

四苯乙烯类聚集诱导发光材料在 食品安全检测中的应用

李 毓^{1,2}, 武晋海¹, 孙 博^{1,2}, 白家磊², 吴建虎^{1*}, 高志贤^{2*}

(1. 山西师范大学食品科学学院, 太原 030000; 2. 军事科学院军事医学研究院环境医学与作业医学研究所, 天津市环境与食品安全风险监控技术重点实验室, 天津 300050)

摘 要: 食品安全对人们的身心健康至关重要, 快捷、精准、灵活和直观的检测方法是保障食品安全的重要手段。聚集诱导发光(aggregation-induced emission, AIE)材料是近年来提出的一种新型荧光材料, 该材料具有可调节的光学特性、良好的光学性能及较好的抗干扰性, 并以背景值低、信号强度高的优势在食品安全检测领域展现出广阔的应用前景。四苯乙烯(tetraphenylethylene, TPE)是最具有代表性的 AIE 分子之一, 具有合成简便、易功能化及优异的 AIE 效应等优点。本文对 TPE 类 AIE 材料的发光机制, 以及近年来在食品安全领域中的应用研究进展进行了综述, 重点总结和分析 TPE 衍生物在真菌毒素、农兽药残留、重金属离子、食品添加剂、致病微生物等方面的研究进展, 并对目前存在的问题和应用前景进行了总结和展望, 旨在激发新的研究思路 and 兴趣, 推进传感技术的发展, 促进 TPE 类 AIE 材料的多元化应用。

关键词: 聚集诱导发光; 四苯乙烯; 食品安全

Application of tetraphenylethylene-based aggregation-induced emission materials in food safety testing

LI Yu^{1,2}, WU Jin-Hai¹, SUN Bo^{1,2}, BAI Jia-Lei², WU Jian-Hu^{1*}, GAO Zhi-Xian^{2*}

(1. College of Food Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Risk Assessment and Control Technology for Environment and Food Safety, Institute of Environmental Medicine and Operational Medicine, Academy of Military Medicine, Academy of Military Sciences, Tianjin 300050, China)

ABSTRACT: Food safety is very important to people's physical and mental health. Fast, accurate, flexible and intuitive detection methods are important means to ensure food safety. Aggregation-induced emission (AIE) material is a new kind of fluorescent material proposed in recent years, which has adjustable optical properties, good optical performance and good anti-interference with the advantages of low background value and high signal intensity, it shows a broad application prospect in the field of food safety detection. Tetraphenylethylene (TPE) is one of the most representative AIE molecules, which has the advantages of simple synthesis, easy functionalization and excellent AIE effect. This paper reviewed the luminescence mechanism of TPE-based AIE materials and its application in the field

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1606306, AMS-ZQJJ-2021-004)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFC1606306, AMS-ZQJJ-2021-004)

*通信作者: 吴建虎, 副教授, 主要研究方向为食品质量与安全检测。E-mail: 287718596@qq.com

高志贤, 研究员, 主要研究方向为食品安全快速检测。E-mail: gaozhx@163.com

*Corresponding author: WU Jian-Hu, Associate Professor, College of Food Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, China. E-mail: 287718596@qq.com

GAO Zhi-Xian, Professor, Institute of Environmental Medicine and Operational Medicine, Academy of Military Medicine, Academy of Military Sciences, Tianjin 300050, China. E-mail: gaozhx@163.com

of food safety in recent years, emphatically summarized and analyzed the research progress of TPE derivatives in the detection of mycotoxins, residues of agricultural and veterinary drugs, heavy metal ions and food additives, pathogenic microorganisms and other aspects. Finally, this paper summarized and prospected the existing problems and application prospects, aiming to stimulate new research ideas and interests, promote the development of sensing technology, and promote the diversified applications of TPE-based AIE materials.

KEY WORDS: aggregation-induced emission; tetraphenylethylene; food safety

0 引言

近年来,随着人们生活质量的逐步提高,食品安全问题受到越来越多的关注。据世界卫生组织估计,每年全世界有6亿人因食用受污染的食品而患病,并有42万人死亡,5岁以下儿童承受40%的食源性疾病负担,每年发生12.5万例死亡^[1]。其中有害物质残留如金属离子、农药和兽药、非法添加剂、致病微生物和有毒工业废物是人类健康的主要威胁^[2]。目前,食品污染物的检测方法主要包括比色法、荧光法、电化学分析法、化学发光法、拉曼传感技术等^[3]。其中,荧光法具有操作简单、响应速度快和高灵敏度的突出优点,广泛应用于食品快速检测。传统的荧光分子,如基于染料的荧光纳米材料^[4]、上转换纳米材料^[5]、石墨烯量子点^[6]等仅在稀溶液中有较强荧光,在高浓度下表现出聚集引起的猝灭(aggregation-caused quenching, ACQ)效应,限制了其在实际检测中的应用。聚集诱导发光(aggregation-induced emission, AIE)是唐本忠院士于2001年首次观察到的一些噻咯分子,在溶液中几乎不发光,而在聚集状态或固体薄膜下发光显著增强的现象,AIE材料具有可调节的光学特性、良好的成膜性、优异的加工性能和较大的斯托克斯位移等特点^[7-9],解决了传统荧光分子ACQ的缺陷,在食品安全检测领域具有广阔的应用前景。

1,1,2,2-四苯乙烯(tetraphenylethylene, TPE),又名四苯乙烯,因具有易于合成、光性能优良、官能团容易修饰等优点而成为目前应用最广泛、发展最快的具有AIE特性的典型材料之一。四苯乙烯衍生物是在四苯乙烯上修饰功能性基团而制备的荧光材料,四苯乙烯衍生物同样具有聚集诱导发光特性。目前已有关于AIE材料在毒性物质(如毒性离子、分子、病原体等)检测方面的综述^[10],本文简述基于四苯乙烯的AIE现象的发光机制,聚焦于四苯乙烯衍生物在食品安全检测方面的应用,并对近几年基于四苯乙烯衍生物的AIE传感器在食品检测方面应用进行分类总结,希望引起人们对四苯乙烯衍生物的关注,开发更多基于四苯乙烯类AIE材料的食品安全快速检测方法。

1 TPE类聚集诱导发光机制

TPE分子中4个苯环通过C-C单键与中间的乙烯基团

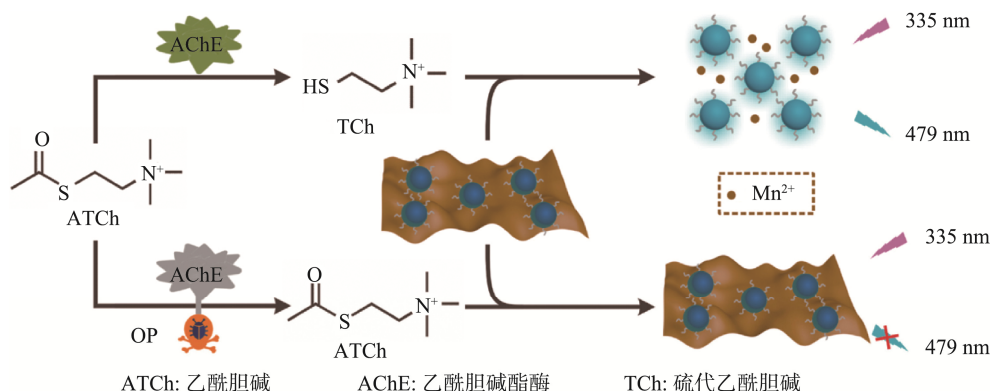
相连接,呈螺旋桨形结构,因而苯环可以单键为中心自由地旋转、振动^[11-12]。TPE是典型的分子内旋转受限(restriction of intramolecular rotation, RIR)机制的AIE分子,当其处于溶液状态时,四周的苯环通过分子骨架碳碳单键的转动及振动过程消耗能量,从而使其在溶液态下具有极低的荧光强度;当分子处于浓溶液或固态等聚集状态时,由于分子间的相互作用抑制了苯环分子的内旋转,抑制了非辐射弛豫,最终使激发态能量以荧光的形式释放出来^[13-15]。与传统的荧光染料相比,TPE非平面分子结构可有效避免 π - π 相互作用,阻止了分子间平面堆积产生的荧光猝灭。

基于TPE的各种衍生物同样具有良好的AIE特性,通过受体基团对TPE进行功能化修饰可以获得新的AIE荧光剂,从而拓宽了TPE的应用领域^[16]。近年来,研究者合成开发了大量TPE基荧光探针,并在食品安全检测领域取得了大量重要的研究成果。

2 TPE衍生物在食品安全检测方面的应用

2.1 真菌毒素检测

真菌毒素污染是近年来食品安全检测领域的热点和难点。JIA等^[17]基于黄曲霉毒素B₁(aflatoxin B₁, AFB₁)适配体、氧化石墨烯(graphene oxide, GO)和四苯乙烯季铵盐(1,2-bis[4-(bromomethyl)-phenyl]-1,2-diphenylethene, TPE-Z)开发了一种新型无标记的开启式AFB₁荧光检测方法(图1a),没有AFB₁时,GO可以通过静电相互作用猝灭TPE-Z/AFB₁适配体聚集体的荧光,AFB₁的加入将诱导适配体从单链结构到AFB₁适配体复合物的构象转换,从而触发从GO表面释放吸附的TPEZ/AFB₁适配体聚集体,导致TPE-Z/AFB₁适配体的荧光恢复,检出限低至0.25 ng/mL。该方法不需要标记AFB₁适配体,降低了成本和复杂性,但适配体亲和力差且筛选过程烦琐;LV等^[18]通过一步反应合成了聚集诱导电化学发光的四苯乙烯衍生物(2,5-di-tetraphenylethylene-ylthiazolo [5,4-d] thiazole, TPETTZ),以功能化二氧化钛纳米粒子(polyaniline-wrapped TiO₂ nanoparticles, PANI/TiO₂ NPs)为催化剂,制作出一种用于AFB₁检测的无标记电化学发光免疫传感器(图1b),PANI/TiO₂ NPs的引入有效改善了单个电化学发光纳米颗

图2 TPE 探针用于 OPs 检测原理示意图^[24]Fig.2 Schematic diagram of TPE probe for OPs detection^[24]

高发光强度和分析灵敏度。先前已有在单个纳米颗粒中掺入数千个荧光分子的相关研究,所合成的纳米材料的荧光信号强度显著增强^[26-27],当这些荧光纳米材料用作信号报告基因时,这种改进的特性有利于对目标进行高灵敏度检测^[28]。为进一步提高检测方法的灵敏度,WANG等^[29]将TPE负载于介孔二氧化硅,制备出了TPE功能化的介孔二氧化硅纳米粒子,限制TPE的分子运动,从而使荧光增强,基于TPE与硝基苯酚相互作用发生能量转移导致荧光猝灭的原理,实现了硝基咪唑类抗生素检测;ZHAO等^[30]以TPE为配体,制备了具有高孔隙率的新型三维金属有机框架,在水溶液介质中对硝基抗生素表现出有较高的灵敏度和选择性。虽然不同聚合方法均能增强AIE材料的荧光强度和稳定性,但依然存在合成步骤烦琐的不足,可拓展合成方法如SPG(Shirasu Porous Glass)膜乳化^[31-32]和微乳液自组装^[33]等来增强TPE荧光探针的荧光强度,研发荧光性能好且易于合成的荧光材料以实现兽药残留的高灵敏度检测。

2.4 重金属离子检测

重金属污染物不能被微生物分解,可经过食物链富集作用进入人体,具有长期积累和缓慢作用,对人体产生急性或慢性毒性作用^[34-35],防范食品中的重金属污染已成为一个全球性的问题。与传统检测方法相比,借助AIE材料的新型荧光成像技术能够精准、快速地检测食品中的重金属离子,可有效提升检测的效率^[36]。检测重金属离子的有机荧光探针多数特异性不高、易受环境干扰,或结构复杂、合成困难、难以广泛使用。而基于TPE的荧光传感器由于其优异的光学性质,能够满足定量分析的需要^[37]。TANG等^[38]将二硫代缩醛基团掺入TPE合成了TPE-M, Hg^{2+} 触发TPE-M中二硫代缩醛的水解,而引起溶液中荧光强度变化,实现 Hg^{2+} 在水性介质中检测。该方法具有响应速度快、选择性和灵敏度高、抗干扰能力强、检出限低的优势,可用于虾、蟹、茶等样品中 Hg^{2+} 检测;LI等^[39]设计了一种检测铝离子的荧光化学传感器,该传感器能与

Al(III)结合在水溶液中形成2-Al(III)螯合物,产生强烈的“开启”响应,该方法检出限低且具有较高的回收率和准确度;GAWAS^[40]将带有炔丙基的TPE衍生物负载到介孔二氧化硅MCM-41(mobil composition of matter N-41),开发了一种用于 Cu^{2+} 检测的高选择性、高灵敏度的荧光纳米传感器。QIAO等^[41]以四苯乙烯衍生物(H4tcbpe)为材料制备了一种对 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 敏感的化学传感器,实现了 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 双重检测并成功应用于黑木耳样品中的离子检测,该方法成本低且准确度高。以上研究表明TPE在检出限、选择性等方面具较大优势,有望应用于食品中重金属离子的快速检测。未来可设计多种新型金属离子的检测荧光探针,实现多种金属快速检测。

2.5 食品添加剂的检测

食品添加剂乱用将会破坏食品营养结构甚至会对人体造成危害^[42-43],近年来商家为了达到保鲜、防腐、增白等目而非法使用食品添加剂的情况也屡见不鲜。传统的色谱方法检测成本高、反应时间长、检测步骤烦琐。目前已有多种基于TPE衍生物检测食品添加剂的传感器报道。ANURADHA等^[44]开发了基于氨基官能化的AIE比色TPE受体(tetraamino-tetraphenylethene 1, TA-TPE),可通过比色反应实现对 NO_2^- 的定量检测,检出限为17.7 ppb;ERDEMIR等^[45]以TPE为信号分子、氨基硫脲(thiosemicarbazide, TSC)为识别单元,制备了一种用于次氯酸盐检测的特异性荧光探针TPE-TSC,实现了牛奶和水中的微量次氯酸盐的检测;SHEN等^[46]将四苯基乙烯与姜黄素结合制备了用于食品中残留次氯酸盐(ClO^-)检测的混合比率荧光纳米探针,对牛奶等食品基质中残留的 ClO^- 表现出快速、高灵敏度和选择性的响应。基于TPE的荧光检测方法解决了仪器体积大、价格昂贵、预处理复杂和过程耗时等问题,实现了食品添加剂的快速、实时感测和便携式操作。未来可以考虑在TPE荧光基团上搭载特异性识别原件,结合生物传感检测方法,开发更多用于食品添加剂的荧光可视化检测方法。

2.6 致病菌的检测

我国国家市场监督管理总局 2022 年发布的食品安全监督抽检结果显示,微生物污染占不合格项目总数的 22.4%,食源性致病菌成为食品安全主要隐患之一^[47]。TPE 具有较好的生物相容性,克服了传统染料细胞毒性高的缺陷,许多基于 TPE 及其衍生物的荧光传感器被开发出来并用于检测食源性致病菌。BAO 等^[48]将 TPE 与多粘菌素 B 肽结合,制备了一种基于功能肽的 AIE 生物探针,实现了革兰氏阴性菌的特异性检测和光动力杀灭;SAYED 等^[49]用萘酰亚胺基团和叔胺修饰 TPE,制备了基于 G⁺细菌检测的荧光探针(tetraphenylethylene-naphthalimide, TPE-NIM),该方法用于 G⁺细菌的检测具有快速、免洗、可视化的优点。细菌表面通常有负电荷及较强的疏水性,可通过改变细菌表面的电荷和疏水性来调控 AIE 在细菌表面的聚集,以提高检测的灵敏度。ZHOU 等^[50]基于此原理制备出了 7 种带铵基团和不同疏水基团的 TPE 荧光探针,以同种菌株与不同的荧光探针孵育及不同的菌株与相同的荧光探针孵育时会出现不同的荧光响应,以此创建传感器阵列,借助线性判别分析实现了包括金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和白色念珠菌在内的包括 G⁺细菌、G⁻细菌及真菌的 7 种微生物的检测;LIU 等^[51]用醛基、羧基和季铵基修饰四苯乙烯,制备了 6 种 TPE 衍生物,基于每种 TPE 衍生物对 8 种细菌的荧光响应不同构建荧光传感器阵列,结合线性判别分析方法,实现了大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等 8 种细菌的识别,准确率达 100%。近年来高通量和多路复用传感技术的发展迅速,基于多样性和可调发射波长的优势,TPE 类 AIE 材料的已成为制造高通量多模式检测的理想信号探针。基于致病菌的高通量多模式检测的功能化荧光探针成为新的研究方向。

3 小 结

与传统荧光材料相比,四苯乙烯类 AIE 材料具有较大的斯托克斯位移、稳定的光学性质、易于功能化等优点,将 TPE 类 AIE 材料与生物传感技术结合而研发的荧光传感器在过去的几年里广泛应用于食品安全检测的各个领域,并取得了众多创新性成果。但在应用方面仍存在问题,比如食品中待检测的有害物种类还有许多,未来需进一步丰富 TPE 功能,扩大 TPE 型荧光探针检测范围,实现高通量、多元化的应用;在精确度、特异性提升方面,可通过一系列不同的合成方法,将尽可能多的 TPE 荧光团集成到一个颗粒中,开发具有高量子产率的荧光标记物,再修饰以特异性生物识别原件,将 TPE 与免疫检测方式有机融合开发出更多灵敏度高、特异性好的 TPE 免疫检测方法。另外,提高 TPE 类 AIE 材料的亲水性,改善其在水溶液中的分散性也是未来研究的重点。随着对 TPE 的创新

设计和深入研究,相信未来在食品安全检测领域会有更为广泛的应用。

参考文献

- [1] 世界卫生组织. 食品安全[EB/OL]. [2022-04-30]. <https://www.who.int/zh/news-room/fact-sheets/detail/food-safety> [2023-02-07].
World Health Organization. Food safety [EB/OL]. [2022-04-30]. <https://www.who.int/zh/news-room/fact-sheets/detail/food-safety> [2023-02-07].
- [2] ZHANG W, ZHONG H, ZHAO P, *et al.* Carbon quantum dot fluorescent probes for food safety detection: Progress, opportunities and challenges [J]. Food Control, 2022, 133: 108591.
- [3] HUANG X, GUO Q, ZHANG R, *et al.* AIEgens: An emerging fluorescent sensing tool to aid food safety and quality control [J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2020, 19(4): 2297–2329.
- [4] REISCH A, KLYMCHENKO AS. Fluorescent polymer nanoparticles based on dyes: Seeking brighter tools for bioimaging [J]. Small, 2016, 12(15): 1968–1992.
- [5] HAKEEM DA, SU SS, MO ZR, *et al.* Upconversion luminescent nanomaterials: A promising new platform for food safety analysis [J]. Crit Rev Food Sci, 2022, 62(32): 8866–8907.
- [6] SHARMA AS, ALI S, SABARINATHAN D, *et al.* Recent progress on graphene quantum dots-based fluorescence sensors for food safety and quality assessment applications [J]. Compr Rev Food Sci Food, 2021, 20(6): 5765–5801.
- [7] LUO J, XIE Z, LAM JWY, *et al.* Aggregation-induced emission of 1-methyl-1,2,3,4,5-pentaphenylsilole [J]. Chem Commun, 2001, (18): 1740–1741.
- [8] LI X, LI M, YANG M, *et al.* “Irregular” aggregation-induced emission luminogens [J]. Coordin Chem Rev, 2020, 418: 213358.
- [9] 李丹, 孙盼盼, 李建高, 等. 聚集诱导发光高分子在光学诊疗应用中的研究进展[J]. 高分子学报, 2022, 53(7): 856–872.
LI D, SUN PP, LI JG, *et al.* Research progress of aggregation-induced luminescent polymers in optical diagnosis and treatment [J]. Acta Polym Sin, 2022, 53(7): 856–872.
- [10] 刘向, 杜宪超, 顾慧莹, 等. 聚集诱导发光分子在毒性物质检测中的应用[J]. 分析试验室, 2022, 41(8): 984–992.
LIU X, DU XC, GU HY, *et al.* Application of AIEgens in toxicity detection [J]. Chin J Anal Lab, 2022, 41(8): 984–992.
- [11] MEI J, LEUNG NLC, KWOK RTK, *et al.* Aggregation-induced emission: Together we shine, united we soar! [J]. Chem Rev, 2015, 115(21): 11718–11940.
- [12] ZHAO Z, ZHANG H, LAM JWY, *et al.* Aggregation-Induced emission: New vistas at the aggregate level [J]. Angew Chem Int Ed, 2020, 59(25): 9888–9907.
- [13] 杨学琴, 来守军, 丁媛媛, 等. 四苯乙烯类聚集诱导发光探针在生物分子检测领域的应用[J]. 发光学报, 2022, 43(6): 961–985.
YANG XQ, LAI SJ, DING YY, *et al.* Application of tetraphenylated

- aggregation-induced luminescence probes in the field of biomolecular detection [J]. *Chin J Lumin*, 2022, 43(6): 961–985.
- [14] 罗一权, 冯亮, 郑仁林. 四苯乙烯制备及其应用研究综述[J]. *安徽化工*, 2022, 48(4): 10–16.
- LUO YQ, FENG L, ZHENG RL. Preparation and application of tetraphenylbenzene [J]. *Anhui Chem Ind*, 2022, 48(4): 10–16.
- [15] 刘丹, 赵征, 唐本忠. 聚集诱导发光天然产物:从发现到其多功能应用[J]. *中国科学: 化学*, 2022, 52(9): 1524–1546.
- LIU D, ZHAO Z, TANG BZ. Accumulation induced luminescence of natural products: From discovery to its multifunctional application [J]. *Sci Sin (Chim)*, 2022, 52(9): 1524–1546.
- [16] LA DD, BHOSALE SV, JONES LA, *et al.* Tetraphenylethylene-based AIE-active probes for sensing applications [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10(15): 12189–12216.
- [17] JIA Y, WU F, LIU P, *et al.* A label-free fluorescent aptasensor for the detection of aflatoxin B₁ in food samples using AIEgens and graphene oxide [J]. *Talanta*, 2019, 198: 71–77.
- [18] LV X, HU Q, MIAO T, *et al.* An efficient aggregation-induced electrochemiluminescent immunosensor by using TiO₂ nanoparticles as coreaction accelerator and energy donor for aflatoxin B₁ detection [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2022, 414(17): 4837–4847.
- [19] HU X, ZHANG P, WANG D, *et al.* AIEgens enabled ultrasensitive point-of-care test for multiple targets of food safety: Aflatoxin B₁ and cyclopiazonic acid as an example [J]. *Biosens Bioelectrons*, 2021, 182: 113188.
- [20] 王沂雯, 刘晏霖, 付瑞杰, 等. 便携式生物传感器在真菌毒素检测中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(11): 234–245.
- WANG YW, LIU YL, FU RJ, *et al.* Research progress of portable biosensor in mycotoxin detection [J]. *Food Sci*, 2022, 43(11): 234–245.
- [21] PUNDIR CS, MALIK A, PREETY. Bio-sensing of organophosphorus pesticides: A review [J]. *Biosens Bioelectrons*, 2019, 140: 111348.
- [22] WANG J, ZHANG J, WANG J, *et al.* Fluorescent peptide probes for organophosphorus pesticides detection [J]. *J Hazard Mater*, 2020, 389: 122074.
- [23] WU X, WANG P, HOU S, *et al.* Fluorescence sensor for facile and visual detection of organophosphorus pesticides using AIE fluorogens-SiO₂-MnO₂ sandwich nanocomposites [J]. *Talanta*, 2019, 198: 8–14.
- [24] CHEN J, CHEN X, ZHAO J, *et al.* Instrument-free and visual detection of organophosphorus pesticide using a smartphone by coupling aggregation-induced emission nanoparticle and two-dimension MnO₂ nanoflake [J]. *Biosens Bioelectrons*, 2020, 170: 112668.
- [25] ZHUANG Q, ZHANG C, ZHUANG H, *et al.* Heteroatom-free conjugated tetraphenylethylene polymers for selectively fluorescent detection of tetracycline [J]. *Anal Chim Acta*, 2022, 1190: 339236.
- [26] TAN H, MA L, GUO T, *et al.* A novel fluorescence aptasensor based on mesoporous silica nanoparticles for selective and sensitive detection of aflatoxin B₁ [J]. *Anal Chim Acta*, 2019, 1068: 87–95.
- [27] ZHANG G, XU S, XIONG Y, *et al.* Ultrabright fluorescent microsphere and its novel application for improving the sensitivity of immunochromatographic assay [J]. *Biosens Bioelectrons*, 2019, 135: 173–180.
- [28] WU Y, SUN J, HUANG X, *et al.* Ensuring food safety using fluorescent nanoparticles-based immunochromatographic test strips [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 118: 658–678.
- [29] WANG C, LI Q, WANG B, *et al.* Fluorescent sensors based on AIEgen-functionalised mesoporous silica nanoparticles for the detection of explosives and antibiotics [J]. *Inorg Chem Front*, 2018, 5(9): 2183–2188.
- [30] ZHAO Y, WANG YJ, WANG N, *et al.* Tetraphenylethylene-decorated metal-organic frameworks as energy-transfer platform for the detection of nitro-antibiotics and white-light emission [J]. *Inorg Chem*, 2019, 58(19): 12700–12706.
- [31] WU W, WANG X, SHEN M, *et al.* AIEgens barcodes combined with AIEgens nanobeads for high-sensitivity multiplexed detection [J]. *Theranostics*, 2019, 9(24): 7210–7221.
- [32] WU W, SHEN M, LIU X, *et al.* Highly sensitive fluorescence-linked immunosorbent assay based on aggregation-induced emission luminogens incorporated nanobeads [J]. *Biosens Bioelectrons*, 2020, 150: 111912.
- [33] CHEN G, CHEN X, XU G, *et al.* Ultrabright orange-yellow aggregation-induced emission nanoparticles for highly sensitive immunochromatographic quantification of ochratoxin a in corn [J]. *Food Chem*, 2023, 412: 135580.
- [34] SHEN Y, NIE C, WEI Y, *et al.* FRET-based innovative assays for precise detection of the residual heavy metals in food and agriculture-related matrices [J]. *Coord Chem Rev*, 2022, 469: 214676.
- [35] 马麟莉, 李树旺, 程亚萍. 食品中重金属污染物的危害[J]. *食品安全导刊*, 2022, (3): 181–183.
- MA LL, LI SW, CHENG YP. Hazards of heavy metal contaminants in food [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2022, (3): 181–183.
- [36] 吕妍婷, 王琪, 朱为宏. 聚集诱导发光材料在食品安全检测中的应用[J]. *发光学报*, 2021, 42(3): 319–335.
- LV YT, WANG Q, ZHU WH. Application of aggregation-induced luminescence materials in food safety detection [J]. *Chin J Lumin*, 2021, 42(3): 319–335.
- [37] ALAM P, LEUNG NLC, ZHANG J, *et al.* AIE-based luminescence probes for metal ion detection [J]. *Coord Chem Rev*, 2021, 429: 213693.
- [38] TANG L, YU H, ZHONG K, *et al.* An aggregation-induced emission-based fluorescence turn-on probe for Hg²⁺ and its application to detect Hg²⁺ in food samples [J]. *RSC Adv*, 2019, 9(40): 23316–23323.
- [39] LI Y, XU K, SI Y, *et al.* An aggregation-induced emission (AIE) fluorescent chemosensor for the detection of Al(III) in aqueous solution [J]. *Dyes Pigments*, 2019, 171: 107682.
- [40] GAWAS RU. Amplification of AIE-effect of tetraphenylethylene on solid support: formation of a sensitive fluorescent nanosensor for turn-on

- detection of Cu^{2+} and successive sensing of ascorbate ions [J]. *Inorg Chim Acta*, 2022, 542: 121097.
- [41] QIAO X, CHEN G, YUE T, *et al.* A functional fluorescent probe for Zn^{2+} and Cu^{2+} detection in food products based on tetraphenylethylene derivative [J]. *J Anal Chem*, 2022, 77(9): 1131–1140.
- [42] 王悦. 化学添加剂对食品安全的危害及检测方法[J]. *食品安全导刊*, 2021, (27): 164, 174.
- WANG Y. Hazards of chemical additives on food safety and detection methods [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2021, (27): 164, 174.
- [43] 胡牧. 食品安全中食品添加剂的功能与危害分析[J]. *食品安全导刊*, 2019, (6): 87.
- HU M. Function and hazard analysis of food additives in food safety [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2019, (6): 87.
- [44] ANURADHA A, LATHAM K, BHOSALE SV. Selective detection of nitrite ion by an AIE-active tetraphenylethylene dye through a reduction step in aqueous media [J]. *RSC Adv*, 2016, 6(51): 45009–45013.
- [45] ERDEMIR E, SUNA G, GUNDUZ S, *et al.* Tetraphenylethylene-thiosemicarbazone based ultrafast, highly sensitive detection of hypochlorite in aqueous environments and dairy products [J]. *Anal Chim Acta*, 2022, 1218: 340029.
- [46] SHEN Y, NIE C, ZHU C, *et al.* Aggregation-induced emission fluorophore-incorporated curcumin-based ratiometric nanoprobe for hypochlorite detection in food matrices [J]. *J Agric Food Chem*, 2022, 70(30): 9577–9583.
- [47] 王丹丹, 刘鸣畅, 杨艳歌, 等. 食源性致病菌快速检测技术研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(3): 276–285.
- WANG DD, LIU MC, YANG YG, *et al.* Advances in rapid detection of foodborne pathogens [J]. *Food Sci*, 2022, 43(3): 276–285.
- [48] BAO P, LI C, OU H, *et al.* A peptide-based aggregation-induced emission bioprobe for selective detection and photodynamic killing of gram-negative bacteria [J]. *Biomater Sci*, 2021, 9(2): 437–442.
- [49] SAYED SM, XU KF, JIA HR, *et al.* Naphthalimide-based multifunctional aiegens: Selective, fast, and wash-free fluorescence tracking and identification of gram-positive bacteria [J]. *Anal Chim Acta*, 2021, 1146: 41–52.
- [50] ZHOU C, XU W, ZHANG P, *et al.* Engineering sensor arrays using aggregation-induced emission luminogens for pathogen identification [J]. *Adv Funct Mater*, 2019, 29(4): 1805986.
- [51] LIU G, TIAN S, LI C, *et al.* Aggregation-induced-emission materials with different electric charges as an artificial tongue: Design, construction, and assembly with various pathogenic bacteria for effective bacterial imaging and discrimination [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(34): 28331–28338.

(责任编辑: 郑 丽 张晓寒)

作者简介



李 毓, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全检测。
E-mail: 18636908201@163.com



吴建虎, 副教授, 主要研究方向为食品质量与安全检测。
E-mail: 287718596@qq.com



高志贤, 研究员, 主要研究方向为食品安全快速检测。
E-mail: gaozhx@163.com