

# 石墨烯修饰电极对吲哚丁酸的电分析应用研究

杜科志<sup>1</sup>, 杜海军<sup>1\*</sup>, 张艳<sup>1</sup>, 张志萍<sup>1,2</sup>, 刘雄<sup>1</sup>, 韦愿继<sup>1</sup>  
(1. 贵州民族大学化学工程学院, 贵州 贵阳 550025;  
2. 贵州天福化工有限责任公司, 贵州 福泉 550501)

**摘要:**将电化学法制备的石墨烯与十二烷基苯磺酸钠在超纯水中超声 1.5 h, 实现对石墨烯的非共价改性。用所得的复合材料构建了一种石墨烯传感器, 利用循环伏安法探究吲哚丁酸的电化学生物行为。在最优实验条件下, 使用线性扫描伏安法对吲哚丁酸进行测定, 线性浓度范围为 0.5~100  $\mu\text{mol/L}$ , 最低检测限为 0.022  $\mu\text{mol/L}$  ( $S/N=3$ )。该传感器综合性能良好, 将其应用在化肥中吲哚丁酸的测定, 回收率为 98.90%~101.03%。

**关键词:**线性扫描伏安法; 吲哚丁酸; 植物生长调节剂; 修饰电极

中图分类号: TQ452

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)04-0255-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.04.049

## Electrochemical analysis of indole-3-butyric acid based on graphene modified electrode

DU Ke-zhi<sup>1</sup>, DU Hai-jun<sup>1\*</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-ping<sup>1,2</sup>, LIU Xiong<sup>1</sup>, WEI Yuan-ji<sup>1</sup>  
(1. School of Chemical Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China;  
2. Guizhou Tianfu Chemical Co., Ltd., Fuquan 550501, China)

**Abstract:** Non-covalent modification of graphene is realized after graphene prepared by electrochemical method has been ultrasonicated with sodium dodecylbenzene sulfonate in ultra-pure water for 1.5 h. The electrochemical behavior of indole-3-butyric acid is investigated through cyclic voltammetry using a graphene sensor constructed from the obtained composite materials. Under the optimal experimental conditions, the linear sweep voltammetry method is utilized to determine indole-3-butyric acid. It is shown that the linear concentration range is 0.5–100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , and the lowest detection limit is 0.022  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $S/N=3$ ). The sensor is verified to have a good comprehensive performance, and the recovery can reach 98.90%–101.03% of when it is applied in the detection of indole-3-butyric acid in chemical fertilizer.

**Key words:** linear sweep voltammetry; indole-3-butyric acid; plant growth regulator; modified electrodes

如果在化肥中添加植物生长调节剂(PGRs), 应按照国家农药管理条例的规定作为农药使用, 并应在生产、销售和使用过程中进行登记。近年来, 在化肥中检测出 PGRs 的违法行为被多次报道, 对于化肥中 PGRs 的监管成为了关注的热点话题。吲哚丁酸(Indole-3-butyric acid, IBA)是一种能够促进植物生长发育的外源激素<sup>[1]</sup>, 施用 IBA 能强烈诱导多种植物扦插生根<sup>[2]</sup>。IBA 的非标准使用可能会使作物生长过快或受到抑制<sup>[3]</sup>, 导致植物死亡, 影响农产品质量, 甚至危害人类健康<sup>[4]</sup>。目前, IBA 最常见的检测方法有荧光光谱法<sup>[5]</sup>、液相色谱法<sup>[6-7]</sup>和毛细管电泳法<sup>[8]</sup>等。但是, 这些方法存在仪器大、费用高、检测时间长等缺点。电化学法仪器便

携<sup>[9]</sup>, 且检测迅速, 成为现场快速检测 IBA 的优选方案<sup>[10]</sup>。

石墨烯具有机械性能强<sup>[11]</sup>、电导率高和催化性能好等特点<sup>[12]</sup>。具有长疏水 C-H 链和亲水基的表面活性剂, 能在疏水电极表面吸附, 改变电极/溶液界面的性质, 可以影响电活性物质的电化学过程<sup>[13]</sup>。十二烷基苯磺酸钠在石墨烯的非共价改性中应用广泛<sup>[14]</sup>, 良好的亲水性使得石墨烯在水中分散程度得到加强<sup>[15]</sup>, 已有报道将其应用在电化学传感器中<sup>[16]</sup>。目前还没有人用石墨烯修饰电极构造传感器来检测 IBA。

本文中利用十二烷基苯磺酸钠(SDBS)对电化学法制备的石墨烯(eGr)进行超声非共价改性。在

收稿日期: 2021-04-28; 修回日期: 2022-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(81860701, 82060714); 贵州省普通高等学校“绿色化学与资源环境创新团队”项目(黔教合人才团队字[2015]62); 贵州民族大学自然科学基金(校科学(2019)1号)

作者简介: 杜科志(1995-), 男, 硕士生; 杜海军(1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电化学与储能材料, 通讯联系人, hjdk51@163.com。

玻碳电极 (GCE) 表面上滴涂该材料, 制成了 eGr-SDBS/GCE 传感器。通过循环伏安法 (CV) 对 IBA 进行了伏安定性分析, 用线性扫描伏安法 (LSV) 实现了对 IBA 的伏安定量测定, 并优化实验条件对化肥中的 IBA 进行了检测。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

FEI Nova Nano SEM450 场发射扫描电镜 (美国 FEI 公司); CHI660E 型电化学工作站 (上海辰华仪器公司); 工作电极为玻碳电极 (GCE), 辅助电极为铂电极, 参比电极为 Ag/AgCl 电极 (3 mol/L KCl); pH S-3C 型酸度计 (上海雷磁仪器厂); KQ-3200DB 型数控超声波清洗器 (郑州豫华仪器制造有限公司)。

石墨烯 (自制); 十二烷基苯磺酸钠 (上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 吡啶丁酸 (国药集团化学试剂有限公司); 其他试剂均为分析纯; 实验用水为超纯水, 化肥 (磷酸二氢钾, 贵州瓮福集团)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 改性石墨烯材料的制备

基于本课题组之前的研究电化学方法制备了石墨烯<sup>[17]</sup>。取 2 mg eGr 和 1 mg 十二烷基苯磺酸钠于 2 mL 纯水中, 超声分散 1.5 h, 使得二者均匀分散在溶剂中, 得到基于 SDBS 辅助下非共价改性后的石墨烯, 将二者的混合物 (eGr-SDBS) 静置待用。

#### 1.2.2 电极预处理与活化

在抛光布上依次加入  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末, 将玻碳电极 (GCE) 表面打磨至镜面后, 依次在稀硝酸、无水乙醇和超纯水中超声清洗 3 min。利用 CV (电位区间 -0.3~0.7 V, 扫描速度 0.1 V/s) 在配制好的电极测试液中检验电极是否可以使用。在 0.5 mol/L 的硫酸溶液中, 将 GCE 静置 5 min 后, 在电位区间为 -0.2~2 V, 扫描速度为 0.5 V/s 的条件下利用 CV 扫描至图像稳定, 用水冲洗后烘干待用。

#### 1.2.3 eGr-SDBS/GCE 传感器的构建

取 5  $\mu$ L eGr-SDBS 复合物滴涂于玻碳电极 (GCE) 表面, 自然风干。将制备好的 eGr-SDBS/GCE 置于 pH=7 的 PBS 溶液中, 利用循环伏安法在扫描速度为 0.1 V/s, 电位区间为 0.4~1.2 V 的条件下扫描至图像稳定后, 烘干待用。

取 5 mg eGr 于 5 mL 纯水中, 超声 1.5 h 后, 按上述方法制备 eGr/GCE, 烘干待用。

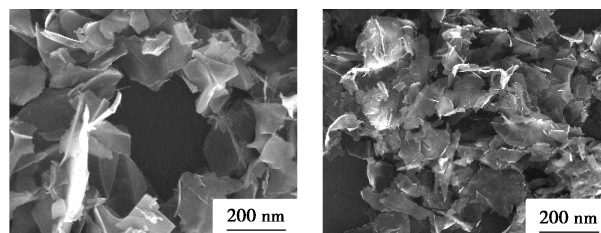
### 1.2.4 电化学测试

利用循环伏安法对 50  $\mu$ mol/L IBA 进行电化学行为探究 (电位区间 0.4~1.2 V, 扫描速度 0.1 V/s), 利用线性扫描伏安法探究实验条件和扫描速度的影响 (电位区间 0.4~1.2 V, 扫描速度区间 0.05~0.5 V/s), 利用线性扫描伏安法对 IBA 进行测定 (电位区间 0.4~1.2 V, 扫描速度 0.1 V/s)。

## 2 分析与讨论

### 2.1 材料的表征

利用场发射扫描电镜对十二烷基苯磺酸钠处理前后的石墨烯进行表面形貌观测, 结果如图 1 所示。处理前电化学法制备的石墨烯边界清晰, 且明显看出石墨烯片层结构较厚。经过十二烷基苯磺酸钠处理后, 石墨烯依旧有片层结构存在, 且片层表面出现了褶皱, 说明电化学制备的石墨烯被进一步剥离<sup>[18]</sup>, 出现了单层石墨烯。单层石墨烯具有更高的比表面积, 能够增加电极的有效面积, 进而提高玻碳电极的检测灵敏度。



(a) 电剥离石墨烯的 SEM 图

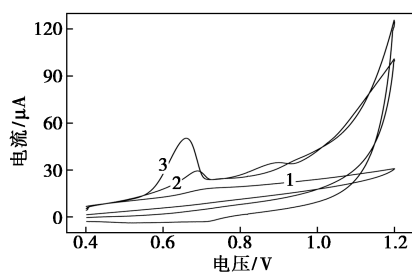
(b) SDBS 处理后的石墨烯的 SEM 图

SEM 图

图 1 石墨烯的 SEM 图像

### 2.2 IBA 的电化学行为

利用 GCE、eGr/GCE 和 eGr-SDBS/GCE 在 pH 为 7 的 PBS 溶液中分别构建电化学传感器, 对 50  $\mu$ mol/L 的 IBA 进行循环伏安扫描。图 2 中可以明显看出, IBA 在 GCE 上有一极小的氧化峰, 峰电位为 0.713 V, 峰电流为 2.126  $\mu$ A; 在 eGr/GCE 上, IBA 的氧化峰电位负移 (0.686 V), 说明 eGr 具有一定的电催化活性, 峰电流 (9.717  $\mu$ A) 也得到了增加。在 eGr-SDBS/GCE 上, IBA 的氧化峰电位 (0.658 V) 进一步负移, 说明结合 SDBS 后的 eGr 具有更强的电催化活性。由于 SDBS 改善了疏水电极的亲水性, 与石墨烯协同作用使得 IBA 更好地吸附在电极表面<sup>[19]</sup>, 氧化峰电流 (31.69  $\mu$ A) 相对于 GCE 增大了近 15 倍, 并且在 0.884 V 附近出现了一峰电流为 3.344  $\mu$ A 的氧化峰, 该现象与已报道的结果一致<sup>[20]</sup>。

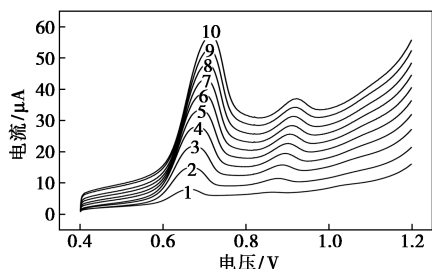


1—GCE; 2—eGr/GCE; 3—eGr-SDBS/GCE

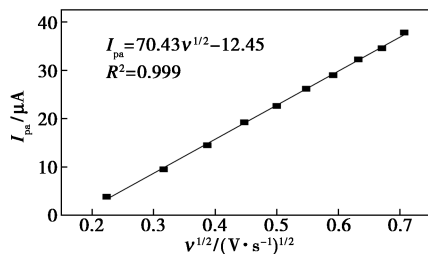
图2 不同修饰电极对 IBA 的循环伏安扫描

### 2.3 扫描速度的影响

为了探究不同扫描速度对 IBA 氧化峰电流的影响,在 pH 为 7 的 PBS 溶液中对 50  $\mu\text{mol/L}$  的 IBA 利用线性扫描伏安法进行研究。根据图 3(a) 可以看出,扫描速度逐渐加快,增加同等电压值所需的时间越少,氧化峰的宽度越窄,扩散层厚度越小,峰电流增大,符合电活性物质在电极表面的扩散规律。图 3(b) 表现出 IBA 较大的氧化峰电流  $I_{\text{pa}}$  与扫描速度的平方根  $v^{1/2}$  呈线性关系,拟合方程为  $I_{\text{pa}} = 70.43v^{1/2} - 12.45$  ( $R^2 = 0.999$ )。由此可知,IBA 在 eGr-SDBS/GCE 表面的电化学氧化反应受扩散控制。

1—0.05 V/s; 2—0.1 V/s; 3—0.15 V/s; 4—0.2 V/s;  
5—0.25 V/s; 6—0.3 V/s; 7—0.35 V/s; 8—0.4 V/s;  
9—0.45 V/s; 10—0.5 V/s

(a) IBA 在不同扫速下的 LSV 图



(b) 扫描速度的平方根与 IBA 氧化峰的关系

图3 扫描速度的影响

## 2.4 实验条件的选择

### 2.4.1 SDBS 浓度的影响

利用不同 SDBS 浓度改性的 eGr 传感器分别对

IBA 进行 LSV 测定。通过研究发现, SDBS 的浓度也会影响到电极的灵敏度<sup>[21]</sup>, 结果如图 4 所示, 随着 SDBS 浓度不断加大, IBA 的氧化峰响应电流逐渐增大。主要是由于表面活性剂的加入有助于石墨烯的液相剥离, 不仅增大了石墨烯的单层率, 还提高了石墨烯在水中的分散度, 使修饰材料更均匀地附着在电极表面, 增大了电极的有效面积, 提高电极灵敏度。当 SDBS 浓度到达一定程度时, IBA 氧化峰电流略微下降, 可能是由于阴离子与羧基之间的静电效应造成<sup>[22]</sup>。因此, 选用 0.5 mg/mL 浓度的 SDBS。

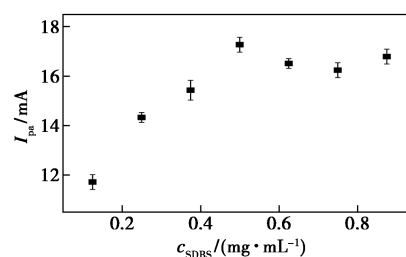


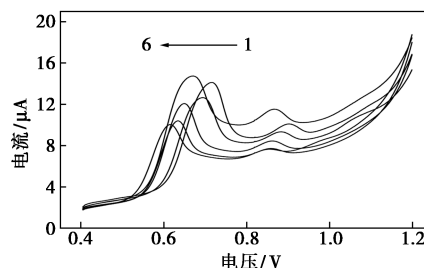
图4 SDBS 浓度的影响

### 2.4.2 材料修饰量的影响

修饰材料的滴涂量也能影响电极的检测灵敏度, 探究滴涂量范围在 3~7  $\mu\text{L}$  的 IBA 峰电流响应。从实验结果易知, 随着滴涂量的增高, 峰电流也在增强, 而后又不断下降。由于 eGr-SDBS 复合物具有较高的比表面积, 提高了电极检测灵敏度。又因为修饰材料在电极表面过厚, 减少了活性点位与 IBA 分子的电化学响应, 从而使得峰电流不断下降。在实验中滴涂量选择 5  $\mu\text{L}$  为最佳。

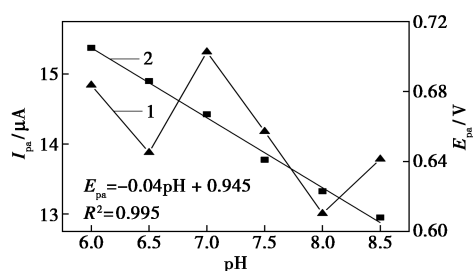
### 2.4.3 pH 的选择

缓冲溶液的 pH 不仅会影响到 IBA 的氧化峰大小, 还会干扰氧化电位。为了实现对 IBA 的定性分析, 利用 LSV 探究 pH 对 IBA 电活性的影响。从图 5(a) 得知, 在 pH 为 6.0~8.5 的范围内, 随着 pH 不断增大, 氧化峰电势向左偏移, 表明有质子参与 IBA 在 eGr-SDBS/GCE 表面的不可逆电氧化反应。在



1—6; 2—6.5; 3—7; 4—7.5; 5—8; 6—8.5

(a) IBA 在不同 pH 下的 LSV 图



1—pH 与  $I_{pa}$  之间的关系; 2—pH 与  $E_{pa}$  之间的关系  
(b) pH 与 IBA 氧化峰的关系

图 5 pH 对 IBA 峰电流响应值的影响

pH 为 6.0~8.5 的范围内, 峰电流的大小变化没有明确的规律, 但在 pH 为 7 时获得最大电流响应值。经多次验证, 在 IBA 电化学测定中选择最佳 pH 为 7。

如图 5(b) 所示,  $E_{pa}$  与 pH 在一定范围内有良好的线性关系, 线性拟合方程为  $E_{pa} = -0.04pH + 0.945$  ( $R^2 = 0.995$ )。由能斯特方程易知<sup>[23]</sup>, 斜率  $k = \partial E_{pa} / \partial pH = 0.059m/n$  ( $m$  为质子转移数,  $n$  为电子转移数), 易知  $m/n \approx 1$ , 已知 IBA 在电氧化过程中发生 1 个电子转移<sup>[20]</sup>, 可见 IBA 在电极表面发生氧化反应过程中有 1 个电子和 1 个质子转移, 反应机理如图 6 所示。

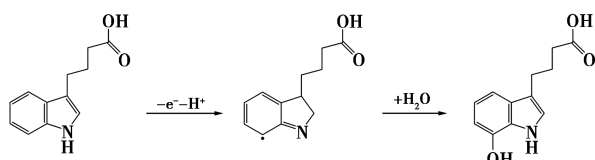
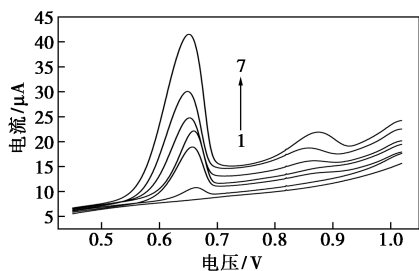


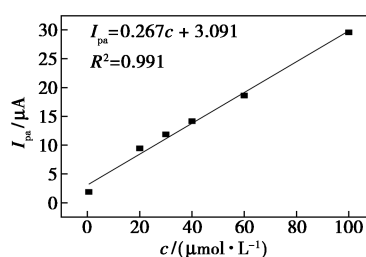
图 6 吲哚丁酸电氧化机理

### 2.5 线性范围及检测限

在最优条件下, 利用 LSV 在 PBS 缓冲液中探究了不同浓度下 IBA 的氧化峰电流响应情况。从图 7 可以看出, 随着 IBA 浓度增加, 氧化峰电流增大, 峰电流与 IBA 的浓度在 0.5~100  $\mu\text{mol/L}$  范围内呈良好的线性关系, 拟合方程为  $I_{pa} = 0.267c + 3.091$  ( $R^2 = 0.991$ ), 最低检出限为 0.022  $\mu\text{mol/L}$  ( $S/N = 3$ )。



1—0  $\mu\text{mol/L}$ ; 2—0.5  $\mu\text{mol/L}$ ; 3—20  $\mu\text{mol/L}$ ; 4—30  $\mu\text{mol/L}$ ;  
5—40  $\mu\text{mol/L}$ ; 6—60  $\mu\text{mol/L}$ ; 7—100  $\mu\text{mol/L}$   
(a) 不同浓度 IBA 的线性扫描伏安图像



(b) IBA 浓度与氧化峰电流值的关系  
图 7 IBA 的线性浓度关系

### 2.6 电极的性能评价

#### 2.6.1 修饰电极的稳定性和重现性

为了探究该电极的重现性和稳定性, 在最优实验条件下, 将 5 根同样方法制备的 eGr-SDBS/GCE 修饰电极用于相同浓度的 IBA 进行 LSV 测定, 峰电流的相对标准偏差为 1.74%。将修饰电极经 CV 再生后, 置于温度设置为 5℃ 的冰箱中, 密封保存 1 周后再对 IBA 进行电化学测试, 相对标准偏差为 3.35%, 说明该电极具有极佳的重现性。实验结果表明, 经过冰箱保存的电极灵敏度略有下降, 平均峰电流响应值相对于之前下降了 9.57%, 说明该电极具有良好的稳定性。

#### 2.6.2 干扰实验

化工厂生产的化肥主要以无机离子为主, 在对电极的抗干扰能力进行测试时, 选择了  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等常见的无机离子作为干扰物。结果表明, 该电极在这些离子的干扰下, 氧化峰电流变化在 5% 以内, 说明该电极具有良好的抗干扰能力。

### 2.7 化肥中 IBA 的实际检测

参照 GB/T 37500—2019 的样品处理方法, 将试样全部研磨粉碎至过 0.5 mm 试验筛, 待用。加入 10 mL 甲醇溶解精确称取的 1 g 试样, 置于离心管中。经涡旋振荡 1 min, 再超声提取 30 min。静置冷却后, 用甲醇定容, 高速离心 10 min, 用 0.22  $\mu\text{m}$  有机相滤膜取上层清液过滤, 待测。使用 eGr-SDBS/GCE 对化肥中可能存在的 IBA 进行检测, 结果表明, 并未有 IBA 的存在。采用加标回收试验结果如表 1 所示, 该传感器回收率为 98.90%~101.03%。

表 1 化肥中 IBA 回收率的测定 ( $n=3$ )

| 样品 | 加入量/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ | 回收量/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ | 回收率/% |
|----|--|--|-------|
| 1  | 0  | <LOD                                     | —     |
| 2  | 10                                       | 9.89                                     | 98.90 |

续表

| 样品 | 加入量/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ | 回收量/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$ | 回收率/%  |
|----|--|--|--------|
| 3  | 30                                       | 30.31                                    | 101.03 |
| 4  | 50                                       | 49.75                                    | 99.50  |
| 5  | 70                                       | 69.74                                    | 99.62  |
| 6  | 90                                       | 90.14                                    | 100.15 |

### 3 结论

将电化学法制备的石墨烯在十二烷基苯磺酸钠辅助下进行超声非共价改性,发现所得材料对 IBA 具有电催化特性。首次使用该材料所制成的 eGr-SDBS/GCE 传感器在较低的浓度实现对 IBA 的电化学定性和定量分析。该传感器制备成本低且方法简单,具有良好的重现性和稳定性,并具有一定的抗干扰能力,将其应用在化肥中 IBA 的实际检测效果良好。本研究为实现化肥中植物生长调节剂的电化学快速检测提供了新方法。

### 参考文献

- [1] Li S W, Zeng X Y, Leng Y, *et al.* Indole-3-butyric acid mediates antioxidative defense systems to promote adventitious rooting in mung bean seedlings under cadmium and drought stresses[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 161: 332-341.
- [2] Ludwig-Müller J. Indole-3-butyric acid in plant growth and development[J]. *Plant Growth Regulation*, 2000, 32(2/3): 219-230.
- [3] Strader L C, Bartel B. Transport and metabolism of the endogenous auxin precursor indole-3-butyric acid[J]. *Molecular Plant*, 2011, 4(3): 477-486.
- [4] Spence C, Bais H. Role of plant growth regulators as chemical signals in plant-microbe interactions: A double edged sword[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2015, 27: 52-58.
- [5] Yigaimu A, Chang J H, Hoji A, *et al.* A simple spectrofluorometric method for the determination of total auxins in mung bean sprouts[J]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 75(11): 1404-1407.
- [6] Hong R X, Wu P P, Lin J, *et al.* Three-phase hollow fiber liquid-phase microextraction combined with HPLC for determination of three trace acidic plant growth regulators in *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl[J]. *Journal of Separation Science*, 2020, 43(14): 2773-2783.
- [7] Aihebaier S, Muhammad T, Wei A X, *et al.* Membrane-protected molecularly imprinted polymer for the microextraction of indole-3-butyric acid in mung bean sprouts[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(16): 16789-16793.
- [8] Zheng Y, Peng X F, Wu Y W. Field-amplified sample injection and solid-phase extraction for sensitivity improvement of electrophoretic determination of indole-3-acetic acid and indole-3-butyric acid in food samples[J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11(4): 1155-1162.
- [9] Shen Y, Li X, Chen W, *et al.* Electrochemical determination of indole butyric acid by differential pulse voltammetry on hanging mercury drops electrode[J]. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 2013, 22(3): 319-323.
- [10] Chylkova J, Janikova L, Sedlak M, *et al.* Voltammetric determination of plant hormone indole-3-butyric acid in acidic media employing boron-doped diamond electrode [J]. *Monatshefte Fur Chemie*, 2019, 150(3): 443-449.
- [11] Fowler J D, Allen M J, Tung V C, *et al.* Practical chemical sensors from chemically derived graphene [J]. *ACS Nano*, 2009, 3(2): 301-306.
- [12] Pumera M, Ambrosi A, Bonanni A, *et al.* Graphene for electrochemical sensing and biosensing [J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2010, 29(9): 954-965.
- [13] Yi H, Huang W. Enhancement effect of sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) and its application into voltammetric determination of telmisartan[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 58(2): 237-241.
- [14] Hernandez Y, Nicolosi V, Lotya M, *et al.* High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite[J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3(9): 563-568.
- [15] Uddin M E, Kuila T, Nayak G C, *et al.* Effects of various surfactants on the dispersion stability and electrical conductivity of surface modified graphene[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 562(1): 134-142.
- [16] Qiu N, Liu Y, Guo R. A novel sensitive electrochemical sensor for lead ion based on three-dimensional graphene/sodium dodecyl benzene sulfonate hemimicelle nanocomposites [J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 212: 147-154.
- [17] 杜科志, 杜海军, 张艳, 等. 石墨烯电化学传感器检测 4-氯苯氧乙酸的研究[J]. *现代化工*, 2020, 40(9): 231-234.
- [18] Sukumaran S S, Tripathi S, Resmi A N, *et al.* Influence of surfactants on the electronic properties of liquid-phase exfoliated graphene[J]. *Materials Science & Engineering*, 2019, 240: 62-68.
- [19] Zhang S, Wu K. Square Wave Voltammetric determination of indole-3-acetic acid based on the enhancement effect of anionic surfactant at the carbon paste electrode [J]. *Bulletin-Korean Chemical Society*, 2004, 25(9): 1321-1325.
- [20] Teodor, Adrian, Enache, *et al.* Pathways of electrochemical oxidation of indolic compounds [J]. *Electroanalysis*, 2011, 23(6): 1337-1344.
- [21] Xie P, Chen X, Fang W, *et al.* Electrochemical behaviors of adrenaline at acetylene black electrode in the presence of sodium dodecyl sulfate[J]. *Colloids Surfaces B: Biointerfaces*, 2006, 48(1): 17-23.
- [22] Sun Z, Wei X, Han Y, *et al.* Complete dechlorination of 2,4-dichlorophenol in aqueous solution on palladium/polymeric pyrrole-cetyl trimethyl ammonium bromide/foam-nickel composite electrode[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 244/245: 287-294.
- [23] Bard A J, Faulkner L R. *Electrochemical methods: Fundamentals and applications, student solutions manual* [M]. 2nd. New York: Wiley, 2002. ■