

聚多巴胺功能化复合材料的研究 及在食品安全检测中的应用

路悦,吕蕾,何金兴*,李迎秋

(齐鲁工业大学(山东省科学院)食品科学与工程学院,山东济南 250353)

摘要:多巴胺分子在弱碱性条件下容易自聚,并能在各种材料表面沉积形成聚多巴胺(polydopamine,PDA)涂层。PDA能够优化基体材料性能并赋予其亲水性、抗污性能、抗菌性能、生物相容性等,为材料表面的进一步功能化修饰提供了理想的平台。本文对近年来多种PDA功能化复合材料的研究现状进行了归纳和总结,包括聚多巴胺功能化金属纳米粒子、聚多巴胺功能化碳基纳米材料、聚多巴胺功能化金属有机框架、聚多巴胺分子印迹聚合物等,并突出介绍了其在食品中农兽药残留、重金属残留及其它痕量有机污染物检测中的应用,为食品样品前处理技术的发展提供了新的研究方向。

关键词:聚多巴胺,金属纳米粒子,碳基纳米材料,金属有机框架,分子印迹聚合物,农兽药,重金属,残留检测

Research on Polydopamine Functionalized Composite and Its Application in Food Safety Detection

LU Yue, LV Lei, HE Jin-xing*, LI Ying-qi

(College of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology
(Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

Abstract: Dopamine molecules are easy to self-polymerize under weak alkaline conditions, and can deposit on the surface of various materials to form a polydopamine (PDA). PDA can optimize the properties of the substrate materials, equipped it with excellent hydrophilicity, antifouling, antibacterial performance and biocompatibility, which provide an ideal platform for further functional modification on material surface. The recent research status of various PDA functionalized composite, including polydopamine-functionalized metal nanoparticles, polydopamine-functionalized carbon-based nanomaterials, polydopamine-functionalized metal-organic framework and polydopamine molecular imprinting polymers were summarized, their application in the detection of pesticide and veterinary drug residues, heavy metal residues and other trace organic pollutants in food were introduced, which could provide a new research direction for the development of food sample pretreatment technology.

Key words: polydopamine; metal nanoparticle; carbon-based nanomaterial; metal-organic framework; molecular imprinting polymer; pesticide and veterinary drug; heavy metal; residues detection

中图分类号:TS207.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2020)14-0344-05

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020.14.055

引文格式:路悦,吕蕾,何金兴,等.聚多巴胺功能化复合材料的研究及在食品安全检测中的应用[J].食品工业科技,2020,41(14):344-348.

海洋生物贻贝能够分泌具有强粘附性能的贻贝黏附蛋白,粘性蛋白中起到黏附作用的主要成分为3,4-二羟基-L-苯基丙氨酸(多巴,L-DOPA),而作为其衍生物的多巴胺(dopamine,DA)分子亦有同样的性质^[1]。2007年,Haeshin等^[2]研究小组以多巴胺在含氧的弱碱性水溶液里发生氧化自聚为反应机理,首次制备出具有超强黏附性能的聚多巴胺涂层(polydopamine,PDA),自此,聚多巴胺作为一种新型

涂层材料引起科学家们的广泛关注。PDA可以容易地沉积在几乎所有类型的无机和有机基底上,包括超疏水表面,并具有可控的膜厚度和持久的稳定性^[3]。其化学结构中包含许多官能团,如羟基、邻苯二酚、胺和亚胺,这些官能团既可作为理想的分子共价修饰的起始点,又可作为过渡金属离子负载的锚固点,增强纳米材料和聚合物基质之间的界面相互作用^[4-5]。

收稿日期:2019-11-29

作者简介:路悦(1994-),女,硕士研究生,研究方向:食品安全与质量控制,E-mail:luyuezfc@163.com。

*通讯作者:何金兴(1978-),男,博士,副教授,研究方向:食品安全检测,E-mail:jinhc.h@163.com。

基金项目:2018年度山东省重点研发计划(公益类专项)项目(2018GNC110029)。

近年来,关于 PDA 基功能材料制备和应用的报道迅速增加。在生物医学领域,PDA 被应用于生物传感、生物成像、药物/基因传递、组织工程、抗菌等方面^[6-7]。以 PDA 作为碳源,在能源领域也具有广阔的应用前景,碳化后的 PDA 表现出非凡的电催化活性,通过在碳基体上引入 PDA 而掺杂氮元素,为氧化还原反应提供了新活性中心^[8-9]。此外,多巴胺自聚合作为一种适用性广、省时、高效的表面改性方法广泛应用于各种复合纳米材料的制备,用于吸附、电/光/化学催化、传感器研究等,在电池、超级电容器、重金属和有机染料去除、油水分离以及海水淡化等领域逐渐应用^[10]。

在食品安全检测方面,具有丰富吸附位点和官能团的聚多巴胺功能化复合材料已成功应用于食品样品中多种痕量有机污染物的检测,包括农兽药残留、重金属残留、生物毒素、多环芳烃、邻苯二甲酸酯类等,显著提高了单一基底材料的检测灵敏度,同时具有制备方法简单、成本低等优点,促进了食品样品前处理方法向着绿色化和多样化方向发展。为此本文对近几年来聚多巴胺功能化复合材料的研究现状进行了归纳总结,并概述了其在食品中痕量污染物检测中的应用。

1 聚多巴胺功能化复合材料的研究

1.1 聚多巴胺功能化金属纳米粒子

利用 PDA 的还原性能及其分子结构中的氮、酚基团对金属离子的吸附作用,可在无还原剂、稳定剂的情况下,原位还原得到 PDA 功能化的金属纳米粒子^[11]。Zhang 等^[12]通过简单的一步法制备了具有三明治状核-壳结构的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{Au}/\text{PDA}$ 纳米复合材料,其中 Au/PDA 混合壳是通过 HAuCl_4 和多巴胺之间的原位氧化还原聚合得到的。 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{Au}/\text{PDA}$ 具有可调的 Au 纳米晶体含量、壳厚度和颗粒尺寸,对 4-硝基苯酚的还原具有良好的催化活性。Raji 等^[13]以聚多巴胺包覆的银纳米粒子为材料修饰氧化铟锡电极,实现了对半胱氨酸的选择性和高灵敏度非酶电化学检测。Yang 等^[14]通过两步浸渍法制备了纳米铜包覆棉织物,首先在棉纤维表面通过多巴胺自聚形成均匀的聚多巴胺膜,然后以聚多巴胺作为还原剂和粘结剂,原位水热生长法沉积铜纳米粒子于棉织物上,该改性棉织物具有持久的超疏水性和较好的抗菌活性。David 等^[15]将 Al 纳米晶体表面包覆聚多巴胺涂层,有效防止了 Al 纳米晶体在水中的氧化并提高了其稳定性,同时聚多巴胺功能化还提供了一种分子捕获层的作用,结合表面增强拉曼光谱可检测水中的主要致癌物苯并[a]芘。

1.2 聚多巴胺功能化碳基纳米材料

碳基纳米材料具有高比表面积及可修饰表面,近年来引起人们的广泛关注,包括碳纳米管、氧化石墨烯、多孔碳、生物碳等。Zhao 等^[16]采用聚多巴胺改性,使多壁碳纳米管在聚乙烯亚胺水溶液中得到较好的分散,同时增强了其与聚酰胺基体之间的相容性和相互作用,显著提高了其透水性,并与三甲酰氯正己烷溶液进行界面聚合,制备了一种高通量正电

荷纳米复合膜。Cao 等^[17]以壳聚糖为增强剂,采用水热法、浸泡法和冷冻干燥法,将 PDA 改性的氧化还原石墨烯纳米片自组装成三维多孔结构,然后用 1H、2H、2H-全氟去甲基乙醇改性,制备了全氟超疏水聚多巴胺/壳聚糖/还原石墨烯复合气凝胶,该材料具有较好的油水分离特性,是处理溢油事故和含油废水的理想材料。Sun 等^[18]采用两步组装法制备了一种灵敏的检测氯霉素的三维伏安传感器,首先在玻碳电极上引入有序介孔碳以提高电子传输性能,然后在电极表面修饰聚多巴胺层,以增强亲水性,提供负电荷吸引带正电荷的氯霉素,同时为进一步的 β -环糊精改性提供氢键结合位点。

1.3 聚多巴胺功能化金属有机框架

金属有机框架(metal-organic frameworks, MOFs)是通过金属离子与有机配体之间的配位键或分子间作用力进行自组装而制备的一类多孔材料^[19]。MOFs 具有超高的比表面积、大量的开放金属中心和芳香配体,以及良好的机械稳定性等优点^[20],MOFs 作为提取目标化合物的吸附剂具有很大的潜力。Zhao 等^[21]在室温下通过快速和温和的溶胶-凝胶反应在 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ 上制备沸石咪唑酯框架材料,该复合物对含有组氨酸残基的低丰度肽具有很强的亲和力并且对大分子蛋白质有很好的排斥作用。Fan 等^[22]以聚多巴胺作为连接剂和涂层基质,将纳米级铜基金属有机框架(Cu-MOFs)固定在钛(Ti)箔表面,可同时催化产生一氧化氮和传递 Cu^{2+} 离子,这种生物相容性涂层可用于心血管支架的表面改性。Li 等^[23]将 PDA/聚乙烯亚胺复合物和铝基金属有机框架(MIL(53)-Al)快速共沉积于离子交换膜表面,然后加入三甲基氯甲苯交联,制备了一种具有单价选择性的复合膜材料,其中正电荷的 $-\text{NH}_2$ 基团可抑制多价阳离子迁移,而多孔的 MIL(53)-Al 则能加速 Na^+ 的迁移。Lv 等^[24]采用聚多巴胺作为粘结剂,在不锈钢丝上制备了聚多巴胺和铁基金属有机框架(MIL(53)-Fe)的复合涂层,将其用作固相微萃取纤维,用于土壤样品中多氯联苯的检测。

1.4 聚多巴胺分子印迹聚合物

通过多巴胺自聚过程中引入模板可以获得三维印迹位点,从而产生对模板的特异性识别能力。通过改变聚合时间和多巴胺用量可以方便地调节 PDA 印迹层的厚度,为在纳米材料表面制备超薄的印迹 PDA 薄膜提供有利条件^[25-26]。Yin 等^[27]以日落黄为模板,多巴胺在多壁碳纳米管基体上自聚合制备了分子印迹聚合物,将其作为修饰剂对玻碳电极进行功能化修饰,得到用于识别和检测日落黄及其类似物的新型电化学传感器。Wu 等^[28]通过简单的浸泡过程将聚多巴胺沉积在多孔 Al_2O_3 陶瓷膜表面,然后通过邻苯二酚诱导的 Ag 还原反应对 $\text{PDA}@ \text{Al}_2\text{O}_3$ 进行改性,以甲基丙烯酸作为功能性单体,在环境温度下光引发合成了以四环素为模板的分子印迹膜,该印迹膜对四环素的吸附量可达 $35.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。Nie 等^[29]在含有富氮量子点(N 点)的纸条表面制备了以对硝基苯胺为模板的聚多巴胺分子印迹聚合物

涂层,利用对硝基苯胺对 N 点的荧光猝灭作用来高选择性检测苯胺类化合物。Li 等^[30]以牛血清白蛋白为模板,多巴胺为功能单体,在硅烷化的磁性四氧化三铁上制备了蛋白质表面印迹微球,利用聚多巴胺壳表面的活性基团引入 2-甲基丙烯氧基磷酸胆碱聚合物链,减少了竞争蛋白的非特异性吸附。

2 聚多巴胺功能化复合材料在食品安全检测中的应用

2.1 农兽药残留

食品中农兽药残留是引起食品安全问题的主要原因。常用的农药包括有机氯农药、有机磷农药、氨基甲酸酯类、杀虫剂等,抗生素类兽药如四环素类、磺胺类、呋喃类、激素类等,被广泛用于治疗动物的细菌感染。农兽药残留经食物链富集从而对人类生命健康产生潜在危害,因此建立高效灵敏的检测方法尤为重要^[31]。Tan 等^[32]以磁性氧化石墨烯为载体,沙拉沙星为模板,在 Tris-HCl 缓冲液中通过多巴胺自聚合制备了具有选择性去除水中氟喹诺酮类抗生素的印迹纳米颗粒 PDA@GO/Fe₃O₄,其对沙拉沙星的最大吸附容量可达 70.9 mg·g⁻¹,去除率在 95% 以上。Chao 等^[33]将金属有机框架材料 ZIF-8 (zeolitic imidazolate frameworks, ZIF) 与静电纺丝技术相结合,以聚丙烯腈作为电纺纤维的模板剂,成功制备了一种基于 PDA 涂层辅助的电纺纤维,该纤维对四环素类抗生素具有优异的吸附性能。Du 等^[34]通过将聚多巴胺和 Mg/Al 层状双氢氧化物涂覆在铁酸镍纳米颗粒上制备了一种新型三层纳米复合材料,利用聚多巴胺的较高分散性和 Mg/Al 层状双氢氧化物的较大比表面积,可快速分散和高效吸附有机磷化合物,将其应用于果汁样品中有机磷农药的测定,方法检出限为 0.06~0.13 μg·L⁻¹,平均提取回收率为 81.8%~94.4%。Antonio 等^[35]在金电极表面电化学合成了基于聚多巴胺分子印迹膜的选择性电化学传感器,在食品分析中首次用该电极材料对两种不同浓度(3.4 和 9.8 μmol·L⁻¹)的磺胺甲恶唑牛奶加标样品进行测定,回收率分别为 103%±6% 和 99%±8%,同时该电极材料具有很好的防污性能,避免了测量过程中复杂的电极表面清洗过程。Li 等^[36]以 SiO₂@RGO@Ag 复合材料为基底,利用多巴胺自聚合对其表面改性,然后以 λ-氯氰菊酯作为模板进行表面引发聚合制备分子印迹聚合物,结合表面增强拉曼散射技术检测菊酯类农药,最低检出限为 3.8 × 10⁻¹⁰ mol·L⁻¹。

2.2 重金属残留

重金属及其化合物在工业发展中是必不可少的,广泛应用于电镀、染色、电池制造、采矿、化工等众多行业^[37],重金属离子作为工业废水中的主要污染物,严重危害人类健康。Reghavendra 等^[38]采用一步法合成了聚多巴胺修饰的羟基磷灰石纳米管,并将其作为分散性良好的亲水性添加剂,对聚醚酰亚胺膜进行改性,提高了其过滤性能,对改性膜的防污性能研究表明,该膜对 Pb²⁺ 和 Cd²⁺ 具有高效吸附作用。Qian 等^[39]基于多巴胺聚合和水杨醛脲沉积,以

快速一步法合成水杨醛脲/聚多巴胺修饰的还原氧化石墨烯复合材料(RGO-PDA/脲),具有高效吸附铀等重金属残留的性能,最大铀吸附容量可达 1049 mg·g⁻¹。Zhu 等^[40]采用一锅共沉淀法制备了一种新型的层状核/壳结构聚多巴胺/镁铝层状双氢氧化物复合材料(PDA@MgAl-LDHs),该材料对水生环境中富集的放射性核素铀和钍有很高的吸附性,最大吸附容量为 142.86 和 76.02 mg·g⁻¹。Antonio 等^[41]利用 PDA 沉积在多孔聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)泡沫中来去除水溶液中的重金属残留,这种简单、低成本的工艺所制备的 PDMS/PDA 泡沫材料在去除铜离子方面表现出显著的快速吸附性能。

2.3 其它有机污染物

基于 PDA 及其复合材料在对食品中生物毒素、合成染料、多环芳烃、多氯联苯、二噁英、邻苯二甲酸酯类化合物等污染物的检测中也有着广泛的应用^[42-44]。基于与分析物之间的氢键、疏水作用和 π-π 相互作用,研究人员成功地应用 PDA 层作为吸附剂提取多环芳烃、邻苯二甲酸酯^[45]。Cai 等^[46]采用原位氧化自聚法制备了 PDA 修饰的三维镍泡沫型吸附剂材料,结合气相色谱-质谱(GC-MS)法成功地建立了一种快速、方便测定水样中 16 种多环芳烃的方法。对河水和废水进行验证,回收率为 89.6%~97.5%,检出限为 2.3~16.5 ng·L⁻¹。Wang 等^[47]在碳纤维上制备了一种聚多巴胺功能化的三聚氰胺-甲醛气凝胶,并将其作为固相微萃取材料填充于聚醚酮塑料管中,建立了管内固相微萃取-高效液相色谱法检测自来水和食品用塑料制品中邻苯二甲酸酯,最低检出限为 0.02~0.05 μg·L⁻¹。Piyaluk 等^[48]以杯[4]芳烃官能化的氧化石墨烯/聚多巴胺涂覆的醋酸纤维素复合材料为吸附剂,用于玉米样品中黄曲霉毒素的预富集,提取效率较好,回收率为 83.0%~106%,且可重复利用。Chen 等^[49]以绿色合成法制备了聚乙烯亚胺改性的磁性聚多巴胺纳米粒子,并将其用作磁性基质固相萃取过程中的吸附剂材料,结合高效液相色谱法同时测定糖果、果冻和碳酸饮料中的 4 种合成着色剂,实验结果表明,该方法操作简单,分析重现性好,灵敏度高。

3 结语

多巴胺的自聚-附着行为为温和条件下材料表面的改性开辟了一条简单、绿色且适用性广的有效途径。PDA 不仅赋予材料表面依赖于 PDA 的仿生特性,如亲水性、粘性、生物相容性和抗氧化活性等,并且作为中间介质为材料表面的二次修饰提供了理想的结合位点,可控地制备具有特定功能的复合材料。在食品安全检测方面,聚多巴胺功能化复合材料可代替传统的吸附剂材料应用于样品前处理过程,也可作为一种新型的电极修饰方法用于定量测定,从文献报道来看,这些方法普遍具有更高的灵敏度和更低的检测限,使食品中痕量有机污染物检测向更加精确可靠、快速简便且多样化的方向发展。此外,以多巴胺为功能单体自聚合的蛋白质分子印

迹技术也将实现大分子领域的特异性识别,对多巴胺化学类似物的研究将有望进一步促进材料表面改性技术的发展,不断扩宽在其它领域中的应用。但迄今为止对于 PDA 的形成机理尚未定论,依然需要更加深入的研究,从而为基于 PDA 的表面功能化提供理论基础,为实际应用做准备。

参考文献

- [1] Zhang X Y, Huang Q, Deng F J, et al. Mussel-inspired fabrication of functional materials and their environmental applications: Progress and prospects[J]. Applied Materials Today, 2017, 7: 222-238.
- [2] Haeshin L, Shara M D, William M M, et al. Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings[J]. Science, 2007, 318(5849): 426-430.
- [3] Liu Y L, Ai K L, Lu L H. Polydopamine and its derivative materials: synthesis and promising applications in energy, environmental, and biomedical fields[J]. Chemical Reviews, 2014, 114(9): 5057-5115.
- [4] 陈丽娟,汪君,闫叶寒,等.聚多巴胺涂层的研究与应用进展[J].高分子通报,2018,7:42-49.
- [5] Ding Y H, Michael F, Tan W. Mussel-inspired polydopamine for bio-surface functionalization[J]. Biosurface and Biotribology, 2016, 2(4): 121-136.
- [6] Liu M Y, Zeng G J, Wang K, et al. Recent developments in polydopamine: An emerging soft matter for surface modification and biomedical applications[J]. Nanoscale, 2016, 8(38): 16819-16840.
- [7] Zhang H, Zhao T Y, Newland B, et al. Catechol functionalized hyperbranched polymers as biomedical materials[J]. Progress in Polymer Science, 2017, 78: 47-55.
- [8] Yang X, Li Q, Wang H J, et al. Chai, In-situ carbonization for template-free synthesis of MoO_2 - Mo_2C -C microspheres as high-performance lithium battery anode[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 337: 74-81.
- [9] Qu K G, Zheng Y, Dai S, et al. Polydopamine-graphene oxide derived mesoporous carbon nanosheets for enhanced oxygen reduction[J]. Nanoscale, 2015, 7(29): 12598-12605.
- [10] Huang Q, Chen J Y, Liu M Y, et al. Polydopamine-based functional materials and their applications in energy, environmental, and catalytic fields: State-of-the-art review[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 387: 1-16.
- [11] 赵晨旭,谢银红,廖芝建,等.聚多巴胺对材料表面功能化的研究及应用进展[J].高分子通报,2015,12:28-37.
- [12] Zhang J F, Fang Q, Duan J Y, et al. Magnetically separable nanocatalyst with Fe_3O_4 core and polydopamine-sandwiched-Au-nanocrystals shell[J]. Langmuir, 2018, 34(14): 4298-4306.
- [13] Raji T, Ganesh V. Simple and facile preparation of silver-polydopamine core-shell nanoparticles for selective electrochemical detection of cysteine[J]. RSC Advances, 2016, 6(55): 49578-49587.
- [14] Yang J Y, Xu H, Zhang L P, et al. Lasting superhydrophobicity and antibacterial activity of Cu nanoparticles immobilized on the surface of dopamine modified cotton fabrics[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 309: 149-154.
- [15] David R, Shu T, Arash A, et al. Polydopamine stabilized aluminum nanocrystals: Aqueous stability and benzo[a]pyrene detection[J]. ACS Nano, 2019, 13: 3117-3124.
- [16] Zhao F Y, Ji Y L, Weng X D, et al. High-flux positively charged nanocomposite nanofiltration membranes filled with poly(dopamine) modified multiwall carbon nanotubes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(10): 6693-6700.
- [17] Cao N, Li J, Wang Y, et al. Facile synthesis of fluorinated polydopamine/chitosan/reduced graphene oxide composite aerogel for efficient oil/water separation[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 326: 17-28.
- [18] Sun Y F, Wei T T, Jiang M D, et al. Voltammetric sensor for chloramphenicol determination based on a dual signal enhancement strategy with ordered mesoporous carbon @ polydopamine and β -cyclodextrin[J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2018, 255(2): 2155-2162.
- [19] 谭彩荷,卢鹏.金属-有机框架材料在分离和化学传感方面的应用进展[J].功能材料,2019,50(7):7046-7051.
- [20] 孟志超,张璐,黄艳凤.金属有机骨架复合材料在样品预处理中的研究进展[J].色谱,2018,36(3):216-221.
- [21] Zhao M, Xie Y Q, Chen H M, et al. Efficient extraction of low-abundance peptides from digested proteins and simultaneous exclusion of large-sized proteins with novel hydrophilic magnetic zeolitic imidazolate frameworks[J]. Talanta, 2017, 167: 392-397.
- [22] Fan Y H, Zhang Y, Zhao Q, et al. Immobilization of nano Cu-MOFs with polydopamine coating for adaptable gasotransmitter generation and copper ion delivery on cardiovascular stents[J]. Biomaterials, 2019, 204: 36-45.
- [23] Li J, Zhu J Y, Yuan S S, et al. Mussel-inspired monovalent selective cation exchange membranes containing hydrophilic MIL-53(Al) framework for enhanced ion flux[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(18): 6275-6283.
- [24] Lv F Y, Gan N, Huang J, et al. A poly-dopamine based metal-organic framework coating of the type PDA-MIL-53(Fe) for ultrasound-assisted solid-phase microextraction of polychlorinated biphenyls prior to their determination by GC-MS[J]. Microchimica Acta, 2017, 184: 2561-2568.
- [25] 李梦圆,赵慕华,翟筠秋,等.以多巴胺为功能单体的生物大分子印迹聚合物[J].科学通报,2019,64(13):1321-1329.
- [26] Chen W, Fu M, Zhu X X, et al. Protein recognition by polydopamine-based molecularly imprinted hollow spheres[J]. Biosensors & bioelectronics, 2019, 142: 165-179.
- [27] Yin Z Z, Cheng S W, Xu L B, et al. Highly sensitive and selective sensor for sunset yellow based on molecularly imprinted polydopamine-coated multi-walled carbon nanotubes[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2018, 100: 565-570.
- [28] Wu Y L, Liu X L, Cui J Y, et al. Bioinspired synthesis of high-performance nanocomposite imprinted membrane by a polydopamine-assisted metal-organic method[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 323: 663-673.

- [29] Nie Y X, Liu Y, Su X G, et al. Nitrogen-rich quantum dots-based fluorescence molecularly imprinted paper strip for p-nitroaniline detection [J]. Microchemical Journal, 2019, 148: 162-168.
- [30] Li X J, Zhou J J, Tian L, et al. Preparation of anti-nonspecific adsorption polydopamine-based surface protein-imprinted magnetic microspheres with the assistance of 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine and its application for protein recognition[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 241: 413-421.
- [31] 邓家珞, 陆利霞, 熊晓辉, 等. 兽药残留快速检测方法比较分析[J]. 生物加工过程, 2018, 16(2): 42-48.
- [32] Tan F, Liu M, Ren S. Preparation of polydopamine-coated graphene oxide/Fe₃O₄ imprinted nanoparticles for selective removal of fluoroquinolone antibiotics in water [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 241-252.
- [33] Chao S, Li X, Li Y Z, et al. Preparation of polydopamine-modified zeolitic imidazolate framework-8 functionalized electrospun fibers for efficient removal of tetracycline [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 552: 506-516.
- [34] Du L Y, Wang X D, Liu T T, et al. Magnetic solid-phase extraction of organophosphorus pesticides from fruit juices using NiFe₂O₄@ polydopamine @ Mg/Al-layered double hydroxides nanocomposites as an adsorbent [J]. Microchemical Journal, 2019, 150: 104-128.
- [35] Antonio T, Stefania C, Elisabetta M, et al. Preparation and characterization of molecularly imprinted mussel inspired film as antifouling and selective layer for electrochemical detection of sulfamethoxazole [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 255: 3374-3383.
- [36] Li H J, Wang X N, Wang Z R, et al. A polydopamine-based molecularly imprinted polymer on nanoparticles of type SiO₂@ rGO@ Ag for the detection of λ-cyhalothrin via SERS [J]. Microchimica Acta, 2018, 185(3): 193-203.
- [37] 袁志鹰, 张梦通, 陈乃宏, 等. 百合药材种植土壤及灌溉水中农药及重金属残留分析[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(11): 1943-1949.
- [38] Reghavendra S H, Arun M I, Ananda K, et al. Fabrication of polydopamine functionalized halloysite nanotube/polyetherimide membranes for heavy metal removal [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(3): 764-774.
- [39] Qian Y X, Yuan Y H, Wang H L, et al. Highly efficient uranium adsorption by salicylaldehyde/poly-dopamine graphene oxide nanocomposites [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6: 24676-24685.
- [40] Zhu K R, Lu S H, Gao Y, et al. Fabrication of hierarchical core-shell polydopamine @ MgAl-LDHs composites for the efficient enrichment of radionuclides [J]. Applied Surface Science, 2017, 396: 1726-1735.
- [41] Antonio T, Antonio P, Antonio C, et al. Easy fabrication of mussel inspired coated foam and its optimization for the facile removal of copper from aqueous solutions [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 552: 401-411.
- [42] Yan J, Huang Y, Miao Y E, et al. Polydopamine-coated electrospun poly(vinyl alcohol)/poly(acrylic acid) membranes as efficient dye adsorbent with good recyclability [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 283: 730-739.
- [43] Xu X, Zheng Q, Guang M, et al. Polydopamine induced in-situ growth of Au nanoparticles on reduced graphene oxide as an efficient biosensing platform for ultrasensitive detection of bisphenol A [J]. Electrochimica Acta, 2017, 242: 56-65.
- [44] David R, Shu T, Arash A, et al. Polydopamine stabilized aluminum nanocrystals: Aqueous stability and benzo[a]pyrene detection [J]. ACS Nano, 2019, 13: 3117-3124.
- [45] Qin S B, Li X S, Fan Y H, et al. Facile synthesis of polydivinylbenzene coated magnetic polydopamine coupled with pressurized liquid extraction for the extraction and cleanup of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils [J]. Journal of Chromatography A, 2019, 6: 47-55.
- [46] Cai Y, Yan Z H, Yang M, et al. Polydopamine decorated 3D nickel foam for extraction of sixteen polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Journal of Chromatography A, 2016, 1478: 2-9.
- [47] Wang X Q, Feng J J, Tian Y, et al. Melamine-formaldehyde aerogel functionalized with polydopamine as in-tube solid-phase microextraction coating for the determination of phthalate esters [J]. Talanta, 2019, 199: 317-323.
- [48] Piyaluk N, Warapon B, Proespichaya K, et al. A miniaturized solid phase extraction adsorbent of calix[4]arene-functionalized graphene oxide/polydopamine-coated cellulose acetate for the analysis of aflatoxins in corn [J]. Journal of Separation Science, 2018, 41: 3892-3901.
- [49] Chen H, Deng X J, Ding G S, et al. The synthesis, adsorption mechanism and application of polyethyleneimine functionalized magnetic nanoparticles for the analysis of synthetic colorants in candies and beverages [J]. Food Chemistry, 2019, 293: 340-347.

(上接第 343 页)

及其功效性和安全性研究[J]. 香料香精化妆品, 2017(2): 44-48.

[83] 谢炎福. 固态发酵复方中药生产新型鱼类药物的研究

[J]. 粮食与饲料工业, 2015(4): 48-52.

[84] 秦俊杰. 发酵型黄芪党参饲料添加剂的评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.

权威 · 高效 · 核心 · 领先 · 精湛 · 实用