

抗坏血酸在聚对苯二酚/铜复合膜修饰电极上电催化氧化行为的探究

何春晓,王妍,魏晓霞

(陇东学院化学化工学院,甘肃庆阳 745000)

摘要:利用电沉积法制备了聚对苯二酚/铜(PHQ/Cu)复合膜修饰电极,并采用循环伏安法探究了抗坏血酸(AA)在该电极上的电催化氧化行为。结果表明,与裸电极、PHQ修饰电极相比,PHQ/Cu复合膜修饰电极对AA具有更好的催化作用,表明两种修饰剂对AA的电催化氧化有良好的协同催化作用;在0.1 mol/L磷酸盐缓冲溶液(pH=4.35)中,AA的氧化峰电流与其浓度在 $5 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-1}$ mol/L范围内呈良好的线性关系,线性方程为 $\lg I = 0.7364 \lg c + 1.6932$, $R^2 = 0.9959$,检出限为 2.0×10^{-5} mol/L。该复合膜修饰电极在冰箱内贮存9 h,其电化学信号基本保持不变,且共存物几乎不干扰AA的测定,表明电极具有良好的稳定性和较强的抗干扰能力,可以用于饮料中AA含量的测定,回收率在95.5%~109.1%之间。

关键词:抗坏血酸,电催化氧化,电沉积法,循环伏安法,化学修饰电极

Electrocatalytic Oxidation Behavior of Ascorbic Acid on the Electrode Modified with PHQ/Cu Composite Film

HE Chun-xiao, WANG Yan, WEI Xiao-xia

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Longdong University, Qingyang 745000, China)

Abstract: In this paper, the electrodeposition method was used to prepare the glass carbon electrode modified with PHQ/Cu composite film (PHQ/Cu/GCE) and the electrocatalytic oxidation behavior of ascorbic acid (AA) on the electrode was studied by using cyclic voltammetry. The experimental results showed that compared with the bare GCE and PHQ/GCE, PHQ/Cu/GCE had better catalytic activity towards AA, which indicated that the composite film had a good synergistic catalytic action towards the electrooxidation reaction of AA. At the same time, in 0.1 mol/L phosphate buffer solution (pH = 4.35), the oxidation peak current of AA was in proportion to its concentration in the range of $5 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-1}$ mol/L. The regressive equation was $\lg I = 0.7364 \lg c + 1.6932$, $R^2 = 0.9959$, with a detection limit of 2.0×10^{-5} mol/L. The modified electrode was stored in refrigerator for 9 h, the electrochemical signal remained unchanged, and the coexisting substances hardly interfered with the determination of AA, which demonstrated that the modified electrode had good stability and strong anti-interference ability. Furthermore, the modified electrode was successfully used to determine the content of AA in drink with recoveries of 95.5%~109.1%.

Key words: ascorbic acid; electrocatalytic oxidation; electrodeposition method; cyclic voltammetry; chemically modified electrode

中图分类号:TS201.2

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2020)06-0210-05

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020.06.035

引文格式:何春晓,王妍,魏晓霞.抗坏血酸在聚对苯二酚/铜复合膜修饰电极上电催化氧化行为的探究[J].食品工业科技,2020,41(6):210-214.

抗坏血酸(AA),又称维生素C,是人体必需的营养成分之一,也是维持机体正常生理功能的重要维生素之一^[1-2]。临床上抗坏血酸可用于坏血病的预防及治疗,增加对感染的抵抗力^[3]。由于人体肝细胞中缺少L-抗坏血酸氧化酶,使抗坏血酸无法在体内合成^[4],所以必须从食物中摄取,但过多摄入抗坏血酸会对人体产生不利的影响^[5]。因此,检测食物和药物中抗坏血酸的含量具有非常重要的意义。

目前测定抗坏血酸的主要方法有:分光光度法、

滴定分析法、化学发光法、色谱法、毛细管电泳法及电化学法等^[6-11]。其中,电化学法具有仪器简单、检测周期短、灵敏度高、选择性好等优点^[12-15],被广泛地用于样品中抗坏血酸的检测。由于抗坏血酸在碳电极或金属电极上的过电位较大^[16-17],且电氧化产物会使工作电极毒化失活^[18],使得抗坏血酸的直接电化学测量十分困难^[19-20]。因此,制备一种功能化的修饰电极来降低过电位、减弱电极表面的毒化作用成为科研人员研究的重点。

收稿日期:2019-06-24

作者简介:何春晓(1987-),女,硕士,讲师,研究方向:环境分析化学,E-mail:chunxiaoh211@163.com。

基金项目:甘肃省应用化学省级重点实验室项目(GSACK20130113);甘肃省民生科技计划项目(17CX1FM071)项目支撑。

本文采用电沉积法成功制备了一种新型的 PHQ/Cu 复合膜修饰电极,与裸电极、PHQ 修饰电极相比,AA 在该复合膜修饰电极上的过电位明显降低,氧化峰电流明显增强,表明两种修饰材料间具有良好的协同催化作用。该电极稳定性良好,抗干扰能力强,可以用于饮料中 AA 含量的测定。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

对苯二酚(分析纯) 天津市北方天医化学试剂厂;抗坏血酸(分析纯) 成都市科隆化学制品有限公司; H_2SO_4 (98%) 北京化学试剂厂;KCl(分析纯) 天津化学试剂有限公司; CuSO_4 (分析纯) 天津市北联精细化学品开发有限公司;葡萄糖(分析纯) 西安化学试剂厂;酒石酸(分析纯) 天津欧博凯化工有限公司;亮氨酸(分析纯) 北京化学试剂商店;甘氨酸(分析纯) 陕西晨明生物科技有限公司;蔗糖(分析纯) 广东西陇化工厂; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (分析纯) 北京红星化工厂;NaCl(分析纯) 天津市嘉宇精细化工有限公司; FeCl_2 (分析纯) 北京南尚乐化工厂; Na_2HPO_4 、 NaH_2PO_4 、 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ (均为分析纯) 购自天津市百世化工有限公司;果粒橙 购自某超市;实验用水均为二次蒸馏水。

LK98B II 型微机电化学工作站 天津市兰力科化学电子高技术有限公司;KQ2200DB 型数控超声清洗器 昆山市超声仪器有限公司;PHS-3C 精密 pH 计 上海精密科学仪器有限公司;玻碳电极 天津艾达恒晟科技发展有限公司;铂丝电极 上海越磁电子科技有限公司;饱和甘汞电极 武汉高仕睿联科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 玻碳电极的预处理 将裸玻碳电极在 0.3 和 0.05 Al_2O_3 粉末上抛光至镜面后,依次在蒸馏水、 HNO_3 (1+1) 和无水乙醇中进行超声清洗各 1 min,最后用二次蒸馏水冲洗。将处理好的电极置入含 0.2 mol/L $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 的溶液中,在 -0.2~0.6 V 电位范围内以 0.1 V/s 的速率进行循环伏安扫描,当峰电位差值在 0.1 V 以内,且有较高的对称性时,表明电极具有较高的活性,将此电极用蒸馏水冲洗干净备用。

1.2.2 修饰电极的制备 将预处理好的玻碳电极置入含 0.02 mol/L HQ 溶液中,采用三电极体系,在 0~1.0 V 电位范围内,以 0.1 V/s 的扫速循环伏安扫描 10 圈,即得 PHQ 修饰电极。取出上述电极,用二次蒸馏水冲洗干净,以该修饰电极为工作电极,将三电极体系置于 0.2 mol/L CuSO_4 溶液中,以 0.1 V/s 扫描速率在 -0.6~0.6 V 之间循环伏安扫描 10 圈,由此制备的电极即为 PHQ/Cu 复合膜修饰电极。

1.2.3 电化学性能测试 电化学测试采用三电极体系:PHQ/Cu 复合膜修饰电极为工作电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,铂丝电极为对电极。测试时,将三电极体系置于含 0.1 mol/L AA 和 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲溶液中(PBS, pH=4.35),以 0.1 V/s 的扫描速率,在 -0.4~1.2 V 电位范围内记录循环伏安曲线。所有实验均在室温下进行。

1.3 数据处理

实验中每个数据重复三次,采用 Origin 7.5 软件进行数据处理绘图。

2 结果与分析

2.1 修饰电极的聚合循环伏安曲线

图 1 为 HQ 的聚合循环伏安曲线。由图 1 可知,在 0~1.0 V 范围内,随着扫描次数增加,氧化峰电流基本保持不变,还原峰电流持续增加。这是对苯二酚沉积在电极表面发生电化学聚合且量不断增加的结果,表明对苯二酚是一种较好的电子媒介体,并且对苯二酚薄膜易于生成和达到饱和状态。图 2 为 PHQ 修饰电极表面沉积 Cu 的循环伏安曲线。由图 2 可知,在 -0.6~0.6 V 范围内,随着扫描次数增加,氧化峰电流和还原峰电流均有所增加并很快达到稳定值,表明 Cu 已沉积在电极表面。实验发现,扫描 10 圈时催化效果最佳。

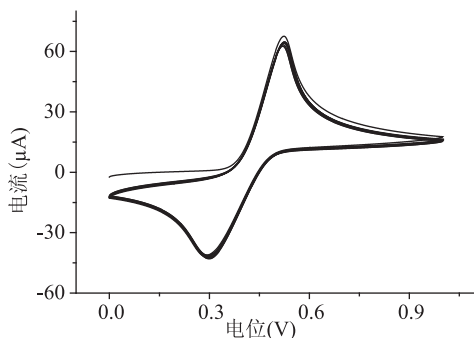


图 1 裸玻碳电极表面沉积 HQ 的循环伏安图

Fig.1 Cyclic voltammogram of hydroquinone deposited on bare GC electrode surface

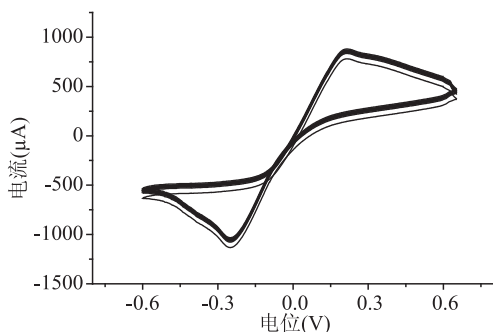


图 2 PHQ 修饰电极表面沉积 Cu 的循环伏安图

Fig.2 Cyclic voltammogram of Cu deposited on PHQ/GCE surface

2.2 缓冲溶液浓度的选择

实验中以 PBS 作为缓冲溶液,本文考察了 PBS 浓度在 0.05~0.25 mol/L 的范围内变化时 AA 氧化峰电流的变化情况,结果如图所 3 示。由图可知当 PBS 的浓度为 0.1 mol/L 时,峰电流值最大,故选用 0.1 mol/L 作为缓冲溶液的最佳浓度。

2.3 缓冲溶液 pH 的选择

实验探究了 pH 在 3.50、3.95、4.30、5.05、5.65、6.05、6.40 之间变化时 AA 峰电流的变化趋势,结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着 pH 的增大,氧化峰电流先逐渐增大,而后又减小,在 pH=4.35 时,峰电

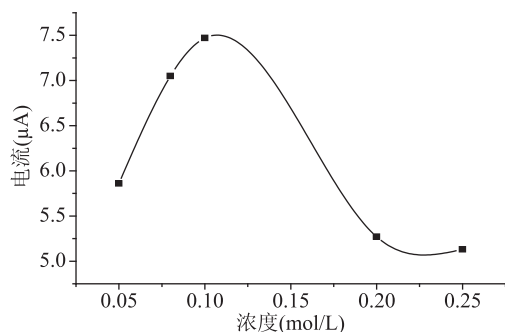


图3 缓冲溶液浓度对 AA 峰电流的影响

Fig.3 The effect of the concentration of buffer solution on the peak currents of AA

流最大。表明在 $\text{pH} = 4.35$ 时, AA 在 PHQ/Cu 复合膜修饰电极上具有最大电化学活性,故选择 $\text{pH} = 4.35$ 作为缓冲溶液最佳 pH 。

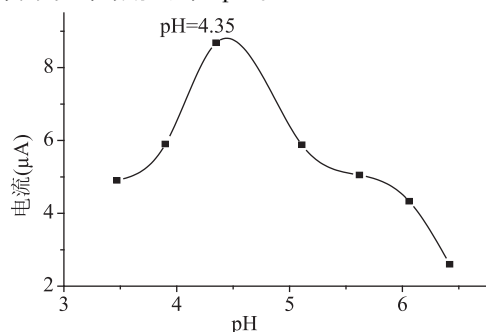


图4 缓冲溶液 pH 对 AA 峰电流的影响

Fig.4 The effect of the pH value of buffer solution on the peak currents of AA

2.4 AA 在修饰电极上的电催化氧化行为

用循环伏安法对 AA 进行定量测定具有较高的灵敏度和良好选择性。图 5 为 AA 在 GCE(a)、PHQ/GCE(b) 及 PHQ/Cu/GCE(c) 上的电催化氧化行为。由图可知,与裸电极或单一材料修饰的电极相比,AA 在复合修饰电极上的峰电流最大,峰电位最小。表明 HQ 和 CuSO_4 在玻碳电极表面对 AA 的电催化氧化是良好的,复合修饰电极催化最佳。

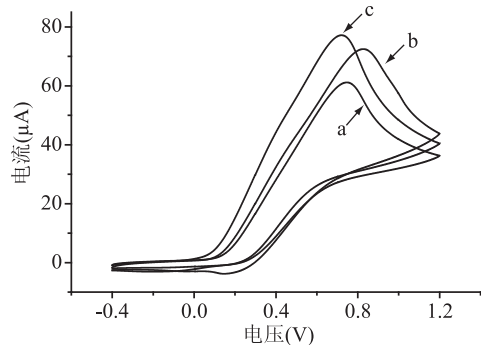


图5 AA 在 GCE(a)、PHQ/GCE(b) 及 PHQ/Cu/GCE(c) 上的循环伏安曲线

Fig.5 The electrochemical behavior of AA

on bare GC electrode (a), PHQ/GCE (b), PHQ/Cu/GCE

2.5 扫描速率对 AA 电催化氧化的影响

图 6 为修饰电极上 AA 在 $0.1 \sim 0.8 \text{ V/s}$ 范围内不

同扫描速率下的循环伏安图。从图 6 中可以看出,随着扫描速率的增加,其氧化峰电位略微正移,峰电流也随之增大,这是由于随着转速的增加,动力学传输速率也随之增大的原因。由图可知,峰电流 I 与扫速 ν 呈良好的线性关系,线性方程 $I = 1.5106\nu + 0.6505$, $R^2 = 0.9936$,表明溶液中的电极反应是受吸附控制的。

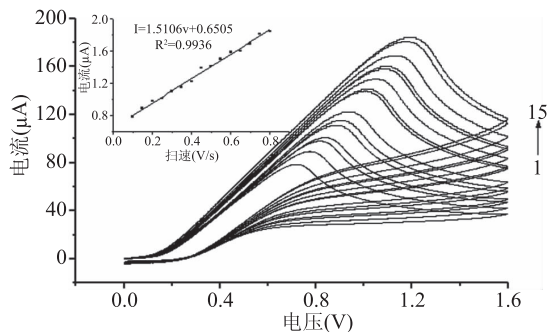


图6 修饰电极上 AA 在不同扫速下的循环伏安图及 AA 峰电流与扫速之间的关系图(内嵌图)

Fig.6 Cyclic voltammograms of AA on modified electrode at different scan rates. Inset curves show the relationship between the peak current of AA and the scan rate

注:曲线 1~15 对应的扫描速率 (V/s):
0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5,
0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8。

2.6 AA 浓度与氧化峰电流之间的关系

在不同浓度的 AA 溶液中,以复合修饰电极为工作电极进行 CV 测试,结果如图 7 所示。从图中可以看出随着 AA 浓度的增加,氧化峰电流逐渐增大,并且在 $5 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-1} \text{ mol/L}$ 范围内呈良好的线性关系,线性方程为 $\lg I = 0.7364 \lg c + 1.6932$, $R^2 = 0.9959$,检出限为 $2.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 。

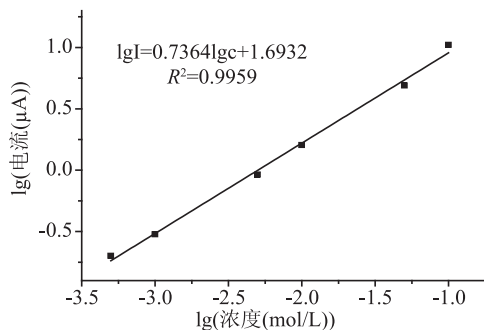


图7 AA 浓度与氧化峰电流之间的关系曲线

Fig.7 The relationship between the logarithm peak current and the logarithm of AA concentration

2.7 修饰电极的稳定性

修饰电极的稳定性是电化学方法可靠性的前提条件。实验中将 PHQ/Cu/GCE 电极贮存于冰箱内,每隔 1 h 取出,并置于含 0.1 mol/L AA 和 0.1 mol/L PBS ($\text{pH} = 4.35$) 的溶液中测一次峰电流值,结果如图 8 所示。由图 8 可知,在 9 h 以内,AA 在该电极上的电流基本保持不变, $\text{RSD} = 1.7\%$,表明该电极稳定性良好。

表1 干扰实验(n=3)
Table 1 Interference experiment(n=3)

测定溶液	AA	AA + 葡萄糖、蔗糖	AA + 亮氨酸、甘氨酸	AA + 酒石酸	AA + Ca ²⁺ 、Na ⁺	AA + K ⁺ 、Fe ²⁺
I(平均)(μA)	7.96	7.91	7.93	8.05	7.89	8.01
相对误差(%)	/	0.63	0.37	1.10.88	0.63	

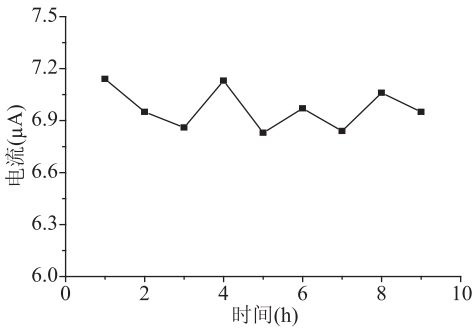


图8 修饰电极放置时间对 AA 峰电流的影响
Fig.8 The effect of the storage time of PHQ/Cu/GCE on the oxidation peak currents of AA

2.8 干扰实验

一种方法能否用于实际样品的检测,选择性是一个很重要的因素,本文研究了几种可能干扰物对 AA 测定的影响,实验方法参照 1.2.3,结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,对 0.1 mol/L 的 AA 溶液,在允许相对误差(±5%)范围内,10 倍的下列共存物:葡萄糖、酒石酸、亮氨酸、甘氨酸、蔗糖、Ca²⁺、Na⁺、K⁺、Fe²⁺ 均不干扰测定。因此,该方法有良好的选择性,可有效地应用于实际样品的测定。

2.9 样品测定

AA 是果粒橙的主要成分之一。实验中将果粒橙静置取其上清液,采用标准加入法对果粒橙中的 AA 含量进行测定。结果如表 2 所示,样品加标回收率在 95.5%~109.1% 之间,表明该法的准确度较高,可靠性强。

表2 样品中 AA 的回收率测定结果
Table 2 Recovery measurements of AA in the sample

样品	样品中 AA 的浓度(mol/L)	加标量(mol/L)	测定总值(mol/L)	回收率(%)
果粒橙	0.00079	0.01	0.01034	95.5
		0.02	0.02029	97.5
		0.03	0.03333	108.4
		0.04	0.04446	109.1

3 结论

本文通过电沉积法成功制备了一种新型的聚对苯二酚/铜复合膜修饰电极,研究了 AA 在该电极上的电催化氧化行为。结果表明两种修饰剂对 AA 的电催化氧化具有良好的协同催化作用,此电极在冰箱内贮存 9 h,其电化学信号基本保持不变,电极的稳定性较好。通过干扰试验的探究,表明电极选择性良好,具有较强的抗干扰能力。采用标准加入法对果粒橙中的 AA 的含量进行了测定,回收率在

95.5%~109.1% 之间,表明该法准确度高,可以用于实际样品的检测。

参考文献

[1] 邓培红,刘晓鹏,贺全国,等.石墨烯-聚乙烯吡咯烷酮复合膜修饰电极用于抗坏血酸和芦丁的同时测定[J].衡阳师范学院学报,2018,39(3):62-67.

[2] 窦砚鹏,梁英,彭俊军,等.石墨烯/纳米纤维素/亚甲基蓝电极同时检测抗坏血酸和尿酸[J].湖北大学学报:自然科学版,2016,38(1):73-78.

[3] 郭子英.抗坏血酸的电化学研究[J].山西大同大学学报:自然科学版,2016,32(6):40-41.

[4] 陈贤光,王壬,赵国芳,等.聚对苯二酚修饰玻碳电极的制备及其对抗坏血酸的催化氧化作用[J].分析化学研究报告,2006,34(8):1063-1067.

[5] 陈少华,周健康,丁益,等.抗坏血酸在壳聚糖-碳纳米管-二茂铁复合修饰玻碳电极上的电化学行为[J].应用化工,2018,47(7):1452-1456.

[6] Shaidarova L G, Gedmina A V, Chelnokova I A, et al. Electrocatalytic oxidation and flow - injection determination of ascorbic acid at a graphite electrode modified with a polyaniline film containing electrodeposited palladium [J]. Journal of Analytical Chemistry.2006,61(6):601-608.

[7] Lin L Q, Yao H, Huang L Y, et al. Electrocatalytic oxidation and determination of norepinephrine in the presence of ascorbic and uric acids at a poly (evans blue) - modified glassy carbon electrode [J]. Journal of Analytical Chemistry.2009, 64 (2): 189-194.

[8] Cheng W X, Jin G Y, Zhang Y Z. Electrochemical behavior of a gold electrode modified with SWNTs/DDAB films and its electrocatalytic activity towards ascorbic acid[J]. Russian Journal of Electrochemistry.2005,41(10):1061-1065.

[9] Pelissari M R S, Archela E, Tarley C R T, et al. Ascorbic acid electrocatalytic activity in different electrolyte solutions using electrodeposited Co(OH)₂ [J]. Ionics.2019,25(4):1911-1920.

[10] Zare H R, Nasirizadeh N. A comparison of the electrochemical and electroanalytical behavior of ascorbic acid, dopamine and uric acid at bare, activated and multi - wall carbonnanotubes modified glassy carbon electrodes [J]. Journal of the Iranian Chemical Society.2011,8(1):55-66.

[11] 连欢,李金涛,张翠忠,等.花状氧化锌修饰电极对抗坏血酸的电催化氧化[J].分析试验室,2019,38(2):136-140.

[12] 杨秋娟,丁雷,涂进春,等.钴酸镍空心球的合成及其抗坏血酸电化学敏感性能[J].材料科学与工程学报,2018,36(3):443-448.

[13] 张家睿,王丽红,冯永博,等.硫瑾/氧化石墨烯修饰电极

的制备及其应用研究[J].分析试验室,2019,38(2):172-175.

[14] 王俊,张攀峰,李莉,等.抗坏血酸在石墨烯修饰电极的电化学行为研究[J].化学工程师,2018,32(8):9-17.

[15] 顾玲,柯苗,闫璟,等.抗坏血酸在钴酞菁修饰碳糊电极上的电化学行为[J].化学研究与应用,2017,29(2):173-177.

[16] 王岩玲,程云环.纳米金-壳聚糖修饰电极循环伏安法测定抗坏血酸[J].化学分析计量,2017,26(5):36-39.

[17] 赵一玮,秦建华,李周原,等.氧化石墨烯/多壁碳纳米管负载金铂核壳纳米粒子构建一种三维新型抗坏血酸电化学传

感器[J].分析测试学报,2019,38(3):339-344.

[18] 谢云,周敏,曹小娟,等.修饰电极伏安法快速测定食品中抗坏血酸和亚硝酸盐[J].分析试验室,2019,37(6):646-650.

[19] 张婧,张春花,张雷.苯胺在邻-氨基苯磺酸功能化的玻碳电极上聚合及其对抗坏血酸的电催化氧化[J].分析化学研究报告,2009,37(9):1281-1285.

[20] 刘冉彤,宋诗稳,胡凯,等.聚三聚氰胺-石墨烯复合膜修饰电极对多巴胺与尿酸的同时测定[J].分析测试学报,2017,36(10):1240-1244.

(上接第197页)

离心取上清定容)、酶法(样品加入2%纤维素酶,温度58.5℃,酶解68min,添加无水乙醇至终浓度50%,离心取上清定容)单独对莽吉柿果壳中原花青素进行提取,得率分别为8.93%和9.46%,由此可见,超声波-酶法的提取效果要优于单独使用超声波和酶法提取。

3 结论

本研究首次将超声波与酶解技术结合应用于莽吉柿果壳原花青素的提取中,通过单因素和响应面试验对工艺参数进行优化,确定最佳工艺条件为:纤维素酶用量2%、酶解时间68min、酶解温度58.5℃、超声功率320W、超声时间20min。在此条件下原花青素的得率为12.29%,高于单独使用超声波和酶法提取。本研究可为莽吉柿果壳原花青素的工业化提取提供参考,具有较好的应用前景。

参考文献

[1] 杨青,赵丽君,周大江,等.山竹提取物有效成分测定及其多糖组成分析[J].中国医药导报,2014,11(21):85-89.

[2] 戴聪杰,黄雅琼.榴莲和山竹果肉的营养分析[J].食品与机械,2012,28(1):65-67.

[3] Jindarat S. Xanthones from mangosteen (*Garcinia mangostana*): multi-targeting pharmacological properties [J]. Journal of the Medical Association of Thailand, 2014, 97(2): S196-S201.

[4] 蔡彬新,周逢芳,杨惠婷.山竹果皮总黄酮富集工艺研究[J].中国农学通报,2017,33(32):34-38.

[5] Qin Y, Sun Y, Li J Q, et al. Characterization and antioxidant activities of procyanidins from lotus seedpod, mangosteen pericarp, and camellia flower [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(7): 1621-1632.

[6] Mai D S, Duy T. Pectin extraction from the fresh rind of vietnamese mangosteen (*Garcinia mangostana*) [J]. Acta Horticulturae, 2015, 1088: 553-556.

[7] Zhou P Y, Zhang L M, Li W, et al. *In vitro* evaluation of the anti-digestion and antioxidant effects of grape seed procyanidins according to their degrees of polymerization [J]. Journal of Functional Foods, 2018, 49: 85-95.

[8] Luo L X, Bai R F, Zhao Y Q, et al. Protective effect of grape seed procyanidins against H_2O_2 -induced oxidative stress in PC-12 neuroblastoma cells: Structure-activity relationships [J]. Journal of Food Science, 2018, 83(10): 2622-2628.

[9] Zhang L N, Wang S, Liu Z Y, et al. Procyanidin, a kind of biological flavonoid, induces protective anti-tumor immunity and

protects mice from lethal B16F10 challenge [J]. International Immunopharmacol, 2017, 47: 251-258.

[10] Zhang H H, Cheng Y X, Luo X P, et al. Protective effect of procyanidins extracted from the lotus seedpod on immune function injury induced by extremely low frequency electromagnetic field [J]. Biomedicine Pharmacotherapy, 2016, 82: 364-372.

[11] Ottaviani J I, Heiss C, Spencer J P E, et al. Recommending flavanols and procyanidins for cardiovascular health: Revisited [J]. Molecular Aspects of Medicine, 2018, 61: 63-75.

[12] 秦菲,王龙.原花青素提取方法的研究进展[J].北京联合大学学报:自然科学版,2012,26(4):36-39,50.

[13] 陈梦雨,黄小丹,王钊,等.植物原花青素的研究进展及其应用现状[J].中国食物与营养,2018,24(3):54-58.

[14] 叶春苗.原花青素的提取方法及稳定性研究进展[J].农业科技与装备,2014,7:64-65.

[15] 梁祖培,张燕,熊波,等.天然植物中原花青素提取和纯化方法研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8: 3029-3036.

[16] 李绮丽,吴卫国,彭芳刚,等.莲子皮原花青素测定方法的研究[J].现代食品科技,2012,28(2):241-245.

[17] 卜其涛,刘发贵,郑毅男,等.山竹果壳中 α -倒捻子素和水溶性多糖的含量测定[J].药物分析杂志,2012,2:245-248.

[18] 黄文辉,郭秀君,黄雪松,等.山竹果胶提取及流变学特性[J].食品工业科技,2015,36(10):237-240.

[19] 张晓娟,李丽,刘华,等.金刺梨皮原花青素的提取及抗氧化活性研究[J].粮食与油脂,2018,31(9):97-100.

[20] 韩伟,马婉婉,骆开荣.酶法提取技术及其应用进展[J].机电信息,2010,17:15-18.

[21] 薛菲,阴新负,彭效明,等.葡萄籽原花青素溶剂浸提工艺研究[J].农业科学研究,2015,36(4):30-36.

[22] 余修亮,朱志平,李佳桥,等.莲子壳原花青素超声提取工艺优化及其抗氧化活性[J].中国食品学报,2018,18(12): 99-109.

[23] 贾宝珠,鲍金勇,郑晓仪,等.香蕉皮原花色素提取工艺的研究[J].食品工业科技,2014,35(6):251-255.

[24] Li S Y, Yang Y J, Li J S, et al. Increasing yield and antioxidative performance of litchi pericarp procyanidins in baked food by ultrasound-assisted extraction coupled with enzymatic treatment [J]. Molecules, 2018, 23(9): 2089.

[25] 苏适,王双侠.响应曲面优化超声波辅助提取无花果叶总黄酮的工艺研究[J].食品研究与开发,2019,40(9): 101-106.