

Determination of Uric Acid by Poly- β -Cyclodextrin Modified Glassy Carbon Electrode

Yamei He, Xiaofei Ke, Liang Wu, Jiuju Feng*

College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang
Email: 171520456@qq.com, *jjfeng@zjnu.cn

Received: Apr. 16th, 2019; accepted: May 1st, 2019; published: May 8th, 2019

Abstract

The Poly- β -cyclodextrin modified glassy carbon electrode (p β -CD/GCE) was prepared by electro-polymerization of β -cyclodextrin (β -CD) on the surface of glassy carbon electrode (GCE) by cyclic voltammetry (CV). Based on the host-guest interaction between β -cyclodextrin and uric acid (UA), the p β -CD/GCE could effectively enrich UA. The oxidation signal of UA at the modified electrode was determined by square wave voltammetry (SWV). The results showed that the oxidation peak current of UA was significantly enhanced; the oxidation peak potentials of UA and ascorbic acid (AA) were separated, demonstrating that the modified electrode could eliminate the interference of high concentration of AA, so as to realize the highly sensitive and selective determination of UA. Under the optimized experimental conditions, this sensor for UA showed wide linear range (10 μ M - 500 μ M), low detection limit (0.54 μ M, S/N = 3), and good selectivity and repeatability, and was applied in urine samples.

Keywords

Poly- β -Cyclodextrin, Glassy Carbon Electrode, Uric Acid, Selectivity

聚 β -环糊精修饰的玻碳电极对尿酸的测定研究

何亚媚, 柯晓飞, 吴 靛, 冯九菊*

浙江师范大学, 化学与生命科学学院, 浙江 金华
Email: 171520456@qq.com, *jjfeng@zjnu.cn

收稿日期: 2019年4月16日; 录用日期: 2019年5月1日; 发布日期: 2019年5月8日

*通讯作者。

摘要

采用循环伏安法(CV), 将 β -环糊精(β -CD)电聚合在玻碳电极(GCE)表面, 制得聚 β -CD修饰玻碳电极($p\beta$ -CD/GCE)。基于 β -环糊精和尿酸(UA)之间的主客体识别作用, $p\beta$ -CD/GCE能有效地富集UA。用方波伏安法(SWV)考察修饰电极对UA的氧化信号。结果表明, UA的氧化峰电流明显增强; UA和抗坏血酸(AA)的氧化峰电位分离, 从而能排除高浓度AA的干扰, 实现对UA高灵敏、高选择性测定。在优化的实验条件下, 该传感器对UA的检测表现出了宽的线性范围(10 μ M~500 μ M)、低的检测下限(0.54 μ M, 3倍信噪比)、良好的选择性和重复性, 并可用于实际尿样的检测中。

关键词

聚 β -环糊精, 玻碳电极, 尿酸, 选择性

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人体内尿酸(UA)的生成和排泄不平衡时, 会引起血液中 UA 含量异常, 诱发多种疾病, 例如痛风、高尿酸血症、白血病、莱纳综合征等[1] [2]。因此, 无论是在临床诊断、还是在药物控制方面, 发展简单有效的方法检测人体体液中的 UA 含量都有十分重要的意义[3]。UA 具有电化学活性, 可以用电化学方法检测, 但在实际生物样品中常存在干扰物, 如抗坏血酸(AA)等[4] [5] [6]。在常规电极(如玻碳电极)上, UA 和 AA 的氧化峰电位相近, 电化学信号会发生重叠[7] [8]; 且生物样品中, AA 的浓度较高, 因此 AA 的电化学信号往往较强, 会覆盖 UA 的信号, 严重影响 UA 的测定[9]。所以, 发展在高浓度 AA 条件下, 选择性测定 UA 的电化学方法, 更具实际意义。

β -环糊精(β -CD)是由若干 D-吡喃葡萄糖基以 α -1,4-糖苷键连接而成的环状低聚糖, 其分子具有“内疏水、外亲水”的特殊结构[10]。 β -CD 有很强的分子识别和富集能力, 其疏水内腔可嵌入多种无机、有机分子或无机离子等, 从而形成主-客体包合物[11] [12] [13]。

基于此, 本文采用简单的电化学聚合方法, 制备聚 β -CD 修饰玻碳电极($p\beta$ -CD/GCE), 作为传感平台。基于 β -CD 对 UA 的主客体识别作用, $p\beta$ -CD/GCE 可以富集 UA。相比于裸玻碳电极, 该修饰电极检测到的 UA 的 SWV 氧化峰电流明显增加。此外, 该电极还能有效地分离 UA 和 AA 的 SWV 氧化峰电位, 从而实现在高浓度 AA 条件下, 对 UA 的高灵敏、高选择性测定。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

CHI 650A 电化学工作站(上海辰华仪器公司); BSA-224 电子天平(赛多利斯科学仪器有限公司); KQ-5200 超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司)。电化学研究过程采用三电极体系: 工作电极为玻碳电极(GCE, 直径 3 mm), 参比电极为 Ag/AgCl 电极, 辅助电极为铂丝电极。 $p\beta$ -CD/GC 电极的形貌由 Hitachi S-4800 扫描电子显微分析仪(SEM)进行分析。

β -环糊精(β -CD)购自上海展云化工有限公司；高氯酸(HClO_4)、尿酸(UA)购自国药集团化学试剂有限公司；抗坏血酸(AA)购自上海晶纯试剂有限公司；多巴胺盐酸盐(DA)购自南京奥多福尼生物科技有限公司；无水氯化钙(CaCl_2)购自天津市北方天医化学试剂厂；水杨酸购自天津市光复精细化工研究所；L-谷氨酸购自上海麦克林生化科技有限公司；葡萄糖购自上海山浦化工有限公司；柠檬酸购自宜兴市第二化学试剂厂；蔗糖购自北京化学试剂二厂；尿素购自宜兴市第二化学试剂厂。其它试剂均为分析纯，实验用水均为二次水。

2.2. $p\beta$ -CD/GC 电极的制备

玻碳电极先用二次水超声约 10 s，然后将电极在麂皮上用 $0.05 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$ 粉末打磨抛光至呈镜面，再用二次水超声约 10 s，洗净后保存在二次水中备用。

通过电聚合的方法，制备 $p\beta$ -CD/GCE。具体操作如下[14]：将干净的 GC 电极置于 $0.04 \text{ M } \beta$ -环糊精溶液(溶于 1 M HClO_4)中，在 $-0.8 \text{ V} \sim 1.3 \text{ V}$ (vs. Ag/AgCl)的电位范围内进行 40 圈循环伏安(CV)扫描，扫速为 100 mV/s 。扫描完毕，取出电极，用二次水小心淋洗电极，然后置于二次水中保存备用。

2.3. 检测方法

将 GC 或 $p\beta$ -CD/GC 电极分别置于 0.1 M 磷酸缓冲溶液(PBS, $\text{pH } 7.4$)中，利用方波伏安法(SWV)，测得空白信号。再将 GC 或 $p\beta$ -CD/GC 电极分别置于含有一定浓度 UA (或 AA 与 UA 混合)的 PBS 溶液中，测得 SWV 曲线，扣除空白信号，即得到响应信号。

SWV 参数设置：扫描范围 $-0.3 \text{ V} \sim 0.6 \text{ V}$ (vs. Ag/AgCl)，振幅 25 mV ，频率 15 Hz ，电位增量 4 mV 。

2.4. 修饰电极的选择性

在最佳实验条件下，固定 UA 的浓度为 $50 \mu\text{M}$ ，然后向 UA 溶液中分别加入一定浓度的干扰物(如 10 倍浓度的多巴胺，20 倍浓度的 Ca^{2+} 、水杨酸、L-谷氨酸、葡萄糖、柠檬酸，30 倍浓度的蔗糖，50 倍浓度的尿素)，对比加入干扰物前后 UA 的 SWV 信号。

2.5. 实际尿样分析

将适量的人体尿液静置一夜，取上清液，并用 PBS 将其稀释 3000 倍。在尿液样品中加入不同量的 UA，利用 $p\beta$ -CD/GC 电极进行回收实验。

3. 实验结果及讨论

3.1. $p\beta$ -CD/GC 电极的表征

图 1 显示了在裸 GC 电极表面电聚合 β -CD 的 CV 曲线。由图可知，随着扫描圈数的增加，CV 曲线上的氧化、还原峰均不断增强，说明 β -CD 被成功电聚合到了电极表面[15]。图 2 是 $p\beta$ -CD/GC 电极的 SEM 图，可以明显地观察到电极表面有大量纳米颗粒，直观地证明了 $p\beta$ -CD/GC 电极已成功制备。

3.2. UA 和 AA 在修饰电极上的电化学行为

图 3 显示了 GC 电极和 $p\beta$ -CD/GC 电极在混合溶液($10 \mu\text{M UA} + 100 \mu\text{M AA}$)中的 SWV 曲线。由图可知，GC 电极上，AA 的氧化峰电位约为 0.13 V ，峰电流约为 $0.89 \mu\text{A}$ ；UA 的氧化峰电位约为 0.32 V ，峰电流约为 $0.74 \mu\text{A}$ ；二者的峰电位差约 0.19 V 。与裸 GC 电极相比，在 $p\beta$ -CD/GC 电极上，AA 的氧化峰电位明显负移，峰电流约增加 2 倍；而 UA 的氧化峰电流约增加 1 倍；二者的峰电位差扩大至 0.27 V 。这是因为环糊精具有主客体识别作用， $p\beta$ -CD/GC 电极能将溶液中的 UA 和 AA 富集在电极表面，从而使

UA 和 AA 的氧化峰电流明显增加[16]。同时, $p\beta$ -CD/GC 电极还能有效地分离 UA 和 AA 的氧化峰电位。基于此, 该修饰电极有望实现在高浓度 AA 条件下, 对 UA 的灵敏测定。

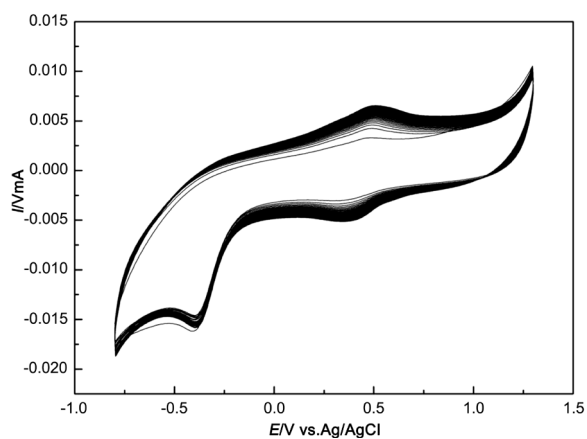


Figure 1. Cyclic voltammograms of the electro-polymerization of β -CD on GCE

图 1. 在玻碳电极上电聚合 β -环糊精的 CV 曲线

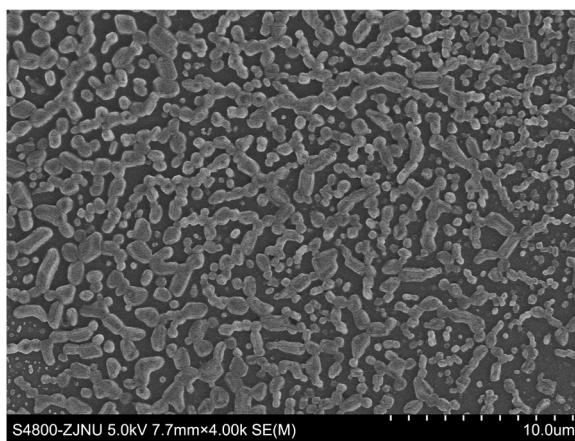


Figure 2. SEM image of $p\beta$ -CD/GC

图 2. $p\beta$ -CD/GC 电极的 SEM 图

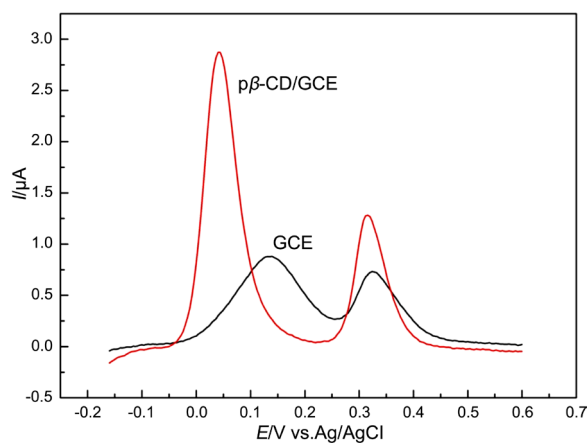


Figure 3. SWV responses at GCE and $p\beta$ -CD/GCE in the mixture of $10\ \mu\text{M}$ UA and $100\ \mu\text{M}$ AA

图 3. GC 和 $p\beta$ -CD/GC 电极在混合溶液($10\ \mu\text{M}$ UA + $100\ \mu\text{M}$ AA)中的 SWV 曲线

3.3. 高浓度 AA 对 UA 测定的影响

之前的实验结果表明, GC 和 $p\beta$ -CD/GC 电极在混合溶液($10\ \mu\text{M UA} + 100\ \mu\text{M AA}$)中均能检测到分离的 UA 和 AA 的氧化信号。但是, 在生物体内, AA 的浓度一般远高于 UA, 为了研究高浓度 AA 对 UA 测定的影响, 我们考察了在不同浓度 AA 条件下, GC 和 $p\beta$ -CD/GC 电极对 UA 的测定。

图 4 显示了 GC 电极在不同混合溶液中的 SWV 曲线。其中, UA 的浓度固定为 $10\ \mu\text{M}$; 而 AA 的浓度分别为 $10\ \mu\text{M}$ 、 $50\ \mu\text{M}$ 、 $100\ \mu\text{M}$ 、 $150\ \mu\text{M}$ 、 $200\ \mu\text{M}$ 、 $250\ \mu\text{M}$ 、 $300\ \mu\text{M}$ 。由图可知, 在 GC 电极上, UA 和 AA 的氧化峰电位相隔较小(约 $0.19\ \text{V}$)。当 AA 的浓度较小时($10\ \mu\text{M}$ ~ $100\ \mu\text{M}$), UA 的氧化峰信号相差不大。但当 AA 的浓度逐渐增加到 $150\ \mu\text{M}$ 以上时, UA 的氧化峰电流明显增加, 且峰形变化。这是因为 AA 的浓度过高, AA 的 SWV 氧化信号比较强, 使得 AA 和 UA 的信号重叠, UA 的峰形受到影响, 最终导致 UA 的氧化峰逐渐消失(曲线 g)。这些结果表明, 虽然 GC 电极上可以测得分离的 UA 与 AA 的氧化信号, 但当 AA 的浓度过高时, AA 的氧化峰会对 UA 的信号造成较大影响[17]。因此, 裸 GC 电极无法实现在高浓度 AA 条件下, 对 UA 的选择性测定。

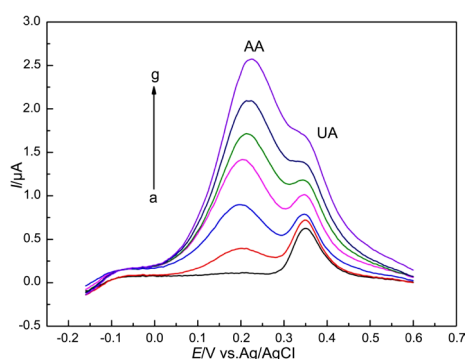


Figure 4. SWV responses at GCE in the mixtures of $10\ \mu\text{M UA}$ and AA with different concentrations (a \rightarrow g: $10\ \mu\text{M}$, $50\ \mu\text{M}$, $100\ \mu\text{M}$, $150\ \mu\text{M}$, $200\ \mu\text{M}$, $250\ \mu\text{M}$, $300\ \mu\text{M}$)

图 4. GC 电极在 $10\ \mu\text{M UA}$ 和不同浓度 AA 混合溶液中的 SWV 图。AA 的浓度(a \rightarrow g: $10\ \mu\text{M}$, $50\ \mu\text{M}$, $100\ \mu\text{M}$, $150\ \mu\text{M}$, $200\ \mu\text{M}$, $250\ \mu\text{M}$, $300\ \mu\text{M}$)

图 5 显示了 $p\beta$ -CD/GC 电极在不同混合溶液中的 SWV 曲线。其中, UA 的浓度固定为 $10\ \mu\text{M}$; AA 的浓度分别为 $100\ \mu\text{M}$ (曲线 a)和 $500\ \mu\text{M}$ (曲线 b)。由图可知, 在 $p\beta$ -CD/GC 电极上, UA 和 AA 的氧化峰电位相隔较大(约 $0.27\ \text{V}$)。当混合溶液中 AA 的浓度达到 $500\ \mu\text{M}$ 时, 虽然 AA 的氧化峰信号很强, 但对 UA 信号的影响较小。这些结果表明, $p\beta$ -CD/GC 电极可以实现在高浓度 AA 条件下, 对 UA 的选择性测定。

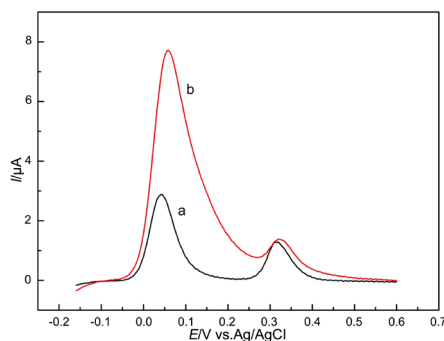


Figure 5. SWV responses at $p\beta$ -CD/GCE in the mixtures of $10\ \mu\text{M UA}$ and AA with different concentrations (a: $100\ \mu\text{M}$, b: $500\ \mu\text{M}$)

图 5. $p\beta$ -CD/GC 电极在 $10\ \mu\text{M UA}$ 和不同浓度 AA 混合溶液中的 SWV 图。AA 的浓度(a: $100\ \mu\text{M}$, b: $500\ \mu\text{M}$)

3.4. β -CD 聚合圈数对检测的影响

图 6(A)显示了不同聚合圈数的 $p\beta$ -CD/GC 电极在 $100 \mu\text{M}$ UA + $500 \mu\text{M}$ AA 混合溶液中的 SWV 曲线。图 6(B)直观地显示了 UA 的氧化峰电流随 β -CD 聚合圈数的变化。由图可知,随着聚合圈数的增加,UA 的氧化峰电流先逐渐增大,在聚合圈数为 40 圈时,达到最大。这是因为电极表面修饰了更多的环糊精,能富集更多的 UA。但当 β -CD 的聚合圈数达到 50 圈时,UA 峰电流开始减小。这可能是由于过多的 β -CD 覆盖在电极表面,导致彼此的空腔被遮挡,对 UA 的富集效率降低。因此,实验中选择 40 圈为最佳的 β -CD 聚合圈数。

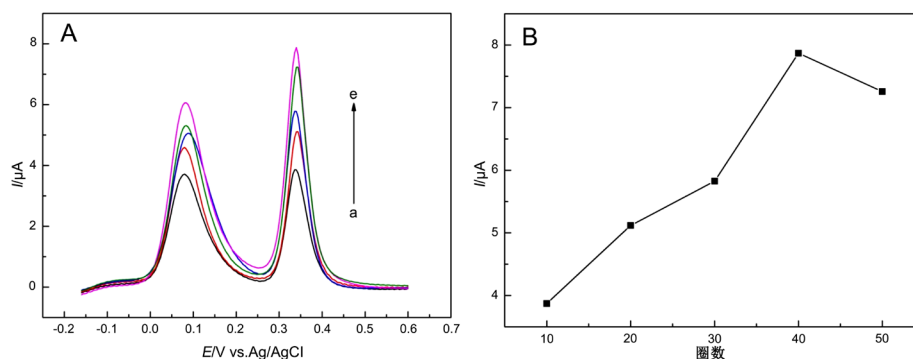


Figure 6. A: SWV responses in the mixture of $100 \mu\text{M}$ UA and $500 \mu\text{M}$ AA at $p\beta$ -CD/GCE with different electro-polymerization cycle numbers (β -CD: a \rightarrow e: 10, 20, 30, 50, 40). B: The effect of the electro-polymerization cycle number of β -CD on the oxidation peak current of UA

图 6. A:不同聚合圈数的 $p\beta$ -CD/GC 电极在 $100 \mu\text{M}$ UA + $500 \mu\text{M}$ AA 混合溶液中的 SWV 曲线(β -CD 的聚合圈数:a \rightarrow e: 10, 20, 30, 50, 40)。B: UA 氧化峰电流随 β -CD 聚合圈数的变化曲线

3.5. $p\beta$ -CD/GC 电极对 UA 的检测

在最优的实验条件下,固定 AA 的浓度为 $500 \mu\text{M}$,采用 SWV 法对不同浓度的 UA 进行检测。由图 7(A)可知,随着 UA 浓度的增大,其峰电流逐渐增加。响应电流值与 UA 的浓度在 $10\sim 500 \mu\text{M}$ 范围内呈现良好的线性关系(图 7(B)),其线性方程为: $I(\mu\text{A}) = 0.07292c(\mu\text{M}) + 0.6384$ ($R^2 = 0.9990$);对 UA 的检测下限为 $0.54 \mu\text{M}$ ($S/N = 3$)。AA 与 UA 的氧化峰相隔较远,对 UA 的测定无影响。以上结果表明,该传感器可以实现在高浓度 AA 条件下,对 UA 的选择性检测。

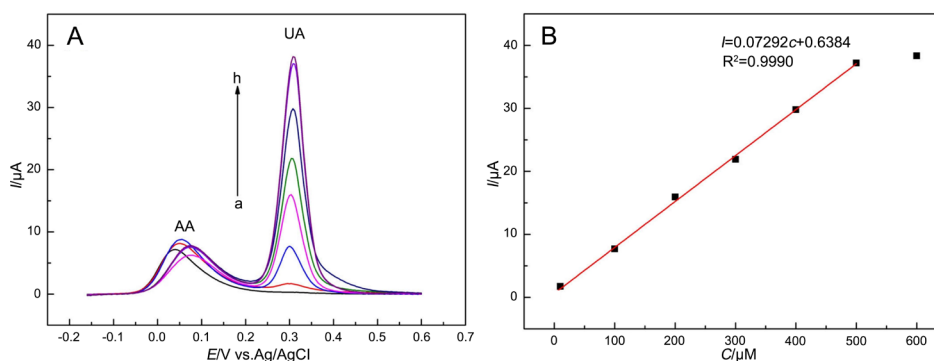


Figure 7. A: SWV responses at $p\beta$ -CD/GCE for different concentrations of UA in the presence of $500 \mu\text{M}$ AA (a \rightarrow h: $0 \mu\text{M}$, $10 \mu\text{M}$, $100 \mu\text{M}$, $200 \mu\text{M}$, $300 \mu\text{M}$, $400 \mu\text{M}$, $500 \mu\text{M}$, $600 \mu\text{M}$). B: Calibration curve of the oxidation peak current of UA to its concentration

图 7. A: $p\beta$ -CD/GC 电极在 $500 \mu\text{M}$ AA 和不同浓度 UA 的混合溶液中的 SWV 曲线(a \rightarrow h: $0 \mu\text{M}$, $10 \mu\text{M}$, $100 \mu\text{M}$, $200 \mu\text{M}$, $300 \mu\text{M}$, $400 \mu\text{M}$, $500 \mu\text{M}$, $600 \mu\text{M}$); B: UA 的氧化峰电流与浓度之间的校正曲线

3.6. 修饰电极的重复性

在最优的实验条件下, 制备 5 根 p β -CD/GC 电极, 分别测定 100 μ M UA + 500 μ M AA 的混合溶液, 测得 UA 的氧化峰电流值分别为 7.94 μ A、8.15 μ A、8.28 μ A、7.55 μ A、7.71 μ A, 五次检测结果的相对标准偏差(RSD)为 3.8%, 表明该修饰电极具有良好的重复性。

3.7. 修饰电极的选择性

之前的实验表明, 该传感器能够有效地排除高浓度 AA 的干扰。在最优的实验条件下, 固定 UA 的浓度为 50 μ M, 加入其他可能共存的干扰物, 进一步考察传感器的选择性。实验结果表明, 10 倍浓度的多巴胺, 20 倍浓度的 Ca²⁺、水杨酸、L-谷氨酸、葡萄糖、柠檬酸, 30 倍浓度的蔗糖和 50 倍浓度的尿素对 UA 的检测均无明显干扰。以上结果表明该修饰电极具有良好的选择性。

3.8. 实际尿样分析

为了评估 p β -CD/GC 电极对实际样品检测的性能, 以人体尿液样品为例, 考察了该修饰电极对 UA 的回收情况。将适量的人体尿液静置一夜, 取上清液, 并用 PBS 将其稀释 3000 倍。在最优的实验条件下, 在尿样中分别加入 10 μ M UA、200 μ M UA、400 μ M UA, 并进行 SWV 检测。实验结果如表 1 所示, 回收率在 94.32%~100.2%之间。该传感器表现出了令人满意的回收结果, 有望进一步用于 UA 的实际检测中。

Table 1. Recovery assays of UA in real urine samples

表 1. 实际尿液样品中 UA 的回收实验

样品	加入量(μ M)	测定量(μ M)	回收率(%)	RSD (% , $n = 3$)
1	10	10.02	100.2	4.7
2	200	188.65	94.32	4.2
3	400	383.89	95.97	2.8

4. 结论

本文利用电化学聚合法, 成功制备了聚 β -环糊精修饰玻碳电极(p β -CD/GCE), 作为传感平台。基于 β -CD 对 UA 的主客体识别作用, p β -CD/GC 电极可以有效地将 UA 分子富集于电极表面。相比于裸玻碳电极, 该修饰电极检测到的 UA 的 SWV 氧化峰电流明显增加。此外, 该电极还能有效地分离 UA 和干扰物 AA 的 SWV 氧化峰电位, 从而实现在高浓度 AA 条件下, 对 UA 的选择性测定。在优化的实验条件下, 该传感器对 UA 的检测表现出了令人满意的结果, 如宽的线性范围(10 μ M~500 μ M)、低的检测下限(0.54 μ M, S/N = 3)、良好的重复性和选择性, 其可用于实际尿样的检测中。

参考文献

- [1] Ndrepepa, G. (2018) Uric Acid and Cardiovascular Disease. *Clinica Chimica Acta*, **484**, 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2018.05.046>
- [2] Immanuel, S., Aparna, T.K. and Sivasubramanian, R. (2019) A Facile Preparation of Au-SiO₂ Nanocomposite for Simultaneous Electrochemical Detection of Dopamine and Uric Acid. *Surfaces and Interfaces*, **14**, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.11.010>
- [3] Su, T.T., He, L., Mo, R.J., Zhou, C.X., Wang, Z., Wang, Y., Hong, P.Z., Sun, S.L. and Li, C.Y. (2018) A Non-Enzymatic Uric Acid Sensor Utilizing Ion Channels in the Barrier Layer of a Porous Anodic Alumina Membrane. *Electrochemistry Communications*, **96**, 113-118. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.10.017>

- [4] Motshakeri, M., Travas-Sejdic, J., Phillips, A.R.J. and Kilmartin, P.A. (2018) Rapid Electroanalysis of Uric Acid and Ascorbic Acid Using a Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene)-Modified Sensor with Application to Milk. *Electrochimica Acta*, **265**, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.147>
- [5] Wang, J., Yang, B.B., Zhong, J.T., Yan, B., Zhang, K., Zhai, C.Y., Shiraishi, Y., Du, Y.K. and Yang, P. (2017) Dopamine and Uric Acid Electrochemical Sensor Based on a Glassy Carbon Electrode Modified with Cubic Pd and Reduced Graphene Oxide Nanocomposite. *Journal of Colloid and Interface Science*, **497**, 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.03.011>
- [6] Lavanya, N., Fazio, E., Neri, F., Bonavita, A., Leonardi, S.G., Neri, G. and Sekar, C. (2015) Simultaneous Electrochemical Determination of Epinephrine and Uric Acid in the Presence of Ascorbic Acid Using SnO₂/Graphenenanocomposite Modified Glassy Carbon Electrode. *Sensors and Actuators B*, **221**, 1412-1422. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.08.020>
- [7] Zhang, L.Q., Feng, J., Chou, K.-C., Su, L. and Hou, X.M. (2017) Simultaneously Electrochemical Detection of Uric Acid and Ascorbic Acid Using Glassy Carbon Electrode Modified with Chrysanthemum-Like Titanium Nitride. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **803**, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.09.006>
- [8] Zhao, D.Y., Yu, G.L., Tian, K.L. and Xu, C.X. (2016) A Highly Sensitive and Stable Electrochemical Sensor for Simultaneous Detection towards Ascorbic Acid, Dopamine, and Uric Acid Based on the Hierarchical Nanoporous PtTi Alloy. *Biosensors and Bioelectronics*, **82**, 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.03.074>
- [9] Reddy, Y.V.M., Sravanib, B., Agarwal, S., Gupta, V.K. and Madhavi, G. (2018) Electrochemical Sensor for Detection of Uric Acid in the Presence of Ascorbic Acid and Dopamine Using the Poly(DPA)/SiO₂@Fe₃O₄ Modified Carbon Paste Electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **820**, 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.04.059>
- [10] 易银辉, 孙恒, 钱俊娟, 朱刚兵. 环糊精功能化碳纳米材料的制备及电化学分析研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(12): 126-134.
- [11] Zhang, D.J., Zhang, J.P., Lv, P., Zhao, Y.L., Liao, X.L., Gao, C.Z. and Yang, B. (2019) Biotin-Functionalized Targeting Anti-Tumor Complex Based on β -Cyclodextrin and Methotrexate. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **49**, 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2018.11.015>
- [12] 于飞, 崔天然, 陈德贤, 姚温浩, 孙怡然, 马杰, 和怡雯. 环糊精基复合吸附剂的制备及对水中有机污染物去除的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(10): 3645-3653.
- [13] Gidwani, B. and Vyas, A. (2014) Synthesis, Characterization and Application of Epichlorohydrin- β -cyclodextrin Polymer. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **114**, 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.09.035>
- [14] Zhu, G.B., Wu, L., Zhang, X., Liu, W., Zhang, X.H. and Chen, J.H. (2013) A New Dual-Signalling Electrochemical Sensing Strategy Based on Competitive Host-Guest Interaction of a β -Cyclodextrin/Poly(Nacetylaniline)/Graphene-Modified Electrode: Sensitive Electrochemical Determination of Organic Pollutants. *Chemistry—A European Journal*, **19**, 6368-6373. <https://doi.org/10.1002/chem.201204635>
- [15] Zhang, X., Wu, L., Zhou, J.W., Zhang, X.H. and Chen, J.H. (2015) A New Ratiometric Electrochemical Sensor for Sensitive Detection of Bisphenol a Based on Poly- β -Cyclodextrin/Electroreducedgraphene Modified Glassy Carbon Electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **742**, 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.02.006>
- [16] Gong, W., Dou, Z.-Y., Cui, L.-L., Liu, D.-J. and He, X.-Q. (2012) Electrocatalytic Oxidation and Simultaneous Determination of Uric Acid, Xanthine, Hypoxanthine and Dopamine Based on β -Cyclodextrin Modified Glassy Carbon Electrode. *Chemical Research in Chinese Universities*, **28**, 1047-1053.
- [17] 李宁波, 何凤云, 李丽, 胡耀娟, 白程超, 段雨晴. 高浓度抗坏血酸存在下氮掺杂石墨烯/壳聚糖修饰电极对尿酸的选择性测定[J]. 分析化学, 2015, 43(12): 1859-1863.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-1557，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aac@hanspub.org