以桑色素为探针聚鸟氨酸电化学传感器测定铝含量

吕惠萍，马心英*，陈美凤，朱琪，尹明静，张馨月
（菏泽学院化学化工学院，山东菏泽 274015）

摘要：铝离子过量摄入会对人体健康造成危害，因此建立高灵敏、快速检测铝离子的分析方法具有重要意义。其中电化学传感器因操作简便、响应快速而受到关注。为了构建一种基于聚鸟氨酸修饰电极（Polyornithine Modified Electrode，POrn/GCE）并以桑色素为探针的电化学传感器，用于实现对铝离子的灵敏检测，并考察其在实际样品中的应用可行性。采用循环伏安法（Cyclic Voltammetry，CV）制备了聚鸟氨酸电化学传感器，并用扫描电镜（SEM）、电化学阻抗谱（EIS）对 POrn/GCE 电极的表面形貌和电化学性能进行了表征。与玻碳电极（Glassy Carbon Electrode，GCE）相比，POrn/GCE 对桑色素具有良好的电催化作用，其峰电流明显增大。由于桑色素能与铝离子形成配位化合物，在同一溶液中，桑色素在 POrn/GCE 上的氧化峰电流随着铝离子浓度的增大而减小，在此基础上构建了以桑色素为探针聚鸟氨酸电化学传感器对铝离子的检测，其线性范围为 8.0×10^{-7}~1.0×10^{-5} mol Ł$^{-1}$，相关系数 R=0.998 3，检出限为 6.00×10^{-7}mol Ł$^{-1}$。该电极用于测定实际样品中的铝离子，回收率为 97.87%~106.38%。该方法简单快速准确，在食品安全等领域有良好的应用前景。

关键词：桑色素；鸟氨酸；电化学传感器；铝离子

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.0518

Determining Aluminum Content Using a Poly-ornithine Electrochemical Sensor Based on Morin as a Probe

LYU Huiping, MA Xinying*, CHEN Meifeng, ZHU Qi, YIN Mingjing, ZHANG Xinyue
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Heze University, Heze 274015, China)

Abstract: Excessive intake of aluminum ions poses a risk to human health; therefore, developing highly sensitive and rapid analytical methods for aluminum ion detection is of great significance. Among various techniques, electrochemical sensors have attracted attention due to their simple operation and fast response. In this study, an electrochemical sensor based on a polyornithine-modified glassy carbon electrode (POrn/GCE) using morin as a probe was constructed for the sensitive detection of aluminum ions, and its feasibility for practical sample analysis was evaluated. The polyornithine electrochemical sensor was prepared using cyclic voltammetry (CV). The surface morphology and electrochemical performance of the POrn/GCE were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Compared with the bare glassy carbon electrode (GCE), the POrn/GCE exhibited excellent electrocatalytic activity toward morin, with a significantly increased peak current. Since morin can form coordination complexes with aluminum ions, the oxidation peak current of morin at the POrn/GCE decreased with increasing aluminum ion concentration in the same solution. Based on this principle, an electrochemical sensor using morin as a probe was developed for aluminum ion detection. The linear range of the sensor was 8.0×10^{-7} to 1.0×10^{-5} mol Ł$^{-1}$, with a correlation coefficient R=0.998 3 and a detection limit of 6.00×10^{-7}mol Ł$^{-1}$. The proposed electrode was successfully applied to determine aluminum ions in real samples, with recovery rates ranging from 97.87% to 106.38%. This method is simple, rapid, and accurate, and holds good application prospects in fields such as food safety.

Key words: morin; ornithine; electrochemical sensor; aluminum ion

铝是地壳中含量最丰富的金属元素之一，因其具有导电导热性好、密度小、优良延展性、耐腐蚀性能强等优良性能，被广泛使用在建筑材料、电线电缆、制造工业、包装制品、涂料以及食品添加剂中[1-3]。在食品工业中，含有铝的食品添加剂（如硫酸铝钾、硫酸铝铵等）经常用于油炸面制品、膨化食品、粉条或蜂蜜中。然而，人体

收稿日期：2026-04-04；修回日期：2026-07-07；接受日期：2026-07-07

作者简介：吕惠萍（1985-），女，硕士，高级实验师，研究方向：电化学分析检测及传感器研究，E-mail：lvhuiping1225@126.com.

通讯作者：马心英（1971-），女，硕士，教授，研究方向：电化学分析及生物传感器的研究，E-mail：maxinying5966@163.com.

对铝的吸收率低，排泄较慢，长期过量食用会导致其在体内逐渐积累，影响正常钙、磷的新陈代谢，导致认知功能障碍和记忆力下降[4,5]。为保障公众的饮食安全，我国对食品中铝的残留量制定了严格的标准。《食品安全国家标准食品添加剂使用标准 GB 2760-2024》[6]中明确规定，油炸面制品、焙烤食品中铝的残留量要小于等于 100 mg kg^{-1}，粉丝、粉条中铝的残留量要小于等于 200 mg kg^{-1}。本实验通过检出限计算出原样品中的铝最低可检出 0.162 mg kg^{-1}，可满足国标检测要求。因此，开发灵敏、快速、便捷且适用于常规检测的食品中铝含量分析检测方法，对保障公众食品安全、防范铝过量摄入带来的健康风险具有重要的现实意义[7]。

目前，用于检测铝离子的方法有分光光度法[8-11]、原子吸收光谱法[12-15]、荧光光谱法[16-19]和电化学分析法[20-23]等。其中，分光光度法操作简便、成本较低，适用于常规分析，但灵敏度相对有限，难以满足痕量检测需求。原子吸收光谱法准确度高、重复性好，是铝离子检测的经典方法之一，然而其仪器设备昂贵、运行维护成本高，且样品前处理较为复杂，限制了其在现场快速检测中的应用。荧光光谱法具有选择性好、响应灵敏等优点，但部分荧光探针的合成路线复杂、耗时较长，不利于大规模推广。相比之下，电化学分析法凭借其简单易行、灵敏度高、稳定性好、检测速度快以及仪器成本低廉等显著优势，在痕量金属离子检测领域得到了广泛关注[24-28]。

本实验通过循环伏安法把鸟氨酸单体修饰在玻碳电极（GCE）的表面，并以桑色素为探针，构建新型铝离子电化学传感器。桑色素是一种天然的黄酮类化合物，其分子结构中含有多个羟基和羰基，能够与铝离子发生特异性配位络合反应，从而引起传感器界面电化学信号的变化。通过研究桑色素在 POrn/GCE 上氧化峰电流大小与铝离子的线性关系进而测定铝离子的含量（图 1）。该传感器在线性范围、检出限以及抗离子干扰方面展现出更优异的分析性能。其性能提升源于聚鸟氨酸提供的氨基位点对桑色素的稳定固载以及两者对 Al^{3+}的协同富集与络合作用，增强了界面电子转移效率。将所构建的传感器应用于实际食品样品中铝离子的加标回收实验，结果满意，验证了该方法在实际检测中的可靠性和实用性。

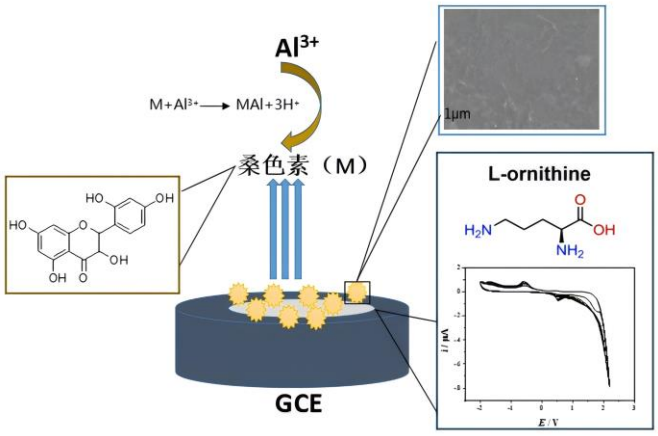


图 1 POrn/GCE 的聚合循环伏安曲线、电子扫描显微镜图（SEM）及以桑色素为探针聚鸟氨酸电化学传感器检测铝离子原理图

Fig.1 CV Curves of POrn/GCE Polymerization, SEM Images, and Schematic for Al^{3+}Detection by Morin-Probed Polyornithine Electrochemical Sensor

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

CHI660 电化学工作站，上海辰华仪器有限公司；KQ-100 超声波清洗器，昆山市超声仪器有限公司；SYZ－550 石英亚沸高纯水蒸馏器，金坛市江南仪器厂；Gemini SEM 300 发射扫描电子显微镜，蔡司。

桑色素（1.00×10^{-3} mol Ł$^{-1}$），上海麦克林生化科技有限公司；鸟氨酸（1.00×10^{-3} mol Ł$^{-1}$），上海麦克林生化科技股份有限公司；硫酸铝（1.00×10^{-3} mol Ł$^{-1}$），国药集团化学试剂有限公司；磷酸氢二钠，天津市科密欧化学试剂有限公司；柠檬酸，莱阳经济技术开发区精细化工厂；红薯粉条，产地：河南。

1.2 POrn/GCE 制备

将 GCE 在放置有三氧化二铝粉末的麂皮上打磨 30 s，用蒸馏水冲洗干净后，依次在硝酸（体积比为 1:1）、无

水乙醇、蒸馏水中超声清洗 30 s，红外干燥备用。将处理好的电极放置于鸟氨酸溶液（1.00×10^{-4} mol Ł$^{-1}$，pH 值=8.0）中，电位为-2.0~2.2 V，扫描速率为 0.04 V/s，扫描 12 段，循环伏安法制备 POrn/GCE。

1.3 实验方法

1.3.1 分析检测方法

本研究采用三电极体系进行电化学测定：以聚鸟氨酸修饰玻碳电极（POrn/GCE）为工作电极，Ag/AgCl 电极为参比电极，铂电极为对电极。测定前，将适量桑色素溶液与不同浓度的 Al 标准溶液混合均匀，在最优实验条件下孵育 40 s，使 Al^{3+}与桑色素充分发生配位反应。随后将三电极体系浸入上述混合溶液中，采用循环伏安法扫描，记录桑色素的氧化峰电流。由于 Al^{3+}与桑色素形成配合物后，溶液中游离桑色素的浓度降低，导致其在 POrn/GCE 上的氧化峰电流随之减小。据此，以桑色素的氧化峰电流为响应信号，根据标准曲线可实现对未知样品中 Al^{3+}浓度的定量分析。

1.3.2 数据分析

记录不同浓度 Al^{3+}标准溶液对应的桑色素氧化峰电流值（i_{pa}），绘制标准曲线，进行分析。所有实验重复测定至少 3 次，结果以平均值±标准偏差（SD）或相对标准偏差（RSD）表示。采用 Origin 软件进行数据拟合与统计分析。

1.4 样品处理

采用干灰化法对粉条样品进行前处理。首先将粉条样品粉碎、混合均匀后，准确称取 5.00 g 样品置于瓷坩埚中，在电炉上小火炭化至无烟，再将坩埚转移至马弗炉中，从室温开始升温，设置升温速率为 5 ℃/min 至 550 ℃，达到设定温度后，保持恒温 4~6 h，直至样品完全变为灰白色或浅灰色灰分。取出坩埚冷却至室温后，向其中加入 0.5 mol Ł$^{-1}$ 硝酸溶液 10 mL，置于电热板上 80 ℃微热 15~20 min，轻轻摇动使灰分充分溶解。随后用少量 0.5 mol Ł$^{-1}$ 硝酸溶液多次洗涤坩埚内壁，将洗涤液一并转移至漏斗中过滤，以除去可能存在的少量不溶性杂质。过滤完成后，继续用 0.5 mol Ł$^{-1}$ 硝酸溶液洗涤滤渣 2~3 次，确保待测组分完全转移。将收集的滤液全部转移至 50 mL 容量瓶中，用 0.5 mol Ł$^{-1}$ 硝酸溶液定容至刻度线，摇匀，即得待测液，备用。同时制备试剂空白（10 mL 0.5 mol Ł$^{-1}$ 硝酸溶液直接定容至 50 mL）作为对比。整个操作过程应避免引入污染，所用器皿均需用硝酸浸泡清洗。该方法操作简便、适用性强，能够有效去除粉条中的有机基质，适用于后续电化学传感器对铝离子的检测分析。

2 结果与讨论

2.1 桑色素的电化学行为

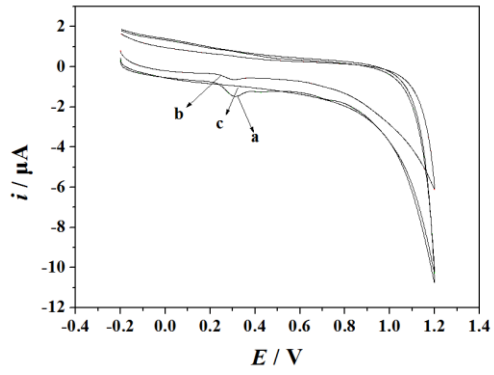


图 2 POrn/GCE 测定桑色素溶液，GCE 测定桑色素溶液，POrn/GCE 测定空白溶液循环伏安曲线

Fig.2 CV Curves: POrn/GCE in Morin Solution, GCE in Morin Solution , POrn/GCE in Blank Solution

注：a 为 POrn/GCE 测定桑色素溶液；b 为 GCE 测定桑色素溶液；c 为 POrn/GCE 测定空白溶液。

图 2 中 a 为 POrn/GCE 测定桑色素溶液，b 为 GCE 测定桑色素溶液，c 为 POrn/GCE 测定空白溶液循环伏安曲线。由图 2 可以看出，桑色素在 GCE 上的氧化峰电流较小，i_{pa}=-2.62 μA，E_{pa}=0.31 V，POrn/GCE 测定的桑色

素的 i_{pa}=-6.62 μA，E_{pa}=0.32 V，POrn/GCE 上桑色素的 i_{pa} 是 GCE 上的 2.5 倍，表明 POrn/GCE 对桑色素的电化学氧化过程有一定的催化作用，提高了其反应的电子转移速度。

2.2 POrn/GCE 最佳聚合条件的选择

实验结果表明，聚合底液 pH 值、扫描段数（n）、高低电位及扫描速率（v）都会影响 POrn/GCE 的催化性能。采用控制变量法，固定其他条件不变，分别改变单一条件进行实验。结果表明当聚合底液 pH 值=7.0，扫描段数 n=12，高电位为 2.2 V，低电位为-2.0 V，扫描速率 v=0.04 V/s 时，桑色素在 POrn/GCE 上的氧化峰电流最大。

2.3 POrn/GCE 的聚合循环伏安曲线及表征

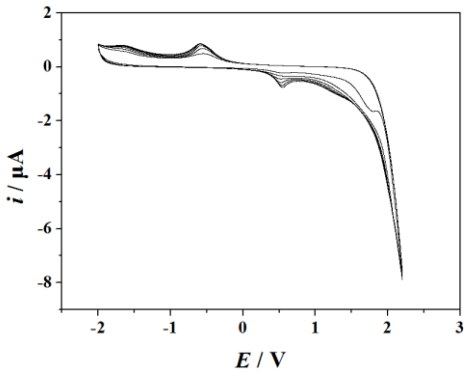


图 3 POrn/GCE 最佳聚合条件下的 CV 图

Fig.3 CV of POrn/GCE at Optimal Polymerization Conditions

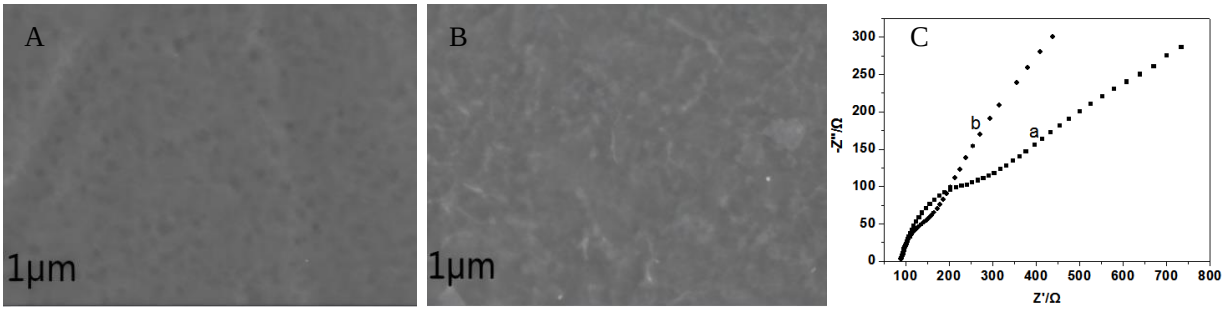


图 4 GCE 和 POrn/GCE SEM、EIS 对比图

Fig.4 SEM and EIS comparison: GCE vs POrn/GCE

注：（A）GCE 的 SEM 图；（B）POrn/GCE 的 SEM 图；（C）GCE（a）和 POrn/GCE（b）EIS 对比图。

图 3 为 POrn/GCE 最佳聚合条件下的循环伏安曲线。由图可以看出，在电位 0.5V 处出现了氧化峰，-0.5V 处出现了还原峰，说明了该电极表面发生了氧化还原反应。图 4A 为 GCE 与图 4B 为 POrn/GCE 的 SEM 对比图，可以看出 POrn/GCE 表面形成了褶皱状结构，说明鸟氨酸被修饰到玻碳电极表面。图 4C 为 EIS 图。电子转移阻抗（Rct）与电子转移能力呈反比，半圆的直径与 Rct 呈正相关的关系[29]。由图可以看出，GCE 的 EIS 图半圆直径大于 POrn/GCE 半圆直径，表明 POrn/GCE 较 GCE Rct 降低，但电子转移能力增加，该传感器具有快速的电子转移动力。

2.4 桑色素响应信号的条件优化

2.4.1 底液酸度的影响

底液酸度对桑色素的氧化还原峰电流和电位均有一定影响。从图 5 可以看出，当底液 pH 值=3.0 时，桑色素的氧化峰和还原峰电流值最大，峰电位随着 pH 值增大而发生负移。当底液 pH 值=3.0 时，质子活度与电子转移数匹配，实现了质子耦合电子转移的最佳动力学协同，因此峰电流最大。在 pH 值 2.2~8.0 之间，氧化峰电位和 pH 值线性关系良好，其方程为 E_{pa}=0.74-0.059 pH，相关系数 R=0.998 8，斜率的绝对值为 0.059，说明该氧化还原

反应有质子参与，并且质子转移数与电子转移数相同[30]。

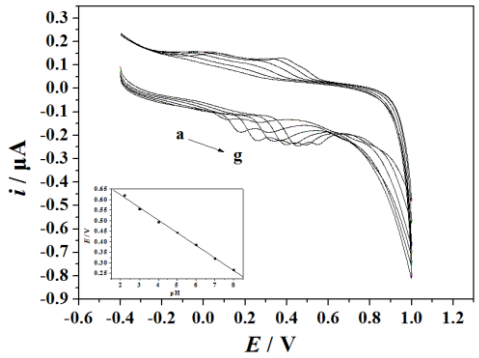


图 5 桑色素在 POrn/GCE 上随 pH 值变化的 CV 曲线（内插图为氧化峰电位随 pH 值变化关系曲线）

Fig.5 CVs of Morin on POrn/GCE at Different pH (Inset: Oxidation Peak Potential vs. pH)

2.4.2 扫描速度的影响

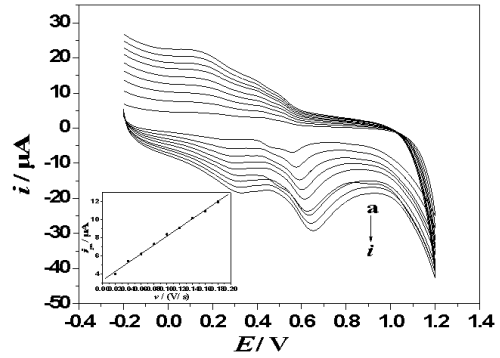


图 6 桑色素在 POrn/GCE 上随扫描速度变化的 CV 曲线（内插图为桑色素氧化峰电流随扫描速度变化的曲线）

Fig.6 CV curves of morin on POrn/GCE at different scan rates. (Inset: oxidation peak current versus scan rate.)

实验考察了扫描速率分别为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12、0.14、0.16、0.18 V s^{-1}时桑色素在 POrn/GCE 上的循环伏安曲线。如图 6 所示，桑色素氧化峰电流随着扫描速率的增大而增加，综合考虑电极的灵敏性和峰形，选择扫描速率为 0.10 V s^{-1}。桑色素氧化峰电流与扫描速度呈线性关系，方程为 $i_{pa}=3.32\times10^{-5}+4.85\times10^{-4}v$，$R$=0.998 3，说明桑色素在 POrn/GCE 上的电极过程为吸附过程。

2.4.3 高、低电位和搅拌时间的影响

不同电位及搅拌时间对桑色素在 POrn/GCE 上的氧化峰电流有一定的影响。当高电位为 1.2 V，低电位为 -0.2 V，搅拌时间为 40 s 时，桑色素氧化峰电流达到最大。

2.5 线性范围

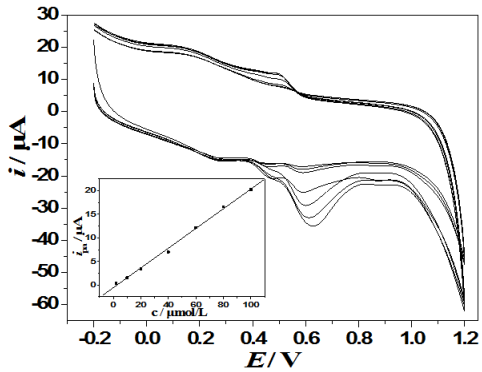


图 7 不同浓度下桑色素在 POrn/GCE 上的 CV 图（内插图为桑色素氧化峰电流随其浓度变化的曲线）

Fig.7 CVs of morin on POrn/GCE at different concentrations.(Inset: oxidation peak current versus concentration.)

桑色素与 Al^{3+}发生配位反应，随着 Al^{3+}的不断加入，桑色素的氧化峰电流逐渐减小，因此通过变化的线性关

系测得 Al^{3+}的浓度。首先，测定不同浓度下桑色素在 POrn/GCE CV 曲线（图 7），其最低检出限为 2.0×10^{-6} mol Ł$^{-1}$。在 2.0×10^{-6}~1.0×10^{-4} mol Ł$^{-1}$ 范围内，桑色素的氧化峰电流与其浓度呈线性关系，方程式为 i_{pa}=-5.56×10^{-7}+0.21c(mol Ł$^{-1}$)，相关系数 R=0.998 3。

在 POrn/GCE 测定桑色素的线性范围内，选择 1.00×10^{-5}mol Ł$^{-1}$ 的桑色素为探针，在相同条件下对不同浓度 Al^{3+}进行测定。从图 8 可以看出，桑色素的 i_{pa} 在 Al^{3+}浓度范围为 8.0×10^{-7}~1.0×10^{-5}mol Ł$^{-1}$ 之间存在线性关系，方程为 i_{pa}=8.36×10^{-6}-0.038c（mol Ł$^{-1}$），相关系数为 R=0.998 3，铝离子检出限为 6.0×10^{-7} mol Ł$^{-1}$。

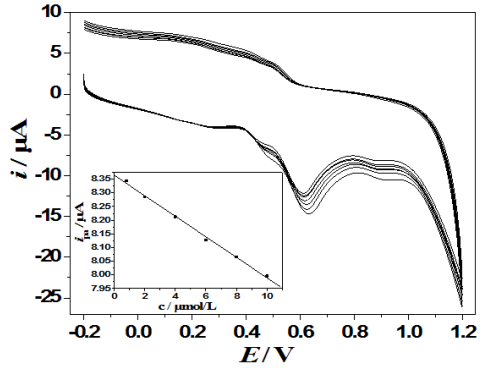


图 8 不同浓度的 Al^{3+}存在时桑色素在 POrn/GCE 上 CV 图（内插图为桑色素氧化峰电流随 Al^{3+}浓度变化）

Fig.8 CV curves of morin on POrn/GCE with different concentrations of Al^{3+}.(Inset: oxidation peak current vs. Al^{3+} concentration.)

2.6 POrn/GCE 的重现性和选择性

在最佳实验条件下，以 6.0×10^{-5} mol Ł$^{-1}$ 的桑色素溶液为探针，平行测定 1.0×10^{-5}mol Ł$^{-1}$ 的 Al^{3+} 6 次，测得桑色素 i_{pa} 的相对标准偏差 RSD=1.5%（n=6），表明以桑色素为探针 POrn/GCE 测定 Al^{3+}的重现性和稳定性良好。为探究 POrn/GCE 在测定 Al^{3+}时的选择性，在最佳测定条件下，加入 100 倍常见阳离子 Mg^{2+}、K^{+}、Na^{+}、NH_4^{+}、Ca^{2+}、Zn^{2+}、Fe^{3+}和常见阴离子 Cl^{-}、NO^{3-}、$SO4^{2-}$进行干扰实验，桑色素氧化峰电流变化值相对误差均在±5%范围内，表明该电极对 Al^{3+}的检测具有较好的选择性。

2.7 实际样品的测定

在最优条件下，取 60 微升粉条样品溶液，采用 CV 法测定样品中 Al^{3+}的含量。在最佳实验条件下平行测定 3 次，其结果见表 1，回收率在 97.87%~106.38%之间，表明该方法说明该方法准确可靠、基质干扰小。综上，本方法对粉条中 Al^{3+}的测定具有良好的实际应用价值。

表 1 粉条样品的测定结果

Table 1 Determination results of vermicelli samples (n=3)

测定次数	样品测定值/(μmol·L^{-1})	加入标准量/(μmol·L^{-1})	样品的测定总量/(μmol·L^{-1})	回收率/%
1	0.48	0.47	0 .94	97.87
2	0.46	0.47	0.96	106.38
3	0.47	0.48	0.95	100.00

3 结论

本研究通过循环伏安法成功制备了聚鸟氨酸修饰玻碳电极（POrn/GCE），并系统优化了聚合条件及桑色素的测定参数，构建了一种新型电化学传感器用于铝离子的间接检测。研究结果表明，在最佳实验条件下，Al^{3+}的引入会与桑色素发生配位作用，Al^{3+}的浓度与桑色素在 POrn/GCE 上的氧化峰电流呈负相关线性关系。在 Al^{3+}浓度范围为 8.0×10^{-7}~1.0×10^{-5}mol Ł$^{-1}$ 时，桑色素的氧化峰电流随着 Al^{3+}浓度增大而减小，相关系数 R=0.998 3，铝离子检出限为 6.0×10^{-7}mol Ł$^{-1}$，说明该分析方法具有较高的灵敏度和较宽的检测范围。实际样品的回收率在 97.87%~106.38%之间，将聚鸟氨酸修饰电极测定 1.0×10^{-5}mol Ł$^{-1}$ 桑色素溶液后，取出，用二次蒸馏水冲洗，分别放置 5、15、30 天后，测定同一浓度桑色素溶液，分别保持 98.3%、97.6%、97.0%的初始电流响应，进一步验证

了该传感器在实际复杂基质中的准确性与可靠性，排除了常见共存离子的显著干扰。综上所述，基于 POrn/GCE 的电化学传感器为痕量 Al^{3+}的快速、灵敏检测不仅提供了一种可行的分析平台，也为食品中铝含量的日常监测与安全评估奠定了方法学基础。相较于传统光谱法，该方法具有操作简便、响应快速、成本低廉等优势，在食品安全、环境监测及临床检验等领域展现出良好的应用前景。

参考文献

[1] 陈海勇,蒋莉莉,蔡伟.铝工业的绿色低碳转化势在必行[J].当代贵州,2024,Z1:90-91.

[2] YOKEL R A. Aluminum in beverages and foods: a comprehensive compilation of regulations; concentrations in raw, prepared, and stored beverages and foods; and intake [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(3): 70175.

[3] GUIHERME R, ALMEIDA V B P, SOUZA E A, et al. Clinical outcomes of the deleterious effects of Aluminum on Neuro-Cognition, inflammation, and health: a review [J]. Nutrients, 2023, 15(9): 2221

[4] 刘育金,李春雷,孟强.含铝食品添加剂及其检测技术与监测分析的研究进展[J].食品工业技,2023,44(7):470-476.

[5] ÇUBUK S, KAPLAN P, NALLBANI B G, et al. A versatile reusable polymer-based sensor for aluminum analysis in various food matrices [J]. Food Chemistry, 2025, 471: 142809.

[6] GB 2760—2024,食品安全国家标准 食品添加剂使用标准[S].

[7] BLAYLOCK R L. Additive aluminum as a cause of induced immunoexcitotoxicity resulting in neurodevelopmental and neurodegenerative disorders: a biochemical, pathophysiological, and pharmacological analysis [J]. Surgical Neurology International, 2024, 15: 1-13.

[8] FAWZY K H, ZAYED M A, FRAG E Y. Chemically modified flubendazole carbon electrochemical sensor for aluminum determination in food stuff, Multivitamin syrup and real water samples supported by DFT calculations, IR and morphological tools [J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136197.

[9] 泮秋立,孙潇慧,张廷文,等.分光光度法和电感耦合等离子体质谱法测定粉条中铝含量的结果比较[J].食品安全质量检测学报,2021,12(17):6929-6932.

[10] GÜRAY T, ERCENGIZ D, UYSAL U D. A new spectrophotometric study with ortho hydroxy schiff base for thedetermination of aluminum in drug [J]. Cumhuriyet Science Journal, 2020, 41(2): 456-461.

[11] 贾天辉,王洁,苏丹,等.淀粉制品中铝残留量的测定[J].现代食品,2024,30(3):189-193.

[12] SAHOO S S, BEHERA K C, BAG B. Substituted thiourea incorporated rhodamine-based chemosensors for selective detection of aluminium ions [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2025, 328: 125494.

[13] 薛巧如,陈宇堃,黄丽华,等.原子吸收光谱法测定果糖二磷酸钠制剂中的铝离子含量[J].中国现代应用药学,2018,35(7):971-974.

[14] 张凯,李明路,董川,等.用于检测铝离子的比色荧光探针及细胞成像研究[J].山西大学学报:自然科学版,2024,3(2):334-340.

[15] MAKARISHCHEVA D D, KOLESNIKOVA O N, TREGUBOVA V E, et al. Development of a quantitative determination method for Aluminum Ions in adsorbed drugs using atomic absorption spectrometry with electrothermal atomization [J]. Pharmaceutical Chemistry Journal, 2022, 56(4): 527-531.

[16] 张书迪,肖晴天,梁志森,等.光纤激光诱导击穿光谱技术快速检测铝质食品包装中铬含量[J].食品安全质量检测学报,2025,16(5):10-15.

[17] 康倩文,张国,柴瑞涛,等.基于碳纳米点荧光增强检测铝离子[J].分析化学,2019,47(12):1901-1908.

[18] AN C N, LI H Y, LIU C F, et al. Novel flavonoid photoswitchable “Turn-On” fluorescent chemosensors: synthesis of bromo flavonols for nanomolar aluminum ion detectionand cellular imaging, among other applications [J]. Journal of Fluorescence, 2024, 34: 2745-2756.

[19] TÜMAY S O, ŞENOCAK A, MERMER A. A "turn-on" small molecule fluorescent sensor for the determination of Al^{3+} ion in real samples: theoretical calculations, and photophysical and electrochemical properties [J]. New Journal of Chemistry, 2021, 45: 18400-18411.

[20] SURESH S, PRABAKARAN G, PRABHU J, et al. A pyridine naphthalene conjugate: ESIPT based molecular chemosensor for Al^{3+} ions and sequential detection of $H_2PO_4^-$ and applications in milk, water samples and bio-imaging [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 133: 106364.

[21] AYALA M C, LÓPEZ L L, JARAMILLO-BOTERO A, et al. Electrochemical modified electrode with bismuth film for

ultrasensitivedetermination of aluminum (iii) [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2022, 919: 116552-116559.

[22] SOLIMAN I M, EI-NAHASS M M, MANSOUR Y. Electrical, dielectric and electrochemical measurements of bulkaluminum phthalocyanine chloride (AlPcCl) [J]. Solid State Communications, 2016, 225: 17-21.

[23] WU S Z, LIANG Y M, GUO H Y. An electrochemical sensor for sub-attomolar determination of aluminum ion with an ultra-wide response range [J]. Microchemical Journal, 2023, 195: 109527.

[24] REYES-LOAIZA V, DE L R J, HEMANDEZ-RENJIFO E, et al. Laser-induced graphene electrochemical sensor for quantitative detection of phytotoxic aluminum ions (Al^{3+}) in soils extracts [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 5772.

[25] YIN M J, YUAN J C, YU L, et al. Poly (L-lysine) modified glassy carbon electrode for sensitive electrochemical measurement of 2, 3, 5, 6-tetramethylpyrazine [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2024, 19: 100500.

[26] DHAMODHARAN A, MURUGAN E, LI H X, et al. Hexagonal morphology nickel sulfde anchored on GrapheneOxide–Modifed glassy carbon electrode for the sensitive detectionof paracetamol in biological samples [J]. Electrocatalysis, 2025, 16: 182-195.

[27] KADER M, AZMIN, KAFI A. Recent advances in gold nanoparticles modified electrodes in electrochemical nonenzymatic sensing of chemical and biological compounds [J]. Inorganic Chemistry Communications, 2023, 153: 110767.

[28] 吕惠萍,马心英,陈美凤,等.基于聚鸟氨酸修饰的玻碳电极用循环伏安法测定盐酸肾上腺素注射液中肾上腺素的含量[J].理化检验-化学分册,2022,58(5):506-511.

[29] 孙心悦.基于氧化石墨烯的电化学传感器对酚类内分泌干扰物的检测研究[D].上海:上海师范大学,2022.

[30] YANG D X, ZHU L D, JING X Y, et al. Sensitive determination of Sudan I at an ordered mesoporous carbon modified glassy carbon electrode [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 141(1): 124-129.