5-triazine-2,4,6-triyl)triphenylamine (NTB) and triformylphloroglucinol (TP) as monomers, an NTB-TP-COF porous material was synthesized via a solvothermal method. Its structure, crystallinity, thermal stability, and morphology were characterized using FT-IR, XRD, TG, and SEM. The material exhibited a three-dimensional porous network of interwoven fibers and retained 85.35% of its weight at 340 ℃, making it suitable as an SPME coating. The effects of the extraction temperature, extraction time, salt concentration, desorption time, desorption temperature, and stirring speed on extraction efficiency were systematically investigated. The optimal conditions were determined to be an extraction temperature of 50 ℃, extraction time of 30 min, salt concentration of 2.5%, desorption time of 3 min, desorption temperature of 280 ℃, and stirring speed of 400 r/min. Under optimized conditions, the seven PAEs exhibited good linear relationships within their respective linear ranges (R^2 > 0.99). The limits of detection ranged from 0.033 to 0.33 ng/mL, and the limits of quantification ranged from 0.10 to 1.0 ng/mL. Intra-day precision (n = 6) ranged from 3.52% to 8.98%, and inter-day precision (n = 3) ranged from 5.97% to 11.34%. The method was applied to two types of honeysuckle oral liquid samples packaged in glass and plastic bottles, with dibutyl phthalate (0.16 ng/mL) and di-n-octyl phthalate (1.06 ng/mL) detected in the plastic-bottled samples. The spiked recovery rates ranged from 76.06% to 123.19%, with relative standard deviations ranging from 0.69% to 14.29%. Compared to traditional pretreatment methods, this method integrates extraction and enrichment, does not require large amounts of organic reagents, and is simple to operate, highly sensitive, and reproducible. The prepared NTB-TP-COF coating exhibited good extraction and enrichment performance for the target PAEs and could provide a new approach for the trace monitoring of PAEs in liquid traditional Chinese medicine formulations and food contact materials.

Key words：covalent organic framework; solid-phase microextraction; GC-MS; PAEs; honeysuckle oral liquid

苯二甲酸酯（Phthalateacid esters，PAEs）是一类产量大、用途广泛的人工合成增塑剂，广泛应用于各类工业品和商用产品，可从塑料包装溶出迁移至食品，具有较强毒性[1]。鉴于其对健康的危害，欧洲食品安全局与欧盟针对食品接触材料中的 PAEs 设定严格的迁移值为 0.05 ~ 6 mg/kg[2]。因此，需要开发灵敏、可靠的分析方法，

收稿日期：2026-08-25；**修回日期：**2026-10-30；**接受日期：**
基金项目：国家自然科学基金项目(22174032)。
作者简介：万梦雅（2001-），女，安徽亳州人，硕士生，主要研究方向为中药功效成分及作用机制。
通讯作者：胡锴，E-mail：hk5268@126.com；李立新，E-mail：lilixin@hactcm.edu.cn。

用于复杂样品中 PAEs 的测定。

金银花既是食品又是中药材，具有清热解暑的功效，经加工能制成金银花露作为食品饮料[3]。目前，市面上流通的金银花露包装材料有塑料和玻璃两种。塑料制品生产过程中通常会添加增塑剂[4]。小分子的 PAEs 在包装运输过程中受环境的影响容易迁移至食品中，可致癌并影响激素水平严重危害人体健康，尽管各国管控其在食品中的残留，但其广泛使用与持久性致使污染问题依然突出[5, 6]。PAEs 在食品中含量较低、基质干扰大，难以实现直接检测所以开发新型材料并结合样品前处理手段应用于 PAEs 的检测是很有必要的。

样品前处理是复杂基质中污染物分析关键，传统溶剂萃取法耗时长、操作复杂且污染性强。目前，常用的样品前处理方法包括固相微萃取（SPME）[7]、固相萃取[8]、分散固相萃取[9]等。其中 SPME 具有操作便捷、采样速度快、样品需求少、无需消耗大量有机试剂的优点，已经广泛用于 PAEs 萃取富集。SPME 的萃取效果很大程度上取决于吸附剂的理化性质与表面功能，近年来，研究人员探索了多种吸附剂，如金属有机骨架（MOF）[10]、共价有机骨架（COF）[11]、石墨烯和氧化石墨烯[12]等新型材料。其中 COF 是一类含有 C、N、O、H 等元素的有机单体通过共价作用连接而成的新型多孔有机聚合物，具有低密度、高比表面积、优异的化学、热稳定性等优点，被广泛应用于 SPME 的吸附剂[13, 14]。

本研究以 4,4’,4”-（1,3,5-三嗪-2,4,6-三基）三苯胺（NTB）与三醛基间苯三酚（TP）为单体，采用溶剂热法合成一种 NTB-TP-COF 材料，将其作为 SPME 纤维涂层，与 GC-MS 结合，建立 SPME/GC-MS 分析方法，用于食品样品中的 PAEs 的富集分析，通过表征验证 NTB-TP-COF 材料合成成功，优化萃取条件，最终将该方法用于金银花露中 PAEs 的检测。

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

7890A-7000B 型气相色谱串联质谱联用仪、PAL RSI 85 型多功能自动进样器（美国安捷伦科技有限公司）；iS50 FT-IR 型傅里叶红外光谱仪（美国尼高力仪器公司）；SmartLab SE 型 X 射线多晶衍射仪（日本理学公司）；STA 8000 型同步热分析仪（美国珀金埃尔默股份有限公司）；Sigma 300 型扫描电子显微镜（德国蔡斯卡股份有限公司）。

7 种 PAEs 混合标准溶液（1000 μg/mL）：邻苯二甲酸二甲酯（DMP）、邻苯二甲酸二乙酯（DEP）、邻苯二甲酸二丁酯（DBP）、邻苯二甲酸丁苄酯（BBP）、己二酸二（2-乙基己）酯（DEHA）、邻苯二甲酸二（2-乙基）己酯（DEHP）、邻苯二甲酸二正辛酯（DNOP）（北京坛墨质检科技股份有限公司）；NTB、正丁醇、邻二氯苄、TP（上海阿拉丁生化科技股份有限公司）；Sylgard 184 PDMS 预聚物、固化剂（美国 DOW Corning 公司）；所用其他试剂皆为分析纯。

金银花露购买于郑州某药房。

1.2 实验方法

1.2.1 NTB-TP-COF 的制备

将 70 mg（0.2 mmol）NTB 和 42 mg（0.2 mmol）TP 溶解于 5 mL 的 *V*（邻二氯苯）：*V*（正丁醇）=1:1 混合溶液中，加入 0.5 mL（6 mol/L）HAc 将混合物超声 10 min 均匀分散，然后通过 3 次冷冻-泵解冻循环脱气和密封，并在 120℃下反应 36 h。反应结束后，离心收集，依次用四氢呋喃（3×5 mL）、超纯水（3×5 mL）和甲醇（3×5 mL）洗涤。离心收集所得沉淀产物并在 60℃真空下干燥 12 h 得到 NTB-TP-COF。

1.2.2 NTB-TP-COF 涂层纤维的制备过程

将直径 0.2 mm、长 10 cm 的不锈钢丝用超纯水清洗，一端浸入含 1 mL 浓盐酸的 1.5 mL 玻璃小瓶刻蚀 1 min，随后用超纯水冲洗。将洗净的铁丝浸入 *V*（Sylgard 184 PDMS 预聚物）：*V*（固化剂）=10:1 的混合溶液中 1 min，取出后于 NTB-TP-COF 粉末中旋转裹覆约 1 cm 长的涂层。最后于 120℃烘烤 30 min，再在 280℃进样口活化 20 min 以去除杂质，制得 SPME 涂层纤维。

1.2.3 SPME 过程

将 7 种 PAEs 混合标准溶液用丙酮稀释为 10 μg/mL 储备溶液，方便后续配备样品溶液使用。所有萃取实验均在多功能自动进样器下进行。萃取前，取 14 mL 超纯水和 1 mL 金银花露转移至装有 0.375 g NaCl 的 20 mL 样品瓶中，并密封；萃取时自动进样器将 SPME 针直接浸入样品中，进行浸入式固相微萃取（DI-SPME）于 50℃下萃取 30 min；萃取完成后，在进样口 280℃下解析 3 min 后进行 GC-MS 分析。NTB-TP-COF 涂层纤维的制备及其萃取过程如图 1 所示。

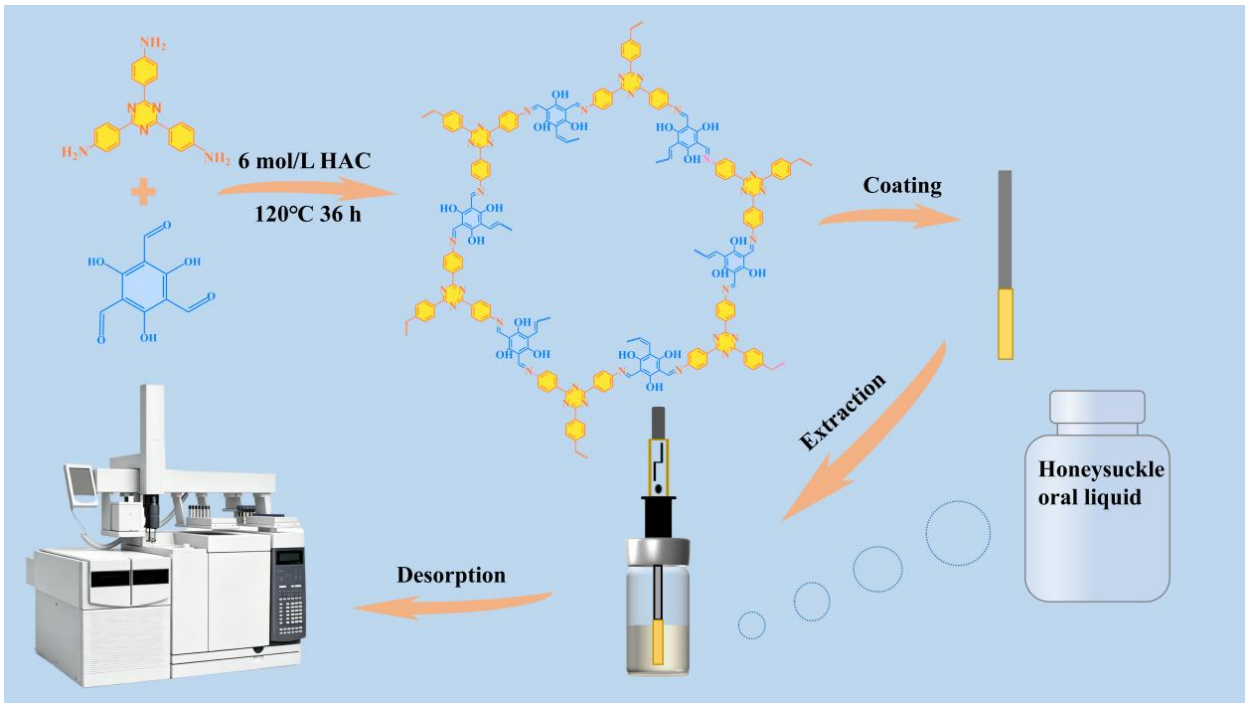


图 1 NTB-TP-COF 涂层材料的制备流程及 SPME 流程图

Fig.1 Schematic illustration of the preparation of NTB-TP-COF coating material and the SPME process

1.3 GC-MS 条件

色谱柱为 HP-5 毛细管柱(30 m × 0.32 mm × 0.25 μm)。高纯度氦气作为载气，进样口温度为 280℃，流速 1.5 mL/min，不分流模式下工作。

柱温程序为：初始温度为 80℃，保持 0 min，然后在 30℃/min 下达到 190℃，保持 2 min，以 13℃/min 升至 250℃保持 3 min，在以 15℃/min 的速率升至 280℃保持 5 min；总运行时间为 20.282 min。质谱条件：采用 70 eV 电子能量、离子源温度设置 250℃、传输线温度 280℃、四级杆温度 150℃、溶剂延迟 4 min。采集模式为 MS1 模式、扫描范围为 40 ~ 400 *m/z*，结合保留时间与 NIST 谱库完成定性识别，如表 1 所示。

表 1 7 种 PAEs 多反应检测（MS1）参数

Tab.1 Multiple reaction monitoring (MS1) parameters for 7 PAEs

Compound	Retention time/min	Characteristic ions （*m/z*）
DMP	4.54	163
DEP	5.46	149
DBP	8.64	149
BBP	11.90	149
DEHA	12.20	129、112
DEHP	14.00	149、167
DNOP	15.80	149

2 结果与讨论

2.1 材料表征

2.1.1 FT-IR 结果分析

FT-IR 表征图 2a 显示，TP 单体在 1618 cm^{-1}（醛基 C=O）及 3200 ~ 3600 cm^{-1}（酚羟基 O-H）有特征峰；NTB 单体在 3300 ~ 3450 cm^{-1}（伯胺 N-H 伸缩）和 1620 cm^{-1}（N-H 弯曲）有吸收。合成后，TP 的醛基峰几乎消失，NTB 的氨基峰显著减弱，表明缩合反应充分进行。同时，新出现的 1560 cm^{-1} 和 1217 cm^{-1} 吸收峰归属于 *β*-酮烯胺结构的 C=C 与 C-N 振动，证实成功构建了目标 COF 框架。

2.1.2 TG、XRD 和 SEM 结果分析

SPME 涂层纤维需要在较高的进样口温度下解吸目标物，因此，涂层需要有较好的热稳定。从图 2b 中可以看出该材料在 340 ℃时依然能保持 85.35%的重量，这表明 NTB-TP-COF 材料具有很好的热稳定性。

通过对 NTB-TP-COF 材料在 5 ~ 80°的 2*θ* 范围内的 XRD 进行了研究，图 2c 中可以看出在 5.56°处出现一个明显的衍射峰，对应于(200)晶面，该特征峰是 COF 材料层内有序排列的典型特征[15]，在 26.38°处的特征峰出现证明了材料这些特征峰的存在表明 NTB-TP-COF 存在晶体结构[16]。

采用 SEM 对材料的形貌进行分析，如图 2d ~ 2f 所示，该材料呈现纤维状，纤维相互缠绕、彼此交联呈现三维网络骨架。纤维之间存在大量尺寸不一的孔隙构成多孔网络结构，能够提供丰富的孔道与吸附位点，有利于目标物的扩散传质。

2.2 SPME 条件优化

为了优化 NTB-TP-COF 涂层纤维的最佳吸附条件，研究系统考察了萃取时间、萃取温度、盐浓度、解吸时

间、解吸温度、搅拌速度对萃取效率的影响。实验优化均采用浓度为 50 ng/mL 的 PAEs，通过单因素实验确定最佳萃取条件。

2.2.1 萃取温度和萃取时间的影响

萃取温度与时间是影响 SPME 效率的关键参数。温度升高可加速传质，利于涂层捕获目标物，但吸附为放热过程，过高温度会降低分配系数，且强挥发性 PAEs 可能发生热解吸。考察了 30～60℃范围（图 3a）发现，30 ℃升至 50 ℃时，7 种 PAEs 萃取效率持续上升；继续升至 60 ℃则效率下降，故选定 50 ℃为最佳温度。萃取时间是目标物在涂层纤维与样品溶液之间吸附-解吸的动态平衡过程[17]，直接影响萃取效率。图 3b 考察了 10～40 min 萃取时间对峰面积的影响，随着萃取时间的增加至 30 min，7 种 PAEs 的峰面积随着时间的增加而增大。萃取时间达到 40 min 时，DEP 和 DEHP 略有下降，其余目标物达到平衡，因此选用 30 min 作为最佳萃取时间。

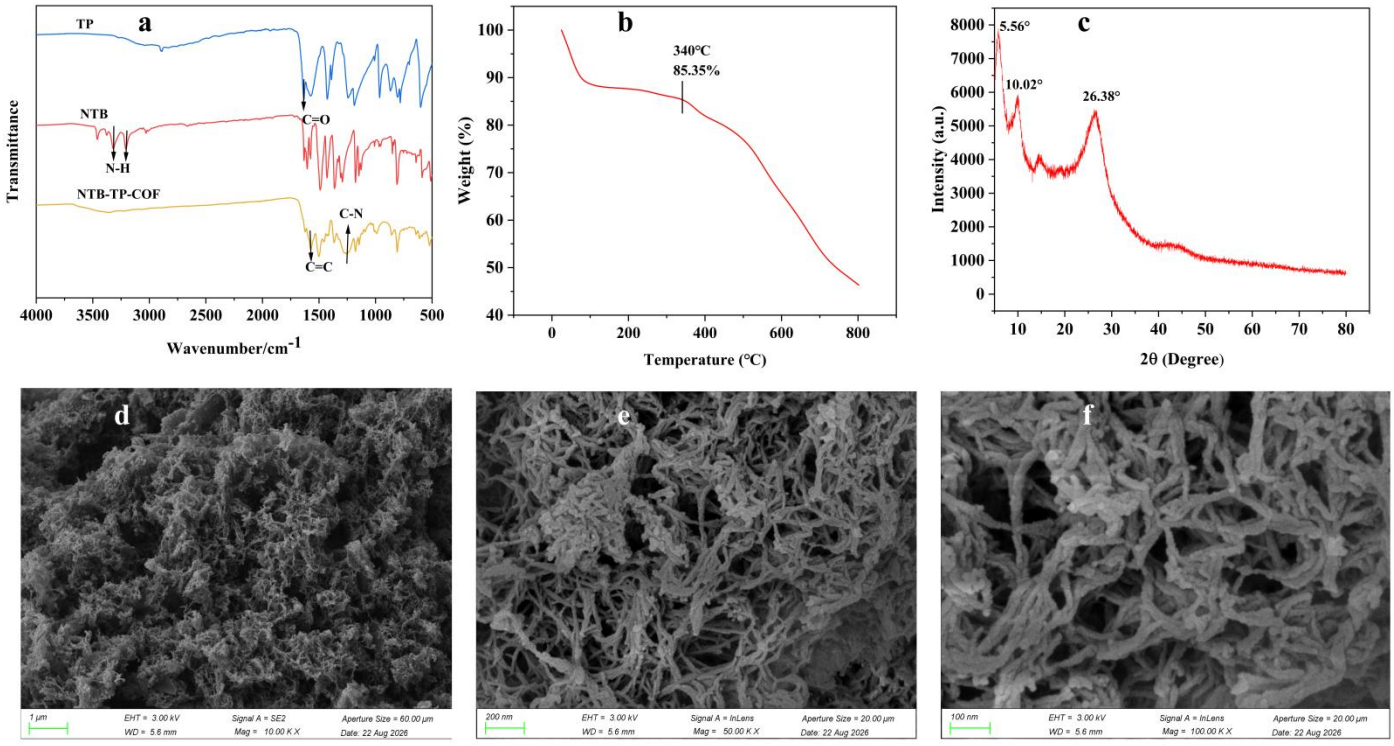
2.2.2 解吸温度和解吸时间的影响

解吸温度和解吸时间对萃取效率具有显著影响。解吸温度过低易造成分析物解吸不完全，而温度过高则会降低涂层材料的使用寿命。为了达到最佳的萃取效率，在 250 ～ 280 ℃ 范围内考察解吸温度的影响。如图 3c 所示，7 种 PAEs 随着解吸温度的增加峰面积而增大，到 280 ℃时达到最大解吸效率，因此，选用 280 ℃最为解吸温度。选取 1～4 min 来优化解吸时间，如图 3d 所示，在解吸时间达到 3 min 时 7 种物质的峰面积达到最大，随着解吸时间的延长，峰面积出现降低，因此选用 3 min 为最佳解吸时间。

2.2.3 盐浓度和转速的影响

离子强度可提高目标物在溶液与萃取纤维间的分配常数，从而改善萃取效率，但过高会增大溶液黏度，导致效率下降。如图 3e 所示，随着 NaCl 浓度由 0%增至 2.5%时，PAEs 萃取效率显著提升；继续增加至 7.5%时则峰面积下降，可能因过量 NaCl 改变 COF 表面状态，产生竞争吸附，故选择 2.5% NaCl 为最优离子强度。适度搅拌可促进挥发性目标物扩散，提升萃取效率并缩短吸附时间。如图 3f 考察了搅拌速度（250～450 r/min），250 ～ 400 r/min 范围内峰面积随转速增加而增大，400 r/min 时达峰值，故选择 400 r/min 为最佳转速。

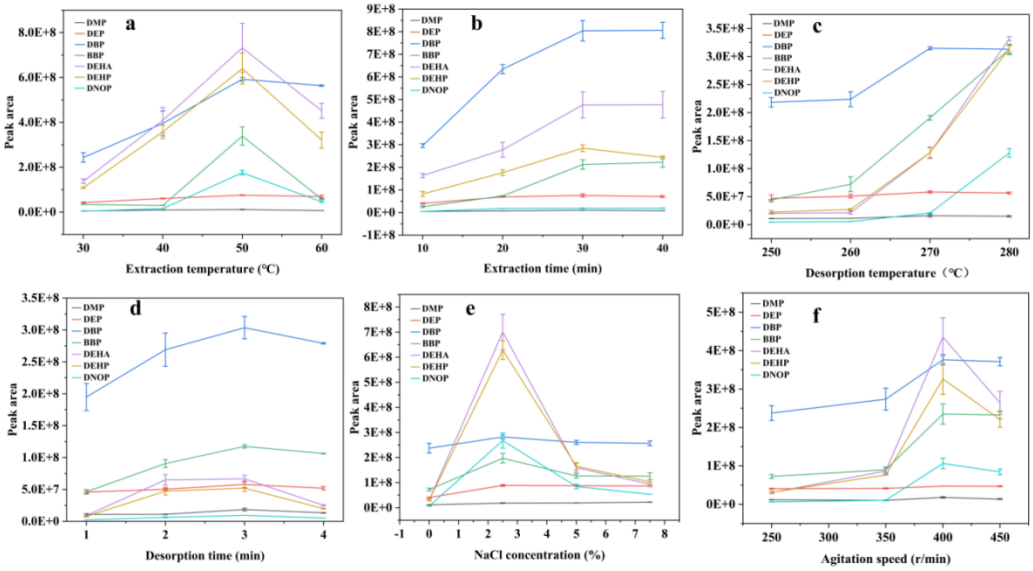
综上所述，本实验的最优条件：萃取温度为 50 ℃、萃取时间 30 min、解吸温度 280 ℃、解吸时间 3 min、NaCl 浓度为 2.5%和转速为 400 r/min。



a. FT-IR 光谱图；b. TG 图；c. XRD 图；d～f. SEM 图

图 2 NTB-TP-COF 的表征图

Fig.2 Characterization of NTB-TP-COF



a. 萃取温度；b. 萃取时间；c. 解吸温度；d. 解吸时间；e. 盐浓度；f. 转速

图 3 不同 SPME 条件对 PAEs 萃取效率的影响

Fig.3 Effects of different SPME conditions on the extraction efficiency of PAEs

2.3 方法验证结果

2.3.1 标准曲线和检出限

在最优萃取条件下，向空白基质中添加不同浓度的PAEs，建立分析方法，评价其线性关系、决定系数(r^2)、检出限(LOD)、定量限(LOQ)及日间/日内精密度（RSD），相关结果见表 2。DMP、BBP 和 DNOP 在 1 ~ 50 ng/mL 范围内有良好的线性，r^2>0.9946；DEP 的线性范围为 0.1 ~ 20 ng/mL，r^2=0.9990；DBP 在 0.1 ~ 50 ng/mL 范围内有良好的线性，r^2=0.9997；DEHA 在 0.5 ~ 20 ng/mL，DEHP 在 0.5 ~ 50 ng/mL 范围内有良好的线性，r^2>0.9947；以信噪比（*S/N*）为 3 和 10 分别计算了分析方法的检出限（LOD）为 0.033 ~ 0.33 ng/mL，定量限（LOQ）为 0.10 ~ 1.0 ng/mL；通过添加 50 ng/mL 的 PAEs 来评估方法的精密度，1 d 内连续制备 6 组样品和连续 3 d 制备 3 组样品进行分析，分别得到日内精密度和日间精密度，该方法的日内精密度（*n*=6）在 3.52% ~ 8.98%之间，日间精密度（*n*=3）在 5.97% ~ 11.34%之间，表明该分析方法具有良好的重复性。

2.3.2 加标回收率与精密度

本研究测定两个品种金银花露，其中金银花露 1 为玻璃瓶装，金银花露 2 为塑料瓶装。将该方法用于分析金银花露样品中 7 种 PAEs 的含量，成功检测出金银花露 2 样品中含有 0.16 ng/mL 的 DBP 和 1.06 ng/mL 的 DNOP。通过向样品中添加低、中、高 3 种浓度水平 PAEs，计算回收率考察该方法的准确度，如表 3 所示，金银花露 1 中 3 个浓度水平的回收率为 76.06% ~ 123.19%，RSD 为 0.71% ~ 14.29%，金银花露 2 中 3 个浓度水平的回收率为 76.12% ~ 119.40%，RSD 为 0.69% ~ 13.33%，结果表明该方法的准确性良好，可以用于实际样品中 7 种 PAEs 的定量分析。塑料制品中塑化剂种类繁多，为充分考察本吸附材料对邻苯二甲酸酯类的响应特性与抗干扰能力，向样品体系中添加了塑料制品中常见的邻苯二甲酸二环己酯（DCHP）、邻苯二甲酸二异丁酯（DIBP）、邻苯二甲酸二苯酯（DPHP）3 种塑化剂，以验证本方法的抗干扰性能。通过对比加入干扰物前、后目标物的色谱峰面积，计算目标物的相对回收率。结果表明，在共存干扰物的存在下，本方法对 7 种目标 PAEs 的响应仍能保持在 80% ~ 120%，表明在多种塑化剂共存的环境中，NTB-TP-COF 涂层依然能对目标物保持稳定、高效的富集能力，未出现明显的竞争吸附抑制现象。

表 2 SPME/GC-MS 的方法学参数

Tab.2 Analytical parameters for the SPME/GC-MS method

Compound	Linear equation	Linear range /（ng • mL^{-1}）	r^2	LOD /（ng • mL^{-1}）	LOQ /（ng • mL^{-1}）	RSD/%	
						Intra-day(*n*=6)	Inter-day(*n*=3)
DMP	y=742222x+6×10^6	1 ~ 50	0.9948	0.33	1.00	3.52	8.18
DEP	y=3×10^6x+2×10^6	0.1 ~ 20	0.9990	0.033	0.10	6.91	8.44

DBP	$y=9\times10^6x+2\times10^7$	0.1 ~ 50	0.9997	0.033	0.10	7.27	7.04
BBP	$y=9\times10^6x-8\times10^6$	1 ~ 50	0.9999	0.33	1.00	8.98	9.79
DEHA	$y=2\times10^7x+1\times10^7$	0.5 ~ 20	0.9947	0.17	0.50	7.32	10.10
DEHP	$y=2\times10^7x+3\times10^7$	0.5 ~ 50	0.9989	0.17	0.50	8.76	5.97
DNOP	$y=7\times10^6x-4\times10^6$	1 ~ 50	0.9946	0.33	1.00	7.09	11.34

表 3 金银花露样品中 7 种 PAEs 的回收率和精密度

Tab.3 Spiked-recovery and precision experimental results of seven PAEs in honeysuckle oral liquid

Compounds	Spiked concentration /（ng • mL^{-1}）	Honeysuckle oral liquid 1		Honeysuckle oral liquid 2	
		Recovery/%	RSD/%	Recovery/%	RSD/%
DMP	5.0	122.66	1.74	109.46	2.13
	10	110.68	8.10	107.01	9.74
	40	87.79	6.89	88.88	4.93
DEP	1.0	101.18	10.10	94.56	11.14
	5.0	110.90	2.39	76.12	11.99
	10	82.12	5.77	80.23	3.88
DBP	1.0	118.17	14.29	87.25	0.69
	5.0	117.02	1.39	85.27	1.64
	40	86.46	7.30	82.22	0.73
BBP	5.0	122.47	5.11	88.16	10.25
	10	123.19	5.94	110.93	1.74
	40	101.27	12.80	76.55	4.61
DEHA	1.0	121.98	5.22	95.80	1.54
	5.0	101.23	0.71	91.48	2.06
	10	105.86	13.94	76.26	8.17
DEHP	1.0	85.63	1.82	90.06	4.15
	5.0	76.06	7.40	81.48	13.33
	40	84.43	6.44	82.38	4.42
DNOP	5.0	122.30	7.32	119.40	4.56
	10	118.49	4.60	111.15	4.86
	40	96.22	11.41	85.70	6.30

2.4 吸附机理研究

由于 7 种分析物官能团相近、作用模式相似，本研究选取 DEP 作为代表，与 COF 片段开展分子对接模拟（图 4）。如图可见，DEP 可嵌入 COF 孔道内部，孔道限域效应缩短了分析物与孔壁活性位点的距离；DEP 的酯羰基与骨架酚羟基形成氢键，COF 共轭三嗪芳环可与含邻苯二甲酸酯的苯环产生 π-π 堆积作用。因此，NTB-TP-COF 对 7 种分析物 PAEs 的吸附是多重非共价作用协同的结果。

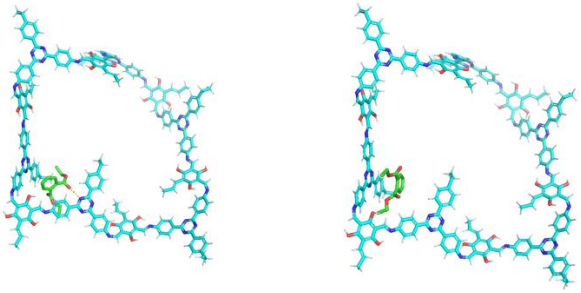


图 4 NTB-TP-COF 与 DEP 的分子对接模拟图

Fig.4 molecular docking simulation results of NTB-TP-COF with DEP

3 结论

本研究成功制备了一种稳定性和重复性良好的

SPME 涂层纤维，将其与 GC-MS 结合并通过单因素实验优化了萃取时间、萃取温度、盐浓度、解吸时间、解吸温度等。在最优条件下建立了金银花露样品中 7 种 PAEs 的分离分析新方法，结果表明该方法在 0.1 ~ 50 ng/mL 范围内线性响应优异，相关系数 0.9946 ~ 0.9999，检出限为 0.033 ~ 0.33 ng/mL，表明该方法具有良好的线性、高灵敏度，可满足复杂样品中痕量 PAEs 的检测。

参考文献：

[1] Zhan W. *Modern Food*, 2024, **30(22)**: 200-203.
展望. 现代食品, 2024, **30(22)**: 200-203.

[2] Husani N I M, Hashim N M, Yahaya N, Waras M N, Fuente-ballesteros A, Zain N N M. *Food Chem*., 2026, **525**: 150620.

[3] Zeng M, Zeng H, Rong G, Cui C C, Wu M H, Li K, Song H. *J. Food Saf. Qual*., 2020, **11**(**23**): 8942-8951.
曾鸣, 曾辉, 荣光, 崔翠翠, 吴明辉, 李开, 宋昊. 食品安全质量检测学报, 2020, **11**(**23**): 8942-8951.

[4] Ni Q, Xiong F, Tian J G, Sun J, Zhang Y L, Pang Q L. *Pharm. Clin. Res.*, 2025, **33(3)**: 219-222.
倪倩, 熊菲, 田京歌, 孙晶, 张妤琳, 庞庆林. 药学与临床研究, 2025, **33 (3)**: 219-222.

[5] Chen K X, Lin J, Xiao M F. *Occup. Health*, 2026, **42(10)**: 1337-1342.
陈柯星, 林捷, 肖明发. 职业与健康, 2026, **42(10)**: 1337-1342.

[6] Wang Y, Xue Y, Zhang Q L, Song S J, Zhao C L, Wen J. *Chem. Anal. Meterage*, 2026, **35(4)**: 66-74.
王勇, 薛勇, 张钦龙, 宋少杰, 赵辰路, 文君. 化学分析计量, 2026, **35(4)**: 66-74.

[7] Zhang P C, Wang Y, Liu K L, Sun Y M, He L J, Zhao W J. *Chin. J. Chromatogr*., 2024, **42**(**9**): 881-890.
张朋成, 王媛, 刘坤玲, 孙亚明, 何丽君, 赵文杰. 色谱, 2024, **42**(**9**): 881-890.

[8] Huang C P, Qin W Z, Wang F, Ren Y, Luo L. *Ind. Microbiol.*, 2025, **55 (5)**: 241-244.
黄承鹏, 秦威振, 王甫, 任燕, 罗兰. 工业微生物, 2025, **55(5)**: 241-244.

[9] Jiang X H. Analysis of Migrated Bisphenols and Phthalate Esters in Food Plastic Packaging by Dispersive Solid-Phase Extraction Combined with Liquid Chromatography. Jilin: Jilin University of Chemical Technology, 2021.
姜鑫浩. 分散固相萃取结合液相色谱分析食品塑料包装中迁移的双酚和邻苯二甲酸酯. 吉林：吉林化工学院, 2021.

[10] Zhang W, Hu M Y, Wang A H, Lin H, Peng D, Zhou W. *Environ. Sci.Technol.*, 2026,**49(9)**: 45-56.
张伟, 胡孟源, 汪爱河, 林海, 彭定, 周维. 环境科学与技术, 2026,**49(9)**: 45-56.

[11] Zhang Y, Zhao J F, Fei Z Q, Lian L L, Lou D W, Wang X Y. *Chem. J. Chin. Univ*., 2024, **45**(**8**): 70-79.
张莹, 赵金凤, 费哲奇, 连丽丽, 娄大伟, 王希越. 高等学校化学学报, 2024, **45**(**8**): 70-79.

[12] Feng J J, Sun M X, Feng Y, Xin X B, Ding Y L, Sun M. *Chin. J. Chromatogr*., 2022, **40**(**11**): 953-965.
冯娟娟, 孙明霞, 冯洋, 辛绪波, 丁亚丽, 孙敏. 色谱, 2022, **40**(**11**): 953-965.

[13] Wang H C, Xu X L, Wang X J, Lian J. *J. Food Saf. Qual*., 2025, **16(8)**: 54-62.
王绘超, 许秀丽, 王秀娟, 廉洁. 食品安全质量检测学报, 2025, **16(8)**: 54-62.

[14] Zhou X L. Synthesis of Triazine Covalent Organic Frameworks and Their Enrichment Analysis for Emerging Environmental Pollutants, Guilin: Guangxi Normal University, 2026.
周小丽. 三嗪共价有机框架的合成及其对环境新污染物的富集分析研究. 桂林：广西师范大学, 2026.

[15] Xie Y, Zhang T, Chen Y L, Wang Y, Wang L. *Talanta*, 2020, **213**: 120843.

[16] Jiang W, Cui W R, Liang R P, Qiu J D. *J. Hazard. Mater*., 2021, **413**: 125302.

[17] Jafari Z, Roushani M. *Microchem. J*., 2025, **212**: 113575.