DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250714010
引用格式: 朱松松, 柳迪, 范小龙, 等. 定量核磁共振氢谱法测定饮料中山梨酸含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(7): 58–63.
ZHU SS, LIU D, FAN XL, *et al*. Determination of sorbic acid content in beverages by ^{1}H-quantitative nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 58–63. (in Chinese with English abstract).

定量核磁共振氢谱法测定饮料中山梨酸含量

朱松松[1,2,3], 柳　迪[1,2,3], 范小龙[1,2,3], 王会霞[1,2,3], 江　丰[1,2,3*],
夏金涛[1,2,3], 高　芳[1,2,3]

[1. 湖北省食品质量安全监督检验研究院, 武汉　430075; 2. 国家市场监督管理总局重点实验室(动物源性食品中重点化学危害物检测技术), 武汉　430075; 3. 湖北时珍实验室, 武汉　430065]

摘　要: 目的　建立定量核磁共振氢谱法检测饮料中山梨酸含量的方法。**方法**　采用核磁共振技术测定饮料中山梨酸的含量。样品中山梨酸的含量与 ^{1}H 的核磁共振信号峰成正比; 氘代溶剂为重水, 内标物"3-(三甲基硅基)氘代丙酸钠"[3-(trimethylsilyl)propanoic-2,2,3,3-d_4 acid sodium salt, TMSP-d_4]的甲基峰在重水中的化学位移定标为 0.00 ppm, 确定 δ=1.84 (±0.05) ppm 的多重耦合峰为山梨酸特征化学位移峰, 外标法定量; 氢谱脉冲序列为 zgpr 以压制水峰信号, 样品扫描次数为 16 次。**结果**　方法学验证结果表明该方法在 7.5~300.0 μg/mL 质量浓度范围内线性关系良好: Y=0.01019X+0.36268, r^2>0.99; 检出限和定量限分别为 2.5 μg/mL、7.5 μg/mL; 加标回收率为 81.8%~102.6%; 相对标准偏差为 0.69%~5.27%。**结论**　该方法前处理简单、结果准确, 大幅缩短了样品检测时间, 可用于饮料中山梨酸含量的快速、高通量检验, 具有良好的潜在应用前景。

关键词: 饮料; 山梨酸; 定量核磁共振氢谱法; 重水; 3-(三甲基硅基)氘代丙酸钠; 化学位移

Determination of sorbic acid content in beverages by ^{1}H-quantitative nuclear magnetic resonance

ZHU Song-Song[1,2,3], LIU Di[1,2,3], FAN Xiao-Long[1,2,3], WANG Hui-Xia[1,2,3], JIANG Feng[1,2,3*], XIA Jin-Tao[1,2,3], GAO Fang[1,2,3]

(1. *Hubei Provincial Institute for Food Supervision and Test*, *Wuhan* 430075, *China*; 2. *Key Laboratory of Detection Technology of Focus Chemical Hazards in Animal-derived Food*, *State Administration for Market Regulation*, *Wuhan* 430075, *China*; 3. *Hubei Shizhen Laboratory*, *Wuhan* 430065, *China*)

ABSTRACT: Objective　To establish a method for determination the content of sorbic acid in beverages by ^{1}H-quantitative nuclear magnetic resonance (^{1}H-qNMR). **Methods**　Nuclear magnetic resonance was used to measure the sorbic acid (SA) content in beverages. The content of SA in the sample was proportional to the signal peak of ^{1}H nuclear magnetic resonance; deuterated water (D_2O) was used as the deuterated solvent, and the methyl peak of the internal standard substance "3-(trimethylsilyl)propanoic-2,2,3,3-d_4 acid sodium salt" (TMSP-d_4) in

收稿日期: 2025-07-14
基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2023BAB193); 湖北省自然科学基金联合基金项目(2025AFD726)
第一作者: 朱松松(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为核磁共振技术与食品安全。E-mail: zhusongs@outlook.com
***通信作者:** 江丰(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品检测技术与食品安全。E-mail: 1327192177@qq.com

deuterated water was calibrated to a chemical shift of 0.00 ppm. The multiple coupling peak at δ=1.84 (±0.05) ppm was identified as the characteristic chemical shift peak of sorbic acid, and quantification was performed using the external standard method. The 'zgpr' pulse sequence was employed for ^{1}H-NMR to suppress the residual water peak signal, with 16 scans acquired for each sample. **Results** Method validation indicated a good linear relationship within the concentration range of 7.5–300.0 μg/mL: Y=0.01019X+0.36268, r^2>0.99. The limits of detection and limits of quantitation were 2.5 μg/mL and 7.5 μg/mL, respectively. The recovery rates ranged from 81.8% to 102.6%, with relative standard deviations of 0.69%–5.27%. **Conclusion** This method features simple sample pretreatment, accurate results, and significantly reduces detection time. It is suitable for rapid, high-throughput analysis of sorbic acid in beverages and shows promising potential for practical applications.

KEY WORDS: beverages; sorbic acid; ^{1}H-quantitative nuclear magnetic resonance; deuterated water; 3-(trimethylsilyl)propanoic-2,2,3,3-d_4 acid sodium salt; chemical shift

0　引　言

山梨酸(sorbic acid, SA), 又称为清凉茶酸、2-丙烯基丙烯酸、(*E*,*E*)-2,4-己二烯酸, 是全球最常见的食品防腐剂之一, 通常为白色或类白色固体颗粒。作为一种高效安全的防腐保鲜剂, SA 常被用作食品和药物制剂的防腐剂, 对酵母、霉菌等许多真菌都具有良好的抑制作用。由于生活水平的不断提高, 人们对饮料的风味口感和健康营养等要求也逐渐提高。为了能显著延长各种产品的保质期、货架期以扩大销售利润, 许多厂家都会在原料中添加诸如 SA/山梨酸钾等防腐剂。GB 2760—2024《食品安全国家标准食品添加剂使用标准》中规定, 饮料类(包装饮用水、果蔬汁(浆)除外)、浓缩果蔬汁(浆)(仅限食品工业用)、乳酸菌饮料中的最大使用限量分别为 0.5、2.0、1.0 g/kg, 标准规定剂量下的 SA 并不具有肝毒性。

AJAY 等[1]报道了一种通过溶剂浇注掺入山梨酸钾的聚羟基丁酸酯薄膜的开发研究, 结果表明, 掺入山梨酸钾可以显著增强对革兰氏阴性大肠杆菌和革兰氏阳性金黄色葡萄球菌的抗菌功效。ZHANG 等[2]利用果蝇作为模型生物评估研究山梨酸钾的潜在毒性, 研究结果表明, 山梨酸钾的摄入会缩短果蝇的寿命和繁殖力。过量摄入山梨酸钾会导致果蝇中肠细胞凋亡和活性氧积累, 并增强了中肠细胞的线粒体自噬。MELIN[3]在不添加其他防腐剂的情况下, 使用山梨酸钾或焦亚硫酸钠制备具有不同 pH 的肉制品进行标准化处理, 研究发现, 山梨酸盐能有效抑制所有测试微生物(青霉、发酵毕赤酵母和单核细胞增生李斯特菌)生长。上述研究结果表明, SA 在防腐抗菌等方面已有广泛深入的研究, 但值得注意的是, 过量的 SA 摄入仍有可能对人体带来潜在危害。CHEN 等[4]报道了 SA 通过扰乱肝脏的脂肪酸从头合成、脂肪酸内化、极低密度脂蛋白分泌、自噬及 β-氧化过程, 导致脂质清除障碍并最终引发肝脏脂质蓄积的机制研究, 揭示了 SA 对肝脏脂质代谢的影响。

近年来, 越来越多的新技术被运用到 SA 的测定中。LI 等[5]利用气泡驱动固相微萃取(bubble-driven solid-phase microextraction, BD-SPME)作为现场预处理方法, 利用高效液相色谱法可以快速测定蚝油中山梨酸钾。JANG 等[6]使用气相色谱法和高效液相色谱法研究了不同温度下储存 2 周的生食中 SA 的含量, 检查储存过程中酸浓度的变化, 并建立质谱法鉴定储存过程中海鲜、肉类和水果中防腐剂含量。目前, SA 的检测方法主要有气相色谱法[7–11]、毛细管电色谱法[12–14]、高效液相色谱法[15–20]和拉曼光谱法[21–22]等。上述方法在实际检测中均存在一定缺点和不足: 高效液相色谱法或气相色谱法检测时间较长, 通常在 20 min 以上; 毛细管电色谱法方法开发复杂, 制备过程对实验技术要求较高, 步骤烦琐耗时; 拉曼光谱法由于信号强度较弱, 抗干扰性不足, 更适合用于定性分析或结构表征。由于核磁共振技术具有无损检测、前处理简单、数据准确等优点, 近些年在化工化药、生物医学[23–24]、食品健康和材料新能源等领域应用较多[25–30], 但鲜少有关于 SA 的检测。本研究建立定量核磁共振氢谱(^{1}H-quantitative nuclear magnetic resonance, ^{1}H-qNMR)法快速测定饮料中的 SA 含量, 为满足针对饮料中 SA 专项任务的大批量快速检测检验或筛查分析提供方法参考。

1　材料与方法

1.1　试剂、仪器与材料

SA (CAS: 110-44-1, 纯度≥99%, 梯希爱化成工业发展有限公司); 重水(D_2O, CAS: 7789-20-0, 氘代率≥99.9%, 德国 Sigma-Aldrich 公司); 3-(三甲基硅基)氘代丙酸钠(CAS: 24493-21-8, 纯度≥98%, 美国剑桥同位素实验室)。

AVANCE III HD 600 MHz 高分辨超导核磁共振波谱仪(德国 Bruker 公司)。

实验用样品来自本实验室监督抽检样品。

1.2 实验方法

1.2.1 样品前处理

精密移取待测试样 500 μL 置于 ϕ=5 mm 核磁管中，准确加入 50 μL D_2O，盖塞密封混匀，上机测定。

1.2.2 标准溶液配制

吸取 SA 系列标准溶液 1500 μg/mL，用水逐级稀释，得到质量浓度为 7.5、15.0、30.0、75.0、150.0、300.0 μg/mL 的标准系列溶液，分别移取 500 μL，准确加入 50 μL D_2O，混匀待测。

1.2.3 仪器条件

锁场温度: 298 K; ^{1}H-qNMR 共振频率: 600 MHz; 脉冲序列: zgpr; 扫描次数: 16 次; 谱宽(spectral width, SW): 20 ppm; 频谱中心: 4.7 ppm; 时域点数: 65536; 延迟时间: 2.0 s。

1.3 数据处理

数据采用 Topspin 3.6.3、MestreNova 12.0 软件进行处理。原始谱图经相位校正、“Whittaker”基线平滑、积分等处理，对样品中所含目标化合物进行定性定量分析。

2 结果与分析

2.1 氘代试剂的选择

氘代试剂由于独特的加工生产工艺，通常较普通试剂昂贵，并且价格随氘代原子数增加而上升。例如，氘代二甲基亚砜(dimethyl sulfoxide, DMSO)的价格要高于氘代氯仿(chloroform-d, $CDCl_3$)或氘代甲醇(methanol-d_4, MeOD-d_4)。常用的氘代试剂有 D_2O、$CDCl_3$、MeOD-d_4、DMSO-d_6 和 C_6D_6 等。由于饮料中液体水溶性效果较好，研究对比了 MeOD-d_4 和 D_2O 两种氘代试剂的实验效果(图 1)。当使用 MeOD-d_4 作为锁场试剂时，被测样品体系中含有大量水，可能会造成锁场漂移进而导致匀场调谐欠佳、影响样品的峰型，进而给待测样品的定量结果带来偏差；而 D_2O 作为氘代试剂能与体系中的水互溶，峰型较好，可用作本研究的锁场氘代试剂。

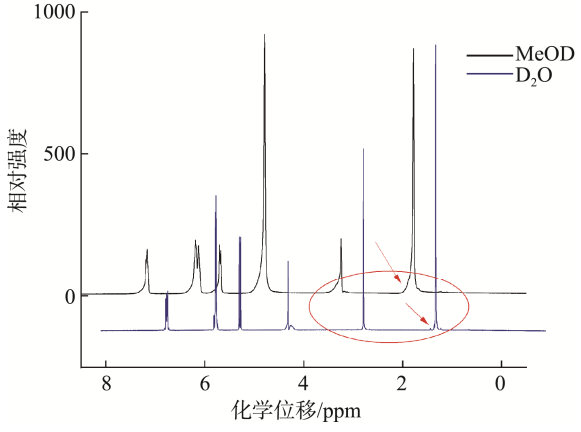


图 1 D_2O 和 MeOD 的 ^{1}H-qNMR 比较

Fig.1 Comparison of ^{1}H-qNMR between D_2O and MeOD

2.2 定量峰的选择

由 SA 标准样品的核磁共振氢谱(图 2)可知，在上述实验条件下，SA 的核磁共振信号峰主要分布在 1.5~7.5 ppm 之间。^{1}H-qNMR (600 MHz, D_2O) δ: 7.98~7.05 (m, 1H), 6.60~6.22 (m, 2H), 5.83 (m, 1H), 1.84 (m, 3H)。

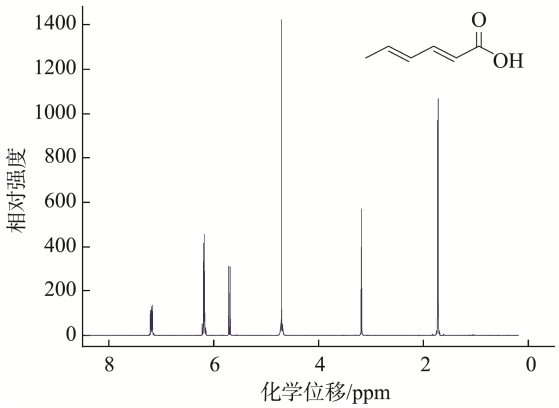


图 2 SA 标准样品的 ^{1}H-qNMR (D_2O)

Fig.2 ^{1}H-qNMR of SA reference standard (D_2O)

由于羧基氢(-COOH)化学性质较为活泼，当氘代试剂为 D_2O 时很容易发生重氢交换失去信号，因此在实验中并未观测到羧基氢信号(通常在 11~13 ppm 之间)；碳碳双键上的氢原子则由于自身周围的电子屏蔽效应导致其在 D_2O 中的化学位移向低场移动(Ha/b/c, 5.5~7.5 ppm)，这就会与饮料中添加的糖类、色素等其他组分中的不饱和碳氢化学信号掺杂在一起，无法分辨；通常情况下，连接饱和碳的链端甲基化学位移在 0.7~0.9 ppm，当甲基和一些电负性较大或不饱和基团直接键连时，甲基氢外围电子云密度降低，去屏蔽效应增大，化学位移向低场移动，一些常见甲基的化学位移见表 1。正是由于与共轭双键直接键连的原因，使得 SA 末端甲基化学位移左移至 1.84 ppm 左右，与一般链端甲基的化学位移(通常小于 1.3 ppm)区分明显。另外，由于甲基氢(-CH_3)化学环境相对简单，且信号强度约是碳碳双键上的单一氢(-C=CH)的 3 倍，适合作为本研究的定量基团，其他位置的氢信号可以用作辅助定性以判别待测样品中是否含有目标化合物。采用分析一定数量的试剂空白、样品空白样品，观察目标分析物积分区域，结果显示在相应范围内不存在干扰。

2.3 脉冲序列

脉冲序列是由射频脉冲、磁场梯度和弛豫延迟等按特定时序组合而成的实验序列。主要作用是通过射频脉冲干扰原子核的自旋，再通过检测原子核从射频态回到平衡状态过程中的自由感应衰减信号，经傅里叶变换得到核磁共振谱图。不同的实验目的通常对应不同的脉冲序列，在常

表 1　常见甲基化学位移
Table 1　Chemical shifts of common methyl

分类	CH_3-X						
	X=-Li	X=-Si(CH_3)$_3$	X=-H	X=-Et	X=-OH	X=-F	X=(-C=CH_2)
δ/ppm	–1.94	0.0	0.23	0.91	3.39	4.27	1.72

规定量核磁检测中, 通常使用 zg 或者 zg30 的脉冲序列即可得到较为理想的核磁谱图。实验对比了 zg30、zgpr 和 watersup 3 种采样脉冲序列, 结果表明: 采用 watersup 压制水峰脉冲时, 待测化合物信号被过度干扰, 导致谱图失真; 当采用 zg30 脉冲序列采样时, 未压制水峰, 致使水峰信号畸高, 待测物信号和分辨率明显低于采用 zgpr 脉冲序列采样结果(图 3)。

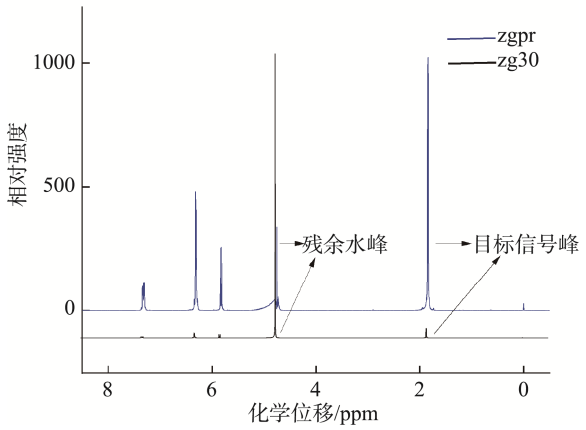


图 3　两种不同脉冲序列的 ^{1}H-qNMR
Fig.3　^{1}H-qNMR of 2 kinds of different pulse sequences

2.4　检出限与定量限

在上述方法条件下, 当 SA 的质量浓度为 2.5 μg/mL 时, 定量峰化学位移 δ=1.73 ppm 处信噪比约为 11.7; 当 SA 的质量浓度为 7.5 μg/mL 时, SA 定量峰信噪比约为 37.9(图 4), 满足关于定量限信噪比大于等于 10 的要求。

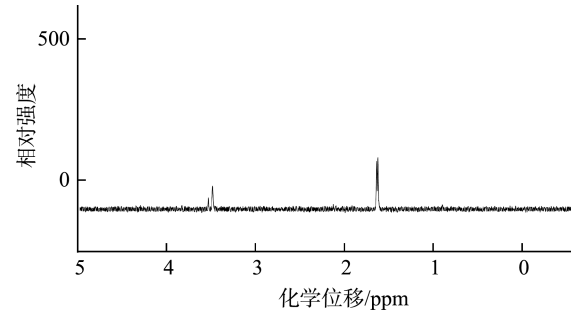


图 4　SA 定量限 ^{1}H-qNMR
Fig.4　^{1}H-qNMR for the limit of quantitation of SA

2.5　标准曲线、线性范围

配制 SA 系列混合标准溶液, 外标法定量。以 SA 的 ^{1}H-qNMR 定量峰的相对面积为纵坐标(Y), 对应质量浓度为横坐标(X, μg/mL), 绘制标准曲线, 得到 SA 的线性回归方程为 Y=0.01019X+0.36268, 相关系数 r^2>0.99, 在 7.5~300.0 μg/mL 质量浓度范围内线性关系良好, 满足实验要求。

2.6　回收率和精密度

在上述实验条件下, 取液体饮料作为加标空白基质, 于 1 倍、2 倍、10 倍 3 个水平进行加标回收试验, 测定加标回收率和精密度(n=6), 结果见表 2。加标回收率范围 81.8%~102.6%; 相对标准偏差 0.69%~5.27%; 日间精密度 0.17%~1.30%。方法准确性、重复性良好, 可满足饮料中 SA 的检测要求。

表 2　SA 的加标回收率(n=6)
Table 2　Recovery rates of spiked SA (n=6)

序号	添加水平/(μg/mL)		
	7.5	15.0	75.0
平均值	81.8	95.5	102.6
相对标准偏差/%	5.27	1.48	0.69

2.7　实际样品分析

使用上述方法对监督抽检的 6 批次液体饮料进行分析, 单样品测定时间 4.5 min, 测定结果见表 3。

由表 3 可知, 6 批次检测样品中的 3 批次未检出 SA, 其中 2 批次饮料为某同一品牌的不同类型维生素饮料; 2 号样品检出较高水平的 SA 添加量, 其配料表内容依次为: 纯净水、黄精、杜仲雄花(人工种植)、鹿鞭、蜂蜜、黑豆、黑松露(块菌)……山梨酸钾; 3 号样品某猕猴桃汁配料表中山梨酸钾排在第 18 位, 但仍表现出较高的添加水平; 5 号样品虽未明确标注 SA 的添加信息, 但是在实际样品中有检出(图 5)。实验结果表明, SA 作为一种常用添加剂在饮料中的使用范围较为广泛, 可能存在滥用风险。上述结果均经高效液相色谱法复核验证, 实验条件如下: 流动相为甲醇:乙酸铵水溶液=11:89 (V:V), 流速 1.0 mL/min, 单次测定时间 20 min(参照 GB 5009.28—2016《食品安全国家标准 食品中苯甲酸、山梨酸和糖精钠的测定》)。

表 3 真实样品的测定结果

Table 3 Determination results of real samples

序号	高效液相色谱法测定结果/(μg/mL)	^{1}H-qNMR 测定结果/(μg/mL)	相对标准偏差/%	样品类型
1	ND	ND	/	维生素饮料
2	86	85.9	–0.12	黑松露植物饮品
3	59	57.3	–2.92	猕猴桃果汁饮料
4	ND	ND	/	维生素饮料
5	36	34.2	–5.13	水蜜桃果汁饮料
6	ND	ND	/	蛋白乳饮料

注: ND 为未检出; /为无需计算。

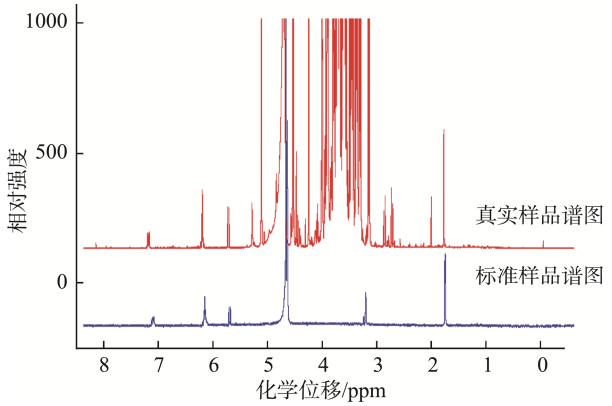


图 5 真实样品与标准溶液谱图对比

Fig.5 Comparison of real sample and standard solution

3 结 论

本研究建立了一种简便、快捷、准确的液体饮料中 SA 含量的 ^{1}H-qNMR。本方法将单样品 SA 的测定时间由 20 min 大幅缩短至 4~5 min, 样品无需提前制备或预处理, 取样加入 D_2O 后可直接上机测试, 最大限度地减少中间处理环节误差源, 保证了测试结果的准确性, 极大地降低了实验室的经济成本和人力成本, 适合高通量样品检测和专项筛查检验工作任务需求。但是由于核磁共振方法要求待测样品澄清透明, 对一些含有悬浊固体的液体饮料如奶茶、咖啡、生乳饮等的测定还需展开进一步研究。

参考文献

[1] AJAY KP, RAHUL VR, ARUL M, *et al*. A comprehensive study on the antimicrobial activity of polyhydroxybutyrate (PHB) film incorporated with gallic acid and potassium sorbate [J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2025, 226: 2400243.

[2] ZHANG XB, ZHANG Q, SONG XX, *et al*. Toxicity evaluation of potassium sorbate *in vivo* with drosophila melanogaster [J]. Insects, 2024, 15(9): 703.

[3] MELIN P. Sorbic acid is an efficient preservative in pea-based meat analogues [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 208: 116749.

[4] CHEN CC, HO SN, HU PA, *et al*. Food preservative sorbic acid deregulates hepatic fatty acid metabolism [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2020, 28: 206–216.

[5] LI JY, MA YJ, XIAO F, *et al*. Bubble-driven solid-phase microextraction for the rapid determination of potassium sorbate in oyster sauce by HPLC-DAD [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(4): 2689–2696.

[6] JANG WJ, CHOI J, YU H, *et al*. Determination of naturally derived propionic, benzoic, and sorbic acids in seafood, meats, and fruits during storage [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 137: 106897.

[7] 高小云, 李林. 气相色谱法测定食品中苯甲酸、山梨酸和脱氢乙酸含量[J]. 食品安全导刊, 2024, 25: 72–74, 78.
GAO XY, LI L. Determination of benzoic acid, sorbic acid and dehydroacetic acid contents in food by gas chromatography [J]. Journal of Food Safety Guide, 2024, 25: 72–74, 78.

[8] 何靖, 何焜鹏, 陆慧珍. 气相色谱法快速测定酱油中的 6 种防腐剂[J]. 食品安全导刊, 2021, 19: 81–83.
HE J, HE KP, LU HZ. Rapid determination of six preservatives in soy sauce by gas chromatography [J]. Journal of Food Safety Guide, 2021, 19: 81–83.

[9] 杨忠芳, 陈玲, 林青雯, 等. 食品中苯甲酸和山梨酸检测方法研究进展[J]. 食品工业, 2024, 45(3): 190–194.
YANG ZF, CHEN L, LIN QW, *et al*. Research progress on detection methods of benzoic acid and sorbic acid in food [J]. The Food Industry, 2024, 45(3): 190–194.

[10] 余晓丽. 糕点中山梨酸和苯甲酸含量测定中气相色谱法的应用分析[J]. 现代食品, 2018, 5: 135–137, 144.
YU XL. Analysis of the application of gas chromatography in the determination of sorbic acid and benzoic acid contents in pastries [J]. Modern Food, 2018, 5: 135–137, 144.

[11] 高海军, 范自营, 张红云, 等. 气相色谱法同时快速测定食品中丙酸、山梨酸、苯甲酸及脱氢乙酸[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(5): 47–51.
GAO HJ, FAN ZY, ZHANG HY, *et al*. Simultaneous and rapid determination of propionic acid, sorbic acid, benzoic acid and dehydroacetic acid in food by gas chromatography [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(5): 47–51.

[12] 张娜, 任春香, 吴英良, 等. 毛细管气相色谱法同时测定果汁中山梨酸、苯甲酸、脱氢乙酸[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(9): 2744–2747.
ZHANG N, REN CX, WU YL, *et al*. Simultaneous determination of sorbic acid, benzoic acid and dehydroacetic acid in fruit juice by capillary

gas chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(9): 2744–2747.

[13] 杨滢, 刘莎莎, 高明霞, 等. 加压毛细管电色谱测定饮料中的三种食品添加剂[J]. 分析试验室, 2025, 44(12): 1750–1753.
YANG Y, LIU SS, GAO MX, *et al*. Determination of three food additives in beverages by pressurized capillary electrochromatography [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2025, 44(12): 1750–1753.

[14] 梅赞, 段玮, 于潜, 等. 麦味地黄口服液防腐剂及溶剂残留量研究[J]. 药品评价, 2024, 21(8): 930–935.
MEI Z, DUAN W, YU Q, *et al*. Study on preservatives and solvent residues in maiwei dihuang oral liquid [J]. Drug Evaluation, 2024, 21(8): 930–935.

[15] 冯竟, 杨飞, 龚羽婷, 等. 直接浸入式固相微萃取-气相色谱法同时测定调味品中的山梨酸、苯甲酸和脱氢乙酸含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(15): 249–254.
FENG J, YANG F, GONG YT, *et al*. Simultaneous determination of sorbic acid, benzoic acid and dehydroacetic acid content in condiments by direct immersion solid phase microextraction with gas chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(15): 249–254.

[16] 邓燕琴, 陈茂姣, 何娓娓, 等. 流动相 pH 值对检测乳制品中山梨酸、苯甲酸影响的探究[J]. 中国乳业, 2025(2): 100–104.
DENG YQ, CHEN MJ, HE WW, *et al*. Exploration on the influence of mobile phase pH value on the detection of sorbic acid and benzoic acid in dairy products [J]. China Dairy, 2025(2): 100–104.

[17] 吕春秀, 刘敏, 林伟. 高效液相色谱法同时测定食品中 5 种添加剂的方法探究[J]. 食品安全导刊, 2025(4): 73–75.
LV CX, LIU M, LIN W. Exploration on the method for simultaneous determination of 5 additives in food by high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(4): 73–75.

[18] 周远华, 伍良涌, 张立雯, 等. 高效液相色谱法测定儿童口服液体制剂中抑菌剂苯甲酸钠和山梨酸钾的含量[J]. 中国药物警戒, 2023, 20(4): 365–369.
ZHOU YH, WU LY, ZHANG LW, *et al*. Determination of bactericidal sodium benzoate and potassium sorbate in pediatric oral liquid preparations by HPLC [J]. Chinese Journal of Pharmacovigilance, 2023, 20(4): 365–369.

[19] 王承业, 谭高好, 吴基任, 等. 超高效液相色谱-变波长法快速检测糕点中 6 种食品添加剂[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(18): 5924–5932.
WANG CY, TAN GH, WU JR, *et al*. Rapid determination of 6 kinds of food additives in pastry by ultra performance liquid chromatography with variable wavelength [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(18): 5924–5932.

[20] 陈艳. 高效液相色谱法快速检测食品中 12 种添加剂[J]. 食品安全导刊, 2024(9): 59–62.
CHEN Y. Rapid detection of 12 additives in food by HPLC [J]. China Food Safety Magazine, 2024(9): 59–62.

[21] 董一童, 许润琦, 黄越, 等. 便携拉曼光谱快速无损定量检测酱料中山梨酸钾[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 68–75.
DONG YT, XU RQ, HUANG Y, *et al*. Rapid nondestructive detection of potassium sorbate in sauces by portable Raman spectroscopy [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(4): 68–75.

[22] 房晓倩, 彭彦昆, 王文秀, 等. 基于表面增强拉曼的鸡尾酒中苯甲酸钠和山梨酸钾的同时快速检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9): 2794–2799.
FANG XQ, PENG YK, WANG WX, *et al*. Rapid and simultaneous detection of sodium benzoate and potassium sorbate in cocktail based on surface enhanced Raman spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(9): 2794–2799.

[23] MAHIDIEH A, YEGANEH Y, MOTASADIZADEH H, *et al*. Rapid and simultaneous detection of sodium benzoate and potassium sorbate in cocktail based on surface enhanced Raman spectroscopy [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2023, 645: 123356.

[24] JACKOWSKI K, WILCZEK M. Measurements of nuclear magnetic shielding in molecules [J]. Molecules. 2024, 29(11): 2617.

[25] 张佳琳, 范春林, 张紫娟. 核磁共振波谱法同时定量测定保健品中烟酰胺腺嘌呤二核苷酸及其前体化合物[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 246–254.
ZHANG JL, FAN CL, ZHANG ZJ. Simultaneously quantitative determination of nicotinamide adenine dinucleotide and its precursors in food supplements using nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(24): 246–254.

[26] 周密, 王小花, 朱芊, 等. 氢核磁共振结合支持向量机鉴别蜂蜜植物源[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(1): 16–21.
ZHOU M, WANG XH, ZHU Q, *et al*. Identification of the botanic source of honey by ^{1}H nuclear magnetic resonance and support vector machine [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(1): 16–21.

[27] 朱松松, 夏金涛, 朱芊, 等. 定量核磁共振技术检测食品中硼的含量[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(4): 687–692.
ZHU SS, XIA JT, ZHU Q, *et al*. Determination of the content of boron in food by quantitative nuclear magnetic resonance technology [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(4): 687–692.

[28] 夏金涛, 黄秀秀, 朱松松, 等. 基于 1H-qNMR 的水溶性镧系位移试剂识别法测定功能性食品中谷氨酰胺对映体[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(11): 1579–1586.
XIA JT, HUANG XX, ZHU SS, *et al*. Determination of glutamine enantiomers in functional foods by a water-soluble lanthanide shift reagent-identified method based on the ^{1}H-qNMR technique [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(11): 1579–1586.

[29] 周晓力, 李增鑫, 刘万卉, 等. 核磁共振技术的定量方法综述[J]. 药物分析杂志, 2024, 44(10): 1655–1664.
ZHOU XL, LI ZX, LIU WH, *et al*. A review of nuclear magnetic resonance quantitative technique [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2023, 35(11): 1579–1586.

[30] 陈雷, 刘红兵, 罗立廷. 氢核磁共振结合正交偏最小二乘法对油菜蜜中果葡糖浆掺假的判别分析[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 275–282.
CHEN L, LIU HB, LUO LT. Detection of honey adulteration with high fructose syrups using ^{1}H nucler magnetic resonance and orthogonal partial least squares [J]. Food Science, 2017, 38(4): 275–282.

(责任编辑: 韩晓红　安香玉)