DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2022.21.022

多壁碳纳米管/石墨烯修饰电极检测饮料中日落黄

李海龙,索习东,乔洪涛,尹爱萍*
(忻州师范学院 化学系,山西 忻州 034000)

摘　要:该文旨在制备性能优良的多壁碳纳米管/石墨烯修饰电极,建立新型的测定日落黄的方法。25 ℃下将多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotubes,MWCNTs)超声分散于壳聚糖(chitosan,CTS)溶液中,得到 CTS-MWCNTs 分散液,接着采用滴涂法将该分散液滴涂在玻碳电极(glassy carbon electrode,GCE)表面,然后将电极在氧化石墨烯(graphene,GO)-十二烷基苯磺酸钠(sodium dodecyl benzene sulfonate,SDBS)溶液中浸泡 2 min,制得壳聚糖-多壁碳纳米管/石墨烯-十二烷基苯磺酸钠复合膜修饰玻碳电极(CTS-MWCNTs/GO-SDBS/GCE)。采用循环伏安法和微分脉冲伏安法研究日落黄(sunset yellow,SY)在 CTS-MWCNTs/GO-SDBS/GCE 上的电化学行为,并对缓冲溶液的酸度进行优化。结果显示,MWCNTs 的外径为 4 nm~6 nm;合成的 GO 呈褶皱状的片层材料。SY 氧化峰电流与其浓度在 2.0×10^{-7} mol/L~4.0×10^{-5} mol/L 范围内呈良好的线性关系,检测限为 1.0×10^{-7} mol/L,表明该修饰电极具有良好的稳定性。在最优化条件下对九制陈皮饮料中微量日落黄进行测定,结果表明该方法具有较高的准确度和精密度。

关键词:多壁碳纳米管;石墨烯;日落黄;电化学行为;循环伏安法

Multi-walled Carbon Nanotubes/Graphene Modified Electrode for the Detection of Sunset Yellow in Beverages

LI Hai-long, SUO Xi-dong, QIAO Hong-tao, YIN Ai-ping*
(Department of Chemistry, Xinzhou Teachers´ University, Xinzhou 034000, Shanxi, China)

Abstract: This paper aimed to develop a multi-walled carbon nanotubes/graphene (MWCNTs/GO) electrochemical electrode with excellent performance for the determination of sunset yellow (SY). At 25 ℃, MWCNTs were ultrasonically dispersed in chitosan (CTS) solution to yield the CTS-MWCNTs dispersion. Then the dispersion was dropped on the glassy carbon electrode (GCE) surface, and the modified GCE was soaked in GO-sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) composite solution for 2 min, to result in the CTS-MWCNTs/GO-SDBS/GCE. The electrochemical behaviors of SY were studied at CTS-MWCNTs/GO-SDBS/GCE by cyclic voltammetry (CV) and differential pulse voltammetry (DPV) in HAc-NaAc. The pH of the buffer solution was optimized. The results showed that the outer diameter of MWCNTs fell in the range of 4 nm~6 nm. According to the SEM image, the synthesized GO was shown as wrinkled sheets. The peak current and the concentration of SY showed good linear relationship within the concentration range of 2.0×10^{-7} mol/L-4.0×10^{-5} mol/L under the optimized conditions and the detection limit was 1.0×10^{-7} mol/L, suggesting the stability of the modified electrode. Furthermore, the method was employed to determine the content of SY in a beverage (made with Citri Reticulatae Pericarpium) under optimized conditions, showing satisfactory accuracy and precision.

Key words: multi-walled carbon nanotubes; graphene; sunset yellow; electrochemical behavior; cyclic voltammetry

基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2021L454);山西省基础研究计划资助项目(20210302124332);山西省高等学校科技创新项目(2019L0836);忻州市科技局项目(20190404);忻州师范学院科研项目(2018KY10)
作者简介:李海龙(1983—),男(汉),讲师,博士研究生,研究方向:纳米材料电化学。
* 通信作者:尹爱萍(1964—),女(汉),教授,硕士研究生,研究方向:有机非线性光学材料化学。

引文格式：
李海龙，索习东，乔洪涛，等. 多壁碳纳米管/石墨烯修饰电极检测饮料中日落黄[J].食品研究与开发，2022，43(21)：170-175.
LI Hailong，SUO Xidong，QIAO Hongtao，et al. Multi-walled Carbon Nanotubes/Graphene Modified Electrode for the Detection of Sunset Yellow in Beverages[J]. Food Research and Development，2022，43(21)：170-175.

日落黄(sunset yellow，SY)是一种具有特殊性质的偶氮类染色素，同时也是一种常用的色素，在食品和药物方面均具有增加外观的着色效果[1-3]。我国GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》规定，日落黄在水果饮料、乳酸菌饮料的最大允许使用量不超过0.10 g/kg。若长期食用含有日落黄的食品，则会出现过敏、腹泻等严重症状，且当摄入量超过肝脏负荷时，会对人体造成极大伤害[4]。迄今为止，研究者探究了很多种检测日落黄含量的方法，包括能消除干扰的双波长补偿计算法[5]、应用范围比较广泛的高效液相色谱法[6]、灵敏度比较高的荧光光谱法[7]、操作相对简便的分光光度法[8]、具有良好选择性的共振瑞利散射光谱法[9]和电化学法[10-12]等。电化学方法不仅灵敏度高、准确度好，还有仪器设备易得等优点，引起了人们的普遍关注。

石墨烯[13-14]是由碳原子构成、呈六角形状，并且形成像蜂窝一样的晶格似的一层薄薄的膜。它拥有十分好的导热性能、电导性能、透光性能，并且拥有高强度、超轻薄等优良特征，被普遍应用在锂电池材料、太阳能材料，还被运用在薄膜晶体管的制备、传感器、半导体器件、复合材料制备等方面[15-16]，并且都取得了较佳的效果。目前，采用电化学方法测定日落黄时，存在电极修饰物易脱落、选择性不高且检测过程容易受到干扰等问题。为了解决这些问题，研究者尝试利用材料的协同效应或者层层组装的方式修饰电极，制得性能优良的传感器，极大地提高了电极的抗干扰能力及稳定性[17-18]。

本试验利用酸性条件下带正电荷的壳聚糖与带负电荷的十二烷基苯磺酸钠的静电相互作用，将壳聚糖-多壁碳纳米管(chitosan-multi-walled carbon nanotubes，CTS-MWCNTs)的分散液修饰在玻碳电极(glassy carbon electrode，GCE)表面，然后将其在石墨烯-十二烷基苯磺酸钠(graphene-sodium dodecyl benzene sulfonate，GO-SDBS)复合溶液中浸泡2 min，制成稳定的壳聚糖-多壁碳纳米管/石墨烯-十二烷基苯磺酸钠复合膜修饰玻碳电极(CTS-MWCNTs/GO-SDBS/GCE)。将这两种纳米材料修饰到电极表面能很好地催化日落黄的氧化还原反应，同时，该修饰电极可用于测定样品中日落黄，为日落黄的选择性检测提供一种快速、准确的新方法。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

多壁碳纳米管(98%)：中国科学院成都有机化学有限公司；壳聚糖：Sigma公司；醋酸、醋酸钠、硝酸钠、浓硫酸、高锰酸钾、过氧化氢、十二烷基苯磺酸钠、日落黄、盐酸、氢氧化钠(均为分析纯)：国药集团化学试剂有限公司。试验用水为忻州师范学院化学系无机基础实验室自备超纯水。

1.2 仪器与设备

电子分析天平(FA1004B)：上海精密仪器仪表有限公司；高功率数控超声波清洗器(KQ-2000KDB)：昆山市超声仪器有限公司；电化学工作站(CHI760e)：上海辰华仪器有限责任公司；高效液相色谱仪(HPLC-2030)：日本岛津公司；场发射扫描电镜(SU-8010)：日本日立公司；透射电子显微镜(Tecnai G2F20)：美国FEI公司；真空干燥箱(DZF-6012)：上海一恒科学仪器有限公司；红外线快速干燥箱(WS70)：郑州标和仪器有限公司。

1.3 石墨烯的制备

采用Si等[19]的方法合成氧化石墨烯(oxidized graphene，GO)：准确称量3.0 g石墨粉、3.0 g $NaNO_3$和138 mL H_2SO_4加入圆底烧瓶中，混合均匀，在冰浴的条件下，边搅拌边缓慢加入$KMnO_4$ 18 g，搅拌1h后，将溶液升温到25 ℃，再慢慢加入100 mL水并将温度升高至90 ℃，搅拌30 min。加入300 mL水和100 mL 30%过氧化氢，最后用水反复洗涤、4 000 r/min离心约15次直至中性。把所得滤饼置于烘箱中干燥12 h得到GO，待用。

1.4 CTS-MWCNTs/GO-SDBS/GCE的制备

称量多壁碳纳米管(MWCNTs)粉末1.0 mg，再添加1 mL的壳聚糖(CTS)溶液，超声分散30 min得到1 mg/mL的CTS-MWCNTs分散液。待用。

用0.05 μm的氧化铝粉把电极表面打磨光滑，超纯水冲洗干净电极表面，分别在无水乙醇、水中超声清洗2次，自然风干。然后将6 μL的CTS-MWCNTs分散液滴在玻碳电极表面，用红外灯将其烘干并冷却。最

后用 3 mg/mL 的 GO–SDBS 复合溶液浸泡 2 min 后，室温（25 ℃）下晾干，得到 CTS–MWCNTs/GO–SDBS/GCE。将 6 μL 的 CTS–MWCNTs 分散液滴在干净的玻碳电极表面，红外烘干，冷却后得到 CTS–MWCNTs/GCE；将电极放置在 3 mg/mL GO–SDBS 复合溶液浸泡 2 min 后，常温晾干，得到 GO–SDBS/GCE。

1.5　试验方法

扫描电镜：将样品粉末均匀分布在样品台的导电胶上，然后推入样品仓，样品仓抽真空，在 5 kV 工作电压、工作距离 8 mm 条件下采集样品扫描电镜信息。

透射电镜：将样品粉末分散在乙醇溶液中进行 15 min 超声分散，将分散好的样品液滴在铜网上面，让其自然干燥，使样品分散在铜网上，推入样品仓，样品仓抽真空，采用 20 kV 工作电压进行透射测试，采集样品透射电镜信息。

日落黄电化学行为研究、扫描速率研究等采用循环伏安法（cyclic voltammetry，CV），工作曲线的绘制及样品分析采用微分脉冲伏安（differential pulse voltammetry，DPV）法。

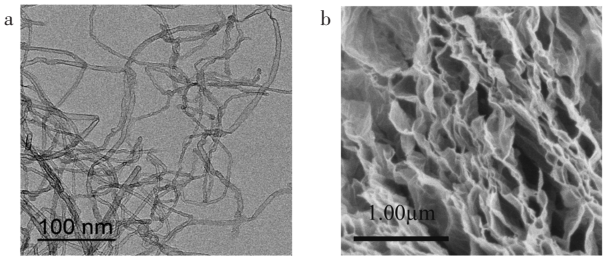
1.6　数据处理

电化学图形的绘制及数据处理采用的是 origin 8.0 软件，图形的编辑采用的是 Adobe illustrator 软件。

2　结果与分析

2.1　材料的形貌表征

图 1 为多壁碳纳米管和氧化石墨烯的形貌表征。



a.透射电镜图；b.扫描电镜图。

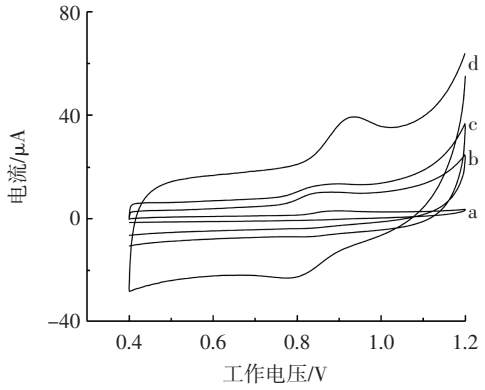
图 1　多壁碳纳米管的透射电镜图和氧化石墨烯的扫描电镜图

Fig.1　The transmission electron microscopy image of MWCNTs and the scanning electron microscopy image of GO

从图 1a 可以看出，多壁碳纳米管相互缠绕在一起，大部分外径在 4 nm~6 nm，且多壁碳纳米管的纯度很高。从图 1b 可以看出，氧化石墨烯呈褶皱状的片层材料，这种特征形貌可以使石墨烯稳定存在。

2.2　日落黄在不同电极上的电化学行为

用循环伏安法研究日落黄在不同电极上的电化学行为，结果见图 2。



a. 裸电极；b. CTS–MWCNTs/GCE；c. GO–SDBS/GCE；d. CTS–MWCNTs/GO–SDBS/GCE。

图 2　不同修饰电极的循环伏安图

Fig.2　Cyclic voltammograms of different modified electrodes

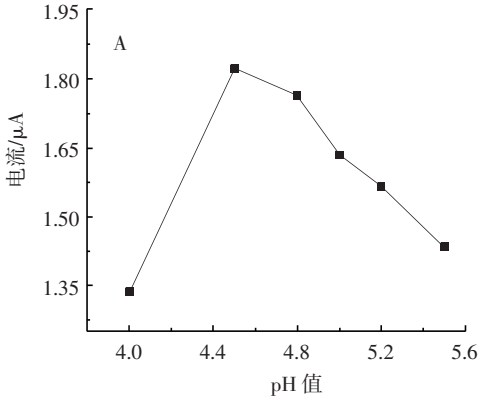
由图 2 可知，在裸 GCE 上日落黄出现了一个氧化峰和一个不明显的还原峰（a），氧化峰及还原峰的峰电位分别为 0.883 V 和 0.902 V。当电极表面修饰壳聚糖–多壁碳纳米管分散液或石墨烯–十二烷基苯磺酸钠溶液后，氧化峰电流明显增大，并没有出现明显的还原峰（b、c）。将 CTS–MWCNTs 和 GO–SDBS 纳米材料复合到一起后，出现了峰形较好的氧化还原峰（d）；相比单个修饰材料（CTS–MWCNTs 或 GO–SDBS），氧化峰电流增加了 5 倍，还原峰电流增加了 40 倍，且日落黄在该复合膜修饰电极上展现出了较好的可逆性。说明将两种纳米材料修饰到电极表面能很好地催化日落黄的氧化还原反应，可能原因为两者的协同效应[20]。

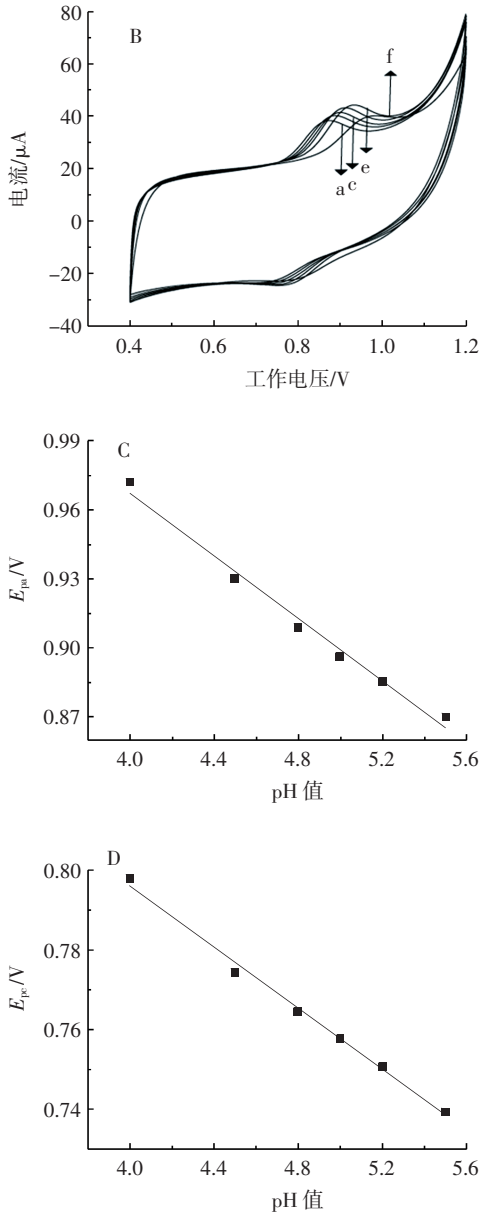
2.3　测定条件优化

2.3.1　缓冲液 pH 值对峰电流（I_p）和峰电位（E_p）的影响

缓冲溶液不同 pH 值对峰电流和峰电位的影响见图 3。

如图 3 所示，试验选择 0.2 mol/L HAc–NaAc 缓冲溶液作为底液时，I_{pa}（氧化峰电流）随着 pH 值增大而逐渐增大，但当 pH 值从 4.5 增大到 5.5 时，I_{pa} 反而下降。因此选择 HAc–NaAc 缓冲溶液的 pH 值为 4.5。如图





A. pH 值与氧化峰电流 I_{pa} 的关系；B.不同 pH 值下的循环伏安图，a→f 对应的 pH 值分别为 5.50、5.20、5.00、4.80、4.50、4.00；C.pH 值与氧化峰电位（E_{pa}）关系图；D. pH 值与还原峰电位（E_{pc}）关系图。

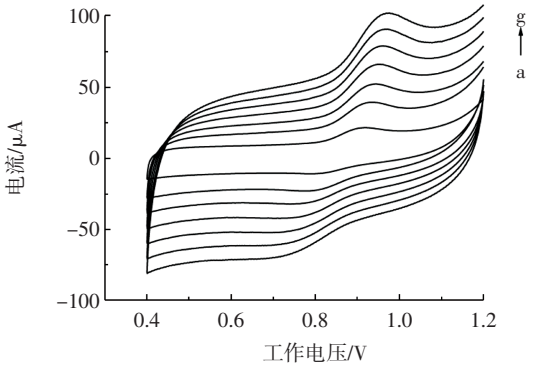
图 3　缓冲溶液不同 pH 值对峰电流和峰电位的影响

Fig.3　Effect of pH of buffer solution on I_p and E_p

3C、图 3D 所示，氧化峰（E_{pa}）与还原峰（E_{pc}）的峰电位均随着 pH 值的增大而变小的趋势，说明 SY 的氧化还原过程有质子参与。得到两者之间的关系式：E_{pa}=1.241−0.063pH，R^2 为 0.994 5；E_{pc}=0.970−0.046pH，R^2 为0.997 0。对于可逆电极过程，依据关系式 $E_p=E^0-0.059\,(m/n)\,pH$，（其中 m 为质子转移数，n 为电子转移数），得到 m/n=1。表明参与电极反应的质子数与电子数相等。

2.3.2　扫描速率的影响

不同扫描速率下的循环伏安图见图 4。

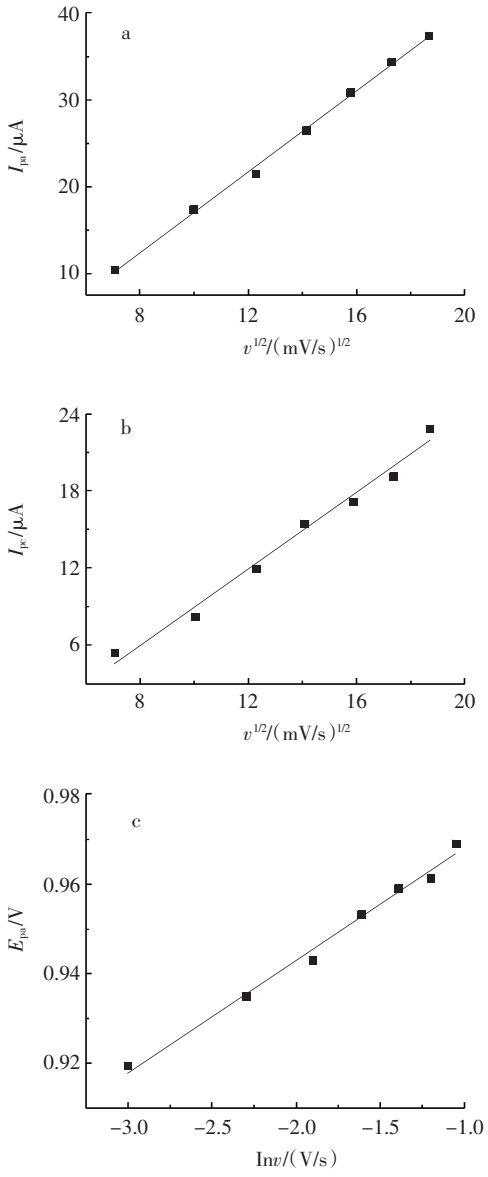


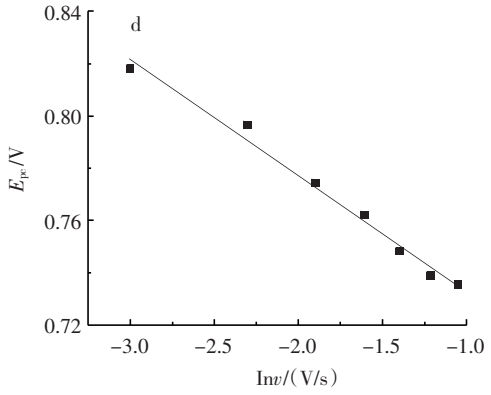
a~g：50、100、150、200、250、300、350 mV/s。

图 4　不同扫描速率下的循环伏安图

Fig.4　The cyclic voltammograms of SY with different scan rates

从图 4 可以看出，在 50 mV/s~350 mV/s，I_{pc} 及 I_{pa} 均随着扫描速率的加快而增大。扫描速率与峰电流和峰电位的关系见图 5。





a.氧化峰电流(I_{pa})与 $v^{1/2}$ 的关系;b.还原峰电流(I_{pc})与 $v^{1/2}$ 的关系;c.氧化峰电位(E_{pa})与 Inv 的关系;d.还原峰电位(E_{pc})与 Inv 的关系。

图 5　扫描速率与峰电流和峰电位的关系图

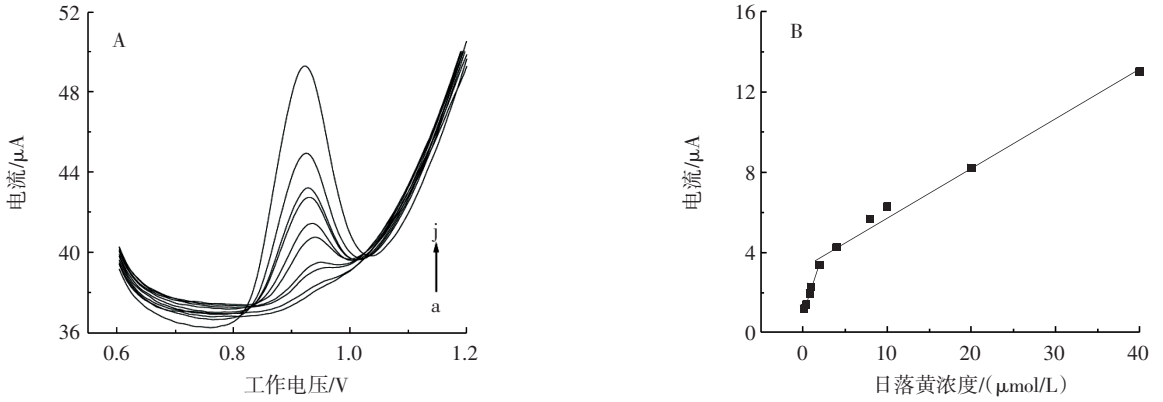
Fig.5　The relations between scan rates and I_p or E_p

由图 5 可知,扫描速率与峰电流的关系 I_{pc}=−5.961+1.491$v^{1/2}$,R^2 为 0.994 5;I_{pa}=−6.400+2.341$v^{1/2}$,R^2 为 0.999 3。峰电流与 $v^{1/2}$ 成正比,说明 SY 在该修饰电极上的反应过程受扩散控制。如图 5c、图 5d 所示,E_{pa} 随着扫描速率的加快逐渐正移,而 E_{pc} 则逐渐负移。得到 E_{pa} 与扫描速率 ln$v$ 的关系为 E_{pa}=0.993+0.025 ln$v$,R^2 为 0.995 5;E_{pc} 与扫描速率 ln$v$ 的关系为 E_{pc}=0.688−0.045 ln$v$,R^2 为 0.994 7。

2.4　工作曲线的绘制

在 0.2 mol/L pH4.5 的 HAc−NaAc 缓冲溶液中,以日落黄浓度为横坐标,相应的氧化峰电流值为纵坐标,绘制日落黄(SY)的 DPV 曲线,具体结果见图 6。

由图6B 可知,在 2.0×10^{-7} mol/L~2.0×10^{-6} mol/L 时,



A.不同浓度日落黄的 DPV 叠加图(a~j 分别为 0.2、0.4、0.8、1.0、2.0、4.0、8.0、10.0、20.0、40.0 μmol/L);B.峰电流与日落黄浓度的校正曲线图。

图 6　日落黄的工作曲线

Fig.6　The working curve of SY

日落黄浓度与峰电流呈较好的线性关系:I_p=1.051+1.171c,R^2 为 0.999 0;当浓度在 2.0×10^{-6} mol/L~4.0×10^{-5} mol/L时,标准工作曲线为 I_p=3.421+0.244c,R^2 为 0.995 2。检测限为 1.0×10^{-7} mol/L。试验结果比许多文献检测范围大[21-22],表明壳聚糖−多壁碳纳米管/石墨烯−十二烷基苯磺酸钠复合膜具备良好的电催化作用,可以作为检测日落黄的新方法。

2.5　饮料样品分析

准确量取 100 μL 九制陈皮饮料加入到 10 mL、0.2 mol/L 醋酸醋酸钠缓冲溶液(pH4.5)中,按照 2.4 中试验方法测定待测液的 DPV。试验未检测出日落黄的含量,说明溶液中日落黄含量低于该方法的检测限1.0×10^{-7} mol/L(即 4.5 mg/kg),即该饮料日落黄含量很低,远远小于国标规定的日落黄最大使用量(100.0 mg/kg)。采用标准加入法进行加标回收试验,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,回收率在 98.5%~102.0%,相对标准偏差在 2.4%~4.5%。表明试验建立的新方法测定样品中 SY 的含量具有较高的准确度和精密度。

表 1　饮料中日落黄含量的测定结果(n=5)

Table 1　Determination result of SY in beverages (n=5)

样品	加入值/(mg/kg)	测得值/(mg/kg)	回收率/%	相对标准偏差/%
1	10.0	10.2	102.0	3.4
2	50.0	49.8	99.6	2.4
3	100.0	98.5	98.5	4.5

3　结论

在壳聚糖−多壁碳纳米管/石墨烯−十二烷基苯磺酸钠复合膜修饰玻碳电极(CTS−MWCNTs/GO−SDBS/GCE)上,日落黄的 I_p 与其浓度(2.0×10^{-7} mol/L~4.0×10^{-5} mol/L)呈较好的线性关系,检测限为 1.0×10^{-7} mol/L。对饮料中日落黄含量进行测定,取得了较好的效果。

参考文献：

[1] 刘瑜, 赵颖, 金雁, 等. 果汁饮料中合成色素检测方法的改进[J]. 中国食品添加剂, 2011(4): 185-188.
LIU Yu, ZHAO Ying, JIN Yan, et al. Improvement on the method of artificial color determination in fruit drinks[J]. China Food Additives, 2011(4): 185-188.

[2] 赫春香, 杨晶. 日落黄分子印迹电化学传感器的研制与应用[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2012, 35(1): 78-82.
HE Chunxiang, YANG Jing. Preparation of sunset yellow sensor based on molecularly imprinting[J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 2012, 35(1): 78-82.

[3] 王俊. 食用合成色素日落黄和柠檬黄荧光光谱的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
WANG Jun. Investigation on fluorescence spectra of synthetic food dyes sunset yellow and tartrazine[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.

[4] 杨燕飞, 张俊燕, 陈晓风. 五味子中非法添加苋菜红、日落黄、亮蓝的检测[J]. 食品与药品, 2015, 17(1): 53-55.
YANG Yanfei, ZHANG Junyan, CHEN Xiaofeng. Detection of pigments added illegally in *Schisandrae chinensis* fructus[J]. Food and Drug, 2015, 17(1): 53-55.

[5] 陈海春. 双波长补偿计算法同时测定饮料中的日落黄及胭脂红[J]. 化学分析计量, 2005, 14(1): 54-55.
CHEN Haichun. Simultaneous determination of sunset yellow and ponceau 4R in beverage by dual wavelength equalizing-account method[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2005, 14(1): 54-55.

[6] 白洋, 潘城, 任小英, 等. 高效液相色谱法检测食品中8种直接染料和6种合成色素[J]. 分析科学学报, 2020, 36(4): 567-571.
BAI Yang, PAN Cheng, REN Xiaoying, et al. Simultaneous determination of 8 kinds of direct dyes and 6 kinds of synthetic pigments in food by high performance liquid chromatography[J]. Journal of Analytical Science, 2020, 36(4): 567-571.

[7] 汤小玉, 罗云敬, 魏安琪, 等. 同步与三维荧光光谱法研究日落黄和人血清蛋白的相互作用[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(10): 3129-3135.
TANG Xiaoyu, LUO Yunjing, WEI Anqi, et al. Application of synchronous and three-dimensional fluorescent spectrometry in studies on interaction between sunset yellow and human serum albumin[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(10): 3129-3135.

[8] 李婉君, 张振宇, 朱秋芳, 等. 沸石修饰聚丙烯酰胺复合材料富集——分光光度法测定日落黄色素[J]. 山东化工, 2017, 46(6): 73-76.
LI Wanjun, ZHANG Zhenyu, ZHU Qiufang, et al. Spectrophotometric determination of sunset yellow after preconcentration with zoelite modified polyacrylamide composite[J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(6): 73-76.

[9] CHEN F, LI S Y, PENG J D, et al. Study on simultaneous determination of three nitroimidazole residues in honey by high performance liquid chromatography-resonance Rayleigh scattering spectra[J]. Microchemical Journal, 2018, 141: 423-430.

[10] KOLOZOF P A, FLOROU A B, SPYROU K, et al. *In-situ* tailoring of the electrocatalytic properties of screen-printed graphite electrodes with sparked generated molybdenum nanoparticles for the simultaneous voltammetric determination of sunset yellow and tartrazine[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 304: 127268.

[11] TKACH V, KUSHNIR M .Theoretical description for sunset yellow electrochemical determination in food, assisted by poly(3, 4-ethylenedioxypyrrole)-VO(OH) composite[J]. Biointerface Research in Applied Chemistry, 2020, 11(4): 11519-11524.

[12] LI L Q, ZHENG H J, GUO L L, et al. A sensitive and selective molecularly imprinted electrochemical sensor based on Pd-Cu bimetallic alloy functionalized graphene for detection of amaranth in soft drink[J]. Talanta, 2019, 197: 68-76.

[13] LEE C G, WEI X D, KYSAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.

[14] QIN W Z, CHEN C, ZHOU J P, et al. Synergistic effects of graphene/carbon nanotubes hybrid coating on the interfacial and mechanical properties of fiber composites[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(6): 1457.

[15] OLIVEIRA G A, CARDENAS CONTRERAS E M, BANDARRA FILHO E P. Experimental study of thermophysical properties of MWCNT and graphene coolant nanofluids for automotive application[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(3): 1-13.

[16] SHIN H, LIM M Y, OH J, et al. Preparation of bottom-up graphene oxide using citric acid and tannic acid, and its application as a filler for polypropylene nanocomposites[J]. RSC Advances, 2021, 11(13): 7663-7671.

[17] WANG M L, ZHANG J J, GAO Y J, et al. Determination of sunset yellow in soft drinks at attapulgite modified expanded graphite paste electrode[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2013, 161(3): H86-H91.

[18] VIKRAMAN A E, THOMAS D, CYRIAC S T, et al. Kinetic and thermodynamic approach in the development of a voltammetric sensor for sunset yellow[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2014, 161(14): B305-B311.

[19] SI Y C, SAMULSKI E T. Synthesis of water soluble graphene[J]. Nano Letters, 2008, 8(6): 1679-1682.

[20] NATARAJAN K, SARAF M, GUPTA A K, et al. Nanostructured δ-MnO_2/$Cd(OH)_2$ heterojunction constructed under ambient conditions as a sustainable cathode for photocatalytic hydrogen production[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(16): 7584-7593.

[21] 张金磊, 段艳, 蒙辉雁. 碳包镍/氮掺杂石墨烯复合膜修饰电极测定日落黄的研究[J]. 山东化工, 2017, 46(11): 95-97.
ZHANG Jinlei, DUAN Yan, MENG Huiyan. Determination of sunset yellow by carbon coated nickel/nitrogen doped graphene composite film modified electrode[J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(11): 95-97.

[22] 初红涛, 于淼, 陈嘉琪, 等. 循环伏安法快速测定饮料及果冻中柠檬黄和日落黄[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 80-83, 98.
CHU Hongtao, YU Miao, CHEN Jiaqi, et al. A quick determination of the content of tartrazine and sunset yellow FCF in beverages and jelly by cyclic voltammetry[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 80-83, 98.

加工编辑：冯娜
收稿日期：2021-07-07