·实验技术及其应用·

QuEChERS–气相色谱–质谱法同时测定牛油火锅底料中七种对羟基苯甲酸酯类防腐剂

杨长晓[1],张坤[1],周永杨[2]

1. 四川省疾病预防控制中心,四川 成都 610041;2.达州市疾病预防控制中心

摘要:目的 建立同时测定牛油火锅底料中七种对羟基苯甲酸酯类防腐剂的 QuEChERS–气相色谱–质谱法。**方法** 称取一定量均质化样品,加入水、内标物和乙腈,经 QuEChERS 法提取、净化后,气相色谱–质谱法分析,内标法定量。**结果** 在 0.05~5.00 μg/ml 范围内,七种被测物均呈现良好的线性关系,相关系数均大于 0.999;检出限和定量限分别为 0.05~0.06 mg/kg 和 0.15~0.20 mg/kg;平均加标回收率为 91.4%~108%,相对标准偏差为 0.6%~7.2%。**结论** 本方法操作方便、准确、灵敏,适用于牛油火锅底料中七种对羟基苯甲酸酯类防腐剂的测定。

关键词:牛油火锅底料;对羟基苯甲酸酯;QuEChERS;气相色谱–质谱法

中图分类号:TS207.3;O657.63 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-8507(2026)01-154-07

DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202508373

Simultaneous determination of seven parabens in beef tallow hotpot seasoning by QuEChERS–gas chromatography–mass spectrometry

YANG Chang-xiao*, ZHANG Kun, ZHOU Yong-yang

Sichuan Center for Disease Control and Prevention, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: Objective To establish a QuEChERS–gas chromatography–mass spectrometry method for the simultaneous determination of seven parabens in beef tallow hotpot seasoning. **Methods** To an accurately weighed quantity of the homogenized sample, water, the internal standard and acetronitrile were added, and the analytes were extracted and purified by QuEChERS, analyzed by gas chromatography–mass spectrometry and quantified by internal standard method. **Results** Good linearity was observed for all seven analytes over the range of 0.05 to 5.00 μg/mL, with $r \geqslant 0.999$. The limits of detection (LODs) were between 0.05 and 0.06 mg/kg, and the limits of quantitation (LOQs) were between 0.15 and 0.20 mg/kg. The average recoveries of the method were between 91.4% and 108%, with the relative standard deviations (RSDs) between 0.6% and 7.2%. **Conclusion** The method is simple, accurate and sensitive, and is suitable for the simultaneous determination of seven parabens in beef tallow hotpot seasoning.

Keywords: Beef tallow hotpot seasoning; Parabens; QuEChERS; Gas chromatography–mass spectrometry

对羟基苯甲酸酯类化合物(parabens,又名尼泊金酯)具备高效广谱的抑菌性能,因而被广泛用作饮料、调味品等各类食品的防腐剂[1]。牛油火锅底料是川渝地区极具特色的调味品,消费频次高且受众群体广泛。豆瓣酱等原料可能在牛油火锅底料的生产过程中引入对羟基苯甲酸酯类防腐剂[2],人为添加和环境代入也可能导致此类食品中检出对羟基苯甲酸酯类化合物[3]。近年来,对羟基苯甲酸酯类防腐剂的安全性引发持续争议。多项研究证实,长期过量摄入该类物质可能导致人体内分泌紊乱,诱发皮肤黏膜过敏等健康问题,其中儿童、孕妇等敏感群体面临的健康风险尤为显著[4-7],甚至有研究发现对羟基苯甲酸酯类化合物和乳腺癌存在一定的关联[8]。因此,有必要建立一种快速、准确的测定牛油火锅底料中对羟基苯甲酸酯类防腐剂的方法,为食品安全监管提供技术支撑。

多项研究证实对羟基苯甲酸酯类化合物联合使用可产生显著的协同抑菌效应[9],但因为分子结构的差别,不同酯型的潜在健康风险并不一致[10],因此并非所有对羟基苯甲酸酯类化合物均可作为食品防腐剂使用。我国仅允许对羟基苯甲酸甲酯和乙酯作为防腐剂在部分食品中使用[11],同时明确规定对羟基苯甲酸丙酯不能用作食品添加剂[12]。基于此,通常情况下需要此类物质分别进行检测以保障食品安全。目前,针对食品中对羟基苯甲酸酯类防腐剂的检测,气

作者简介:杨长晓(1983—),男,本科,副主任技师,研究方向:食品理化检验

通信作者:张坤,E-mail:853533494@qq.com

相色谱法(gas chromatography,GC)[13]、高效液相色谱法(high performance liquid chromatography,HPLC)[14]、气相色谱－质谱法(GC-mass spectrometry,GC-MS)[15]、气相色谱－串联质谱法(GC-tandem mass spectrometry,GC-MS/MS)[16]、液相色谱－串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry,LC-MS/MS)[17-18]、超高效液相色谱－高分辨质谱法(ultra-high performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry,UPLC-HRMS)[19]等均有报道。《食品安全国家标准 食品中对羟基苯甲酸酯类化合物的测定》(GB 5009.31—2025)也规定了GC、HPLC和LC-MS/MS等方法用于测定不同类型食品中的对羟基苯甲酸酯类防腐剂[20]。这些方法中,GC和HPLC的定性能力有限,面对复杂基质样品时易出现假阳性结果,而GC-MS/MS、LC-MS/MS和UPLC-HRMS法所需设备价格昂贵,在国内基层实验室尚未普及,难以广泛应用;相比较之下,GC-MS法能满足定性需求,且仪器经济适用,基层普及率高。另外,这些方法主要集中于酱油、醋、果汁等样品基质,针对牛油火锅底料中该类防腐剂的检测方法尚未见报道。

牛油火锅底料是一种以牛油为主要油脂来源,融合辣椒、花椒、姜、蒜、八角、桂皮等多种香辛料,搭配豆瓣酱、豆豉、冰糖等调味成分熬制而成的特色调味品[21],其基质中高比例的油脂易包裹目标物而导致提取效率偏低;同时,香辛料中含有的色素、挥发油及酚类物质,会与目标物在色谱分离中产生共流出峰,干扰定性定量,增加假阳性风险。

QuEChERS技术具备高效性、经济性和普适性等优势,在食品中农药残留的快速检测领域应用广泛[22-23];近年来,该技术的应用范围进一步拓展,已有报道显示其可用于食品中抗氧化剂[24]、荧光增白剂[25]等其它类型污染物检测的样品前处理环节。本研究采用QuEChERS技术进行目标物的提取和净化,并采用GC-MS对目标物进行分离检测。该方法不仅有效解决了传统方法定性能力不足及基体干扰严重等问题,还具备灵敏度高、准确性好、操作简便的优势,为牛油火锅底料中对羟基苯甲酸酯类防腐剂的检测提供了可靠方案。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂　七种对羟基苯甲酸酯混合标准溶液(1 000 μg/ml)、D_4- 对羟基苯甲酸乙酯标准溶液(1 000 μg/ml)购于北京曼哈格生物技术有限公司;乙腈(色谱纯)购于德国Sigma公司;陶瓷均质子、ProElut QuE En萃取盐包(含NaCl、$MgSO_4$、柠檬酸钠、柠檬酸氢二钠,分别为1、4、1和0.5 g)和ProElut QuE 15 ml净化管(含C18、PSA、GCB、$MgSO_4$,分别为400、400、200和1 200 mg)购于北京迪马科技有限公司;尼龙66膜过滤器(0.22 μm)购于湖南比克曼控股有限公司;实验用水为超纯水。牛油火锅底料样品,购于本地超市和粮油干杂店。

1.2　主要仪器与设备　7890A/7000C气相色谱－质谱仪(Agilent Technologies,美国),H2100R高速冷冻离心机(上海卢湘仪离心机仪器有限公司),Multi Reax涡旋振荡器(Heidolph,德国),HM100刀式研磨仪(北京格瑞德曼仪器设备有限公司)。

1.3　方法

1.3.1　标准溶液的配制　准确吸取1.00 ml对羟基苯甲酸酯混合标准溶液,用乙腈稀释并定容至10 ml配制成质量浓度为100 μg/ml的混合标准中间溶液;准确吸取2.50 ml混合标准中间溶液,用乙腈稀释并定容至25 ml配制成质量浓度为10.0 μg/ml的混合标准工作溶液。准确吸取1.00 ml D_4- 对羟基苯甲酸乙酯标准溶液,用乙腈稀释并定容至10 ml配制成质量浓度为100 μg/ml的内标工作溶液。临用前,准确吸取适当体积的10.0 μg/ml的混合标准工作溶液于7支10 ml容量瓶中,分别加入0.10 ml内标工作溶液,用乙腈定容至刻度,摇匀,配制成内标物质量浓度均为1.00 μg/ml、各目标物质量浓度为0.05、0.10、0.25、0.50、1.00、2.50和5.00 μg/ml的标准系列工作溶液。

1.3.2　样品前处理　准确称取2.00 g均质化样品于50 ml离心管中,加入5 ml水,准确加入0.10 ml内标工作溶液和10 ml乙腈,然后加入一颗陶瓷均质子和ProElut QuE En萃取盐包中的试剂,立即以3 000 r/min涡旋振荡5 min,然后在0℃下16 093 ×g离心5 min;取6 ml上清液,加入ProElut QuE 15 ml净化管中,以3 000 r/min涡旋振荡2 min,静置后吸取上层液体过0.22 μm尼龙66膜过滤器,供GC-MS测试。

1.3.3　空白试验　除不加样品外,采用与试样操作完全相同的步骤进行。

1.3.4　分析条件　选用Agilent DB-5 MS UI毛细管色谱柱(规格30 m × 0.25 mm,0.25 μm);程序升温:初始温度设定为70℃,保持2 min后,以20℃/min的速率升至300℃,并保持2 min;进样口温度为280℃;进样方式为分流进样,分流比为1∶5;进样体积为1 μl;载气为高纯He,流量控制在1.0 ml/min。质谱离子源为电子轰击(EI)源,温度为300℃,电离能量为70eV;四极杆和传输线温度分别为150℃和280℃;溶剂延迟时间为5 min;检测模式为SIM。七种对羟基苯甲酸酯类化合物定量离子和定性离子等信息见表1。

表 1　对羟基苯甲酸酯类化合物的 GC-MS 分析参数

Table 1　GC-MS analysis parameters of parabens

中文名称	英文名称(缩写)	保留时间(min)	定量离子(m/z)	定性离子(m/z)
对羟基苯甲酸甲酯	methyl paraben (MeP)	8.446	121	152、93
对羟基苯甲酸乙酯	ethyl paraben (EtP)	8.889	121	138、166
D_4- 对羟基苯甲酸乙酯	ethyl paraben-D_4 (EtP-D_4)	8.889	125	170
对羟基苯甲酸异丙酯	isopropyl paraben (Iso-Prp)	9.071	121	138、180
对羟基苯甲酸丙酯	propyl paraben (Prp)	9.504	121	138、180
对羟基苯甲酸异丁酯	isobutyl paraben (Iso-BuP)	9.848	121	138、194
对羟基苯甲酸丁酯	butyl paraben (BuP)	10.111	121	138、194
对羟基苯甲酸庚酯	heptyl paraben (HeP)	11.725	121	138、139

1.3.5　结果计算　样品中对羟基苯甲酸酯类化合物含量按式(1)计算：

$$X_i=\frac{(c-c_0)\times V\times 1\,000}{m\times 1\,000}$$　　公式(1)

式中：X_i 为样品中对羟基苯甲酸酯 i 的含量，mg/kg；c 为由标准曲线计算得到样品测试液中对羟基苯甲酸酯 i 的质量浓度，μg/ml；c_0 为由标准曲线计算得到空白测试液中对羟基苯甲酸酯 i 的质量浓度，μg/ml；V 为试样提取液体积，ml；m 为取样量，g；1 000 为单位换算系数。

2　结　果

2.1　提取溶剂的选择　对羟基苯甲酸酯类化合物具极性和非极性结构，其在水中溶解度较低，而在甲醇、乙醚、乙腈等有机溶剂中具有较高溶解度。乙醚与甲醇常被用作该类防腐剂的提取溶剂[13,20,26]，但牛油火锅底料富含甘油三酯等非极性脂类成分及色素等杂质易与甲醇、乙醚发生共萃取，导致提取体系中杂质含量偏高。乙腈与脂类物质的互溶性较低，可减少脂类杂质的共萃取，乙腈与水混合后，在盐析作用下快速分层，而脂类更易留在两相界面，进一步减少进入乙腈相的机会。因此，本研究选用乙腈作为对羟基苯甲酸酯类防腐剂的提取溶剂。

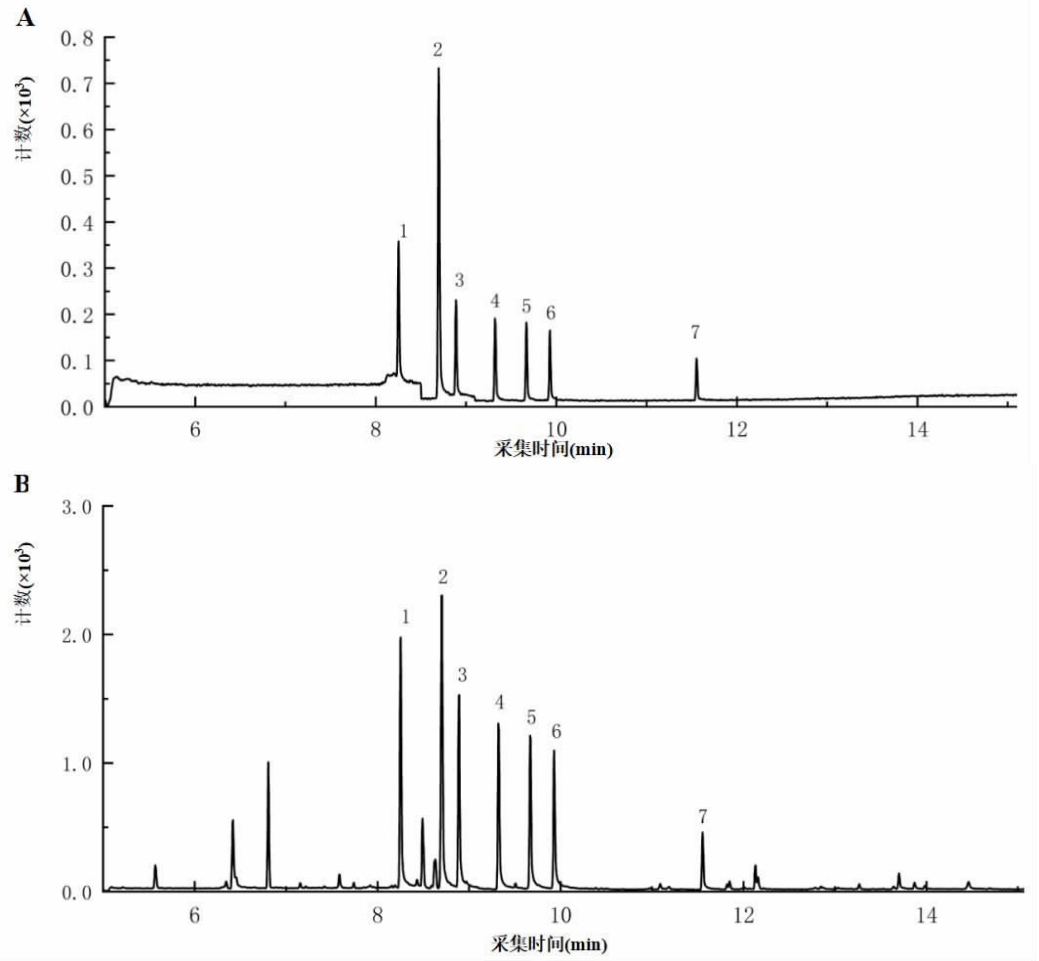
2.2　QuEChERS 提取、净化　随着 QuEChERS 技术的日益成熟，市场上已涌现多种标准化的萃取盐包及净化管产品，为复杂基质样品(如高脂食品)的前处理提供了便捷的解决方案。本研究采用商业化 QuEChERS 试剂盒对牛油火锅底料样品进行提取和净化处理。样品加入适量水和提取溶剂后，加入 ProElut QuE EN 萃取盐包后立即高速涡旋振荡提取。$MgSO_4$ 可快速吸收水分、放热融化并破坏油脂层，促进乙腈对目标物的萃取；NaCl 可提高水相离子强度，加速乙腈 - 水两相的分层进程，促进目标物向乙腈相转移；柠檬酸钠 / 柠檬酸氢二钠缓冲体系维持弱酸性环境，不仅可抑制目标物的水解反应，还能降低基质中酸性干扰物质的共萃取。涡旋振荡处理后，通过低温离心操作促使牛油基质中的脂类成分发生冷凝团聚与沉降，从而进一步降低提取液中脂肪类杂质残留量。

考虑到牛油火锅底料基质中有机酸、色素、脂肪酸等杂质可能会对目标物的分析测定产生干扰，采用成品 ProElut QuE 15 ml 净化管对乙腈提取液进行净化处理。PSA 通过氢键、离子交换等作用选择性吸附极性杂质；C18 通过疏水相互作用选择性吸附样品中的脂肪、脂溶性色素等非极性基质成分；Carb 对辣椒红素等具有平面结构的色素具有较强的吸附能力；$MgSO_4$ 可快速去除提取液中残留的痕量水分。这些试剂协同作用，能够减少提取液中的杂质含量，降低其对目标物信号的干扰。净化处理后，提取液颜色明显变淡，干扰显著降低。

2.3　基质效应　对于牛油火锅底料这类基质组成复杂的样品，基质效应(matrix effect,ME)是必须考虑的影响因素。用纯溶剂和空白基质溶液配制质量浓度为 1.00 μg/ml 的对羟基苯甲酸酯混合标准溶液，分别测定目标物的信号响应值，并依据公式 ME(%)=(空白基质标准溶液响应值 / 纯溶剂标准溶液响应值)×100 评价基质效应。ME＞100%和 ME＜100%分别提示存在基质增强和基质抑制效应，且 ME 值与 100% 偏差越大表明基质效应越强。结果显示七种对羟基苯甲酸酯类化合物的 ME 值均大于 300%，说明牛油火锅底料对对羟基苯甲酸酯类防腐剂的测定呈现明显的基质增强效应。采用同位素内标进行校正是减少基质效应影响的重要手段。本研究选取 D_4- 对羟基苯甲酸乙酯作为内标物，分别采用纯溶剂和空白基质溶液配制相同质量浓度(1.00 μg/ml)的标准溶液(其中内标物的质量浓度均为 1.00 μg/ml)，通过对比两种溶液中目标物和内标物响应的比值，结果发现二者的百分比介于 92%和 105%之间，因此采用内标法可以充分抵消基质效应的影响，从而实现目标物的准确定量。

2.4　GS-MS 条件的优化　本实验涉及的七种对羟

基苯甲酸酯类防腐剂中，异丙酯与丙酯、异丁酯与丁酯互为同分异构体，其监测离子完全一致，因此需通过优化色谱条件实现分离以保证准确定性。文献报道显示，HP-5 MS [16]和 OV-1701 MS [27]色谱柱可用于此类防腐剂的分离。本研究选用 DB-5 MS UI 毛细管色谱柱（30 m × 0.25 mm，0.25 μm）对待测目标物进行分离。实验过程中，通过全扫描模式在 50 ~ 400 amu 范围内筛选各目标物的特征离子，并对进样口温度、色谱柱升温程序、进样模式、分流比、离子源温度及传输线温度等关键仪器参数进行了优化，最终确定了分析条件。优化后的方法可在 15 min 内完成所有目标物的基线分离，且信号强度满足定量要求。在此条件下，混合标准溶液（1.00 μg/ml）及空白样品加标（5.00 mg/kg）处理后测试液的的总离子谱图见图 1。



注：峰号为 1—MeP；2—EtP + EtP-D_4；3—Iso-PrP；4—PrP；5—Iso-BuP；6—BuP；7—HeP；A 为混合标准溶液（1.00 μg/ml）；B 为空白样品加标溶液（5.00 mg/kg）。

图 1　混合标准溶液、及空白样品加标溶液、的总离子谱图

Figure 1　Total ion chromatograms (TIC) of a mixed standard solution and a blank sample spiked solution

2.5　方法学考察

2.5.1　线性范围、检出限和定量限　在本法线性范围内，回归方程的相关系数（r）均大于 0.999。取空白牛油火锅底料基质进行加标回收试验，以 S/N=3 和 S/N=10 所对应的加标水平分别估算方法的检出限和定量限。方法的回归方程、检出限和定量限评估结果见表 2。

2.5.2　准确度和精密度　准确称取 2.00 g 空白样品，分别加入不同体积 100 μg/ml 或 10.0 μg/ml 混合标准溶液配制成高、中、低三个加标水平，每个水平平行制备 6 份，按本法处理后进样分析。回收率和精密度测定结果见表 3。七种目标物在不同加标水平的平均回收率为 91.4% ~ 108%，相对标准偏差为 0.6% ~ 7.2%（n=6），表明该方法具有较好的准确度和精密度。

2.6　实际样品的测定　从自本地超市和干杂店采购不同品牌牛油火锅底料十份，按本法进行处理后测定七种对羟基苯甲酸酯类防腐剂的含量。其中二份样品检出对羟基苯甲酸甲酯，含量分别为 10.5 和 6.25 mg/kg；一份样品同时检出对羟基苯甲酸甲酯和对羟基苯甲酸乙酯，含量分别为 7.40 和 5.11 mg/kg。检测结果均符合《食品安全国家标准食品添加剂使用标准》（GB 2760—2024）中 0.25 g/kg（以对羟基苯甲酸计）的限量规定[11]。

表 2 回归方程、相关系数、检出限和定量限

Table 2 Regression equations, correlation coefficient, limit of detection (LOD) and limit of quantitation (LOQ)

化合物	回归方程	相关系数(r)	检出限(mg/kg)	定量限(mg/kg)
MeP	y=1.733x−0.156	0.999 9	0.05	0.15
EtP	y =1.983x−0.149	0.999 9	0.05	0.15
Iso-PrP	y=1.984x−0.291	0.999 9	0.05	0.15
PrP	y=1.834x−0.425	0.999 6	0.05	0.15
Iso-BuP	y=1.906x−0.543	0.999 6	0.05	0.15
BuP	y=1.614x−0.489	0.999 6	0.05	0.15
HeP	y=1.033x−0.074	0.999 7	0.06	0.20

表 3 回收率和精密度测定结果(n=6)

Table 3 Recovery and precision determination results (n=6)

化合物	加标水平(mg/kg)	测定值[mg/kg,($\bar{x} \pm s$)]	平均回收率(%)	相对标准偏差(%)
MeP	0.300	0.285 ± 0.017	95.2	5.7
	5.000	5.100 ± 0.100	102.0	2.0
	20.000	19.500 ± 0.100	97.5	0.6
EtP	0.300	0.295 ± 0.011	98.5	3.7
	5.000	5.310 ± 0.220	106.0	4.2
	20.000	20.100 ± 0.300	101.0	1.5
Iso-PrP	0.300	0.293 ± 0.009	96.6	3.1
	5.000	4.870 ± 0.170	97.4	3.5
	20.000	20.400 ± 0.500	102.0	2.4
PrP	0.300	0.301 ± 0.014	102.0	4.6
	5.000	5.380 ± 0.060	108.0	1.1
	20.000	19.100 ± 0.200	95.5	0.8
Iso-BuP	0.300	0.298 ± 0.019	93.2	6.3
	5.000	4.800 ± 0.140	96.0	2.9
	20.000	20.000 ± 0.500	100.0	2.7
BuP	0.300	0.288 ± 0.014	94.3	4.9
	5.000	5.040 ± 0.150	101.0	3.0
	20.000	19.30 ± 0.400	96.5	2.1
HeP	0.300	0.290 ± 0.021	92.7	7.2
	5.000	4.570 ± 0.240	91.4	5.3
	20.000	19.700 ± 0.700	98.5	3.8

3 结 论

本研究建立了 QuEChERS 前处理结合 GC-MS 同时测定牛油火锅底料中七种对羟基苯甲酸酯类防腐剂的方法。该方法操作简单、提取效率高、净化效果好、灵敏度、准确度和精密度高,能够满足牛油火锅底料中七种对羟基苯甲酸酯类防腐剂的检测要求。基于牛油火锅底料高盐、高脂的特点,本研究所建方法的适用范围或可扩展至其它类型预制食品(如各种复合调味料、预制菜、方便面等);对环境基质和化妆品等其它类型的样品,采用本研究所建方法时需要开展基质效应分析、方法验证以确保其适用性。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] 刘颖,孙永波,张丽英. 对羟基苯甲酸酯类防腐剂应用现状与展望[J]. 中国饲料,2021,(7):13-16.
Liu Y, Sun YB, Zhang LY. Application status and prospect of parabens[J]. China Feed, 2021, (7): 13-16.(In Chinese)

[2] 杨晓凤,侯雪,易盛国,等. 凝胶渗透色谱 – 气相色谱法测定豆瓣酱中 6 种防腐剂 [J]. 理化检验: 化学分册,2011,47(9):1021-1023.
Yang XF, Hou X, Yi SG, et al. GPC-GC determination of 6 preservatives in bean paste [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2011, 47 (9): 1021-1023.(In Chinese)

[3] Martín J, Santos JL, Aparicio I, et al. Exposure assessment to parabens, bisphenol A and perfluoroalkyl compounds in children, women and men by hair analysis [J]. Science of the Total Environment, 2019, 695: 133864.

[4] Wei F, Mortimer M, Cheng HF, et al. Parabens as chemicals of emerging concern in the environment and humans: A review [J]. Science of the Total Environment, 2021, 778: 146150.

[5] 韩林学,张续,邱天,等. 对羟基苯甲酸酯类防腐剂的环境和人体暴露研究进展[J]. 环境化学,2023,42(8):2563-2575.
Han LX, Zhang X, Qiu T, et al. Research progress in the study of environmental and human exposure to paraben preservatives [J].

Environmental Chemistry, 2023, 42(8): 2563-2575.(In Chinese)

[6] 户宜,丁国栋. 上海地区学龄前儿童对羟基苯甲酸酯类物质暴露与肺功能的相关性研究 [J]. 上海交通大学学报: 医学版, 2022,42(8):1103-1109.
Hu Y, Ding GD. Associations between paraben exposure and pulmonary function in preschool children in Shanghai [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Medical Science), 2022, 42 (8): 1103-1109.(In Chinese)

[7] 曹秀丽,王晶宇,李媛媛,等. 妊娠期多种环境化合物暴露与出生体重的关联[J]. 中华疾病控制杂志,2025,29(2):132-138.
Cao XL, Wang JY, Li YY, et al. Association between prenatal exposure to multiple environmental chemicals and birth weight [J]. Chinese Journal of Disease Control & Prevention, 2025, 29 (2): 132-138.(In Chinese)

[8] Downs CA, Amin MM, Tabatabaeian M, et al. Parabens preferentially accumulate in metastatic breast tumors compared to benign breast tumors and the association of breast cancer risk factors with paraben accumulation[J]. Environmental Advances, 2023, 11: 100325.

[9] 魏一婷,吴媛,丁琳,等. 高效液相色谱-串联质谱法测定调味品中 7 种对羟基苯甲酸酯类防腐剂及其水平调查[J]. 分析科学学报,2023,39(5):612-617.
Wei YT, Wu Y, Ding L, et al. Determination of seven p-Hydroxybenzoate in condiments using high performance liquid Chromatography-Tandem mass spectrometry[J]. Journal of Analytical Science, 2023, 39(5): 612-617.(In Chinese)

[10] Liu S, Wang PF, Wang C, et al. Disparate toxicity mechanisms of parabens with different alkyl chain length in freshwater biofilms: Ecological hazards associated with antibiotic resistome[J]. Science of the Total Environment, 2023, 881: 163168.

[11] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2760-2024 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准[S]. 北京:中国标准出版社,2024.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 2760-2024 National food safety standard-Standard for the use of food additives [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.(In Chinese)

[12] 中华人民共和国卫生部. 卫生部办公厅关于《食品添加剂使用标准》(GB 2760-2011)有关问题的复函[EB/OL]. [2025-11-29]. https://www.nhc.gov.cn/zwgkzt/pwsjd1/201111/53269.shtml.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Reply letter of general office of ministry of health on relevant questions regarding standard for the use of food additives (GB 2760-2011) [EB/OL]. [2025-11-29]. https://www.nhc.gov.cn/zwgkzt/pwsjd1/201111/53269.shtml.(In Chinese)

[13] 杨飞帆,赵舒景. 气相色谱法测定酱油中对羟基苯甲酸酯类的含量[J]. 现代食品,2022,28(10):219-223.
Yang FF, Zhao SJ. Determination of P-Hydroxybenzoate esters in Soy sauce by gas chromatography [J]. Modern Food, 2022, 28(10): 219-223.(In Chinese)

[14] 宁晓盼,姚倩,许忠祥,等. 固相萃取-高效液相色谱法测定水产调味品中 7 种对羟基苯甲酸酯类防腐剂[J]. 色谱,2023,41(6):513-519.
Ning XP, Yao Q, Xu ZX, et al. Determination of seven paraben preservatives in aquatic seasoning using solid-phase extraction coupled with high performance liquid chromatography [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2023, 41(6): 513-519.(In Chinese)

[15] Wang LX, Yan XH,Chen XZ,et al.Magnetic polyimide nanocomposite for analysis of parabens in cooking wine by magnetic solid-phase extraction coupled with gas chromatography - Mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography a, 2024, 1720: 464814.

[16] 乔海清,张凤艳,杨凯,等. 气相色谱-三重四极杆串联质谱法测定蒜薹中对羟基苯甲酸酯[J]. 化学分析计量,2025,34(6):38-44.
Qiao HQ, Zhang FY, Yang K, et al. Determination of p-hydroxybenzoate in garlic sprouts by gas chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2025, 34(6): 38-44.(In Chinese)

[17] 宁晓盼,马晶晶,刘宇,等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定热凝固蛋制品中 7 种对羟基苯甲酸酯类防腐剂[J]. 食品安全质量检测学报,2024,15(21):32-40.
Ning XP, Ma JJ, Liu Y, et al. Determination of 7 kinds of parabens preservatives in hot coagulated egg products by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(21): 32-40.(In Chinese)

[18] 薛钰凡,商婷,崔君涛,等. 固相支撑液液萃取-液相色谱-串联质谱测定尿液中 10 种双酚类化合物和 5 种对羟基苯甲酸酯[J]. 色谱,2024,42(9):827-836.
Xue YF, Shang T, Cui JT, et al. Determination of ten bisphenols and five parabens in urine by solid supported liquid-liquid extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2024, 42(9): 827-836.(In Chinese)

[19] 岑建斌,周朗君,方厚托,等. 超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱快速测定水果中 17 种对羟基苯甲酸酯[J]. 分析测试学报,2022,41(6):843-850.
Cen JB, Zhou LJ, Fang HT, et al. Rapid determination of Seventeen parabens in fruits by ultra performance liquid Chromatography-Quadrupole electrostatic field orbitrap high-resolution mass spectrometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2022, 41(6): 843-850.(In Chinese)

[20] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.31-2025 食品安全国家标准 食品中对羟基苯甲酸酯类化合物的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2025.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.31-2025 National food safety standard-Determination of parabens in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.(In Chinese)

[21] Zhang C, Lu W, Chen D, et al. Potential of beef tallow/palm oil blend as Chongqing hotpot oil from a physicochemical and flavor perspective[J]. Food Chem X, 2025, 27: 102371.

[22] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,中华人民共和国农业农村部, 国家市场监督管理总局. GB 23200.121-2021 食品安全国家标准 植物源性食品中 331 种农药及其代谢物残留量的测定 液相色谱-质谱联用法[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
National Health Commission of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 23200.121-2021 National food safety standard -Determination of 331 pesticides and metabolites residues in foods of plant origin-Liquid chromatography-tandem mass spectrometry method [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(In Chinese)

(下转第 172 页)

Public Health, 2025, 13: 1655711.

[21] Pan DX, Lin M, Lan RS, et al. Tuberculosis transmission in households and classrooms of adolescent cases compared to the community in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(12): 2803.

[22] 陈卉,张慧,成君.《中国学校结核病防控指南》解读[J]. 中国防痨杂志,2021,43(6):542-545.
Chen H, Zhang H, Cheng J. Interpretation of the Chinese guidelines for prevention and control of tuberculosis in schools [J]. Chinese Journal of Antituberculosis, 2021, 43(6): 542-545.(In Chinese)

[23] 梁达,商越,王兆芬,等. 青海省 2014-2019 年肺结核患者就诊延迟情况及影响因素[J]. 中华疾病控制杂志,2021,25(7):763-767.
Liang D, Shang Y, Wang ZF, et al. Analysis of treatment delay and influencing factors among pulmonary tuberculosis patients in Qinghai Province, 2014-2019 [J]. Chinese Journal of Disease Control & Prevention, 2021, 25(7): 763-767.(In Chinese)

[24] 王朝才,宋佳慧,刘燕,等. 青海省牧区居民结核病防治核心知识知晓率调查分析[J]. 中国防痨杂志,2022,44(12):1273-1278.
Wang CC, Song JH, Liu Y, et al. Investigation and analysis on awareness rate of core knowledge of tuberculosis prevention and control among residents in pastoral areas of Qinghai Province [J]. Chinese Journal of Antituberculosis, 2022, 44 (12): 1273-1278.(In Chinese)

[25] 久太,颜然然,冯喜英,等. 青海藏族肺结核患者与健康者循环 miRNA 表达差异性及海拔变化对患者 miRNA 表达水平的影响[J]. 中国高原医学与生物学杂志,2018,39(3):158-164.
Jiu T, Yan RR, Feng XY, et al. Differences in blood miRNAs expression between Tibetan tuberculosis patients and healthy People in Qinghai province and effects of altitude changes on miRNA expression of patients [J]. Chinese High Altitude Medicine and Biology, 2018, 39(3): 158-164.(In Chinese)

收稿日期:2025-08-13

(上接第 159 页)

[23] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,中华人民共和国农业农村部, 国家市场监督管理总局. GB 23200.113-2018 食品安全国家标准 植物源性食品中 208 种农药及其代谢物残留量的测定 气相色谱 - 质谱联用法[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
National Health Commission of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 23200.113-2018 National food safety standard-Determination of 208 pesticides and metabolites residues in foods of plant origin-Gas chromatography-tandem mass spectrometry method [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.(In Chinese)

[24] 陈锂,张恺,杨杭,等. QuEChERS- 气相色谱 - 串联三重四极杆质谱法测定食用油中 7 种抗氧化剂残留[J]. 食品安全质量检测学报,2025,16(7):55-62.
Chen L, Zhang K, Yang H, et al. Determination of 7 kinds of antioxidant residues in edible oil by QuEChERS-gas chromatography-tandem triple quadrupole mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 55-62.(In Chinese)

[25] 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 XY, 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.(In Chinese)

[26] 燕群,党翠红,张育. 气相色谱法测定食品中 4 种对羟基苯甲酸酯类含量[J]. 现代食品,2022,28(9):133-136, 144.
Yan Q, Dang CH, Zhang Y. Determination of 4 P-Hydroxybenzoic acid esters in food by gas chromatography[J]. Modern Food, 2022, 28 (9): 133-136, 144.(In Chinese)

[27] 李燕,鲍治成,杨冉冉,等. QuEChERS 净化 - 气相色谱 / 三重四极杆质谱法测定酱油中 6 种对羟基苯甲酸酯类[J]. 食品与发酵科技,2023,59(4):151-155.
Li Y, Bao ZC, Yang RR, et al. Determination of 6 parabens in Soy sauce by QuEChERS purification GC-MS/MS [J]. Sichuan Food and Fermentation, 2023, 59(4): 151-155.(In Chinese)

收稿日期:2025-08-23

读者·作者·编者

本刊对统计学符号的要求

按照 GB/T 3358.1 ~ 3-2009《统计学术语》的有关规定，统计学符号一律采用斜体排印。常用：（1）样本的算术平均数用英文小写 $\bar{x}$ 或 mean（中位数英文叙述中用 M 或 median）；（2）标准差用英文小写 s 或大写 SD（限英文文献中）；（3）标准误用英文小写 $s_{\bar{x}}$ 或大写 SE（限英文文献中）；（4）t 检验用英文小写 t；（5）F 检验用英文大写 F；（6）卡方检验用希文小写 χ^2；（7）相关系数用英文小写 r；（8）自由度用希文小写 ν 或 df（限英文文献中）；（9）概率用英文大写 P（P 值前应给出具体检验值，如 t 值、χ^2 值、q 值等）。