

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.09.020

纳米氧化铈掺杂菊芋桔秆芯碳材料的制备及 对日落黄的检测

马先鸣, 汪璐, 陶亮亮, 叶礼卉, 刘健

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章采用热解经硝酸铈浸渍的菊芋桔秆芯(*Jerusalem artichoke* straw, JAS)制备负载氧化铈纳米颗粒的生物碳材料,表征CeO₂/JAS材料的理化性质,并分析其在电化学应用方面的潜力。该材料被修饰在电解质溶液栅控石墨烯场效应晶体管(solution-gated graphene field-effect transistor, SGGT)的栅极上,在模拟的软饮料体系中完成对色素的检测,其中对日落黄的响应最好,该修饰的栅极对日落黄的检测限为300 nmol/L,灵敏度曲线斜率为29.2。一系列实验结果表明,CeO₂/JAS材料可以很好地提升对日落黄的检测性能。因此,该研究为其在电化学领域的应用提供了一定参考,并且对农业废弃物资源再利用与食品安全检测均具有一定的意义。

关键词:菊芋桔秆芯(JAS);热解;纳米材料;电化学;电解质溶液栅控石墨烯场效应晶体管(SGGT);日落黄
中图分类号:TB333.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)09-1284-08

Preparation of nano-sized cerium oxide doped carbon material of *Jerusalem artichoke* straw and detection of sunset yellow

MA Xianming, WANG Lu, TAO Liangliang, YE Lihui, LIU Jian

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: Biochar materials impregnated with cerium oxide nanoparticles were prepared by pyrolysis of *Jerusalem artichoke* straw(JAS) impregnated with cerium nitrate solution. The physical and chemical properties of CeO₂/JAS were characterized, and its potential for electrochemical applications was described. The biochar material was modified on the gate of the solution-gated graphene field-effect transistor(SGGT) to detect the pigment in the simulated soft drink system, and the response to sunset yellow was the best. The limit of detection of sunset yellow is 300 nmol/L, and the slope of sensitivity curve is 29.2. A series of experimental results demonstrated that CeO₂/JAS material can improve the detection performance of sunset yellow. This study provides reference for the application of the material in the field of electrochemistry, and is of significance for the reuse of agricultural waste resources and food safety detection.

Key words: *Jerusalem artichoke* straw(JAS); pyrolysis; nanomaterials; electrochemistry; solution-gated graphene field-effect transistor(SGGT); sunset yellow

菊芋作为一种逐渐被广泛种植的农作物,在成熟后,废弃秸秆的通常处理方法是焚烧或掩埋,不利于环保且是一种资源浪费。菊芋除了块茎可食

用,叶子中富含丰富的黄酮类物质外,其秸秆部分也是可以利用的^[1],由于其芯部疏松多孔且富含纤维素、木质素等,非常适合作为生物质热解的材

收稿日期:2021-05-01;修回日期:2021-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31901406);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2020HGTB0044)

作者简介:马先鸣(1995—),男,安徽巢湖人,合肥工业大学硕士生;

汪璐(1984—),女,安徽舒城人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:wanglu@hfut.edu.cn;

刘健(1970—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

料^[2-4],并适用于电极修饰材料^[5]、吸附^[6]或能源利用^[7-8]等领域。

电解质溶液栅控石墨烯场效应晶体管(solution-gated graphene field-effect transistor,SGGT)是一种较为新型的电化学检测的器件^[9-10],相比于传统电化学工作站的检测,基于SGGT的电化学检测除了拥有传统电化学的优势之外,由于其电解质的存在,可以很好地对待测物质进行实时检测,了解溶液中待测物质的实时浓度^[11-13]。SGGT主要由栅极、源极、漏极3个电极及覆盖在源极与漏极间的石墨烯沟道组成,是一个典型的三电极体系^[14]。提升SGGT器件检测性能的最有效方法是对栅极进行改性材料的修饰^[15-16]。其中在改性材料的选择上,碳基纳米材料是当前的主流研究。抛开精密的制作工艺及昂贵的成本,利用生物质进行热解并掺杂金属制备碳基纳米材料是一种可行的方法^[17-19]。以生物质热解得到的碳为载体,可以提高电化学检测性能的金属氧化物负载在碳上^[20-22],将这种复合碳材料修饰在栅极上提升SGGT器件对待测物质的电催化能力,是一项很有前景的研究。

食品安全问题随着经济发展变得更加严峻,食用色素的滥用更让消费者在选择食品时迷茫甚至害怕^[23-24]。除却复杂操作、成本较大的传统检测手段^[25-27],新型的电化学检测因其小巧便携且快速的优势逐渐被食品产业使用。因此本文以菊芋秸秆芯(*Jerusalem artichoke straw*,JAS)、硝酸铈水溶液和氯化铈水溶液作为主要原料,通过浸渍预处理与热解的方法制备修饰SGGT栅极所需的改性材料,并针对食品安全中色素使用的问题,完成模拟软饮料体系中对日落黄的检测,并对很好提升日落黄检测性能的纳米氧化铈掺杂菊芋秸秆芯碳材料(CeO_2/JAS)进行表征。为生物物质的高效利用提供了可行方法,为电化学检测领域提供了一种新的改性材料,同时为食品产业的安全检测提供了一种新型的快速检测方法。

1 实验材料和方法

1.1 材料与自组设备

菊芋秸秆采集于安徽南部;六水合硝酸铈和氯化铈(上海麦克林生化试剂有限公司),AR;单层石墨烯(合肥微晶股份有限公司);日落黄和柠檬黄(上海阿拉丁生化科技股份有限公司),BS;丙酮、乙醇、柠檬酸、碳酸钠、磷酸二氢钾和碳酸氢钠(国药集团化学试剂有限公司),AR;磷酸盐缓冲溶液(生物工程(上海)股份有限公司),pH=7.4。

自组SGGT电化学工作站由2个Sourcemeter 2400高精度数字源表(Keithley公司)、铁架台、磁力搅拌器、安装Labview的电脑组成。

1.2 改性材料的制备

参考文献[5]制备菊芋掺杂氧化铈纳米酶复合材料的方法,制备负载氧化铈与氧化锌的菊芋秸秆芯碳材料(CeO_2/JAS 与 ZnO/JAS),主要制备步骤为:

清洗菊芋秸秆→干燥→剥除外层木质素→粉碎菊芋秸秆芯成段→金属盐溶液浸渍2h→过滤并干燥→800℃热解。

为了形成对比,需要热解制备未掺杂金属盐的菊芋秸秆芯碳材料(JAS)。同时参考文献[28]中制备多孔碳材料的方法,制备KOH活化处理的菊芋秸秆芯碳材料(KOH/JAS),主要制备步骤为:

清洗菊芋秸秆→干燥→剥除外层木质素→粉碎菊芋秸秆芯成粉末(150目筛分)→管式炉中600℃炭化→取出粉末混合KOH再次管式炉中800℃热解→取出粉末HCl搅拌洗涤再利用超纯水洗涤至中性。

1.3 SGGT器件的制备

参考文献[29]的SGGT制备流程并对部分环节优化,主要制备流程包括:制备玻璃基底→制备图案化金电极→转移石墨烯→清洗器件→封装。制备好的SGGT器件包含栅极、源极、漏极及覆盖在源漏极间的石墨烯沟道,用于改性的碳材料利用滴涂法滴加在栅极上。

1.4 材料表征与电化学检测

1.4.1 材料基本理化性质表征

制备出的样品 CeO_2/JAS 材料表面结构形貌特征由GeminiSEM 500肖特基场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscope,FESEM)确定;样品表面的铈元素定性由FESEM配套的牛津Aztec系列X射线能谱仪(energy dispersive spectroscopy,EDS)确定;材料表面附着的 CeO_2 晶格条纹、尺寸及形貌由JEM-2100F场发射透射电子显微镜(field emission transmission electron microscope,FETEM)确定;样品表面的碳、氧及铈元素的存在与分布由ESCALAB 250Xi X射线光电子能谱仪(X-ray photoelectron spectroscopy,XPS)进行再次确认;样品的晶体结构通过X'Pert MPD(仪器运行X光管电压40kV,电流40mA)从 $10^\circ\sim 60^\circ$ 的 2θ 范围以 $1^\circ/\text{min}$ 获得。

1.4.2 电化学检测

电化学表征主要分为2个部分:第1部分为传

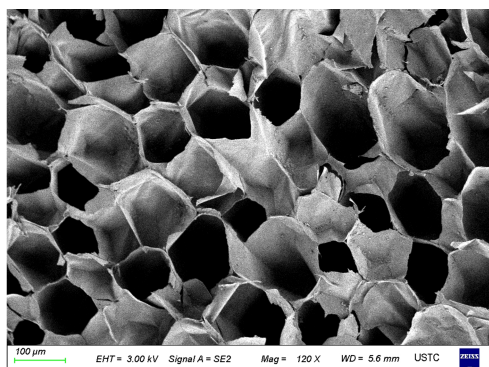
统电化学表征,主要为循环伏安法(cyclic voltammetry, CV),电位扫描范围为 0.4~0.9 V,扫描速率为 0.05 V/s,溶液为含有 100 $\mu\text{mol/L}$ 日落黄的 1 \times 磷酸盐缓冲溶液(phosphate buffer saline, PBS);第 2 部分为 SGGT 电化学性能表征,SGGT 表征主要包括沟道电流随栅极电压变化曲线(即转移曲线, $I_{\text{DS}}-V_{\text{G}}$)和沟道电流随时间变化曲线(即时间电流响应曲线, $I_{\text{DS}}-t$)。实验开始后,通过 Labview 软件控制数字源表,软件会自动记录实时实验数据并输出图像用于分析和处理。转移特性曲线测定参数为:控制沟道电压为定值($V_{\text{DS}}=0.05\text{ V}$),变化栅极电压(V_{G} 为 0~0.8 V)来记录沟道电流(I_{DS})的变化量,其中栅极电压的变化速率为 0.01 V/s;时间电流响应曲线测定参数为:控制沟道电压和栅极电压为定值($V_{\text{DS}}=0.05\text{ V}$, V_{G} 为 0~0.8 V),记录随时间变化而变化的沟道电流值。

2 结果与讨论

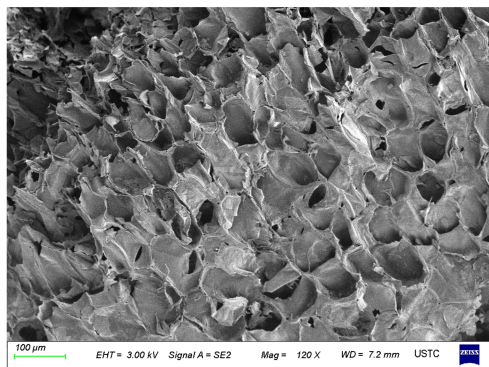
2.1 CeO_2/JAS 的基本理化性质表征

2.1.1 形貌表征结果分析

为了直观地观察菊芋秸秆芯在热解后形成的多孔结构及硝酸铈在菊芋秸秆芯上转化为 CeO_2 纳米颗粒,利用 FESEM 来观察材料的形貌特征。2 种菊芋碳材料 FESEM 图如图 1 所示。



(a) 未热解的 JAS

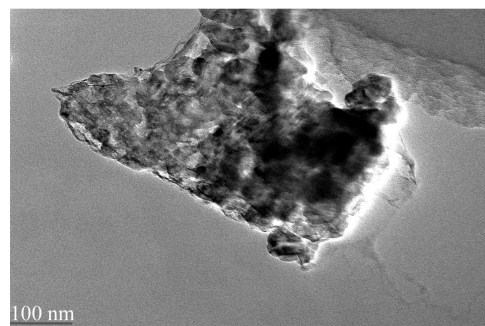


(b) 800 °C 热解的 CeO_2/JAS

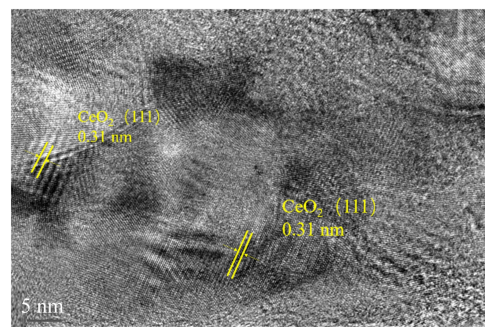
图 1 JAS 和 CeO_2/JAS 的 FESEM 图

图 1a 所示为剥去外层木质部分的菊芋秸秆芯截面图,从图 1a 可以看出,菊芋秸秆芯拥有疏松多孔的结构,说明其适合制备电化学或吸附的生物材料。图 1b 所示为 800 °C 热解制备的掺杂硝酸铈的菊芋秸秆芯碳材料,从图 1b 可以看出,在 800 °C 的热解条件下,材料仍然呈现多孔结构,但孔径明显变小,说明材料的比表面积在热解作用下变大,可以吸附更多的待测物质,从而促进电化学反应的进程。

CeO_2/JAS 的 FETEM 图如图 2 所示。从图 2a 可以看出,材料本身呈良好的疏松多孔的结构,且 CeO_2 颗粒负载在菊芋秸秆芯热解的碳材料上。从图 2b 可以看出, CeO_2 (111) 面的晶格条纹为 0.31 nm。说明该材料确实是在菊芋秸秆芯表面成功热解制备了 CeO_2 颗粒。



(a)

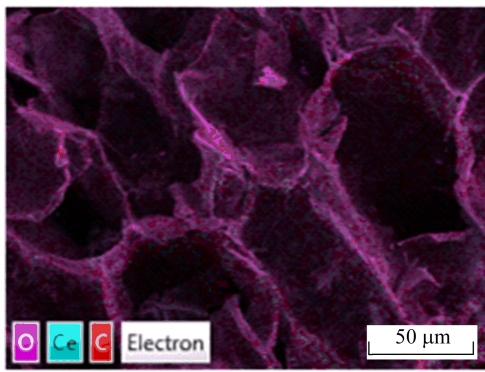


(b)

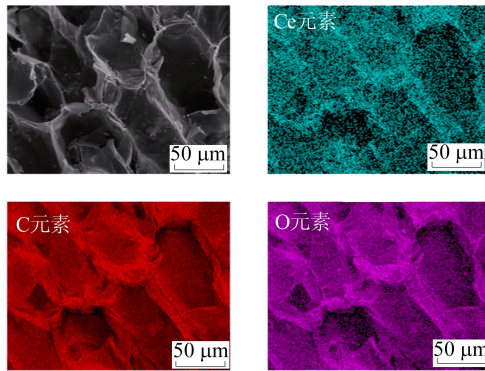
图 2 CeO_2/JAS 的 FETEM 图

2.1.2 EDS 元素分析

通过在 FESEM 上添加 EDS 对 CeO_2/JAS 材料表面进行有效的化学成分分析。800 °C 热解的 CeO_2/JAS 的 EDS 谱图如图 3a 所示。由图 3a 可知,虽然在菊芋秸秆芯内部的孔洞中并未观察到较多的铈元素,但是在对菊芋秸秆芯的表面进行扫描分析时,菊芋秸秆芯表面呈现分布均匀的 C、O 及 Ce 元素,说明浸渍处理将铈均匀地附着在菊芋秸秆芯表面。C、O 和 Ce 3 种元素的分布图如图 3b 所示。



(a) EDS谱图

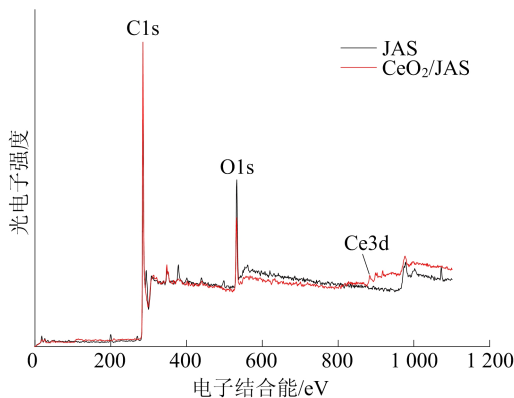


(b) 3种元素的EDS谱图

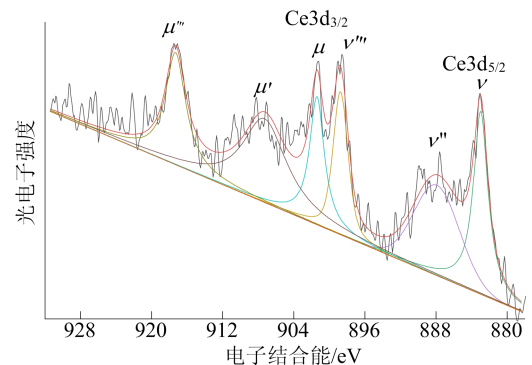
图 3 800 °C热解的 CeO₂/JAS的 EDS 谱图

2.1.3 XPS 能谱分析

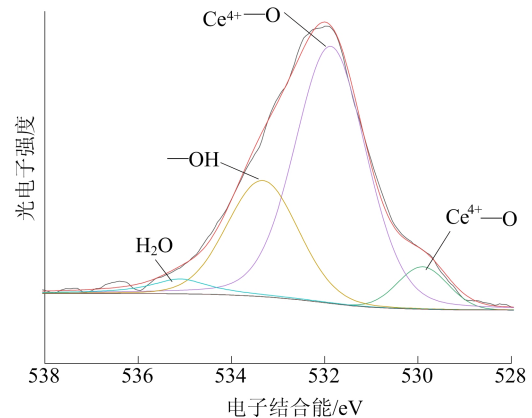
利用 XPS 对材料表面进行简单的化学性质及元素组成验证。800 °C下热解的 CeO₂/JAS的 XPS 能谱如图 4 所示,从图 4 可以看出,未掺杂硝酸铈和掺杂硝酸铈的菊芋桔杆芯在 800 °C下均出现 2 个分别代表 C1s 和 O1s 的原子能吸收峰,说明 2 种材料均由生物质热解衍生出的碳材料。而对掺杂硝酸铈的菊芋桔杆芯热解的碳材料中,出现了关于 Ce3d 的原子吸收峰^[30]。在 300~500 eV 之间出现的较强的峰主要表示 C、O 元素的峰,可以发现掺杂了 CeO₂ 的菊芋桔杆芯材料的 C 元素的峰值较未掺杂前明显升高,而 O 元素的峰值明显下降。



(a) XPS谱图



(b) Ce3d分峰谱图



(c) O1s分峰谱图

图 4 800 °C下热解的 CeO₂/JAS的 XPS 能谱分析

这是由于在热解过程中,大量产生的 CO₂ 气体逸出以及一些可挥发性有机物的逸出引起 C、O 元素含量的变化。而对于 Ce 元素,也对其 XPS 图谱进行了分峰,发现 Ce 元素结合能范围在 880~928 eV 之间,由图 4b 可知,制备的 CeO₂ 中 Ce 元素主要为四价,通过图 4c 中 O 元素的 XPS 分峰图谱中 528~531 eV 段也可以证明。

2.1.4 XRD 分析

结合 SEM-EDS 和 XPS 分析结果,得知铈元素在菊芋桔杆表面均匀分布,通过 XRD 判断其铈元素存在的物质结构,XRD 谱图如图 5 所示。

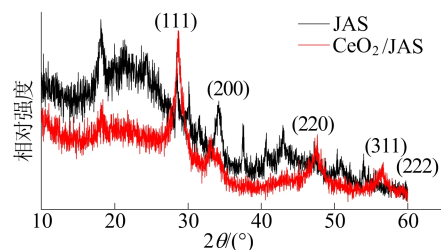


图 5 800 °C下热解的 CeO₂/JAS的 XRD 谱图

从图 5 可以看出,存在 CeO₂ 的吸收峰分别位于 28.6 °、33.1 °、47.5 °、56.4 °、59.2 °,其对应的特征

峰值^[31]也由图中红色括号及数字表示出来,分别为(111)(200)(220)(311)(222),基本可以确定在800℃的热解温度下,铈元素的存在形式为CeO₂。

2.2 传统电化学表征

不同材料修饰的裸金电极对日落黄的 CV 图如图 6 所示,实线围成图形的面积大小可以直观地比较不同修饰的电极对日落黄的电化学催化活性强弱。由图 6 可知,相较于裸金电极,所有菊芋秸秆芯碳材料修饰的金电极都对日落黄的电催化有促进作用,其中利用 CeO₂/JAS 和 ZnO/JAS 材料修饰金电极对日落黄的电化学催化能力增强效果远大于 JAS 与 KOH/JAS,由于 2 种掺杂了金属的菊芋秸秆芯热解得到的碳材料的 CV 图形面积上大致相同,因此选择这 2 种碳材料修饰 SGGT 传感器的栅极进行后续表征。

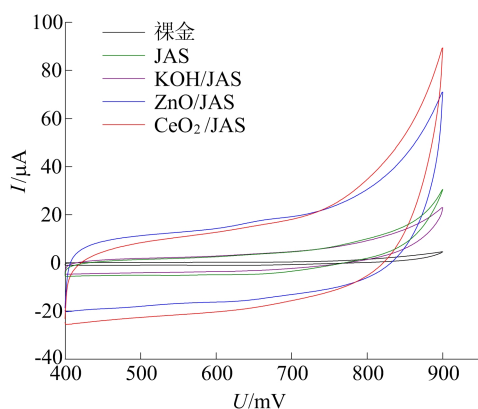
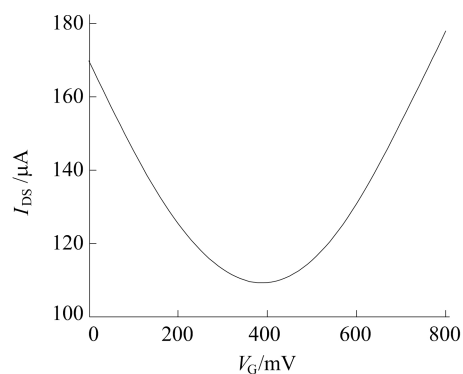


图 6 不同材料修饰金电极对日落黄的 CV 曲线

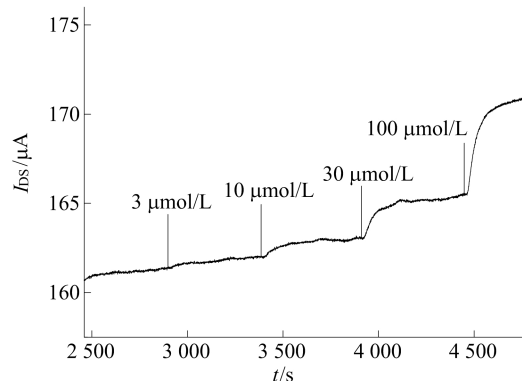
2.3 SGGT 电化学表征

裸金栅极的 SGGT 电化学表征如图 7 所示。由图 7 可知,该转移曲线的狄拉克点为 0.39 V,表明了用于作为沟道材料的石墨烯具有良好的双极性。而对于时间电流响应曲线,在 I_{DS} 首次达到平衡后,开始按照一定浓度梯度向 1×PBS 中加入日落黄,随着日落黄的加入,裸金栅极的 SGGT 的 I_{DS} 也会明显增加。根据国际纯粹与应用化学联合会(International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)对于检测限的定义,若信号大小与噪音大小的比值大于 3,则可以作为传感器的检测限,因此从图 7 可以判定在日落黄加入浓度为 10 μmol/L 时,沟道电流的增加满足检测限的定义,可以得出裸金栅极的 SGGT 对于日落黄的检测限为 10 μmol/L。

CeO₂/JAC 修饰栅极的 SGGT 电化学表征如图 8 所示。

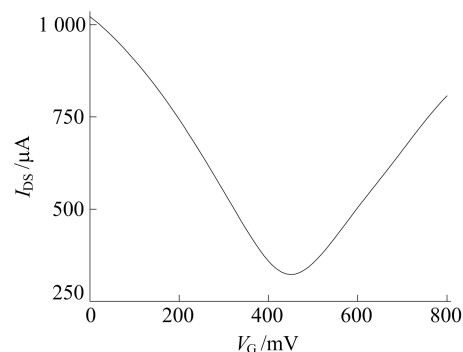


(a) 转移曲线

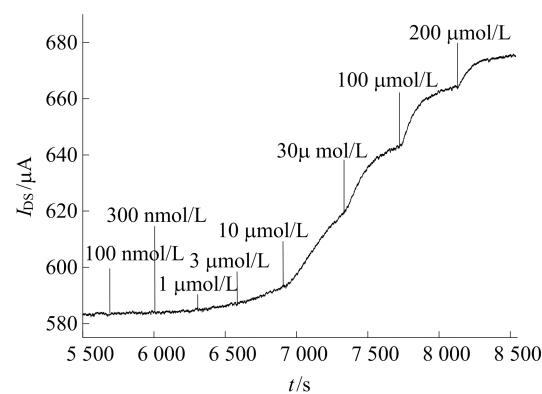


(b) 时间电流响应曲线

图 7 裸金栅极的 SGGT 电化学表征



(a) SGGT 转移曲线



(b) 时间电流响应曲线

图 8 CeO₂/JAS 修饰栅极的 SGGT 电化学表征

从图 8 可以看出,该转移曲线的狄拉克点为

0.45 V,位于裸金栅极的 SGGT 的狄拉克点右边,说明 CeO_2/JAS 的修饰改变了石墨烯的掺杂情况,但未改变石墨烯本身良好的双极性。随着日落黄的添加, I_{DS} 也呈现增加趋势,检测限为 300 nmol/L,相对于裸金栅极的 SGGT 有较大提升。

实验也对另外 2 种菊芋桔杆芯碳材料进行了修饰栅极和 SGGT 电化学表征的工作,由 JAS 修饰栅极的 SGGT 在 $1 \times \text{PBS}$ 中的转移曲线可知,其狄拉克点为 0.51 V,表明用作沟道材料的石墨烯具有良好的双极性。随着日落黄的添加, I_{DS} 也呈现增加的趋势,根据 IUPAC 定义的检测限可以判断出 JAS 修饰栅极的 SGGT 的检测限为 $1 \mu\text{mol/L}$,这个结果相较于裸金电极的检测限提升了 10 倍。

由 ZnO/JAS 修饰栅极的 SGGT 在 $1 \times \text{PBS}$ 中的转移曲线可知,其狄拉克点为 0.49 V,相较于 CeO_2/JAS 有小范围右移,也具有良好的双极性。随着日落黄的添加, I_{DS} 也呈现上升趋势,检测限为 $1 \mu\text{mol/L}$,但相比较 JAS 修饰栅极的 SGGT,随着相同时日落黄浓度的增加,其 I_{DS} 的增加量更大。

2.4 SGGT 对日落黄的检测机理

SGGT 工作时是将三电极体系置于电解质溶液中,因此将 SGGT 传感器放入 $1 \times \text{PBS}$ 体系内并通电,栅极电极与电解质界面之间会形成一个电压值,而这一电压值便会在电解质界面与沟道间形成一个对应的电压值。

向电解质溶液中加入日落黄后,在电流的作用下会产生简单的化学反应,日落黄分子会失去一个电子和氢离子,形成新的化学结构。通过这一反应,在栅极上产生一个法拉第电流,在法拉第电流的作用下,栅极电极与电解质界面间的电压值会发生变化,从而改变电解质界面和沟道间的电压变化,这一电压变化的值称为等效栅极电压变化量($\Delta V_{\text{G}}^{\text{eff}}$),而等效栅极电压变化量是沟道电流变化的根本原因。

本实验中,随着日落黄浓度的增加, I_{DS} 逐渐变大,从而很好地解释了图 7b 和图 8b 中图形呈上升趋势的原因。

2.5 灵敏度测试

利用 $\Delta V_{\text{G}}^{\text{eff}}$ 和 I_{DS} 变化量的关系对裸金栅极、 CeO_2/JAS 修饰栅极、JAS 修饰栅极和 ZnO/JAS 修饰栅极的 SGGT 上日落黄的检测进行灵敏度性能表征。基于转移曲线与时间电流响应曲线,进行多组实验并对实验结果进行整理,计算出不同

栅极的 SGGT 传感器的 $\Delta V_{\text{G}}^{\text{eff}}$ 与日落黄浓度对数($\lg c$)的关系,并绘制成图形。

具体计算方法为:首先利用时间电流响应曲线确定开始滴加日落黄的点的沟道电流值与加入一定浓度日落黄后稳定的沟道电流值;然后通过转移曲线找出该沟道电流值对应的栅极电压值;最后将加入日落黄前、后的栅极电压值相减,便得出 $\Delta V_{\text{G}}^{\text{eff}}$,将 $\Delta V_{\text{G}}^{\text{eff}}$ 对应的浓度取对数,以 $\lg c$ 为 x 轴, $\Delta V_{\text{G}}^{\text{eff}}$ 为 y 轴,绘制成点线图。并利用 Origin 数据处理软件,进行拟合曲线的绘制,得到拟合曲线的斜率,进行对比判断。

不同修饰栅极的 SGGT 的 $\Delta V_{\text{G}}^{\text{eff}}$ 与 $\lg c$ 的关系如图 9 所示。

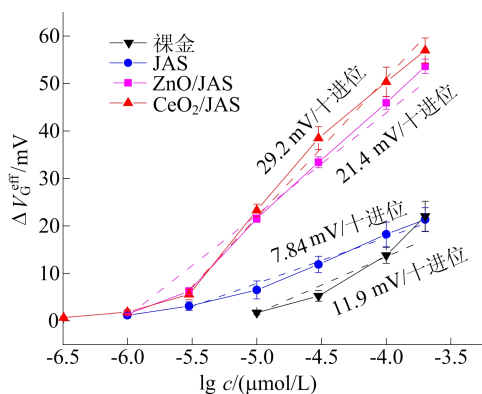


图 9 不同修饰栅极的 SGGT 的 $\Delta V_{\text{G}}^{\text{eff}}$ 与 $\lg c$ 的关系

图 9 中,黑色曲线为裸金栅极的 SGGT 的灵敏度,拟合曲线斜率为 11.9;JAS 修饰栅极的 SGGT 拟合曲线斜率为 7.84; ZnO/JAS 和 CeO_2/JAS 修饰栅极的 SGGT 的拟合曲线斜率分别为 21.4 和 29.2。

结合 2.3 节实验结果可知, CeO_2/JAS 材料修饰栅极的 SGGT 对日落黄具有很高的灵敏度。

2.6 选择性实验

为满足 SGGT 日落黄传感器的实际应用,模拟软饮料的实际检测场景,筛选可能会对检测结果有影响的物质作为干扰物质,包括日落黄(sunset yellow, SY)、柠檬黄(tartrazine, Tar)、柠檬酸(citric acid, CA)及部分离子(Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-})进行选择性实验,从而验证 SGGT 日落黄传感器及 CeO_2/JAS 材料的修饰具备实际样品检测的能力。利用 2.5 节中 $\Delta V_{\text{G}}^{\text{eff}}$ 的计算方法,比较干扰物质对日落黄检测的结果。

本文选择 $10 \mu\text{mol/L}$ 的 SY, $10 \mu\text{mol/L}$ 的 Tar, 及 $100 \mu\text{mol/L}$ 的 CA、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、

CO_3^{2-} 进行 SGGT 的选择性实验。实验结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出: CeO_2/JAS 修饰的 SGGT 对 $10 \mu\text{mol/L}$ 的日落黄响应最大, ΔV_G^{eff} 为 $(30.1 \pm 3.78) \text{ mV}$; 而加入 $10 \mu\text{mol/L}$ 的柠檬黄、 $100 \mu\text{mol/L}$ 的柠檬酸及 CO_3^{2-} 这些干扰物质时, ΔV_G^{eff} 分别为 $(4.99 \pm 1.02) \text{ mV}$ 、 $(1.18 \pm 0.42) \text{ mV}$ 、 $(1.21 \pm 0.12) \text{ mV}$, 但这些物质的有效栅极电压变化量远小于 $10 \mu\text{mol/L}$ 的日落黄; 而加入 $100 \mu\text{mol/L}$ 的 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 时, ΔV_G^{eff} 均小于 1 mV , 对检测结果产生不了任何影响。综上所述, CeO_2/JAS 材料可作为 SGGT 日落黄传感器的栅极修饰材料, 使得整个 SGGT 传感器在检测饮料中日落黄方面具有定性、定量检测的潜力。

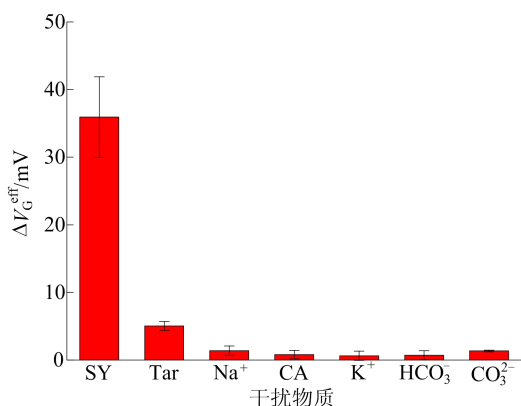


图 10 CeO_2/JAS 修饰栅极的 SGGT 的选择性实验

3 结 论

本文以农业废弃物菊芋秸秆为原料, 去除外层木质素外壳, 将菊芋秸秆芯浸渍硝酸铈水溶液并热解, 得到 CeO_2/JAS 材料; 通过滴涂法修饰在 SGGT 的栅极上, 并对日落黄进行定性定量的检测; 模拟对饮料中日落黄的选择检测, 并对该材料的基本理化性质进行表征, 证实了其作为修饰材料的可行性, 为实现农业废弃物的高效利用提供了一种可行方法。得到结论如下:

1) 以菊芋秸秆芯为碳基材料, 成功制备了多种用于修饰 SGGT 的栅极的修饰材料, 并进行了 CV 实验, 发现 CeO_2/JAS 和 ZnO/JAS 材料对日落黄的电化学催化能力较强。

2) SGGT 对日落黄电化学表征实验中, CeO_2/JAS 材料修饰栅极的 SGGT 对日落黄的检测限为 300 nmol/L , 且在模拟软饮料的复杂体系

中对日落黄具有选择性检测。

3) 在 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热解条件下, 生成的 CeO_2/JAS 材料具有疏松多孔的特性, 且 CeO_2 分布均匀, 可用作电化学检测修饰材料。

[参 考 文 献]

- [1] LONG X H, SHAO H B, LIU L, et al. Jerusalem artichoke: a sustainable biomass feedstock for biorefinery[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 1382-1388.
- [2] YU L, TU C, LUO Y M. Fabrication, characterization and evaluation of mesoporous activated carbons from agricultural waste: Jerusalem artichoke stalk as an example[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2015, 9(2): 206-215.
- [3] MEHMOOD M A, AHMAD M S, LIU Q, et al. Helianthus tuberosus as a promising feedstock for bioenergy and chemicals appraised through pyrolysis, kinetics, and TG-FTIR-MS based study[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 194: 37-45.
- [4] WANG B, XU F, ZONG P, et al. Effects of heating rate on fast pyrolysis behavior and product distribution of Jerusalem artichoke stalk by using TG-FTIR and Py-GC/MS[J]. Renewable Energy, 2019, 132(3): 486-496.
- [5] BI Y L, YE L H, MAO Y, et al. Porous carbon supported nanoceria derived from one step in situ pyrolysis of Jerusalem artichoke stalk for functionalization of solution-gated graphene transistors for real-time detection of lactic acid from cancer cell metabolism[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2019, 140: 111271.
- [6] WEI J, TU C, YUAN G, et al. Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar[J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 56-65.
- [7] SUN W G, ZHAO H, YAN H X, et al. The pyrolysis characteristics and kinetics of jerusalem artichoke stalk using thermogravimetric analysis[J]. Energy Sources Part a-Recovery Utilization and Environmental Effects, 2012, 34(5/6/7/8): 626-635.
- [8] MASSARO A, COLOMBINI M P, RIBECCHINI E. Fructose and inulin; behaviour under analytical pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016, 121: 205-212.
- [9] TARDELLA A, CHAZALVIEL J N. Highly accumulated electron layer at a semiconductor/electrolyte interface[J]. Physical Review B, Condensed Matter, 1985, 32: 2439-2448.
- [10] WANG R R, MAO Y, QU H, et al. Highly sensitive and selective sulfite sensors based on solution-gated graphene transistors with multi-walled carbon nanotube functionalized gate electrodes [J]. Food Chemistry, 2019, 290: 101-106.
- [11] LEE M H, KIM B J, LEE K H, et al. Apparent pH sensitivity of solution-gated graphene transistors [J].

- Nanoscale, 2015, 7(17): 7540-7544.
- [12] LI Y J, WANG C, ZHU Y B, et al. Fully integrated graphene electronic biosensor for label-free detection of lead (II) ion based on G-quadruplex structure-switching[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 89: 758-763.
- [13] ZHANG M, CAIZHI L, MAK C H, et al. Highly sensitive glucose sensors based on enzyme-modified whole-graphene solution-gated transistors[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 1-6.
- [14] WANG Z R, JIA Y F. Graphene solution-gated field effect transistor DNA sensor fabricated by liquid exfoliation and double glutaraldehyde cross-linking [J]. Carbon, 2018, 130: 758-767.
- [15] WANG Y H, BI Y L, WANG R R, et al. DNA-gated graphene field-effect transistors for specific detection of arsenic(III) in rice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(4): 1398-1404.
- [16] XIONG C, ZHANG T, KONG W, et al. ZIF-67 derived porous Co₃O₄ hollow nanopolyhedron functionalized solution-gated graphene transistors for simultaneous detection of glucose and uric acid in tears [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 101: 21-28.
- [17] JAYAWEERA S, YIN K, HU X, et al. Fluorescent N/Al co-doped carbon dots from cellulose biomass for sensitive detection of manganese(VII) [J]. Journal of Fluorescence, 2019, 29(2): 1291-1300.
- [18] JI R T, WU Y R, BIAN Y R, et al. Nitrogen-doped porous biochar derived from marine algae for efficient solid-phase microextraction of chlorobenzenes from aqueous solution [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 407: 124785.
- [19] VATANDOST E, GHORBANI-HASANSARAEI A, CHEKIN F, et al. Green tea extract assisted green synthesis of reduced graphene oxide: application for highly sensitive electrochemical detection of sunset yellow in food products [J]. Food Chemistry, X, 2020, 6: 100085.
- [20] VEERAKUMAR P, VEERAMANI V, CHEN S M, et al. Palladium nanoparticle incorporated porous activated carbon: electrochemical detection of toxic metal ions [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8: 1319-1326.
- [21] SEVILLA M, FUERTES A B, MOKAYA R. High density hydrogen storage in superactivated carbons from hydrothermally carbonized renewable organic materials [J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4: 1400.
- [22] MADHU R, VEERAMANI V, CHEN S M, et al. Functional porous carbon/nickel oxide nanocomposites as binder-free electrodes for supercapacitors [J]. Chemistry, 2015, 21(22): 8200-8206.
- [23] 郑月, 明国伟, 聂雪梅, 等. 食品中违禁添加的非食用色素检测技术综述 [J]. 中国农学通报, 2012(9): 222-228.
- [24] NEUMAN I, ELIAN R, NAHUM H, et al. The danger of 'yellow dyes' (tartrazine) to allergic subjects [J]. Clin Allergy, 1978, 8(1): 65-68.
- [25] CHAI W B, WANG H J, ZHANG Y, et al. Preparation of polydopamine-coated magnetic nanoparticles for dispersive solid-phase extraction of water-soluble synthetic colorants in beverage samples with HPLC analysis [J]. Talanta, 2016, 149: 13-20.
- [26] SOPONAR F, MOT A, SĂRBU C. Quantitative determination of some food dyes using digital processing of images obtained by thin-layer chromatography [J]. Journal of chromatography A, 2008, 1188(2): 295-300.
- [27] PRADO M, BOAS L, BRONZE M, et al. Validation of methodology for simultaneous determination of synthetic dyes in alcoholic beverages by capillary electrophoresis [J]. Journal of Chromatography A, 2007, 1136: 231-236.
- [28] LIU S J, PAN M D, FENG Z M, et al. Ultra-high adsorption of tetracycline antibiotics on garlic skin-derived porous biomass carbon with high surface area [J]. New Journal of Chemistry, 2020, 44(3): 1097-1106.
- [29] XIONG C, WANG Y, QU H, et al. Highly sensitive detection of gallic acid based on organic electrochemical transistors with poly(diallyldimethylammonium chloride) and carbon nanomaterials nanocomposites functionalized gate electrodes [J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2017, 246: 235-242.
- [30] CHEN Y Z, ZHANG R, JIAO L, et al. Metal-organic framework-derived porous materials for catalysis [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2018, 362: 1-23.
- [31] DESHPANDE S, PATIL S, KUCHIBHATLA S V, et al. Size dependency variation in lattice parameter and valency states in nanocrystalline cerium oxide [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(13): 223-227.

(责任编辑 闫杏丽)