

基于金纳米粒子-纳米氧化铈-石墨烯复合物修饰电极对环境水体中As(III)的检测

白雪华¹, 孟佩俊¹, 李淑荣¹, 刘燕茹², 罗利霞^{1*}

(1. 包头医学院公共卫生学院, 内蒙古 包头 014040;

2. 包头医学院医学技术与麻醉学院, 内蒙古 包头 014040)

摘要:先通过滴涂法制备纳米氧化铈-石墨烯(CeO₂-Gr)复合物修饰玻碳电极(GCE),再在含氯金酸(HAuCl₄)的缓冲溶液中,采用循环伏安法将Au(III)还原到CeO₂-Gr表面,从而制得AuNPs/CeO₂-Gr/GCE。采用电化学阻抗谱法(EIS)对修饰电极进行电化学特性表征。研究了AuNPs/CeO₂-Gr/GCE快速、准确测定水环境中As(III),采用差分脉冲溶出伏安法,探讨了氧化铈与石墨烯质量比、金纳米粒子沉积圈数、沉积时间和沉积电位及干扰离子等对测定结果的影响,并确定检测As(III)的优化实验条件。在最优条件下,该电化学传感器对As(III)具有良好的电流响应,其溶出伏安峰电流与As(III)浓度的线性范围为13.35~387.15 μmol/L,检出限为4.74 μmol/L。在不同干扰离子存在的情况下,传感器对As(III)的选择性较好。为了评估传感器的实际应用能力,以实验室自来水为样本进行As(III)加标检测,加标回收率为90.5%~99.2%,表明该电化学传感器具有监测As(III)的应用潜力。

关键词:电化学;石墨烯;纳米氧化铈;金纳米粒子;As(III)

中图分类号:O657.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)05-0251-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.05.045

Determination of As(III) in environmental water based on gold nanoparticles/cerium oxide/graphene composite modified electrode

BAI Xue-hua¹, MENG Pei-jun¹, LI Shu-rong¹, LIU Yan-ru², LUO Li-xia^{1*}

(1. Public Health School, Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science & Technology,

Baotou 014040, China; 2. School of Medical Technology and Anesthesia, Baotou Medical College,

Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014040, China)

Abstract: Nano cerium oxide-graphene composite modified glassy carbon electrode (CeO₂-Gr/GCE) is prepared through a drop coating method. Furthermore, AuNPs/CeO₂-Gr/GCE is prepared through reducing Au(III) onto the surface of CeO₂-Gr by cyclic voltammetry method in buffer solution containing chloroauric acid (HAuCl₄). The modified electrode is characterized by means of electrochemical impedance spectroscopy (EIS). A fast and accurate differential pulse stripping voltammetry method (DPSV) based on AuNPs/CeO₂-Gr/GCE is developed for determining As(III) in the aqueous environment. Some influencing factors such as the mass ratio of graphene to cerium oxide, the circle number, time and potential of gold nanoparticle sedimentation, and interference ions are studied, and the optimal experimental conditions for detecting are determined. Under the optimal experimental conditions, As(III) shows a good current response on this modified electrode. The electrode exhibits good linearity and reproducibility for As(III) concentration in the range of 13.35~387.15 μmol·L⁻¹, with a detection limit of 4.74 μmol·L⁻¹. It is indicated by anti-interference experiment result that this modified electrode exhibits good selectivity for As(III). As the modified electrode is served for the determination of As(III) in laboratory tap water samples, the spiked recovery ranges from 90.5% to 100.1%, indicating a potential in monitoring As(III).

Key words: electrochemistry; graphene; nano cerium oxide; gold nanoparticles; As(III)

As(III)污染在许多国家和地区仍是最严重的环境问题之一^[1],人类长期摄入或暴露于As(III)环境下可导致脑血管疾病、皮肤癌等多种慢性疾病^[2]。因此,开发对As(III)高效和准确的检测方法是非常有意义的。

As(III)的检测方法包括电感耦合等离子体质谱法^[3]、原子荧光光谱法^[4]、氢化物发生原子吸收光谱法^[5]、火焰原子吸收光谱法^[6]和ICP原子发射光谱法^[7]等。这些方法虽然可以准确地检测As(III),但往往都需要大型的仪器和熟练的检测人

收稿日期:2024-01-04;修回日期:2024-03-05

基金项目:包头医学院大学生“花蕾计划”项目(110-2023300729);内蒙古自治区教育教学研究“十四五”规划项目(NJGJH202203)

作者简介:白雪华(1998-),男,硕士生;罗利霞(1980-),女,博士,教授,研究方向为电化学传感器的构建以及应用,通讯联系人,luoluo_80@yeah.net。

员,并且还存在着成本高、耗时长、步骤烦琐等局限^[8]。而电化学传感检测具有低成本、速度快、易操作、仪器便携等方面的优势^[9],当下已经成为热点检测技术研究。

近年来,片状的石墨烯材料因优异导电性被广泛应用于传感器领域中,而且因石墨烯具有二维晶体结构,可大面积生长,经过各种修饰后,可制备各种灵敏电化学传感器应用于痕量或超痕量物质的检测^[10]。在本课题组中,基于石墨烯材料构建电化学传感器用于部分重金属离子检测中,已取得了较好的效果^[11-13]。然而,因合成时石墨烯表面能降低和杂质的存在而易团聚,有相关文献报道,石墨烯与金属氧化物复合可提高导电性并大大改善其分散性^[14]。在过渡金属氧化物中,发现纳米氧化铈结构比较特殊,结构中的 Ce(III)和 Ce(IV)可自由切换,在此过程中形成的氧空位对重金属和类金属离子的氧化还原具有良好的催化活性。本课题组也利用石墨烯/纳米氧化铈复合物修饰电极完成了对抗坏血酸和铅离子的检测^[13,15]。纳米金具有良好的生物相容性,能够维持分子的活性,为氧化还原反应的发生提供稳定条件,并且可与 As(III)形成金属化合物从而提高电化学检测的灵敏度^[16]。然而,使用金纳米粒子-纳米氧化铈-石墨烯复合物修饰电极测定 As(III)却少有报道。

本研究以低成本且导电性强的 Gr 和增强电催化活性的 CeO₂ 为基底修饰玻碳电极,利用电沉积技术在电极表面沉积了高度分布的 AuNPs,制备了 As(III)电化学传感器。使用 EIS 对传感器进行表征,用差分脉冲溶出伏安法(DPSV)评价了传感器的电化学行为,通过控制不同实验条件进行了优化,在最优条件下对传感器进行了方法学评价,并且以实验室自来水为样本进行了真实样品检测。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

CHI900D 电化学工作站(上海辰华仪器公司); NexION5000G 电感耦合等离子质谱仪(珀金埃尔默股份有限公司);三电极系统,工作电极为玻碳电极(GCE, $\Phi=3$ mm),辅助电极为铂丝电极,参比电极为 Ag/AgCl 电极。

石墨烯(纯度 $\geq 98\%$,深圳国森领航科技公司);纳米氧化铈(质量分数 $\geq 99.5\%$,罗恩试剂有限公司);Nafion 溶液(质量分数 5.0%,上海麦克林

生化科技股份有限公司);四氯金酸-三水合物(质量分数 $\geq 99\%$,上海麦克林生化科技股份有限公司);乙醇(质量分数 $\geq 99.7\%$)(罗恩试剂有限公司);铁氰化钾(质量分数 $\geq 99.5\%$,天津大茂化学试剂厂);F(-I)、Ba(II)、Sn(II)、Zn(II)、Cu(II)、As(III)标准溶液(1 mg/mL,国家有色金属及电子材料分析测试中心)。其他试剂均为分析纯。实验用水均为超纯水,电阻率为 18.2 M Ω ·cm。

1.2 AuNPs/CeO₂/Gr/GCE 的制备

称取质量和为 6 mg 的 Gr 与 CeO₂(质量比 8:1)混合物分散于 1 mL 无水乙醇溶液中,再加入体积分数为 0.5% Nafion 溶液,超声分散 1 h,得到 6 mg/mL 的 CeO₂/Gr 复合物溶液。

在进行电极修饰之前,用 0.05 μm Al₂O₃ 粉末对裸玻碳电极进行抛光,使其达到镜面光滑。为了除去电极表面的吸附物,用 HNO₃(体积比 1:1)、乙醇和纯水按顺序对电极进行超声波洗涤,晾干。将 10 μL CeO₂/Gr 分散液滴于洁净的玻碳电极上并用红外灯烤干,然后将制备好的 CeO₂/Gr/GCE 置于含有 1 mmol/L HAuCl₄ 的 1 mmol/L 的 KCl 溶液中,选用 CV 法,设置条件:扫描速率 0.02 V/s、灵敏度 1.0e-004 A/V、电位范围 -0.5~1 V、扫描 20 圈,即制得 AuNPs/CeO₂/Gr/GCE(见图 1)。

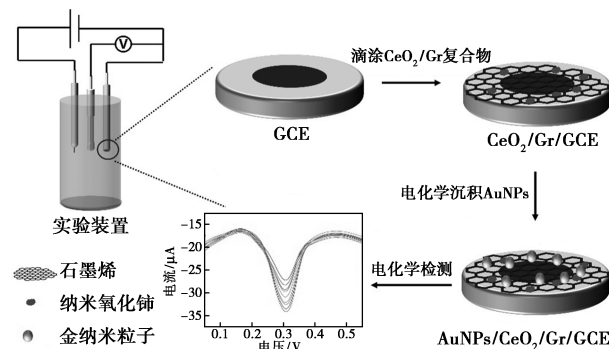


图 1 As(III) 电化学传感器的构建

1.3 电化学检测

使用三电极工作体系,在含有 As(III)的 0.1 mol/L PBS(pH=5)缓冲溶液中,通过优化 Gr 与 CeO₂ 的质量比、电沉积 AuNPs 的扫描圈数、沉积时间和沉积电位来制备出检测 As(III)最优的修饰电极,采用 DPSV 法,设置实验参数:电位范围为 -0.1~0.7 V、电位增量 4 mV、振幅 50 mV、沉积电位 -0.9 V、沉积时间 300 s、扫描速率 0.05 V/s,以此得到 As(III)的电化学信号。所有结果以平均值 \pm 标准偏差(SD)表示,实验均在室温、通 N₂ 下进行。

2 结果与讨论

2.1 AuNPs/CeO₂/Gr/GCE 的制备

图2为CeO₂/Gr/GCE在含有1 mmol/L HAuCl₄的1 mmol/L的KCl溶液中的CV图。在-0.15 V和0.8 V处出现了一对还原峰电流,表明Au³⁺成功发生了还原反应,反应方程式如下:

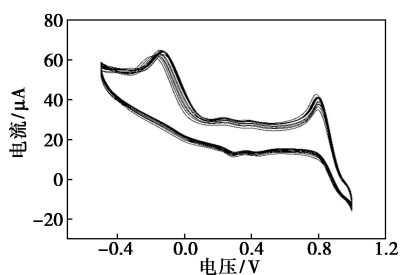
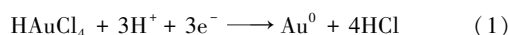
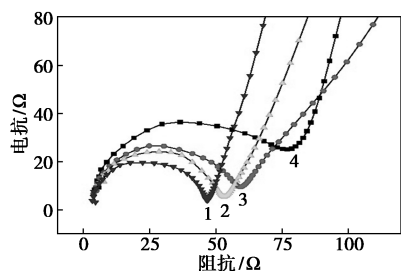


图2 CeO₂/Gr/GCE在含有1 mmol/L HAuCl₄的1 mmol/L的KCl溶液中的CV图

随着AuNPs不断沉积进而占据了电极表面更多的活性空缺点,故峰电流值与扫描的圈数呈正比并且电位略有正移。因此说明通过电化学沉积方法成功将金纳米粒子还原于以Gr和CeO₂为基底的电极表面。

2.2 电化学表征

通过EIS研究了不同修饰电极的电化学阻抗。图3分别展示了不同修饰电极在10 mmol/L [Fe(CN)₆]^{3-/4-}混合溶液中的阻抗变化情况。结果表明,相比于GCE(78 Ω)、Gr/GCE(60 Ω)与CeO₂/Gr/GCE(54 Ω),AuNPs/CeO₂/Gr/GCE(47 Ω)具有更小的阻抗值。这说明负载于电极表面的AuNPs和CeO₂都增大了电极表面传递电子的速度,并且不同修饰电极的阻抗变化也说明了AuNPs和CeO₂成功修饰到了GCE表面。

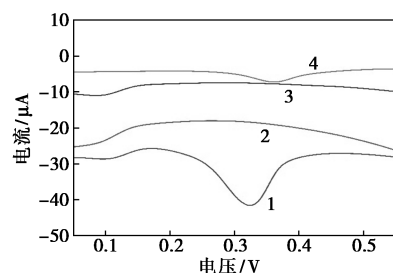


1—AuNPs/CeO₂/Gr/GCE; 2—CeO₂/Gr/GCE;
3—Gr/GCE; 4—GCE

图3 不同修饰电极的电化学阻抗谱

2.3 As(III)在不同修饰电极的电化学行为

在As(III)浓度为106.78 μmol/L的电解质溶液中进行电化学行为测试。用微量进样器取80 μL As(III)标准溶液加到10 mL PBS缓冲溶液中配制待测液,运用DPSV法评估了GCE、CeO₂/Gr/GCE、AuNPs/CeO₂/Gr/GCE和AuNPs/GCE的传感性能。结果如图4所示,在GCE和CeO₂/Gr/GCE上没有出现明显的电流峰,在AuNPs/GCE上有微弱的电流峰,而在AuNPs/CeO₂/Gr/GCE上的0.32 V处出现一个明显的氧化峰,这说明AuNPs/CeO₂/Gr/GCE对As(III)有很强的电催化氧化活性。

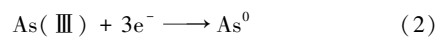


1—AuNPs/CeO₂/Gr/GCE; 2—CeO₂/Gr/GCE;
3—GCE; 4—AuNPs/GCE

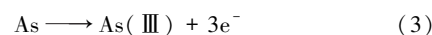
图4 As(III)在不同修饰电极上的DPSV曲线

电极表面的Gr具有高电导率以及更多的吸附位点,并且CeO₂和AuNPs可以增加对As(III)的选择性。所以在沉积期间,溶液中存在的As(III)可以被还原为As⁰吸附在电极表面;而在溶出时电极表面的As⁰则被氧化为As(III)并被剥离从而产生溶出电流,然后记录该电流值,其与溶液中的As(III)浓度呈比例。沉积和溶出的反应方程式如下。

沉积过程:



溶出过程:



2.4 实验条件优化

2.4.1 CeO₂/Gr的质量比

CeO₂/Gr的质量比对电极的导电性以及As(III)的选择性有影响。该实验结果与本课题组之前工作^[13]结果相同。因此选择CeO₂/Gr的质量比为1:8进行实验。

2.4.2 AuNPs沉积圈数

AuNPs的沉积圈数对电极性能和电流大小具有显著影响。沉积圈数太少则不足以对As(III)产生高选择性,影响对As(III)的电催化效果;而沉积圈数太多会导致过多的AuNPs阻碍电子转移通道,

还会使制备电极的时间过长。因此在相同条件下,通过改变 AuNPs 沉积圈数来观察其对 As(III) 的电化学影响。结果表明,当沉积圈数为 20 圈时, AuNPs/CeO₂/Gr/GCE 对 As(III) 的电流响应最大。故选择沉积圈数为 20 进行实验。

2.4.3 沉积时间

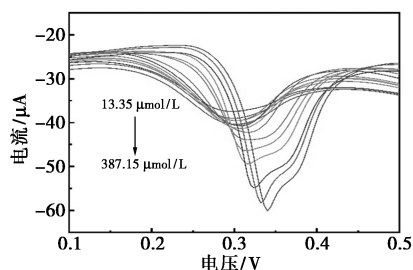
沉积时间是 DPSV 法的关键参数。检测了在相同条件下 100~500 s 范围内的溶出电流,研究发现,在 100~300 s 范围内,峰电流随时间的增大而增大,这是由于该时间段内电极表面富集了大量 As⁰ 所致。但是随着沉积时间的延长,溶出电流不再增加,这主要是由于电极表面可供 As⁰ 的活性位点达到了饱和状态。故后续实验在沉积时间为 300 s 时进行。

2.4.4 沉积电位

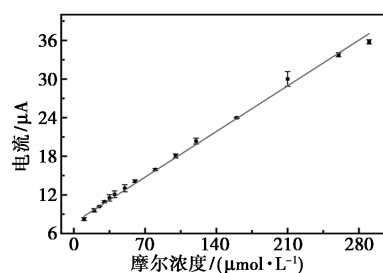
沉积电位对 DPSV 法灵敏度和准确性起关键作用。结果表明,沉积电位从 -0.7 V 变为 -0.9 V 时,峰电流逐渐增大,这是因为较正的电位会使 As(III) 在电极表面溶出不完全;但沉积电位从 -0.9 V 到 -1.1 V 时,峰值电流逐渐下降,这是因为较负的电位使得电极产生了析氢反应,阻碍了 As(III) 在电极表面的溶出。因此,选择 -0.9 V 作为最佳沉积电位。

2.5 方法性能分析

在最佳条件下,用 DPSV 法考察了 AuNPs/CeO₂/Gr/GCE 检测 As(III) 的电化学响应情况。从图 5(a) 可以看出,随着 As(III) 浓度增大,峰电流也随之增大。测定了不同 As(III) 浓度的溶出峰电流,该电流值与 As(III) 浓度在 13.35~387.15 μmol/L 范围内呈良好的线性关系,检出限为 4.74 μmol/L,线性方程为 $I(A) = 0.10c_{As} + 7.67$ ($R^2 = 0.99926$)。图 5(b) 为 DPSV 溶出电流与 As(III) 浓度的线性拟合曲线。表 1 列出了其他 As(III) 电化学传感器的线性范围以及检出限,与之相比,本实验构建的 AuNPs/CeO₂/Gr/GCE 具有一定优势。



(a) DPSV 曲线



(b) 线性拟合曲线

图 5 AuNPs/CeO₂/Gr/GCE 在不同浓度 As(III) 下的 DPSV 曲线与 DPSV 溶出电流与 As(III) 浓度的线性拟合曲线

表 1 不同 As(III) 电化学传感器性能比较 μmol/L

修饰电极	线性范围	检出限
AuNPs/bentoniteclay/GCE ^[17]	0.55~58.06	0.95
In situ AuNPs/SPGE ^[18]	1.34~160.17	0.63
GO/Leucine/Nafion/Au ^[19]	66.74~667.38	6.67
AF/AuNPs/SPCE ^[20]	6.67~200.00	6.61
AuNPs/CeO ₂ /Gr/GCE(本研究)	13.35~387.15	4.74

2.6 稳定性、重复性和重现性

在最优条件下,为了验证电化学传感器的稳定性,用微量移液器取 100 μL As(III) 标准溶液配制成 133.47 μmol/L As(III) 待测溶液进行检测,在经过 10 次检测后,其峰值电流变化幅度较小,计算得 $RSD < 3\%$,说明该电化学传感器具有良好的稳定性。同时构建 5 根相同的工作电极进行检测以验证其重复性是否良好,结果表明 5 次检测结果相近,且 $RSD < 5\%$,说明该电化学传感器的重复性较好。为了验证其重现性,将所制得的电极置于 4℃ 冰箱中冷藏 1 周,每日对同一含 As(III) 的溶液进行测定,结果显示峰电流值波动不超过 8%。说明构建的电化学传感器具有良好的重现性、稳定性和重复性,可用于 As(III) 的连续测定。

2.7 抗干扰性

在含有 66.74 μmol/L As(III) 的 0.1 mol/L PBS 缓冲溶液中分别加入 5 倍干扰离子 F(-I)、Ba(II)、Sn(II)、Zn(II)、Cu(II),平行测定 3 次以评估电化学传感器的抗干扰性能。如表 2 所示,该传感器有良好的抗干扰性。除 Cu(II) 外,加入其他干扰离子时 As(III) 的峰电流强度都在不高于 7% 的 RSD 范围内波动。而加入 5 倍 Cu(II) 后电流强度下降了 53%,这是因为 Cu(II) 是 As(III) 测定的主

要干扰物质,其可与As(III)形成金属间化合物(Cu_3As_2)^[21],从而影响As(III)的溶出,此外有文献报道加入2,4-吡啶二甲酸(PDCA)可降低干扰离子对As(III)的影响^[22]。

表2 不同干扰离子对检测As(III)的影响

干扰离子	加入前 电流值/ μA	加入后 电流值/ μA	(加入后电流值/ 加入前电流值)/%
F(-I)	12.99±0.39	12.41±0.23	96
Zn(II)	12.47±0.52	12.35±0.49	99
Ba(II)	12.21±0.22	13.01±0.36	107
Sn(II)	12.62±0.51	13.32±0.93	106
Cu(II)	11.26±0.42	5.30±0.25	47

2.8 实际样品检测

为了评估电化学传感器的实际应用能力,将实验室自来水1 mL稀释至100 mL。按缓冲液体积比水样体积为19:1的比例分别加入直到电解质溶液总体积为10 mL。结果见表3, AuNPs/CeO₂/Gr/GCE构建的电化学传感器的加标回收率在90.5%~99.2%之间。同时进行了与国标方法的对比,使用了等离子体质谱仪(ICP-MS)进行检测,设置条件转速3.5 r/min、氩气流速0.6 mL/min、检测温度20℃,应用标准曲线法进行检测,结果如表3。所以,实际样品中的As(III)可被AuNPs/CeO₂/Gr/GCE直接检测。

表3 实际水样中As(III)的分析结果(n=3)

样品	AuNPs/CeO ₂ /Gr/GCE			ICP-MS	
	加入量/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	检出量/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/ %	检出量/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率/ %
自来水	40.0	36.2±2.3	90.5	36.3±0.1	90.1
	80.1	76.9±3.9	96.0	82.2±0.4	102.7
	106.8	106.0±4.0	99.2	113.1±1.2	106.0

3 结论

利用滴涂法和电化学沉积技术构建了一种新型As(III)电化学传感器。Gr具有较大的比表面积,可为As⁰的富集提供大量的活性附着位点,并且AuNPs与As(III)可形成金属化合物以及CeO₂的良好电催化性能都为检测As(III)提高了灵敏度。结果表明,所构建的AuNPs/CeO₂/Gr/GCE对

As(III)具有良好的电化学催化作用,有望在将来应用于As(III)的检测。

参考文献

- [1] Joel P, Michael B. Global threat of arsenic in groundwater[J]. Science, 2020, 368(6493): 845-850.
- [2] Zhang L M, Yang Q C, Wang H, et al. Genetic interpretation and health risk assessment of arsenic in Hetao Plain of inner Mongolia, China[J]. Environ Res, 2022, 208: 112680-112680.
- [3] Zhang J Y, Xu Z F. On-site Separation of arsenic species in natural waters by tandem ion-exchange columns and detection by ICP-MS[J]. J Anal Chem, 2023, 78(3): 310-345.
- [4] Valasques S G, Santos D P M A, Silva D F L D, et al. Extraction induced by emulsion breaking for As, Se and Hg determination in crude palm oil by vapor generation-AFS[J]. Food Chem, 2020, 318: 126473.
- [5] Dilek Y, Muhammet A, Ahmet D. Ultra-trace determination of arsenic by platinum-coated tungsten coil Hydride Generation (HG) Atomic Absorption Spectrometry (AAS)[J]. Anal Lett, 2022, 55(17): 2776-2788.
- [6] Suleyman B, Sezin E, Faruk O T, et al. Spray assisted preconcentration method combined with HPLC-Continuous flow hydride generation-FAAS for inorganic arsenic speciation in olive oil samples[J]. J Food Compos Anal, 2023, 123: 105531.
- [7] Jitmanee K, Oshima M, Shoji M. Trace amounts determination of Arsenic(III) and Arsenic(V) in environmental water samples by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) coupled with flow-injection solid-phase collection/concentration system[J]. J Flow Injection Anal, 2019, 21(1): 49-52.
- [8] Karthika A, Selvarajan S, Karuppasamy P, et al. A novel highly efficient and accurate electrochemical detection of poisonous inorganic Arsenic(III) ions in water and human blood serum samples based on SrTiO₃/β-cyclodextrin composite[J]. J Phys Chem Solids, 2018, 127: 11-18.
- [9] Bezing L, Suea N A, Demello A J, et al. Nanomaterials for molecular signal amplification in electrochemical nucleic acid biosensing; recent advances and future prospects for point-of-care diagnostics[J]. Mol Syst Des Eng, 2020, 5(1): 49-66.
- [10] Duan D D, Wang J, Han P X, et al. Dual-monomer molecularly imprinted electrochemical sensor based on amino-functionalized MOFs and graphene for trace determination of taurine[J]. Mikrochimica Acta, 2023, 190(4): 162-162.
- [11] 白雪华, 张碧, 刘莹, 等. 石墨烯钴膜修饰电极电化学法测定水体中的Hg(II)[J/OL]. 分析试验室. [2023-11-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/1.2017.F.0231101.1307.004.html.
- [12] 蒲苏丹, 李淑荣, 王若男, 等. 基于纳米氧化铈-石墨烯修饰电极对环境水体中Pb(II)的测定[J]. 分析试验室, 2023, 42(1): 71-77.
- [13] Pu S D, Wang R N, Bai X H, et al. Research on improvement of detection of Pb in environment waters by graphene/nafion modified glassy carbon electrode[J]. ECS Adv, 2023, 2(3): 030505.
- [14] Zhong Z Y, Wang J J, Jiang S X, et al. Novel electrochemical sensor

- based on $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZrO}_2\text{-graphene oxide}$ for determination of dopamine [J]. *Ionics*, 2022, 28(10): 4853–4865.
- [15] 王若男, 孟佩俊, 李淑荣, 等. 纳米二氧化铈/石墨烯传感器的构建及其对饮品中抗坏血酸的检测 [J]. *现代化工*, 2023, 43(8): 236–240.
- [16] Dutta S, Strack G, Kurup P. Gold nanostar electrodes for heavy metal detection [J]. *Sensors Actuat B-Chem*, 2018, 281: 383–391.
- [17] Rastogi K P, Yadav K D, Andey S, *et al.* Synthesis and characterization of gold nanoparticles incorporated bentonite clay for electrocatalytic sensing of arsenic (III) [J]. *Journal of Chemical Sciences*, 2016, 128(3): 349–356.
- [18] Wisarut K, Phichanan D, Kriangsak S, *et al.* An application of miniaturized electrochemical sensing for determination of arsenic in herbal medicines [J]. *Anal Methods: Applications*, 2022, 14(32): 3087–3093.
- [19] Kumar S, Bhanjana G, Dilbaghi N, *et al.* Fabrication and characterization of highly sensitive and selective arsenic sensor based on ultra-thin graphene oxide nanosheets [J]. *Sensor Actuat B-Chem*, 2016, 227: 29–34.
- [20] Claudia N, Jose J T, Veronica A. A electrochemical biosensor for As(III) detection based on the catalytic activity of *Alcaligenes faecalis* immobilized on a gold nanoparticle-modified screen-printed carbon electrode [J]. *Talanta*, 2021, 223(P2): 121702.
- [21] Li C Y, Wei Y Y, Shen W, *et al.* Ultrahigh sensitivity electroanalysis of trace As(III) in water and human serum via gold nanoparticles uniformly anchored to Co_3O_4 porous microsheets [J]. *Electrochim Acta*, 2021, 368: 137605.
- [22] Isha F, Chansi, Sumaya N, *et al.* Self-assembled gold nano islands for precise electrochemical sensing of trace level of arsenic in water [J]. *Groundw Sustain Dev*, 2021, 12: 100528. ■
- [J]. *Water Science and Technology*, 2015, 71(9): 1361–1366.
- [16] 孙凯学, 赵雷, 冀亚利. 核桃壳磁性活性炭的制备及其性能表征 [J]. *磁性材料及器件*, 2022, 53(2): 81–84.
- [17] Ramesh V, Saivedh G, Gokulakrishnan M, *et al.* 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) adsorptive removal by algal magnetic activated carbon nanocomposite [J]. *Chemosphere*, 2022, 310: 136883.
- [18] Panpan S, Congjin C, Xingyu L, *et al.* Preparation, characterization and adsorption potentiality of magnetic activated carbon from *Eucalyptus* sawdust for removal of amoxicillin: Adsorption behavior and mechanism [J]. *Industrial Crops & Products*, 2023, 203: 117122.
- [19] 秦洁, 常薇, 杜燕萍, 等. 磁性椰壳活性炭的制备与吸附性能 [J]. *西安工程大学学报*, 2021, 35(5): 7–11.
- [20] 王耀耀, 徐文博, 赵向阳. 磁性活性炭的制备及其对亚甲基蓝的吸附性能 [J]. *印染助剂*, 2020, 37(9): 21–24. ■

(上接第 250 页)

- [12] 孙书双, 朱亚明, 赵先奕, 等. 生物质活性炭的制备、应用及再生利用研究进展 [J]. *应用化工*, 2021, 50(11): 3165–3170.
- [13] Marco G, Adele G T, Chitharanjan A P, *et al.* A combined treatment of aerobic activated sludge and powdered activated carbon: Pilot-scale study of per/polyfluoroalkyls (PFASs), organic matters, chromium, and color removal from tannery wastewaters [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 55: 104165.
- [14] Rahmawati R, Permana M G, Harison B, *et al.* Optimization of frequency and stirring rate for synthesis of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles by using coprecipitation-ultrasonic irradiation methods [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 170: 55–59.
- [15] Ahmed M J K, Ahmaruzzaman M. Activated charcoal-magnetic nanocomposite for remediation of simulated dye polluted wastewater

科思创与 GC Insights 联合发布《循环经济的未来之路: 可持续材料的创新与应用》白皮书

近日, 科思创联合 GC Insights 共同发布了《循环经济的未来之路: 可持续材料的创新与应用》白皮书, 深入探讨了可持续材料在推动向循环经济转型中的关键作用, 聚焦循环转型的创新路径。本白皮书旨在帮助企业应对日趋严格的合规挑战以及为企业挖掘产业链之间的合作机遇, 形成循环创新等可持续性竞争优势。

联合国开发计划署 (UNDP) 指出, 我们当前的“线性经济”依赖于提取原材料, 将其转化为产品, 然后将其作为废物丢弃。只有少量所使用的材料得到回收利用, 这对环境造成了重大负担, 并导致了气候、生物多样性和环境污染危机。

循环经济的监管日程正在向前推进。欧洲委员会近年来采取了各项绿色举措。例如, 报废车辆的提案指令规定, 新车使用的塑料必须包含 25% 来自于消费后回收的材料来源, 其中 25% (即总量的 6.25%) 应来自于报废车辆, 从而实现商业闭环。该指令首次重点关注了回收塑料在车辆中的使用。

循环经济是商业的未来。越来越多的来自不同行业的企业将其循环战略作为业务模型的关键部分, 为客户提供环保和经济实惠的解决方案。全球超过一半的大型企业已

经制定了具体可衡量的循环性承诺。

市场对高质量循环材料和产品的需求不断扩张, 同时面临着不同的挑战和市场限制。

本次出版的白皮书重点分析了一系列循环市场挑战, 深入探讨了 5 个市场领先的解决方案和案例研究, 通过分享跨行业龙头企业在循环转型中运用的解决方案和最佳实践案例, 为读者带来一些启发。

白皮书主要看点包括:

(1) 宏观经济趋势。聚焦市场向循环经济转变的前沿政策发展, 合规挑战, 以及消费者需求动态。

(2) 市场挑战与差距。解答错综复杂的生态标签差异、市场回收计划的效率问题, 及缺乏回收可追溯性所带来的洗绿风险。

(3) 新兴趋势及解决方案。对跨行业循环经济市场的最新解决方案及最佳实践案例进行深入分析, 助力企业全方位循环升级。

(4) 可持续回收材料潜力。介绍可持续回收材料的创新发展和市场应用, 助力企业从源头应对循环需求。

(科思创)