DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260312003
引用格式: 李宏亮, 许淑梦, 张雅琪, 等. QuEChERS-气相色谱-串联质谱法测定木制食品接触材料中五氯苯甲醚含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 160–165.
Li Hongliang, Xu Shumeng, Zhang Yaqi, et al. Determination of pentachloroanisole content in wooden food contact materials by QuEChERS-gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 160–165. (in Chinese with English abstract).

QuEChERS-气相色谱-串联质谱法测定木制食品接触材料中五氯苯甲醚含量

李宏亮, 许淑梦, 张雅琪, 韩哲斌, 孙继唯, 赵宜静*
[上海市浦东新区疾病预防控制中心, 上海市浦东新区卫生健康监督所, 上海 200136]

摘 要: 目的 建立 QuEChERS-气相色谱-串联质谱法测定木制食品接触材料中五氯苯甲醚的分析方法。**方法** 制备的样品中加纯水和二氧化锆球超声, 接着依次加入溶剂乙腈和盐包(硫酸镁和氯化钠)振荡、离心, 上层提取溶剂经分散固相萃取净化后, 氮吹至近干, 加正己烷振荡复溶, 经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后, 采用 DB-5MS 石英毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)分离, 在电子轰击离子源和多反应监测模式下检测, 外标法定量。**结果** 五氯苯甲醚在 0.2~10.0 μg/L 质量浓度内呈良好的线性关系(r^2=0.999)。定量限为 0.5 μg/kg, 检出限为 0.2 μg/kg。木制样品添加 3 个浓度水平的五氯苯甲醚, 每个浓度水平 6 个平行, 测定的回收率为 85.3%~97.4%, 相对标准偏差为 3.0%~3.6%。**结论** 该方法操作简便、具有较高的灵敏度、特异度和精确性, 适用于木制食品接触材料中五氯苯甲醚的测定。

关键词: 五氯苯甲醚; 食品接触材料; QuEChERS-气相色谱-串联质谱法
中图分类号: R155.5 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)14–0160–06

Determination of pentachloroanisole content in wooden food contact materials by QuEChERS-gas chromatography-tandem mass spectrometry

LI Hong-Liang, XU Shu-Meng, ZHANG Ya-Qi, HAN Zhe-Bin, SUN Ji-Wei, ZHAO Yi-Jing*
(*Shanghai Pudong New Area Center for Disease Control and Prevention*, *Shanghai Pudong New Area Health Supervision Institute*, *Shanghai* 200136, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish a method for the determination of pentachloroanisole in wooden food contact materials by QuEChERS-gas chromatography-tandem mass spectrometry. **Methods** The prepared samples were added with pure water and zirconia beads, followed by ultrasonic extraction. Acetonitrile and a salt package (magnesium sulfate and sodium chloride) were sequentially added, and the mixture was shaken and centrifuged. The upper extract was purified by dispersive solid-phase extraction, concentrated to near dryness under nitrogen flow,

收稿日期: 2026-03-12
基金项目: 上海市浦东新区科技发展基金资助项目(PKJ2025-Y89)
第一作者: 李宏亮(1981—), 男, 硕士, 副主任技师, 主要研究方向为环境污染物检测及健康影响。E-mail: lhl001@126.com
***通信作者:** 赵宜静(1975—), 女, 主任医师, 主要研究方向为环境污染物的健康影响。E-mail: yjzhao@pdcdc.sh.cn

redissolved by shaking with n-hexane, and filtered through a 0.22 μm microporous membrane. Separation was performed on a DB-5MS quartz capillary column (30 m×0.25 mm, 0.25 μm), and detection was carried out using an electron ionization source in multiple reaction monitoring mode. Quantification was achieved by the external standard method. **Results** Pentachloroanisole showed a good linear relationship in the concentration range of 0.2–10.0 μg/L (r^2=0.999). The limit of quantitation was 0.5 μg/kg, and the limit of detection was 0.2 μg/kg. Wooden samples were spiked with pentachloroanisole at 3 concentration levels, with 6 replicates at each level. The recoveries ranged from 85.3% to 97.4%, and the relative standard deviations were 3.0%–3.6%. **Conclusion** The method is simple to operate, with high sensitivity, specificity and precision, and is suitable for the determination of pentachloroanisole in wooden food contact materials.

KEY WORDS: pentachloroanisole; food contact materials; QuEChERS-gas chromatography-tandem mass spectrometry

0　引　言

五氯苯甲醚是环境持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)之一[1], 2024 年, 生态环境部、工业和信息化部、住房和城乡建设部等十四部委发布了《关于印发〈《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》国家实施计划(2024 年增补版)〉的通知》(环固体〔2024〕7 号), 要求加强五氯苯甲醚等 POPs 环境风险防控[2]。2022 年以来国家和上海市印发新污染物治理行动方案, 将五氯苯甲醚等 POPs 列入重点管控新污染物清单[3]。五氯苯甲醚不是商业化生产的化合物, 而是一种代谢物, 由某些微生物在有氧环境下对五氯苯酚进行生物降解而形成[4–5]。结构类似的氯化碳氢化合物, 如六氯苯、林丹和五氯硝基苯降解后也可能产生五氯苯甲醚[4]。五氯苯酚及其代谢物五氯苯甲醚具有致癌性[6–7]、免疫毒性[8]、神经毒性[9]和生殖毒性[10–11]。

木制食品接触材料, 如砧板、筷子等, 在我国日常生活中被广泛使用。为了延长木制品的使用寿命并防止微生物滋生, 部分木制品在生产过程中可能会使用防腐剂, 其中五氯苯酚曾被广泛使用[12], 近年来对五氯苯酚的方法[13–14]、暴露[15–16]及健康影响[17–18]的研究已有很多。2021 年, 张权等[19]报道了贵州省采集的 80 批次市售竹木砧板的监测情况, 结果显示, 非定型包装竹木砧板检出的五氯苯酚残留量为 0.200~384.350 mg/kg。五氯苯甲醚作为五氯苯酚的代谢产物, 亦可能残留于木制品类食品接触材料中, 并通过迁移行为进入食品, 进而引发潜在健康风险。

五氯苯甲醚是葡萄酒中常见的木塞污染物[20], 现有文献报道多集中于葡萄酒等样品中五氯苯甲醚及其他卤代苯甲醚的检测方法。五氯苯甲醚是强脂溶性中性化合物, 检测方法主要是气相色谱-质谱法[21–23]和气相色谱法[21,24], 前处理方法有直接进样法[25]、顶空-固相微萃取法[23]、固相萃取法[21]和液-液微萃取法[22,24]。而针对木制食品接触材料中五氯苯甲醚的研究较少, 相关基础数据较为匮乏。本研究采用 QuEChERS 前处理技术结合气相色谱-串联质谱法 (gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS)测定木制食品接触材料中五氯苯甲醚, 拟为相关产品的质量监管与风险监控提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　仪器、试剂与材料

GC-2030 气相色谱仪、TQ8040 NX 三重四极杆质谱联用仪(配有电子轰击源, 日本 Shimadzu 公司); DB-5MS 石英毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国 Agilent 公司); MS303TS 分析天平(感量 0.1 mg 和 0.01 g, 瑞士梅特勒-托利多公司); TGL-18MS 离心机(湖南湘仪公司); SK8210LHC 超声波清洗仪(上海科导公司); 71160 手摇削笔机器(浙江得力公司); BT001 电钻(浙江彼拓公司); Autovap S60 氮吹仪(可控温, 上海力德公司); ULTRA CLEAR 超纯水机(福建臻纯智慧公司); QuEChERS 自动样品制备系统(北京本立公司)。

标准品五氯苯甲醚(质量浓度 100 μg/mL, 天津阿尔塔公司); 乙腈、正己烷(色谱纯, 德国 MERCK 公司); 硫酸镁、氯化钠(分析纯, 上海国药集团化学试剂有限公司); 乙酸铵(色谱纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 氨水(色谱纯, 上海弗霓公司)。

QuEChERS 整合管、二氧化锆(ZrO_2)球(北京本立公司); 石墨化炭黑(graphitized carbon black, GCB)、乙二胺基-N-丙基硅烷化硅胶(primary-secondary amine, PSA)(美国 Supelco 公司); 0.22 μm 微孔滤膜(北京纳鸥公司); 木制砧板、木制筷子(北京京东世纪信息技术有限公司)。

1.2　标准溶液的配制

准确移取适量五氯苯甲醚标准溶液, 用正己烷稀释并配制标准工作液: 0、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 μg/L 系列标准工作液, 现用现配。

基质标准工作溶液: 取数份未经过加工处理的木材作

为空白样品，按本研究的方法前处理后，空白基质溶液氮气吹干，加入 1 mL 相应质量浓度的标准溶液复溶，过微孔滤膜。基质混合标准工作溶液应现用现配。空白基质溶液取样量与相应的试样处理取样量一致。

1.3 样品前处理

1.3.1 样品制备

木砧板：采用梅花形九点式布点，用电钻钻孔取木屑，收集木屑，装入聚乙烯塑料袋或塑料管中，贴好试样编号，室温下干燥处保存，备用。筷子：同一批次筷子抽取不少于 10 根，用手摇削笔机器或卷笔刀对筷子前、后部分进行削卷取样(可以用剪刀对木屑进一步剪短)，木屑装入聚乙烯塑料袋或塑料管中，贴好试样编号，室温下干燥处保存，备用[26]。

1.3.2 QuEChERS 方法

称取 1.00 g 制备好的试样置于提取净化管内，加 10 mL 纯水，加 ZrO_2 球 20 粒，超声 10 min(注意要浸没样品，如果没有浸没可以增加 5 mL 水，中间振荡 2 次)，接着准确加入 10 mL 乙腈，然后再加入 2 g 硫酸镁和 1 g 氯化钠。安装 QuEChERS 配套内管(内管中装有 600 mg 硫酸镁，50 mg GCB，50 mg PSA)，放入自动样品制备系统，振荡提取，高速离心净化(1000 r/min 振荡 600 s，4000 r/min 离心 300 s)。准确吸出 1.0 mL 内管中乙腈溶液至离心管；40 ℃水浴中氮吹至近干。加入 1.0 mL 正己烷振荡复溶，过 0.22 μm 微孔滤膜，用于 GC-MS/MS 测定。

1.4 仪器条件

1.4.1 色谱条件

DB-5MS 石英毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm，0.25 μm)；载气为氦气，纯度不小于 99.999%；碰撞气为氩气；不分流进样；进样口温度 250 ℃；流量 1 mL/min；进样量 1.0 μL；溶剂延迟时间 10.0 min。柱升温程序：初始温度 50 ℃，保持 1 min；以 15 ℃/min 速率升温至 250 ℃；保持 15 min。

1.4.2 质谱条件

电子轰击离子源；检测器电压 0.7 kV(相对于调谐结果)；多反应监测(multiple reaction monitoring，MRM)模式；离子源温度 230 ℃，传输线温度 280 ℃。定量离子对：*m*/*z* 265.0/236.8，碰撞能量：15 eV；定性离子对：*m*/*z* 280.0/236.7，碰撞能量：30 eV；280.0/264.8，碰撞能量：9 eV。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Office 专业增强版 2016 的 Excel 软件对数据进行分析及绘制图表，检测结果采用平均值和标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 仪器条件的优化

五氯苯甲醚分子式为 $C_7H_3Cl_5O$，分子量 280.362 g/mol，水溶性(温度为 25 ℃)<1 mg/L，有机碳-水分配系数为 13800 L/kg[27]，为强脂溶性的中性化合物，性质稳定，质谱检测采用 GC-MS/MS MRM 模式可获得较高的灵敏度。采用离子对：*m*/*z* 265.0/236.8、280.0/236.7、280.0/264.8 作为定性定量离子对，同时优化了碰撞能量，满足方法定量和定性确证要求。

在 1.3 优化的前处理条件下，于空白样品中加入标准溶液后依次进行处理，按 1.4 仪器工作条件分析，五氯苯甲醚保留时间为 12.780 min。

2.2 QuEChERS 方法的优化

2.2.1 提取条件的优化

在样品前处理过程中，为了增加检测灵敏度，取样量需要尽量大，但实验发现制备的木屑吸水量大，2.0 g 试样置于提取净化管内，加 20 mL 溶剂，都无法浸没样品，因此最终取样量确定为 1.0 g。同时分别实验了 pH 不同的 10 mL 纯水、10 mL 0.1%甲酸溶液、10 mL 5 mmol/L 乙酸铵水溶液和 10 mL 2%氨水提取样品对结果的影响，实验发现，回收率没有明显区别，因此采用 10 mL 纯水，再加 10 mL 乙腈来提取样品。

QuEChERS 方法中需加入硫酸镁和氯化钠等无机盐[28]，一是脱水，二是通过盐析提高萃取效率，在其他操作条件相同条件下，比较了 0.5、1.0、2.0 和 5.0 g 硫酸镁，氯化钠均为 1 g 对五氯苯甲醚提取率的影响。结果显示，0.5 g 硫酸镁时，提取率明显低，而 1、2 和 5 g 硫酸镁，提取率较高，无明显差异。考虑到硫酸镁浓度太低会导致脱水效果差，而 5 g 用量过多造成试剂浪费，遵循适度过量的原则，最终选择 2 g 硫酸镁和 1 g 氯化钠。

2.2.2 分散吸附剂的选择和优化

QuEChERS 方法中使用的分散吸附剂通常包括 PSA、C_{18} 和 GCB 等[29–30]，除了上述吸附剂之外，净化管里也会加硫酸镁，其常被用作基础除水剂。PSA 通过胺基的弱离子交换作用和极性基质成分形成氢键，从而吸附和消除样品基质中的糖类、色素以及脂肪酸。GCB 对杂质有强烈的吸附作用，但同时对非极性和具有平面结构的物质也有一定的吸附作用。C_{18} 是目前使用最多的一种吸附剂，对非极性化合物有较强吸附作用，常被用来去除极性溶液中的非极性化合物。另外，近年来陶瓷均质子使用较少，通常采用高密度 ZrO_2 球辅助样品提取、净化。

吸附剂的选择和用量是净化步骤的重点，本研究选用未经过加工处理的木材作为样品基质，考察了分散吸附剂 12 种不同组合的净化效果(100 mg C_{18}、100 mg C_{18}+ZrO_2、100 mg GCB、100 mg GCB+ZrO_2、100 mg PSA、100 mg PSA+ZrO_2、100 mg PSA+30 mg GCB、100 mg PSA+30 mg GCB+ZrO_2、50 mg PSA+50 mg GCB、50 mg PSA+50 mg GCB+ZrO_2、50 mg PSA+50 mg C_{18}、50 mg PSA+50 mg C_{18}+ZrO_2)。在 0.050 mg/kg 添加水平下，QuEChERS 方法按 1.3.2 方法进行前处理，其中 ZrO_2 球添

加量均为 20 粒, 分别采用以上 12 种分散吸附剂组合进行净化。结果显示, 50 mg PSA + 50 mg GCB + ZrO_2 净化效果最佳, 见图 1。因此选择 50 mg PSA + 50 mg GCB + ZrO_2 作为分散吸附剂。

2.3　线性范围、定性确认及检出限

准确移取适量五氯苯甲醚标准溶液, 用正己烷稀释并配制标准工作液: 0、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 μg/L 系列标准工作液, 按仪器工作条件进行测定。以五氯苯甲醚的质量浓度为横坐标(X, μg/L), 对应的峰面积为纵坐标(Y)绘制标准曲线, 外标法定量。所得的线性范围为 0.2~10.0 μg/L, 线性回归方程为 Y=16575.83X+927.57, 决定系数为 0.9999。对于复杂基质样品, 常使用空白基质做标准曲线, 结果会更准确。因此本研究同时考察了基质标准工作溶液, 按 1.2 节描述配制基质匹配校准溶液。结果发现, 与溶剂配制的标准工作溶液没有明显区别, 说明本方法的基质干扰很小。

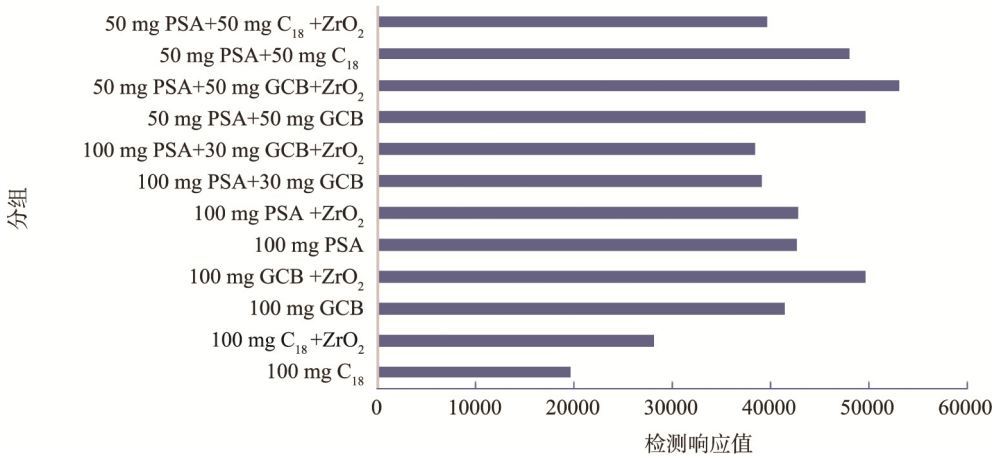


图 1　不同组合分散吸附剂的净化效果
Fig.1　Purification effects of different combined dispersive adsorbents

定性确认除了依据保留时间之外, 还需计算组分的定量离子与定性离子的离子丰度比, 通过比对样品和标准的离子丰度比来确认是否为五氯苯甲醚。质量浓度为 1.0 μg/L 五氯苯甲醚标准溶液测得的定性离子对 m/z 280.0/236.7 的丰度比为 51%, 定性离子对 m/z 280.0/264.8 的丰度比为 41%, 从而确定定性离子对的丰度比最大允许相对偏差为±30%。

空白样品中添加的质量浓度 0.5 μg/kg 的五氯苯甲醚, 信噪比(S/N)>10, 相对离子丰度的偏差为 22%, 确定定量限(limit of quantitation, LOQ)为 0.5 μg/kg; 五氯苯甲醚添加的质量浓度 0.2 μg/kg 时, 实验结果: S/N 明显大于 3, 但相对离子丰度的偏差已达到 31%, 因此确定方法检出限(limit of detection, LOD)为 0.2 μg/kg, 可以满足日常五氯苯甲醚的监测检测需要。

2.4　回收率与精密度

取数份未经过加工处理的木材作为空白样品, 分别添加 2.0、10.0、50.0 μg/kg 3 个浓度水平的五氯苯甲醚, 按实验方法进行测定, 每个添加水平 6 个平行样品, 计算回收率和相对标准偏差, 结果见表 1 样品中五氯苯甲醚的加标回收率为 85.3%~97.4%, 相对标准偏差为 3.0%~3.6%, 准确度和精密度符合痕量物质分析检测要求。

2.5　五氯苯甲醚检测方法比较

木制食品接触材料中五氯苯甲醚的相关报道较少, 但五氯苯甲醚作为葡萄酒中常见木塞污染物, 相关的研究报告已有很多, 见表 2。仪器原理及预实验结果均显示, GC-MS/MS 比 GC-电子俘获检测法和 GC-MS 法灵敏度更好, 尤其是抗干扰能力, 因此最终使用 GC-MS/MS。直接进样对仪器的污染较严重, 且方法灵敏度也不高; 液-液微萃取和固相萃取操作烦琐; 顶空-固相微萃取需要特殊的硬件配制, 并且也不适用于木制食品接触材料。QuEChERS 方法与传统样品前处理相比具有快速、简单、便宜、有效、可靠和安全的优点, 在本研究中, 使用了自动化的 QuEChERS 前处理设备, 操作更加简便。

表 1　五氯苯甲醚的准确度及精密度(n=6)
Table 1　Accuracy and precision of pentachloroanisole (n=6)

加标量 /(μg/kg)	测定值 /(μg/kg)	相对标准偏差/%	回收率/%
2.0	1.90±0.06	3.3	95.0
10.0	9.74±0.35	3.6	97.4
50.0	42.70±1.29	3.0	85.3

现有技术多集中于葡萄酒等液体基质, 单纯方法性能参数比较意义不大。本研究同表 2 中 2 项木制品的方法进行比较, 由表 2 可见, Cacho 等[22]建立的分散液-液微萃取 GC-MS 测定的 LOD 为 0.2 μg/kg, 与本研究相当; Cacho 等[25]发表的另外一项研究是通过直接进样 GC-MS 测定, LOD

表 2 五氯苯甲醚的检测研究

Table 2 Study on the determination of pentachloroanisole

样品	分析技术	前处理技术	取样量	LOQ/LOD	参考文献
木制食品接触材	GC-MS/MS	QuEChERS	1.0 g	LOQ: 0.5 μg/kg LOD: 0.2 μg/kg	本研究
葡萄酒	GC-MS/MS	顶空-固相微萃取	5 mL	LOQ: 10 ng/L LOD: 3 ng/L	BJS 202207
葡萄酒	GC-电子俘获检测法 GC-MS/MS	固相萃取	1.0 L	GC-电子俘获检测法 LOD: 8 ng/L GC-MS/MS LOD: 0.4 ng/L	[21]
葡萄酒木塞	GC-MS	分散液-液微萃取	葡萄酒 5 mL 木塞 1.0 g	白葡萄酒 LOD: 30 ng/L 红葡萄酒 LOD: 24 ng/L 木塞 LOD: 0.2 μg/kg	[22]
葡萄酒	GC-电子俘获检测法	涡旋辅助液-液微萃取	5 mL	LOD: 2.9 ng/L	[24]
葡萄酒	GC-MS/MS	顶空-固相微萃取	5 mL	LOD: 1 ng/L	[23]
木塞	GC-MS	直接进样	20 mg	LOD: 2.5 μg/kg	[25]

为 2.5 μg/kg, 远远小于本研究, 但其取样量很小, 仅为 20 mg。综上所述, 对于木制材料这类复杂基质, 本研究使用了自动化前处理设备, 操作简便, 而且方法性能参数也优于多数研究报道的方法, 或者与其相当。

2.6 实际样品检测

2026 年采集了市售的 3 份砧板和 3 份一次性筷子共 6 份样品, 进行实际样品的方法验证。按前述方法检测了样品中五氯苯甲醚, 结果发现, 五氯苯甲醚均小于 LOD, 原因可能是木材原料中没有添加五氯苯酚, 因此没有五氯苯甲醚生成, 还有可能是未使用过的砧板和筷子产生五氯苯甲醚的量较小。因此后续需要同时检测五氯苯酚, 并且加大采样量, 特别是需要采集使用一段时间的木制食品接触材料, 从而对其健康风险进行客观评估。

3 结 论

本研究建立了木制食品接触材料中五氯苯甲醚的 QuEChERS-GC-MS/MS 测定方法, 系统考察了 QuEChERS 技术中吸附剂组合、提取溶剂及无机盐用量对五氯苯甲醚提取净化效果的影响。该方法操作简便、快速高效且成本较低, 适配自动化前处理设备, 可直接应用于市场上木砧板、筷子等木制食品接触材料的批量检测, 为市场监管部门开展产品质量抽检、企业质量控制提供可靠技术支撑, 同时为五氯苯甲醚的环境风险防控、食品接触材料安全标准制定提供基础数据, 保障消费者饮食安全。

参考文献

[1] Asia and Pacific Regional Centre for the Basel Convention, Asia and Pacific Centre for Capacity-building and Technology Transfer for the Stockholm Convention. Stockholm convention on persistent organic pollutants [EB/OL]. (2026-03-10) [2026-04-10]. https://www.bcrc.cn/atm/7/20241015142652152.pdf

[2] 生态环境部. 关于印发《〈关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约〉国家实施计划(2024 年增补版)》的通知: 环固体〔2024〕7 号[R/OL]. 2024-01-30. http://sthj.hlj.gov.cn/sthj/c116245/202402/c00_31711626.shtml.
Ministry of Ecology and Environment. Circular on issuing *The national implementation plan for the stockholm convention on persistent organic pollutants* (2024 Supplement): [2024] No.7 [R/OL]. 2024-01-30. http://sthj.hlj.gov.cn/sthj/c116245/202402/c00_31711626.shtml.

[3] 上海市生态环境局. 上海市履行《〈关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约〉国家实施计划(2024 年增补版)》实施方案: 沪环土〔2024〕184 号 [R]. 2024-09-25.
Shanghai Municipal Ecology and Environment Bureau. Implementation Plan of Shanghai for *The national implementation plan for the stockholm convention on persistent organic pollutants* (*2024 Supplement*): [2024] N0.184 [R]. 2024-09-25.

[4] Persistent Organic Pollutants Review Committee. Addendum to the report of the ninth meeting of the persistent organic pollutants review committee-risk management evaluation of pentachlorophenol and its salts and esters: UNEP/POPS/POPRC.9/13/Add.3 [R/OL]. 2013-11-11. https://www.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC9/Documents/tabid/3281/ItemId/3700/Default.aspx.

[5] Chemicals Evaluation and Research Institute. Study on the transformation of PCP in the environment [EB/OL]. (2026-03-10) [2026-04-10]. https://www.cerij.or.jp/ceri_en/koukai/koukai_menu.html.

[6] Cheng P, Zhang Q H, Shan X M, et al. Cancer risks and long-term community-level exposure to pentachlorophenol in contaminated areas, China [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(2): 1309–1317.

[7] Tasaki M, Kuroiwa Y, Inoue T, et al. Lack of nrf2 results in progression of proliferative lesions to neoplasms induced by long-term exposure to non-genotoxic hepatocarcinogens involving oxidative stress [J]. Experimental and Toxicologic Pathology, 2014, 66(1): 19–26.

[8] Martin T J, Maise J, Gabure S, et al. Exposures to the environmental contaminants pentachlorophenol and dichlorodiphenyltrichloroethane increase production of the proinflammatory cytokine, interleukin-1β, in

human immune cells [J]. Journal of Applied Toxicology: JAT, 2019, 39(8): 1132–1142.

[9] Fraser L D, Stander A B, Steenkamp V. Cytotoxic activity of pentachlorophenol and its active metabolites in SH-SY5Y neuroblastoma cells [J]. Toxicology in Vitro, 2019, 58: 118–125.

[10] Cheng Y, Ekker M, Chan M H. Relative developmental toxicities of pentachloroanisole and pentachlorophenol in a zebrafish model (Daniorerio) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 112: 7–14.

[11] Corona M V, Bavaresco J, Rocha J A V, et al. Attic dust assessment near a wood treatment plant: past air pollution and potential exposure [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 95: 153–160.

[12] 赵玉文, 李泽冉, 薛香菊, 等. 气相色谱串联质谱法检测木砧板中五氯苯酚[J]. 预防医学, 2023, 35(9): 825–828.
Zhao Yuwen, Li Zeran, Xue Xiangju, et al. Determination of pentachlorophenol in wooden cutting boards by gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Preventive Medicine, 2023, 35(9): 825–828.

[13] 鲁晋南, 王丽, 王云, 等. 柱前衍生-气相色谱-质谱法测定鸡蛋中五氯苯酚的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2025, 61(2): 190–194.
Lu Jinnan, Wang Li, Wang Yun, et al. Determination of pentachlorophenol content in eggs by pre-column derivatization-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2025, 61(2): 190–194.

[14] 卢忠魁, 刘超, 李鲤, 等. 固相萃取-气相色谱-串联质谱法测定木耳中五氯苯酚[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 233–240.
Lu Zhongkui, Liu Chao, Li Li, et al. Determination of pentachlorophenol in Auricularia auricula by solid-phase extraction-gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(22): 233–240.

[15] Wen Juan, Geng Shijie, Mu Juan, et al. Pentachlorophenol exposure, plasma metabolomic markers, and gestational diabetes mellitus: association and potential mediation analyses [J]. Environmental Pollution, 2025, 372: 126069.

[16] Zhou T, Abrishamcar S, Christensen G, et al. Associations between prenatal exposure to environmental phenols and child neurodevelopment at two years of age in a South African birth cohort [J]. Environmental Research, 2025, 264(P1): 120325.

[17] Jin Yongpeng, Zhang Fude, Liu Ying, et al. The toxicity, bioaccumulation, and potential food safety risks of pentachlorophenol in broiler chickens [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 491: 137942.

[18] Li Ruijia, Wan Yanjian, He Zhen, et al. Exposure to organophosphates, pyrethroids, neonicotinoids, and pentachlorophenol: spatial variations in urinary biomarkers and associations with oxidative stress based on a repeated-measure study [J]. The Science of the Total Environment, 2025, 969: 178934.

[19] 张权, 刘利亚, 吴玉田, 等. 气相色谱-串联质谱法测定竹木砧板表层中五氯酚的含量[J]. 理化检验(化学分册), 2021, 57(10): 879–884.
Zhang Quan, Liu Liya, Wu Yutian, et al. Determination of pentachlorophenol content in the surface layer of bamboo and wood cutting boards by gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2021, 57(10): 879–884.

[20] 李昕颖, 赵永芳, 王圣仪, 等。葡萄酒中木塞污染物检测技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 442–453.
Li Xinying, Zhao Yongfang, Wang Shengyi, et al. Research progress on detection technologies for cork contaminants in wine [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 442–453.

[21] Martínez-Urunuela A, Rodriguez I, Cela R, et al. Development of a solid-phase extraction method for the simultaneous determination of chloroanisoles and chlorophenols in red wine using gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Analytica Chimica Acta, 2005, 549(1-2): 117–123.

[22] Cacho J I, Nicolas J, Vinas P, et al. Control of halophenol and haloanisole concentration in wine cellar environ ments, wines, corks and wood staves using gas chromatography with mass spectrometry [J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2016, 22(3): 391–398.

[23] 王小花, 黄韡, 顾培良, 等. 基于自动顶空-固相微萃取-气相色谱质谱检测葡萄酒中的 9 种木塞污染物[J]. 食品科技, 2024, 49(8): 322–328.
Wang Xiaohua, Huang Wei, Gu Peiliang, et al. Determination of 9 cork contaminants in wine based on automatic headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(8): 322–328.

[24] Pizarro C, Perez-Del-Notario N, Saenz-Mateo A, et al. A simple and sensitive vortex assisted liquid-liquid micro extraction method for the simultaneous determination of haloan isoles and halophenols in wines [J]. Talanta, 2014, 128: 1–8.

[25] Cacho J I, Nicolas J, Vinas P, et al. Direct sample introduction-gas chromatography-mass spectrometry for the deter mination of haloanisole compounds in cork stoppers [J]. Journal of Chromatography A, 2016, 1475: 74–79.

[26] 蒋定国, 杨大进. 食品用纸质品、竹木砧板及筷子中五氯酚测定的标准操作程序[C]//国家食品安全风险评估中心. 国家食品污染和有害因素风险监测工作手册(中卷), 2020: 281–289.
Jiang Dingguo, Yang Dajin. Standard Operating Procedure for Determination of Pentachlorophenol in Food-Contact Paper Products, Bamboo and Wood Cutting Boards and Chopsticks [C]//China National Center for Food Safety Risk Assessment (CFSA). National Food Contamination and Harmful Factors Risk Monitoring Workbook (Volume II), 2020: 281–289.

[27] Anon. Pentachloroanisole [EB/OL]. (2026-03-10) [2026-03-10]. http://cameochemicals.noaa.gov/chemical/20850.

[28] 陈达炜, 李少华, 赵云峰. 食品中化学危害物检测的样品前处理方法选择及开发策略[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(5): 1104–1111.
Chen Dawei, Li Shaohua, Zhao Yunfeng. Selection and development strategies of sample pretreatment methods for the detection of chemical hazards in food [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(5): 1104–1111.

[29] Anastassiades M, Lehotay S J, Stajnbaher D, et al. Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and “dispersive solid-phase extraction” for the determination of pesticide residues in produce [J]. Journal of AOAC International, 2003, 86(2): 412–431.

[30] 王连珠, 方恩华, 王彩娟, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法测定动物源食品中痕量五氯酚及其钠盐[J]. 色谱, 2018, 36(6): 518–522.
Wang Lianzhu, Fang Enhua, Wang Chaijuan, et al. Determination of trace pentachlorophenol and its sodium salt in animal-derived foods by QuEChERS-ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2018, 36(6): 518–522.

(责任编辑: 蔡世佳　韩晓红)