

应用亲水作用液相色谱法测定食品中过氧化氢

孙佳¹, 毛燕², 李刚^{1,2*}, 张丽¹

(1. 吉林农业大学食品与科学工程学院, 长春 130118; 2. 吉林省产品质量监督检验院, 长春 130022)

摘要: **目的** 建立食品中过氧化氢含量的高压液相色谱检测方法。**方法** 用水提取样品中过氧化氢, 用乙腈做萃取液和流动相, 在 1 mL/min 流速下, 用 Venusil HILIC 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm, 100 Å) 不经衍生化, 直接通过紫外检测器检测食品中的过氧化氢。**结果** 过氧化氢的检出限为 0.6 μg/mL, 定量限为 2 μg/mL。对实际样品进行检测时, 平均回收率 $R \geq 30\%$, $RSD \leq 7\%$ 。**结论** 该方法准确、灵敏、精密度高, 可用于食品中过氧化氢的测定。

关键词: 过氧化氢; 食品; 液相色谱法; HILIC 色谱柱

Application of hydrophilic interaction liquid chromatography to determine hydrogen peroxide in food

SUN Jia¹, MAO Yan², LI Gang^{1,2*}, ZHANG Li¹

(1. College of Food Science and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

2. Jilin Province Product Quality Supervision Test Institute, Changchun 130022, China)

ABSTRACT: Objective To establish a high pressure liquid chromatography (HPLC) method for determination of the hydrogen peroxide content in food. **Methods** The food sample was directly extracted with water, and the residual hydrogen peroxide (H_2O_2) was determined without derivatization via hydrophilic interaction chromatography (HILIC) subsequently. The separation was carried out through a Venusil HILIC column (250 mm×4.6 mm, 5 μm, 100 Å) with acetonitrile as mobile phase at a flow rate of 1 mL/min. **Results** The detection limit and quantitation limit of H_2O_2 were 0.6 μg/mL and 2 μg/mL, respectively. The average recovery of food sample was higher than 30% with relative standard deviation (RSD) of lower than 7%. **Conclusion** This method has a high sensitivity, a good precision and accuracy, which can be applied to determine the H_2O_2 in food.

KEY WORDS: hydrogen peroxide; food; high pressure liquid chromatography; HILIC column

1 引言

过氧化氢(hydrogen peroxide)是一种强氧化剂, 具有高效杀菌、氧化漂白的作用和易分解、低残留的特点^[1]。我国食品添加剂使用卫生标准 GB2760-2011

中允许食品级双氧水在食品生产中作为加工助剂使用^[2]。但是过氧化氢残留可直接刺激人体粘膜组织, 并通过化学反应致人癌变, 使用过程中产生的大量活泼羟基自由基也会加速人体的衰老或诱发心血管疾病等^[3], 因此过氧化氢在制成成品前应该清除, 如果清

基金项目: 吉林省质量技术监督科技项目(2012-ZJK10)

Fund: Supported by the Jilin Province Quality and Technical Supervision Science Projects (2012-ZJK10)

*通讯作者: 李刚, 教授, 主要研究方向为食品分析检测。E-mail: lg56ky@163.com

*Corresponding author: LI Gang, Professor, Jilin Province Product Quality Supervision Test Institute, No.1088, Nanhu Road, Changchun 130022, China. E-mail: lg56ky@163.com

除不完全, 则应严格控制在规定的范围内。近年来过量使用过氧化氢和使用工业级过氧化氢引起的食品中毒事件在我国时有发生, 如何准确快速地定量检测过氧化氢是我国食品安全迫切需要解决的关键技术难题。

目前, 研究过氧化氢测定方法的报道有很多, 主要有下述几类: 常规滴定法^[4]、生物传感分析法^[5-6]、分光光度法^[7-9]、化学发光法^[10-11]、荧光光度法^[12-13]、色谱法^[14-20]、电化学分析法等^[10, 21]。国家标准 GB/T 23499-2009 规定了食品中过氧化氢的测定方法^[22], 但是滴定法测定过氧化氢却存在灵敏度低, 抗干扰能力弱的缺点, 不适合复杂样品的测定和确证。近年来有研究者报道直接采用高压液相色谱法 (high pressure liquid chromatography, HPLC) 检测过氧化氢, 但是直接 HPLC 法由于过氧化氢在反相色谱柱上保留弱, 紫外响应值低而难于直接用于食品样品中过氧化氢的检测^[20], 通常需要特殊试剂柱前衍生后再分离, 或者使用间接的方法测量, 这将影响方法的准确性, 也不利于推广使用。

本研究中, 我们使用 Venusil HILIC 丙基酰胺亲水作用色谱柱, 以乙腈为流动相, 用亲水液相色谱法直接分离、并检测了食品中残留的过氧化氢, 此方法特异性好, 检测灵敏度高、稳定性强, 特别适合于复杂基质样品中过氧化氢的直接检测, 是一种非常有希望用于食品中过氧化氢残留量检测的方法。

2 材料与方法

2.1 仪器与材料

Agilent1100 液相色谱仪(配置自动进样器、色谱工作站、二元泵、VWD 可见波长紫外检测器和 DAD 二极管阵列检测器、柱温箱); AE240 电子分析天平(梅特勒-托利多); 一次性无菌注射器(陕西海达医疗器械科技有限公司); HPD-25 无油真空泵(天津恒奥科技有限公司); 微量台式离心机(美国贝克曼公司); KQ-250DE 医用数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); 超纯水(自制)。

乙腈(美国 Tedia 公司, 色谱纯); 乙腈(北京化工厂, 分析纯); 30%过氧化氢(北京化工厂, 优级纯); 氯化钠(北京化工厂)。

2.2 方法

2.2.1 标准溶液的配制

标准溶液的配制: 用电子分析天平准确称取过氧化氢 0.66 g 准确称取应准至 0.0001 g 于 200 mL 棕

色容量瓶中, 用乙腈定容至刻度, 配制成 1 mg/mL 过氧化氢标准溶液。使用时需用高锰酸钾法标定浓度, 按标定出的准确浓度值计算此标准溶液浓度。取此标准溶液, 加适量乙腈分别稀释成含过氧化氢 10, 30, 50, 100, 200 $\mu\text{g/mL}$ 的系列标准溶液, 备用。

2.2.2 样品的处理

水产品、新鲜畜禽肉、动物内脏等固体样品: 称取有代表性样品约 100 g, 用绞肉机绞碎后, 称取 10 g(精确至 0.01 g)试样于 250 mL 烧杯中, 加入 50 mL 水, 用高速匀浆机匀浆 3 min, 振荡混匀后, 超声提取 10 min, 混匀, 静置, 取上清液用 4000 r/min 的转速离心 5 min。精密量取 10.00 mL 离心后的上清液过 C_{18} 固相萃取小柱(过柱前, C_{18} 小柱需先用 4 mL 乙腈活化后用 20 mL 水冲洗干净), 将过滤液置于分液漏斗中, 加入氯化钠至饱和后, 再加入 20 mL 乙腈萃取剂选择不当, 振荡萃取, 静置后分层。分取上层乙腈, 水层分别用 20 mL 乙腈和 10 mL 乙腈重复提取两次。合并三次乙腈萃取液, 置于 50 mL 容量瓶中, 定容混匀后用 0.45 μm 一次性微孔滤膜过滤至 2 mL 进样瓶中, 待测。

原料乳、鲜牛乳、豆浆等液体样品: 称取有代表性样品 10 g(精确至 0.01 g)试样于 50 mL 容量瓶中, 加水定容至刻度, 振荡混匀后, 静置, 取上清液用 4000 r/min 的转速离心 5 min。精密量取 10.00 mL 上清液按固体样品相同的前处理方法继续处理即可。

2.3 色谱条件

Venusil HILIC 色谱柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μm , 100 \AA), 流动相为乙腈, 柱温 40 $^{\circ}\text{C}$; 检测波长 220 nm, 流速为 1.0 mL/min, 进样体积 5 μL 。

3 结果与讨论

3.1 色谱条件的优化

3.1.1 色谱柱的选择

通过实验比较, 我们发现 H_2O_2 在常用色谱柱, 如 SCX 型强阳离子交换柱、SAX 型阴离子交换柱、氨基柱、氰基柱等上无保留, 或有保留但峰形很差; 在反相 C_{18} 色谱柱上只有用纯水做流动相时才有很弱的保留, 且分离效果不好, 因此这些色谱柱都不适合用于 H_2O_2 的检测。但是, H_2O_2 在 HILIC 色谱柱上保留较强, 且分离效果较好, 可以用于食品中过氧化氢的检测。

3.1.2 检测波长的选择

实验中, 我们取 0.1 mg/mL H_2O_2 标准溶液, 进样后用 DAD 检测器记录 H_2O_2 的紫外光谱图(见图 1), 由此光谱图可见, H_2O_2 在紫外区没有明显的吸收峰, 在 190~230 nm 区间具有有机溶剂的末端吸收, 随波长的减小几乎呈直线增强。因为检测波长越短, 仪器波动、流动相本底吸收、杂质干扰等对样品检测的影响越大, 因此为确定最佳检测波长, 我们考察了从 195 nm 到 225 nm 间不同检测波长 H_2O_2 的检出限, 发现检测波长在 215~220 nm 间, H_2O_2 的检测灵敏度较好, 为了进一步减少样品中其他杂质对检测结果的影响, 我们选择了 220 nm 作为检测波长。

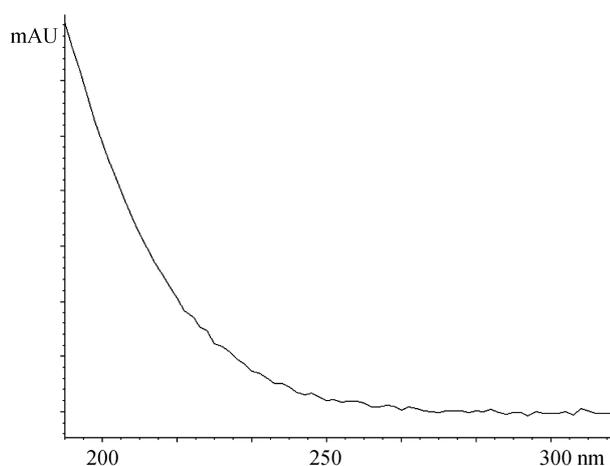


图 1 过氧化氢的紫外光谱图
Fig. 1 UV spectra of H_2O_2

3.1.3 流动相的选择

H_2O_2 在 HILIC 色谱柱上的保留符合正相色谱的保留规律, 极性越强的流动相保留越弱, 为增强 H_2O_2 在此色谱柱上的保留, 我们分别采用了乙腈、乙腈-甲酸、乙腈-高氯酸、乙腈-三氟乙酸、乙腈-氨水、甲醇、乙醇、丙醇、四氢呋喃等作为流动相, 考察不同流动相组成对 H_2O_2 保留时间、峰形、杂质干扰的影响。结果发现: 甲醇、乙醇、四氢呋喃等溶液末端吸收强, 紫外检测截止波长高于 220 nm, 不能用于 H_2O_2 检测; 当乙腈中含水量增加时, H_2O_2 保留变弱, 且选择性降低; 在乙腈中添加氨水、甲酸、三氟乙酸等酸碱溶液亦不能增强 H_2O_2 的保留或增加选择性, 因此我们采用 100% 色谱纯乙腈作为过氧化氢检测的流动相。

3.1.4 H_2O_2 试液含水量对色谱峰影响

由于此检测方法, H_2O_2 峰形对流动相中含水量的变化非常敏感, 即使试样溶液中的微量的水分进入也会对测量结果造成明显的影响。实验中, 我们分别用乙腈-水体积比(v/v)为 0/100、20/80、40/60、60/40、80/20、100/0 的混合溶液配制 1 mg/mL 的 H_2O_2 标准溶液, 分别上机检测, 结果如图 2 所示。由此图 2 可知, 随着试液中含水量增加, H_2O_2 峰中出现水峰的干扰, 且含水量越高水峰的干扰就越强。因此, 我们在样品处理和标准溶液配制过程中尽量使用乙腈直接定容, 以去除水分的干扰。

3.2 HPLC 色谱图

H_2O_2 标准溶液和样品试液的 HPLC 图如图 3 和图 4 所示, 从图 3 和图 4 可以看出 H_2O_2 标准品溶液

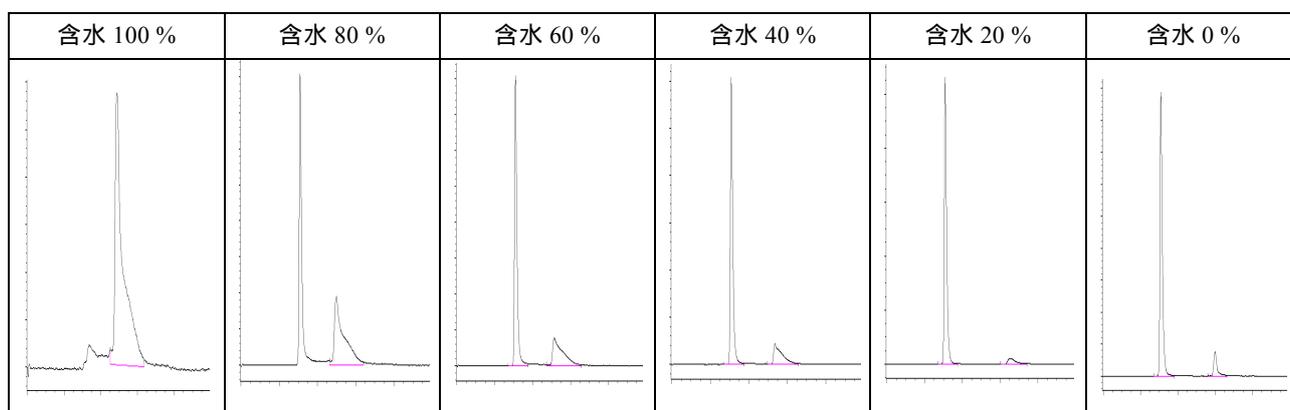
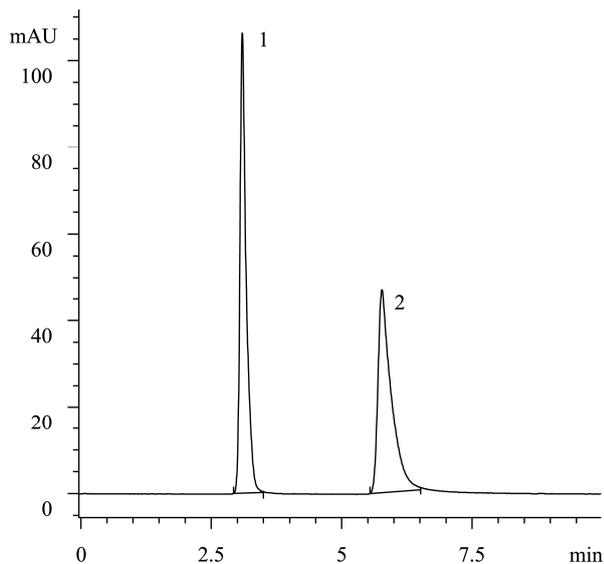


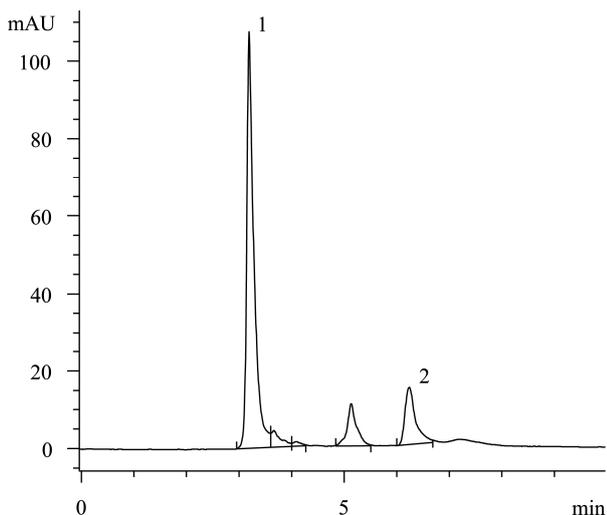
图 2 试液含水量对色谱峰形的影响
Fig. 2 The effect of water contents in samples on chromatographic peak form



1: 乙腈; 2: 过氧化氢.
1: acetonitrile; 2: hydrogen peroxide.

图3 过氧化氢标准溶液色谱图

Fig. 3 Chromatogram of H₂O₂ standard solution



1: 乙腈; 2: 过氧化氢.

1: acetonitrile; 2: hydrogen peroxide.

图4 含过氧化氢样品液相色谱图

Fig. 4 Liquid chromatogram of sample contained H₂O₂

和样品试液的色谱峰保留时间一致, 色谱峰的容量因子大于1, H₂O₂与样品中的杂质成分有较好的分离, 因此此方法适用于样品中 H₂O₂ 的分离、检测。

3.3 标准曲线的绘制及相关性

取 2.2.1 配制的 H₂O₂ 系列标准溶液, 分别进样 20 μL, 记录峰面积。以标准溶液浓度为横坐标, 色谱峰面积为纵坐标绘制标准曲线(图 5), 回归处理, 求得线性方程: H₂O₂ 的线性回归方程: $Y=8.986X-40.439$ ($R=0.9996$)。标准曲线如图 5 所示。

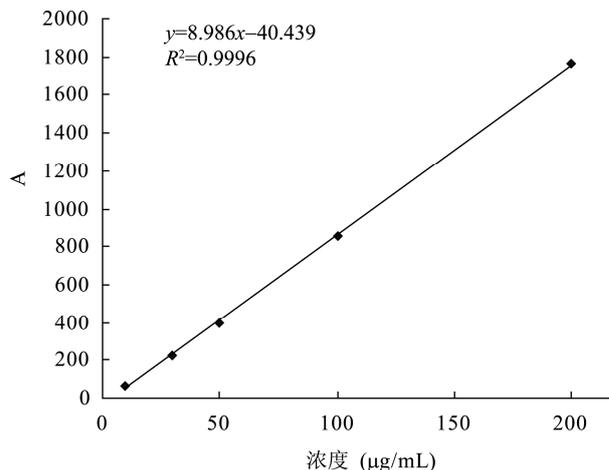


图5 过氧化氢的标准曲线

Fig. 5 Standard curve of hydrogen peroxide

以上数据表明, H₂O₂ 在 10~200 μg/mL 的浓度范围内, 浓度和峰面积线性关系良好, 可用于外标法定量。

3.4 检出限和定量限

取 10 μg/mL 的标准溶液, 在不同的波长下, 分别进样 8 次, 每次 20 μL, 计算不同条件下峰面积的标准差, 结果显示在 220 nm 检测波长条件下, 样品检测的灵敏度最高、抗干扰能力最强。在此条件下, 按三倍标准差计算, 用 DAD 可变波长紫外检测器检测过氧化氢的检出限为 0.6 μg/mL, 以十倍标准差计算定量限为 2 μg/mL。

3.5 精密度实验

取 50 μg/mL 的标准溶液, 重复进样 5 次, 测定峰面积, 计算过氧化氢的 RSD。由表 1 可见精密度良好。

基金项目: 吉林省质量技术监督科技项目(2012-ZJK10)

Fund: Supported by the Jilin Province Quality and Technical Supervision Science Projects (2012-ZJK10)

*通讯作者: 李刚, 教授, 主要研究方向为食品分析检测。E-mail: lg56ky@163.com

*Corresponding author: LI Gang, Professor, Jilin Province Product Quality Supervision Test Institute, No.1088, Nanhu Road, Changchun 130022, China. E-mail: lg56ky@163.com

3.6 样品前处理条件的研究

由于试样中水分的存在对 H_2O_2 检测影响较大, 所以用水提取样品中的 H_2O_2 后, 在上机检测前要尽量除去样品中的水分。我们分别考察了固相萃取、液

液萃取等方法除去样品中水分的效果, 结果发现用固相萃取很难找到合适的固相萃取小柱, 而使用液液萃取则可以取得比较理想的效果。

液液萃取主要是用乙腈萃取出水提取液中的

表 1 精密度实验结果

Table 1 Results of precision test

名称	1	2	3	4	5	average	RSD%
过氧化氢峰面积	396.4	398.1	407.9	403.3	396.8	400.5	1.24

表 2 提取次数的影响

Table 2 The effect of extraction times

提取次数	1	2	3	4	5
过氧化氢峰面积	216.1	105.0	12.2	0	0

表 3 过氧化氢的加样回收率($n=5$)

Table 3 The average recovery of H_2O_2 ($n=5$)

样品	添加量($\mu\text{g/g}$)	回收率(%)	RSD%
鲜牛奶	20	43	6.4
	40	37	5.5
	200	46	3.2
豆浆	20	45	4.8
	40	51	3.9
	200	39	3.1
鸡爪	20	66	4.9
	40	59	6.8
	200	65	5.0
鸡肉	20	53	4.6
	40	47	4.9
	200	59	5.8
鱿鱼丝	20	58	5.2
	40	68	4.3
	200	61	3.6
鸭肚	20	46	6.3
	40	49	6.8
	200	51	5.9

H_2O_2 , 由于乙腈与水的无机盐饱和溶液不互溶, 我们分别考察了在水溶液中加入无水硫酸钠和氯化钠饱和的方法, 发现以氯化钠饱和, 用乙腈萃取样品溶液中的 H_2O_2 , 溶液分层明显, 易于观察, 操作简便。我们分别检测了 2 次、3 次和 4 次提取溶液中过 H_2O_2 , 发现在第 3 次提取后 H_2O_2 基本被萃取干净, 结果见表 2。因此在实验方法中我们使用 50 mL 乙腈分 3 次萃取提取试液中的 H_2O_2 。按此前处理方法, 试样中过氧化氢检出限为: 15 mg/kg。

3.7 回收率实验

样品添加回收率: 我们取鲜牛奶、豆浆、鸭肚、鸡爪、鸡肉、鱿鱼丝 6 种样品, 每个样品各精密称取 5 份, 每份 5 g, 每份分别加入 1000 $\mu\text{g/mL}$ 混合标准溶液 0.1、0.2、1 mL, 按 2.2.2 样品处理方式操作, 分别进样 20 μL , 计算样品添加回收率和相对标准偏差。详细数据见表 3。由表 3 可见, 6 种样品的添加回收率均高于 30%, 相对标准偏差小于 7%, 表明此方

法测定 H_2O_2 具有很好的准确性。

4 结 论

本文建立了亲水作用液相色谱(HILIC)直接检测食品中残留过氧化氢的方法,利用水提取试样中的过氧化氢,乙腈萃取氯化钠饱和水提液后直接进样检测,并且可以用 C_{18} 柱净化去除基质干扰,方法简单快速,结果准确度高、重现性好,可用于食品中残留过氧化氢的含量测定,并为食品中过氧化氢残留量的检测提供了参考依据。

参考文献

- [1] 李树鹏. 过氧化氢的检测新方法研究[D]. 南华大学, 2010.
Li SP. New Methods for Determination of Hydrogen peroxide [D]. University of South China, 2010.
- [2] GB2760-2011 食品添加剂使用卫生标准[S].
GB2760-2011 Hygiene standards for use of food additives [S].
- [3] 周健洪, 黎晖, 宋述财, 等. 过氧化氢对骨髓间充质干细胞增殖活性的影响[J]. 广东医学, 2005, 26(9): 1199-1200.
Zhou JH, Li H, Song SC, *et al.* Determine the effect of hydrogen peroxide on bone mesenchymal stem cells (BMSC) [J]. Guangdong Med J, 2005, 26(9): 1199-1200.
- [4] 张国芳, 陈洪渊. 流动注射胶束电化学发光测定过氧化氢的研究[J]. 分析科学学报, 2001, 17(1): 1-5.
Zhang GF, Cheng HZ. Determination of hydrogen peroxide by micelle electrochemiluminescence with flow injection analysis [J]. J Anal Sci, 2001, 17(1): 1-5.
- [5] 童志强, 袁如, 柴雅琴, 等. 基于二氧化锆/ 纳米金溶胶凝胶膜固定辣根过氧化物酶的 H_2O_2 生物传感器的研制[J]. 西南师范大学学报, 2006, 31(5): 102-106.
Dong ZQ, Yuan R, Chai YQ, *et al.* A biosensor for hydrogen peroxide based on horseradish peroxidase immobilized in ZrO_2/Au So-I gel Matrix [J]. J Southwest China Normal Univ, 2006, 31(5): 102-106.
- [6] 刘海峰. 快速检测食品中过氧化氢残留的生物传感方法的建立[D]. 上海交通大学, 2009.
Liu HF. The development of the biosensor method for rapidly detecting hydrogen peroxide residue in food [D]. Shanghai Jiaotong Univ, 2009.
- [7] 张薇薇, 杨怡, 陈培超. 钼酸铵分光光度法测定水产品中过氧化氢残留量[J]. 现代预防医学, 2008, 35(8): 1556-1557.
Zhang WW, Yang Y, Cheng PC. Determination of hydrogen peroxide in water-soaked foodstuffs by ammonium molybdate tetrahydrate spectrophotometry [J]. Mod Preventive Med, 2008, 35(8): 1556-1557.
- [8] 沈友, 柴素芬. 碘-四氯化碳萃取光度法间接测定食品中的痕量过氧化氢[J]. 光谱实验室, 2003, 20(4): 636-638.
Sheng Y, Chai SF. Indirect determination of trace amount of hydrogen peroxide in food by the i_2-ccl_4 extraction spectrophotometry [J]. Chin J Spectrosc Lab, 2003, 20(4): 636-638.
- [9] 张瑛洁, 马军, 张亮. 钛盐分光光度法测定酸性染料体系中的过氧化氢[J]. 工业水处理, 2008, 28(11): 72-77.
Zhang YJ, Ma J, Zhang L. Spectrophotometric determination of hydrogen peroxide in acidic dye system with titanium oxalate [J]. Ind Water Treat, 2008, 28(11): 72-77.
- [10] Arnous A, Petrakis C, Makris DP, *et al.* A peroxyoxalate chemiluminescence-based assay for the evaluation of hydrogen peroxide scavenging activity employing 9, 10-diphenylanthracene as the fluorophore [J]. J Pharmacol Toxicol Methods, 2002, 48: 171-177.
- [11] 李晓霞, 申丽华, 漆红兰. 毛细管固定过氧化物酶流动注射化学发光法测定过氧化氢的研究[J]. 分析测试学报, 2008, 27(4): 419-422.
Li XX, Sheng HL, Qi HL. Determination of hydrogen peroxide on a peroxidase-immobilized capillary column by flow-injection chemiluminescence [J]. J Instrum Anal, 2002, 48: 171-177.
- [12] 邹昀, 张德新. 荧光分析法测定水发食品中过氧化氢残留量[J]. 公共卫生与预防医学, 2009, 20(6): 64-65.
Zhou Y, Zhang DX. Determination of hydrogen peroxide in water-soaked foodstuffs by fluorescence analysis [J]. J Publ Health Preventive Med, 2009, 20(6): 64-65.
- [13] 盛丽, 朱金林, 韩小茜. 碱性藏花红 T 荧光猝灭法测定痕量过氧化氢[J]. 光谱实验室, 2008, 25(6): 1075-1077.
Sheng L, Zhu JL, Han XQ. Determination of hydrogen peroxide based on fluorescence quenching with safranin T system [J]. Chin J Spectrosc Lab, 2008, 25(6): 1075-1077.
- [14] Kobayashi K, Kawai S. Enzymatic determination of hydrogen peroxide using gas chromatography [J]. J Chromatogr A, 1982, 245(3): 339-345.
- [15] Effkemann S, Pinkernell U, Karst U. Peroxide analysis in laundry detergents using liquid chromatography [J]. Anal Chim Acta, 1998, 363(1): 97-103.
- [16] 徐金荣, 陈忠明. 高效液相色谱-荧光检测法环境样品中的过氧化物[J]. 色谱, 2005, 23(4): 366-369.
Xu JR, Cheng ZM. Determination of peroxides in environmental samples by high performance liquid chromatography with fluorescence detection [J]. Chin J Chromatogr, 2005, 23(4): 366-369.
- [17] 郭治安, 赵景婵, 党高潮, 等. 离子抑制色谱法测定消毒剂中的过氧乙酸和过氧化氢[J]. 色谱, 2003, 21(5): 524-526.
Guo ZA, Zhao JC, Dang GC. Determination of peroxyacetic acid

- and hydrogen peroxide by ion suppression chromatography in disinfectants [J]. Chin J Chromatogr, 2003, 21(5): 524-526.
- [18] 胡俊明, 石文鹏, 林少彬. 高效液相色谱法测定化妆品中过氧化氢的方法研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2003, 13(5): 593-596.
Hu JM, Shi WP, Lin SB. Study on method for determination of H₂O₂ in cosmetics by HPLC [J]. Chin J Health Lab Technol, 2003, 13(5): 593-596.
- [19] 王凯雄, 许利君, 姚铭. 离子色谱仪流动注射电导法测定过氧化氢[J]. 分析化学, 2003, 31(5): 555-558.
Wang KX, Xu LJ, Yao M. Determination of hydrogen peroxide using flow injection analysis-conductivity method with ion chromatography [J]. Anal Chem, 2003, 31(5): 555-558.
- [20] 陈易晖, 刘艳, 周建立. 高效液相色谱-紫外检测法测定食品中的过氧化氢[J]. 光谱实验室, 2009, 26(2): 414-417.
Li YH, Liu Y, Zhou JJ. Determination of peroxides in food samples by high performance liquid chromatography with variable wavelength detector [J]. Chin J Spectrosc Lab, 2009, 26(2): 414-417.
- [21] 李晓霞, 申丽华, 漆红兰. 毛细管固定过氧化物酶流动注射化学发光法测定过氧化氢的研究[J]. 分析测试学报, 2008, 27(4): 419-422.
Li XX, Sheng HL, Qi HL. Determination of hydrogen peroxide on a peroxidase-immobilized capillary column by flow-injection chemiluminescence [J]. J Instrum Anal, 2008, 27(4): 419-422.
- [22] GB/T23499-2009 食品中过氧化氢的测定方法[S].
GB/T23499-2009 The determination methods of hydrogen peroxide in the food [S].

(责任编辑: 张宏梁)

作者简介



孙佳, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。
E-mail: sunjiasunpeng@163.com



李刚, 教授, 主要研究方向为食品分析检测。
E-mail: lg56ky@163.com