

文章编号: 1000-7032(2021)03-0319-17

# 聚集诱导发光材料在食品安全检测中的应用

吕妍婷, 王 琪\*, 朱为宏\*

(华东理工大学 化学与分子工程学院, 上海功能材料化学重点实验室, 精细化工研究所, 上海 200237)

**摘要:** 食品中有害物质的快速检测对预防食源性疾病和保障食品安全至关重要。荧光传感具有选择性好、灵敏度高和响应迅速等优点,相较于传统的检测方法具有很大的应用优势。聚集诱导发光材料(AIEgens)在分散状态下荧光较弱,而在聚集态时发出强烈的荧光,可有效克服传统荧光材料聚集荧光猝灭(ACQ)的应用局限。独特的荧光激活特性、较弱的背景荧光、较大的斯托克斯位移和出色的光稳定性等优势将AIEgens推广到食品安全检测领域。本文分析了近年来AIEgens在食品安全检测中的应用进展,如检测农药残留、兽药残留、重金属、病原体、食品添加剂等的荧光传感器,并对其存在的问题和应用前景进行了总结和展望。

**关键词:** 聚集诱导发光; 食品安全; 荧光传感; 有害物检测

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200382

## Food Safety Detection Using Aggregation-induced Emission Materials

LYU Yan-ting, WANG Qi\*, ZHU Wei-hong\*

(Shanghai Key Laboratory of Functional Materials Chemistry, Institute of Fine Chemicals, School of Chemistry and Molecular Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: wangqi@ecust.edu.cn; whzhu@ecust.edu.cn

**Abstract:** Rapid detection of food contaminants is essential for preventing foodborne diseases and ensuring food safety. Fluorescence sensors with high selectivity, sensitivity and rapid responsibility exhibit superior advantages than common detection methods. Aggregation-induced emission luminogens(AIEgens) emit weakly in the molecular or dispersed state while exhibit strong fluorescence in the aggregated state, which effectively overcome the limitation caused by aggregation-caused quenching(ACQ) effect. AIEgens have been extensively applied in food safety detection because of its unique “off-on” fluorescence, ignorable background fluorescence, large Stokes shift and excellent photostability. In this article, the applications of AIEgens sensors for pesticides, veterinary drugs, heavy metals, pathogens, food additives and the detection mechanisms were reviewed. Finally, the existing problems and future developments were also summarized and prospected.

**Key words:** aggregation-induced emission; food safety; fluorescence sensing; hazards detection

## 1 引 言

食品作为人类生存的第一必需品,与人们的

健康息息相关。随着现代农业和食品工业的集约化发展,食品种类日益增多,而农药、食品添加剂等的广泛使用以及食品供应链中存在的潜在危害

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(21788102)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(21788102)

使得食品安全成为影响人类健康的全球性问题。近年来,全球食品安全事件频发,特别是食源性疾病发展成为世界范围内的主要公共卫生问题之一<sup>[1]</sup>。为了确保食品安全,目前世界各国政府制定了相关标准并要求食品相关行业严格执行<sup>[2,4]</sup>。因此,开发简便、准确、灵敏和高效的食品检测技术对控制食品质量和保障食品安全至关重要。

目前,食品污染物的检测方法主要包括化学检测法、生物检测法和多种技术联用检测法<sup>[5-6]</sup>。化学检测法包括色谱<sup>[7]</sup>、质谱<sup>[8]</sup>、核磁<sup>[9]</sup>、光谱法<sup>[10-11]</sup>、电化学法<sup>[12]</sup>以及生物传感器<sup>[13-14]</sup>等。其中,气相色谱法(Gas chromatography, GC)和高效液相色谱法(High performance liquid chromatography, HPLC)技术较为完善,具有较高的分离效率和灵敏度,可检测的污染物类型较多。而生物检测法主要包括免疫技术<sup>[15]</sup>、基因检测技术<sup>[16]</sup>和聚合酶链式反应技术(Polymerase chain reaction, PCR)<sup>[17]</sup>等,均具有良好的检测准确性。然而,这两类检测方法都存在着样品预处理复杂、设备昂贵和对检测人员的专业素养要求高等问题。近年来,荧光分析法凭借其操作简便、灵敏度高、响应速度快和空间分辨率高等优点被广泛应用于食品安全检测中<sup>[18-22]</sup>。但传统的荧光染料大部分是具有大 $\pi$ 共轭体系的疏水性材料,如三苯胺类、稠环类化合物等<sup>[23-24]</sup>,具有明显的光致漂白现象并且在高浓度或聚集状态下易发生聚集荧光猝灭(Aggregation-caused quenching, ACQ)<sup>[25]</sup>,从而导致灵敏度下降,限制了其对微量有害物的检测<sup>[26]</sup>。

唐本忠课题组在 2001 年提出聚集诱导发光(Aggregation-induced emission, AIE)的概念<sup>[27]</sup>。与 ACQ 现象截然相反,在稀溶液中 AIE 发光材料(Aggregation-induced emission luminogens, AIEgens)通过分子内运动过程增强非辐射衰减使发光减弱;而相反地,在聚集时通过限制分子内运动(Restriction of intramolecular motions, RIM)使荧光发射增强<sup>[28]</sup>。具有 AIE 特性的新型荧光材料具有亮度强、抗光漂白性好和稳定性高等优点。因此,独特的荧光“关-开”性质、可忽略的背景荧光和较大的斯托克斯位移等特点使基于 AIEgens 的检测技术成为生物检测、治疗和成像的高效方法之一<sup>[29-33]</sup>。近年来,基于 AIEgens 开发的生

物传感器在食品安全和质量检测领域受到越来越多国内外学者的关注,并被广泛应用于食品中各种污染物的检测<sup>[34-36]</sup>以及食品品质的评估<sup>[37-42]</sup>。

本文围绕 AIEgens 荧光传感器展开,按照食品污染物的类别,重点介绍了其在农药、重金属、病原体、食品添加剂等领域的检测机制和应用进展,最后对 AIEgens 在保障食品安全和质量检测领域的未来发展进行了展望,希望能对研究本领域的学者提供借鉴。

## 2 AIEgens 在食品安全检测中的应用

### 2.1 农药残留检测

目前,在农林业种植时常选用农药以防治疾病和虫害。有机磷农药(Organophosphorus pesticides, OPs)由于其高效率和低毒性而被广泛用于农业生产中,但 OPs 是一类神经毒素,可以在低浓度下降低人体乙酰胆碱酯酶(Acetylcholine esterase, AChE)的活性并引起大量乙酰胆碱积累,从而导致神经系统疾病,例如帕金森和阿尔茨海默症,甚至死亡<sup>[43-44]</sup>。不恰当地使用农药会导致蔬菜和水果等农副产品中的农药残留超标,并对人体健康产生危害。因此,快速灵敏地检测食品中的农药残留对于生命健康和环境保护具有重要意义。与常规分析方法(如荧光法<sup>[45]</sup>或高光谱成像<sup>[46]</sup>)相比,基于 AIEgens 开发的生物探针能够更简单、灵敏和快速地检测 OPs。

OPs 可以被 AChE 上丝氨酸的羟基磷酸化形成稳定的共价键,阻碍 AChE 的氨基与底物胆碱结合,并降低 AChE 活性,因此可通过荧光检测 AChE 的酶活性,间接测定 OPs 残留。例如,基于 AChE 催化碘代硫代乙酰胆碱(Acetylthiocholine iodide, ATCh)的水解会影响溶液 pH 这一原理, Yue 等<sup>[34]</sup>合成了对 pH 敏感响应的带醛基的四苯乙烯(Tetraphenylethylene, TPE)衍生物(TPE-1)(图 1(a))。由于 OPs 不可逆抑制 AChE 活性,使 ATCh 无法水解为乙酸,削弱了 TPE-1 的质子化效应,进而使 TPE-1 的荧光信号产生变化,并且与 OPs 浓度呈线性关系。该方法已成功用于高选择性检测 OPs。然而,大多数用于传感的 AIE 纳米颗粒在生物溶液中不稳定,对实际应用有害<sup>[47]</sup>。为提高稳定性和生物相容性,Chen 等<sup>[48]</sup>将两性亲性聚合物分散在磷酸盐缓冲溶液中制备得到 AIE

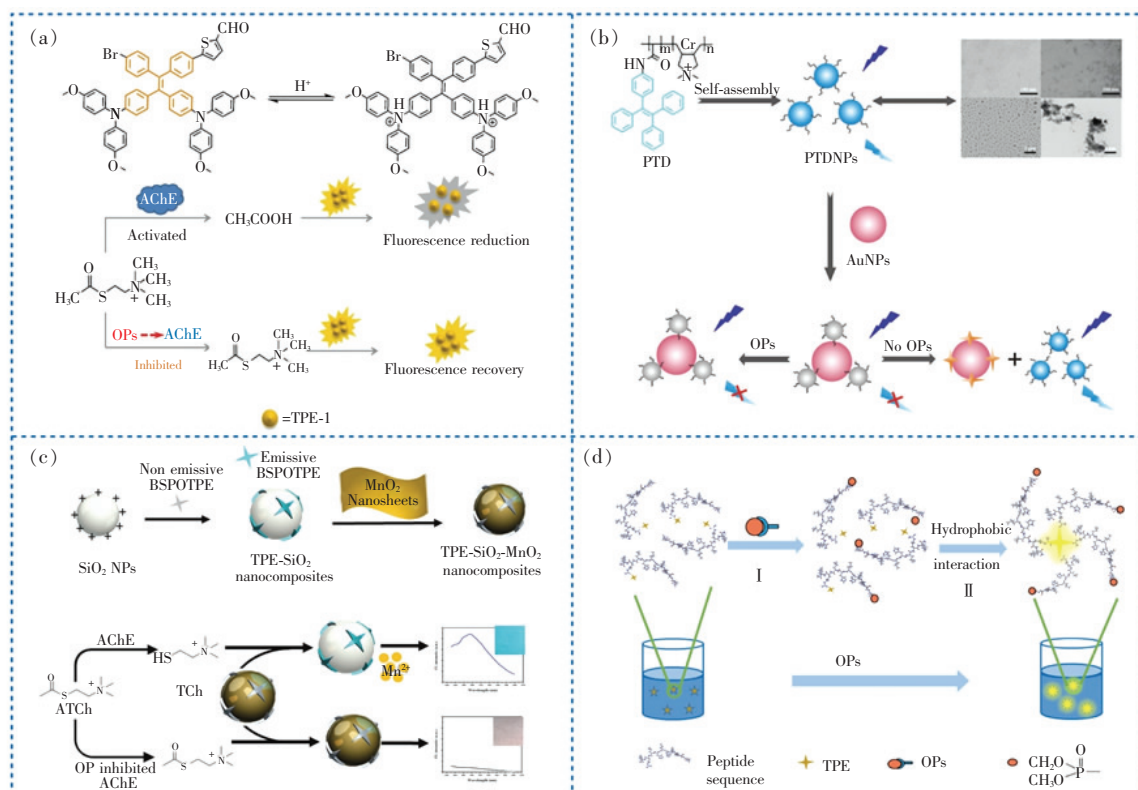


图1 AIE 探针的化学结构及对农药残留物的检测。(a) TPE-1 的 pH 传感机制及 OPs 检测机理<sup>[34]</sup>; (b) 高度敏感检测 AChE 和 OP 的 PT-DNP-AuNPs 生物传感器作用示意图<sup>[48]</sup>; (c) BSPOTPE-SiO<sub>2</sub>-MnO<sub>2</sub> 制备过程和传感器对 OPs 响应示意图<sup>[49]</sup>; (d) TPE-Peptide 与 OPs 作用示意图<sup>[50]</sup>。

Fig. 1 Chemical structures of probes and the detection mechanism towards pesticide residues. (a) pH sensing mechanism using TPE-1 and the principle of OPs detection<sup>[34]</sup>. (b) Schematic representation of PT-DNP-AuNPs-containing biosensors for the highly sensitive detection of AChE and OPs<sup>[48]</sup>. (c) Preparation of BSPOTPE-SiO<sub>2</sub>-MnO<sub>2</sub> and schematic illustration of sensor activation by OPs<sup>[49]</sup>. (d) Schematic diagram of TPE-peptide towards OPs<sup>[50]</sup>.

纳米粒 (PTDNPs) (图 1(b))。金纳米颗粒 (AuNPs) 与 PTDNPs 结合并通过荧光能量共振转移 (Fluorescence resonance energy transfer, FRET) 作用猝灭荧光, 而 ATCh 将竞争性结合 PTDNPs 并阻断 FRET 点亮荧光, 使 PTDNPs 成功地高灵敏定量检测 OPs, 并具有较宽的线性范围。此外, Wu 等<sup>[49]</sup> 设计了一种基于 1,2-双[4-(3-磺酰基丙氧基)苯基]-1,2-二苯乙烯 (BSPOTPE) 的夹心纳米复合 AIE 荧光传感器 (图 1(c))。该探针对对氧磷检测具有良好的线性关系, 还可用于制备便捷的荧光检测试纸实现有机磷农药对氧磷的简便直观半定量分析。

除了基于酶抑制原理开发的 AIE 探针, 基于肽开发的生物探针对农药残留的检测也具有较好的效果。Wang 等<sup>[50]</sup> 将 TPE 分子与肽序列 LHLHLRL 连接合成 AIE 荧光探针 TPE-Peptide 用于测定 OPs (图 1(d))。探针中的丝氨酸与 OPs 通过共价键

反应形成的复合物可以增强探针疏水性, 使探针更容易聚集到胶原纤维中加速肽聚集从而诱导增强探针荧光发射。该探针显示出高度敏感的荧光响应, 可以在 15 min 内完成农药的快速检测。但目前该方法只能用于检测 OPs 的总量, 不能区分特定类型的农药。

目前, 基于 AIE 方法检测农药残留已有许多研究成果, 但由于食品的成分复杂且农药混合使用种类较多, 检测多种或多类别农药具有一定的局限性。因此, 开发具有强抗干扰能力和高选择性的可视化快速现场检测方法仍是目前研究的重点方向。

## 2.2 兽药残留检测

在畜牧养殖业中, 兽药常被用于防治疾病、抗寄生虫和促进生长, 然而由于其不能被畜禽完全代谢, 常会在动物体内残留并积累, 最终通过食物链威胁人类健康, 如人体摄入过量兽药残留的畜禽肉类会发生过敏性反应、中毒反应等<sup>[51]</sup>。因

此,检测和评估动物源性食品(如肉类、牛奶和鸡蛋)中的兽药残留水平至关重要。

抗生素类(包括四环素类、青霉素类、氯霉素(Chloramphenicol, CAP))药物常被用于治疗畜禽的细菌感染类疾病。其中, CAP 具有较强的毒副作用,不仅会影响畜禽的造血系统,而且畜禽体内残留的 CAP 还可能抑制人体骨髓造血机能,从而引起再生障碍性贫血和溶血性贫血等疾病。为此, Zhang 等<sup>[52]</sup>成功开发了一种高灵敏检测 CAP 的 AIE 荧光探针,该探针以适配体(C-Apt)作为

CAP 的识别基团,短烷基链 9,10-二氰基蒽衍生物 DSAC<sub>2</sub>N 作为 AIE 荧光基团,低氧化度的氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)为荧光猝灭剂(图 2(a))。连接有 DSAC<sub>2</sub>N 的 C-Apt 通过  $\pi-\pi$  堆积作用吸附在 GO 上并被 GO 猝灭荧光,当体系中存在 CAP 时, DSAC<sub>2</sub>N-C-Apt 将优先与 CAP 结合形成复合物(C-Apt-CAP)并从 GO 表面脱附, DSAC<sub>2</sub>N 荧光恢复,通过荧光信号变化检测 CAP 的含量。该方法检出限达  $0.36 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,已被成功应用于牛奶中 CAP 含量的检测。

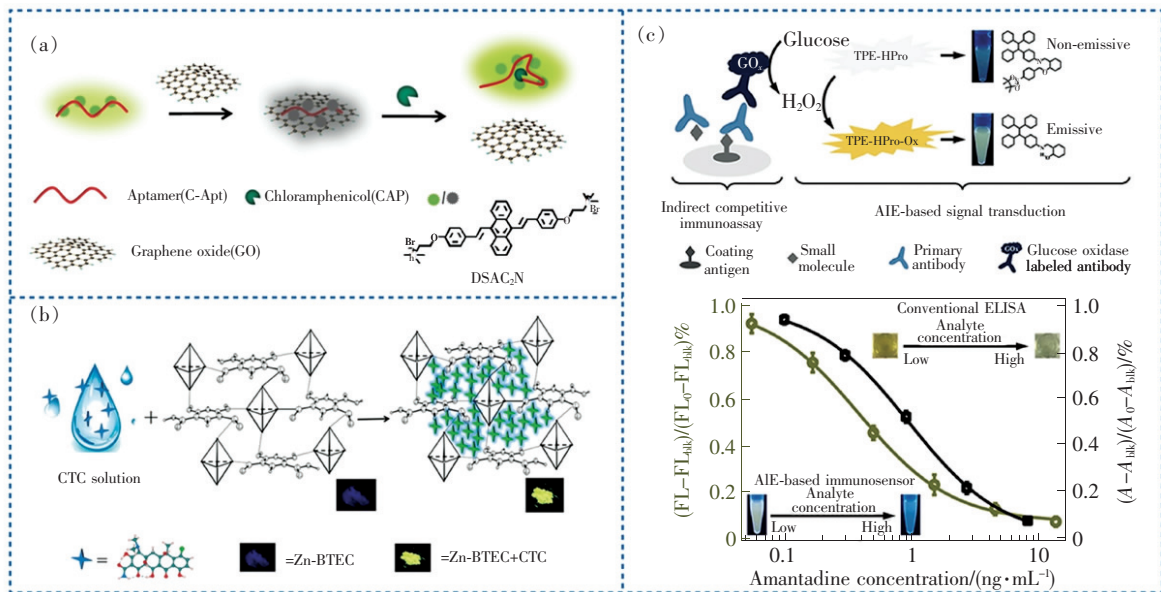


图 2 AIE 探针的化学结构及对兽药残留物的检测。(a) DSAC<sub>2</sub>N 的化学结构及 CAP 检测机理图<sup>[52]</sup>; (b) 金属-有机骨架 Zn-BTEC 作为 AIE 荧光探针检测 CTC 过程示意图<sup>[53]</sup>; (c) 用于间接检测 AMD 的 AIE/ELISA 竞争性免疫传感器示意图和浓度响应荧光曲线<sup>[55]</sup>。

Fig. 2 Chemical structures of AIE probes and the detection mechanism towards veterinary drug residues. (a) Chemical structures of DSAC<sub>2</sub>N and sensing principle for CAP detection<sup>[52]</sup>. (b) Illustration of sensing process for CTC using metal-organic framework Zn-BTEC as an AIE fluorescent probe<sup>[53]</sup>. (c) Schematic illustration of AIE/ELISA competitive immunosensor for indirectly detecting AMD and concentration responding fluorescence curve<sup>[55]</sup>.

金霉素(chlortetracycline, CTC)是四环素类广谱抗生素中的一种,具有 AIE 荧光特性。Yu 等<sup>[53]</sup>发现当 CTC 分子扩散到均苯四酸锌的锌基金属有机框架(Zn-BTEC)中时,刚性金属有机框架的多孔结构促使 CTC 分子发生组装或聚集,由 RIM 机理导致 CTC 的荧光大大增强。该方法成功地实现了鱼类和尿液等样品中 CTC 的高灵敏度和高选择性检测,并且能有效地与其他四环素类抗生素区分(图 2(b))。

金刚烷胺(Amantadine, AMD)是国际医学界公认的对流感病毒具有抑制作用的抗病毒药

物<sup>[54]</sup>。酶联免疫吸附测定(Enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)是一种广泛用于检测 AMD 的简单快速方法,但灵敏度中等,不适合低浓度检测。为提高检测的灵敏度, Yu 等<sup>[55]</sup>结合 AIE 和 ELISA 方法开发了一种新型免疫荧光探针(图 2(c))。在该方法中,葡萄糖氧化酶(glucose oxidase, GOx)将触发 GOx/葡萄糖介导 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 产生的生物学过程,进而使 TPE-HPro 氧化并点亮荧光。与 ELISA 结合使用,可以实现对鸡肌肉样品中 AMD 浓度的定量测定,该方法的灵敏度比传统免疫测定法提高了 2.5 倍。

荧光检测方法相较于传统的仪器分析和免疫分析法具有更高的灵敏度和更强的特异性。然而,目前基于 AIE 性质开发的兽药荧光检测试剂仍然处于发展阶段,这为科研工作者开发探索新的 AIE 型兽药残留检测试剂提供了极大的发展空间。

### 2.3 重金属检测

汞 (Mercury, Hg)、砷 (Arsenic, As)、镉 (Cadmium, Cd)、铅 (Lead, Pb) 等重金属普遍具有较大的毒性,会导致酶和蛋白质失活,从而损伤人体器官、引起慢性中毒甚至死亡<sup>[56]</sup>。食品中的重金属污染主要来源于非法食品添加剂的使用、包装品的铅污染以及工厂“三废”污染食品源三种途

径<sup>[57]</sup>。因此,监测水、食品和环境中的重金属含量是一项至关重要的任务。目前,多种荧光探针已被成功应用于检测环境中的重金属含量。

具有硫代或硫酮结构的反应型荧光探针对于  $\text{Hg}^{2+}$  具有高的检测灵敏度和优良的特异性。Ma 等<sup>[58]</sup>合成了一种基于 Pyrene-1-CHO 和乙二硫醇的反应型 AIE 荧光探针 Pyren-DT (图 3(a))。该探针与  $\text{Hg}^{2+}$  反应生成 Pyrene-1-CHO, 荧光增强,实现了对  $\text{Hg}^{2+}$  的半定量检测。Pyren-DT 对  $\text{Hg}^{2+}$  具有极好的选择性和灵敏度,在  $0 \sim 6.5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  之间具有较好的线性关系,检出限达到  $2.88 \times 10^{-8} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。与自来水样品相比,该探针对河水样品中  $\text{Hg}^{2+}$  的检测具有更好的荧光特性,适用

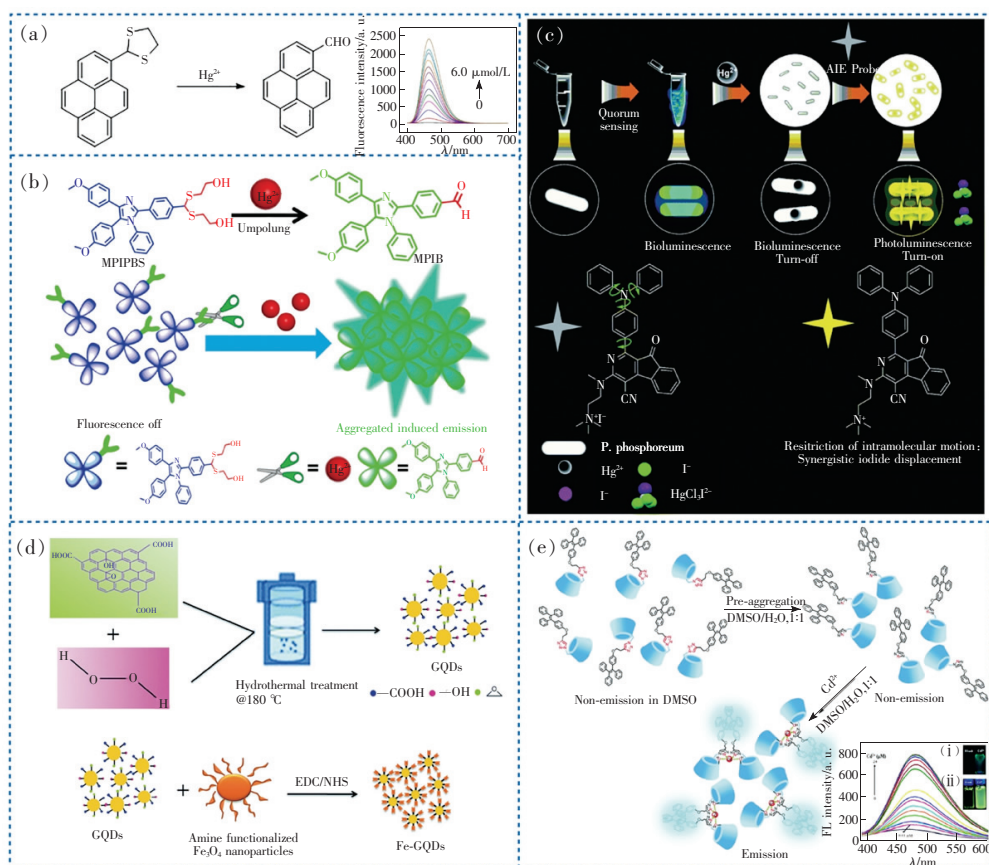


图3 AIE 探针的化学结构及对重金属离子的检测。(a) Pyren-DT 的化学结构及其与  $\text{Hg}^{2+}$  作用机理图<sup>[58]</sup>; (b) 探针 MPIPBS 的化学结构和设计策略<sup>[59]</sup>; (c) 通过破坏群体感应猝灭生物发光和 2-AFN-I 的 AIE 效应实现  $\text{Hg}^{2+}$  的双重检测化学结构及检测 caspase-3 的荧光变化示意图<sup>[60]</sup>; (d) Fe-GQD 的结构及其制备过程<sup>[61]</sup>; (e) TPE-triazole-CD 的化学结构及与  $\text{Cd}^{2+}$  作用机理图<sup>[62]</sup>。

Fig. 3 Chemical structures of AIE probes and the detection mechanism towards heavy metal ions. (a) Chemical structure of Pyren-DT and its detection mechanism towards  $\text{Hg}^{2+}$ <sup>[58]</sup>. (b) Chemical structures of probe MPIPBS and design strategy via the  $\text{Hg}^{2+}$ -induced umpolung reaction and the AIE mechanism<sup>[59]</sup>. (c) Chemical structures of 2-AFN-I and the detection mechanism towards  $\text{Hg}^{2+}$ <sup>[60]</sup>. (d) Chemical structure and synthesis process of Fe-GQDs nanoparticles<sup>[61]</sup>. (e) Chemical structure of TPE-triazole-CD and the mechanism of detection  $\text{Cd}^{2+}$ <sup>[62]</sup>.

于现场检测。进一步地,为了开发用于检测活细胞和生物体中  $\text{Hg}^{2+}$  的荧光探针,Gao 等<sup>[59]</sup> 基于  $\text{Hg}^{2+}$  诱导的极性反转反应(Polar inversion, Umpolung)和 AIE 效应开发了一种水溶性荧光探针 MPIPBS(图 3(b))。在  $\text{Hg}^{2+}$  存在时,MPIPBS 发生 Umpolung 反应使硫代乙缩醛转化为醛,并释放 MPIB 和游离的醛,探针的水溶性和分子内电荷转移(Intramolecular charge transfer, ICT)效率变化从而点亮荧光,检出限达  $1.45 \text{ nmol/L}$ 。MPIPBS 已被用于开发即时检测  $\text{Hg}^{2+}$  的便携试纸,并且可用于水样、尿液样品、活细胞和斑马鱼中  $\text{Hg}^{2+}$  的定量检测。此外,Huang 等<sup>[60]</sup> 根据磷假单胞菌生物发光的关闭和 AIE 活性探针 2-AFN-I 的荧光开启,开发了一种双重检测生物积累  $\text{Hg}^{2+}$  的策略(图 3(c))。其具体机理为:基于群体感应,高浓度的磷假单胞菌会产生强烈的生物发光,而当  $\text{Hg}^{2+}$  在细菌内部积累后会破坏群体感应导致生物发光猝灭;此时 2-AFN-I 可进入受损的细菌并与  $\text{Hg}^{2+}$  形成聚集体点亮荧光,从而检测生物积累的  $\text{Hg}^{2+}$ 。

在其他重金属离子的检测中,Pathon 等<sup>[61]</sup> 开发了一种基于  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  氧化石墨烯量子点(Fe-GQD)的荧光传感器。在  $\text{As}^{3+}$  存在时,Fe-GQD 和  $\text{As}^{3+}$  通过多种分子间相互作用形成聚集态,分子内运动受限从而荧光增强,可用于检测水中的  $\text{As}^{3+}$ (图 3(d))。Fe-GQD 对  $\text{As}^{3+}$  表现出良好的选择性,检出限达  $5.1 \times 10^{-9}$ ,远低于世界卫生组织饮用水中  $\text{As}^{3+}$  的容许限度。Zhang 等<sup>[62]</sup> 合成了一种基于环糊精(Cyclodextrin, CD)和 TPE 的 AIE 荧光响应型传感器 TPE-triazole-CD(图 3(e))。三唑桥和环糊精与  $\text{Cd}^{2+}$  配位形成复合物,由于 RIM 限制了 TPE 单元的非辐射衰变,从而实现开启荧光,可检测  $\text{Cd}^{2+}$ 。该探针对于  $\text{Cd}^{2+}$  具有较高的选择性,检出限达  $0.01 \text{ } \mu\text{mol/L}$ 。这项工作提供了一种基于 AIE 效应在中性环境中检测  $\text{Cd}^{2+}$  的简单方法。

目前,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 AIEgens 发展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,有望应用于食品中重金属离子的快速检测。其中设计合成简单、灵敏度高、水溶性好的新型 AIE 荧光探针用于重金属离子的快速检测

是未来发展的重点。

## 2.4 病原菌检测

食源性病原体是影响食品安全的主要威胁之一,食品中存在的任何致病菌都是严重的公共健康隐患。食源性病原体通过直接或间接污染食物和水源,最终可能导致人类感染肠道疾病、食物中毒甚至引发传染病的流行。尽管目前食品包装技术较为发达可以有效延长食物的储存时间,但在存储和运输过程中,食品不可避免地会接触到食源性病原体,例如霉菌<sup>[63]</sup>、大肠杆菌<sup>[64-65]</sup> 和李斯特菌<sup>[66]</sup> 等。此外,病原体会释放毒素并进一步威胁人体健康。因此,病原体的快速识别和检测非常重要。

食源性病原体主要包括真菌、革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌三类。基于荧光法不需要复杂的仪器且更适合应用于各种实际检测情况,是检测病原菌较为直接方便的方法。因此,目前已经开发了许多基于 AIEgens 的荧光传感器。由于细菌表面带有负电荷,一般设计带有正电荷的 AIE 荧光探针来实现细菌检测,AIE 探针通过静电相互作用吸附在细菌表面,积累后分子运动受限从而实现 AIE 荧光响应。Dong 等<sup>[67]</sup> 通过在本身具有 AIE 特性的带正电荷的壳寡糖(Chitosan oligosaccharide, COS)上接枝肽聚物来模拟细菌细胞壁的肽聚糖结构,制备了阳离子抗菌聚合物肽多糖探针(COS-AMP)(图 4(a))。该探针吸附于细菌表面后,激发依赖性荧光和其自身 AIE 效应,可应用于细菌的多色成像和定量检测。此外,Meng 等<sup>[68]</sup> 报告了一种多功能正电荷探针锌(II)-二甲基吡啶胺(AIE-ZnDPA),用于细菌的选择性成像和成像指导的光动力杀灭(图 4(b))。该探针通过与细菌之间的静电相互作用,在细菌膜上积累,并通过限制 N—N 键的分子内旋转和在水杨酸吡啶部分形成分子内氢键来激活 AIE 效应和激发态分子内质子转移(Excited state intramolecular proton transfer,ESIPT),从而实现成像和杀灭。在哺乳动物细胞中,AIE-ZnDPA 可以选择性地靶向细菌并成像,但该探针无法区分革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌。

事实上,通过非特异性静电作用或疏水相互作用检测病原菌的 AIEgens 分子只能用于细菌成像,无法实现对目标细菌种类的绝对区分,因而其不适用于准确靶向特定的目标细菌。因此,引入

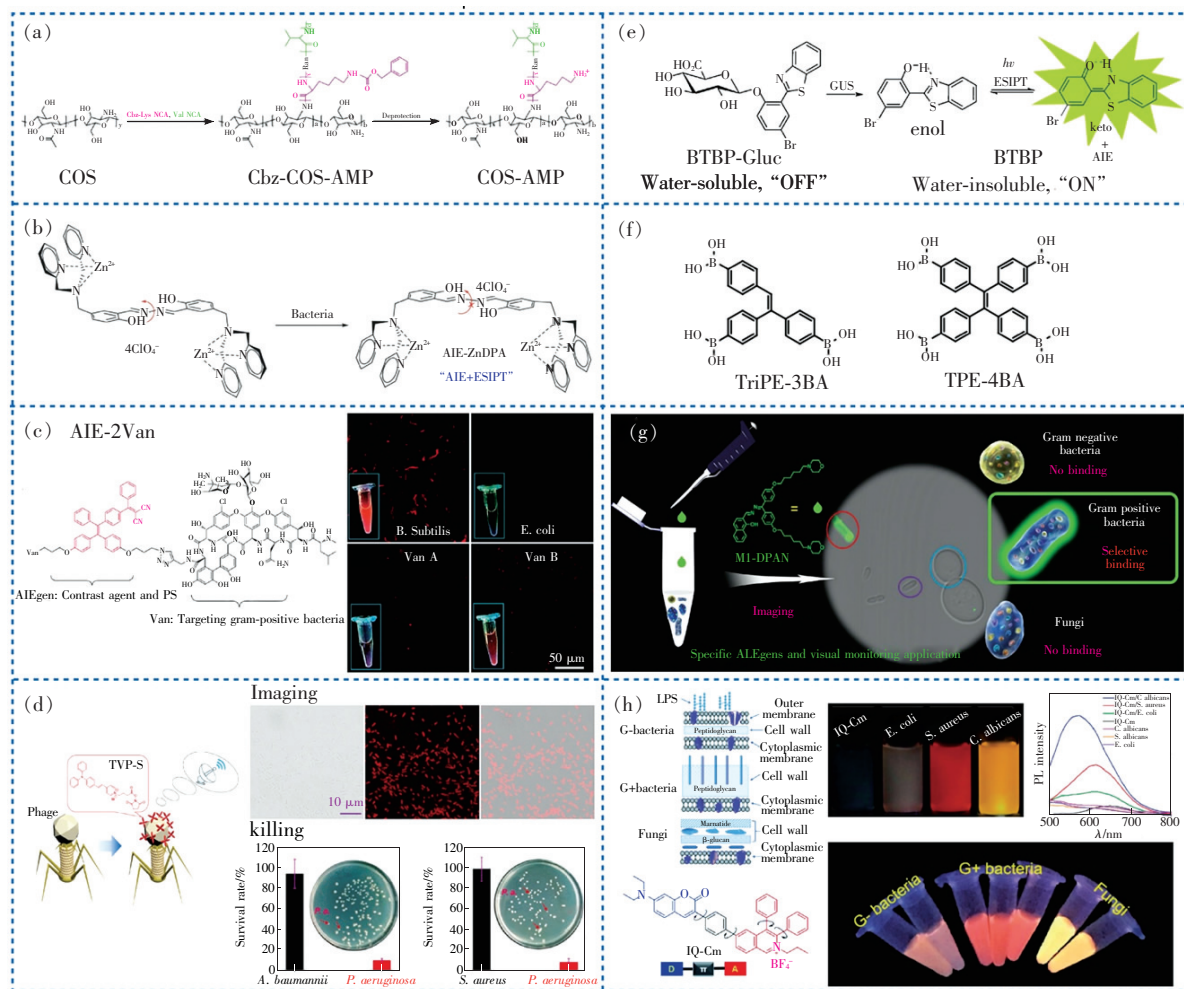


图 4 AIE 探针的化学结构及对病原体的检测。(a)COS-AMP 的化学结构及其合成路线<sup>[67]</sup>;(b)AIE-ZnDPA 的化学结构及与细菌作用示意图<sup>[68]</sup>;(c)AIE-2Van 的化学结构式<sup>[69]</sup>;(d)TVP-S 的化学结构式及其对特定细菌选择性成像、跟踪、杀灭示意图<sup>[70]</sup>;(e)BTBP-Gluc 的化学结构式和荧光响应示意图<sup>[71]</sup>;(f)TriPE-3BA 和 TPE-4BA 的化学结构式<sup>[75]</sup>;(g)M1-DPAN 的化学结构式和检测革兰氏阳性菌的荧光变化示意图<sup>[79]</sup>;(h)IQ-Cm 的结构式及与病原体作用机理示意图<sup>[36]</sup>。

Fig.4 Chemical structures of AIE probes and the detection mechanism towards pathogens. (a)Chemical structure and synthesis process of of COS-AMP<sup>[67]</sup>. (b)Chemical structure of AIE-ZnDPA and its mechanism for the detection of bacteria<sup>[68]</sup>. (c) Chemical structure of AIE-2Van<sup>[69]</sup>. (d)Chemical structure of TVP-S and illumination of particularly specific bacterial recognition, imaging and killing<sup>[70]</sup>. (e)Chemical structure of BTBP-Gluc and “turn on” detection E. coli O157: H7<sup>[71]</sup>. (f) Chemical structure of TriPE-3BA and TPE-4BA<sup>[75]</sup>. (g)Chemical structures of M1-DPAN and the detection mechanism towards Gram-positive bacteria<sup>[79]</sup>. (h)Chemical structures of IQ-Cm and the mechanism of detection pathogens<sup>[36]</sup>.

特异性识别配体是有效提高 AIE 传感器成像选择性的方法之一。万古霉素 (Vancomycin, Van) 对革兰氏阳性菌细胞壁上的肽聚糖序列 N-acyl-D-Ala-D-Ala 具有特异性的结合亲和力,可广泛用于杀灭革兰氏阳性菌。由此,Guang 等<sup>[69]</sup>将 AIEgens 与 2 个 Van 单元共轭合成了具有红色荧光的 AIE 点亮型探针 AIE-2Van,该探针成功用于选择性识别、视觉检测和图像引导光动力杀死

革兰氏阳性菌,甚至包括耐万古霉素肠球菌(图 4(c))。此外,He 等<sup>[70]</sup>提出一种引入噬菌体指导 AIEgen 实现“雷达”感应选择性识别目标细菌的策略,将 AIEgens 与噬菌体结合以形成一类新的抗菌生物共轭物 (TVP-PAP)(图 4(d))。该探针中噬菌体的靶向作用能够使 AIEgens 特异性识别具有噬菌体自身保留感染活性的宿主细菌,通过进一步的噬菌体感染以及 AIE 荧光发射对目标

细菌进行选择性感成像和光动力杀灭。Wei 等<sup>[71]</sup>则基于具有 ESIPT 和 AIE 效应的固态荧光团 (BTBP) 和葡萄糖醛酸 (Glucuronide, Gluc), 开发了一种简单的 OFF-ON 荧光底物 BTBP-Gluc, 用于活大肠杆菌的细胞成像并检测其内源性葡萄糖醛酸糖苷酶 (Glucuronidase, GUS) 的活性 (图 4(e))。由于 GUS 可区分缺乏 GUS 活性的大肠杆菌 O157: H7 与其他大肠杆菌<sup>[72-74]</sup>, 因此, 基于 BTBP-Gluc 开发的 C-F 大肠杆菌琼脂可用于视觉检测及分离牛奶中的 O157: H7 和其他大肠杆菌。

此外, 基于静电吸附的荧光探针不能区分活细菌和死细菌, 为了检测活细菌必须开发基于特定识别机制的新方法。Kong 等<sup>[75]</sup>开发了一类通过与细菌结合旋转受限而发出荧光的新型生物传感器, 可应用于即时检测区分活细菌和死细菌 (图 4(f))。该类 AIEgens 以 TPE 为核心连接不同个数的硼酸基团, 其可通过与细菌表面多糖上的顺式二醇络合而低聚, 从而 AIE 激活。其中, 采用 TriPE-3BA/TPE-4BA 和商用细胞核探针碘化丙啶 (Propidium iodide, PI) 处理活细菌时均发出蓝色荧光, 而死细菌会分别发出蓝色和红色荧光, 因此可以通过比较荧光差异来区分活细菌和死细菌。然而, 快速准确地鉴定和检测细菌种类仍然充满挑战。从结构和成分来看, 革兰氏阳性菌和真菌仅具有被疏松多孔细胞壁覆盖的细胞膜, 而革兰氏阴性菌具有附加的外膜, 该膜具有屏障功能使探针难以进入细胞<sup>[76-77]</sup>。与细菌不同, 真菌是一类具有多个细胞器的真核生物<sup>[78]</sup>。因此, 病原体表面结构和化学成分的差异使荧光探针可以不同程度地穿透其细胞膜, 并定位于不同的微环境中, 从而实现区分。Hu 等<sup>[79]</sup>开发了一种含有吗啉单元的荧光探针 M1-DPAN, 该探针以优异的选择性成功将革兰氏阳性菌与其他细菌和真菌区分开 (图 4(g))。该区分机制为 M1-DPAN 中的碱性吗啉部分可以通过强疏水相互作用和酸碱作用紧密地插入革兰氏阳性菌的肽聚糖层, 由于 AIE 效应荧光增强, 从而实现革兰氏阳性菌的选择性感成像; 相反, DPAN 部分难与真菌外层、革兰氏阴性菌的磷脂层稳定结合, 因此不发光。据报道, 具有扭曲 D- $\pi$ -A 结构的 AIEgens 可以通过 AIE 特性有效地抑制分子内扭转电荷转移 (Twisted intramolecular charge transfer, TICT) 状态的非辐射弛豫, 并实现对微环境极性差异的灵敏

荧光可视化响应<sup>[80]</sup>。Zhou 等<sup>[36]</sup>则开发了同时具有 TICT 和 AIE 特性的荧光探针 IQ-Cm, 可对病原体的不同微环境敏感响应 (图 4(h))。IQ-Cm 对 3 种病原体具有不同亲和力, 通过选择性相互作用定位于不同位置, 从而使其在 3 种病原体中显示出视觉上可辨别的发光颜色, 即大肠杆菌为绿色和橙色, 金黄色葡萄球菌为橙色, 白色念珠菌为黄色。需指出的是, 用 IQ-CM 标记真菌促进了霉菌的检测应用, 其肉眼检测极限约为  $10^6$  CFU  $\cdot$  mL<sup>-1</sup>, 可以很容易地从视觉上确定在食物上生长的霉菌数量。

AIEgens 在病原体成像检测中具有独特优势。在已有报道中, 科研工作者多通过引入不同靶向基团选择性识别特定病原体, 从而用于病原体的快速成像和视觉检测。由于革兰氏阴性菌的外膜包裹阻碍了 AIEgens 的穿膜, 因此开发选择性成像革兰氏阴性菌的 AIE 传感器是病原体成像的研究突破点。

## 2.5 食品添加剂检测

食品添加剂是少量添加于食品的非营养物质, 可用于改善食品的外观、风味、组织结构和贮存性质。但食品添加剂滥用会带来健康风险, 近年来滥用食品添加剂引起的食品安全事件也屡屡发生。因此, 食品添加剂的使用及其含量引起了人们对食品安全的关注。

三聚氰胺通常用于纺织工业和农药生产, 但由于其氮含量高、价格低而被非法添加到牛奶和婴儿配方食品中, 造成食品安全事故。摄入超过安全水平的三聚氰胺会导致肾衰竭, 甚至死亡<sup>[81]</sup>。Niu 等<sup>[35]</sup>开发了一种由带正电的 AIE 有机荧光纳米颗粒和带负电的 Au 纳米簇组成的双发射比例荧光探针 OFNs@ Au NCs, 可用于目测及定量检测食品中的 Hg<sup>2+</sup> 和三聚氰胺 (图 5(a))。Hg<sup>2+</sup> 与 Au NCs 具有高亲和力, 两者结合后将猝灭探针的红色荧光, 从而检测 Hg<sup>2+</sup> 浓度; 而三聚氰胺存在时, 通过与 Hg<sup>2+</sup> 更强的配位亲和力阻止 Hg<sup>2+</sup> 与 Au NCs 的结合, 从而恢复红色荧光。由于 AIE-OFN 的绿色荧光强度稳定, 可以通过明显的颜色变化视觉检测 Hg<sup>2+</sup> 和三聚氰胺。OFNs@ Au NCs 对 Hg<sup>2+</sup> 和三聚氰胺的检出限较低, 分别为 22.7 nmol  $\cdot$  L<sup>-1</sup> 和 680 nmol  $\cdot$  L<sup>-1</sup>, 远低于碳量子点法检测三聚氰胺的最低限 (2.2 mg  $\cdot$  L<sup>-1</sup>)<sup>[82]</sup>。此外, 该探针已成功应用于检测自来水和奶粉中



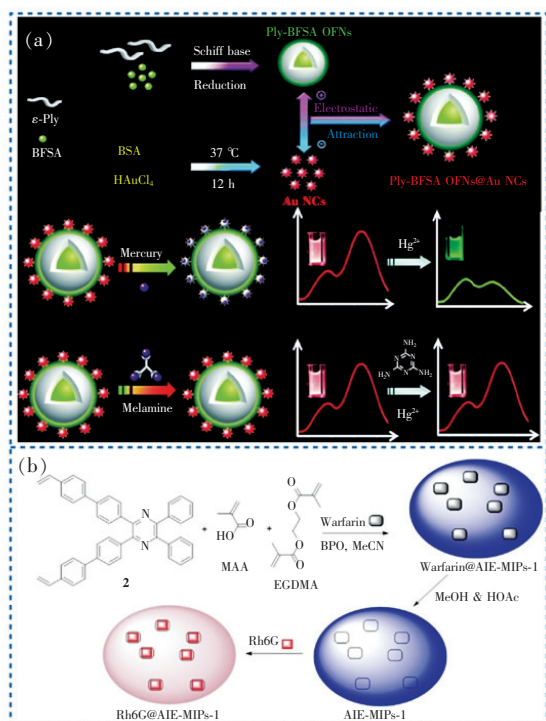


图5 AIE探针的化学结构及对食品添加剂的检测。(a) OFNs@Au NCs的制备过程及其与 $\text{Hg}^{2+}$ 、三聚氰胺的作用荧光变化示意图<sup>[35]</sup>;(b) AIE-MIPs-1的制备过程示意图及其对Rh6G的检测原理<sup>[84]</sup>。

Fig.5 Chemical structures of AIE probes and the detection mechanism towards food additives. (a) Schematic illustration of the synthesis of OFNs@Au NCs and the mechanism of detection  $\text{Hg}^{2+}$  and melamine<sup>[35]</sup>. (b) Schematic illustration for the preparation process of AIE-MIPs-1 and detection principle to Rh6G<sup>[84]</sup>.

的 $\text{Hg}^{2+}$ 和三聚氰胺。

罗丹明(Rhodamine, Rh)具有潜在的致癌性,可导致人类和动物的生殖发育异常,目前已被禁止在食品行业使用<sup>[83]</sup>。但由于成本低,其仍被不法商家当作色素添加在食品中。为此, Li等<sup>[84]</sup>以四苯基吡嗪(TPP)作为AIE响应基团,开发了一种新型的基于分子印迹聚合物(Molecular imprinting polymers, MIPs)的比例型荧光传感器(AIE-MIPs-1),可用于定量检测木瓜干和饮料中的Rh6G(图5(b))。AIEgen本身在420 nm处显示蓝色荧光,吸附Rh6G后,420 nm处的荧光强度降低,而562 nm处的荧光强度增加,颜色从蓝色变为橙色,可用肉眼清楚观察。AIE-MIPs-1对Rh6G在 $0.0 \sim 10.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内具有良好的线性关系,检出限为 $0.26 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。同样地, Li等<sup>[85]</sup>还开发了对RhB具有高灵

敏度和选择性的比例荧光传感器(TPE-A-MIPs), RhB的检出限为 $1.41 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

## 2.6 食品品质评估

食品受到外界有害因素的污染后,其原有的色、香、味和营养成分均会发生变化,最终会导致食品质量降低甚至完全不能食用,即食品腐败变质<sup>[86-87]</sup>。鱼类和肉类等食品的腐败过程主要以蛋白质的分解为主,会产生多种有毒的生物胺,如腐胺、尸胺、酪胺和组胺等。其中,生物胺是常用的评价肉类新鲜度的指标之一<sup>[88-89]</sup>。Han等<sup>[90]</sup>通过将羧基连接在AIEgen核的不同位置上合成了一类具有AIE和ICT效应的位置异构体,其中基于(E)-3-((4-(二乙胺基)-2-羟基苯亚甲基)氨基)苯甲酸(m-DB)自组装的传感器对有机胺蒸汽压力具有线性关系,检出限低至 $2.02 \text{ Pa}$ ,可用于肉类腐败监测(图6(a))。其分子设计的策略是通过改变羧基的位置以调节偶极子间的方向,从而进一步控制自组装体系结构,使其形态实现从一维纳米线到二维微片甚至三维微立方体的转变。AIE异构体的苯甲酸部分对胺具有很强的亲和力,而胺与AIEgens间的不同相互作用会导致AIEgens荧光发生变化从而实现检测。同样地, Hou等<sup>[91]</sup>基于该原理开发的基于HMBA-4的胺传感器也可以用于快速检测变质的猪肉样品。此外, Han等<sup>[92]</sup>使用2,3,5,6-四氟苯硫酚(TFTP)作为还原剂和保护配体开发了一种能够快速、灵敏和高选择性检测组胺的强发光自组装铜纳米团簇(Cu NCs)。当存在组胺时,由于铜原子和组胺间的强相互作用和RIM机制, Cu NCs的荧光会被猝灭。Cu NCs在 $0.1 \sim 10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的组胺浓度范围内具有良好线性关系,检出限为 $60 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,远低于美国食品药品监督管理局规定的最大残留限( $450 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )。基于Cu NCs的发光测试条对组胺含量显示出明显的颜色梯度变化,可用于视觉检测鲤鱼、虾、红酒中的组胺含量。

另一方面,食品的粘度变化是反映流质食品变质的关键参数之一<sup>[93]</sup>。Xu等<sup>[38]</sup>开发了对粘度敏感的AIE荧光探针TPAEQ,可用于检测饮料中食品增稠剂含量以及饮料的变质情况(图6(b))。随着粘度的增加,TPAEQ中可旋转的三苯胺和甲基醚单元旋转受到抑制,从而导致强烈的荧光发射。并且TPAEQ的荧光强度与食物增稠剂质量浓度间存在线性关系。因此,TPAEQ可

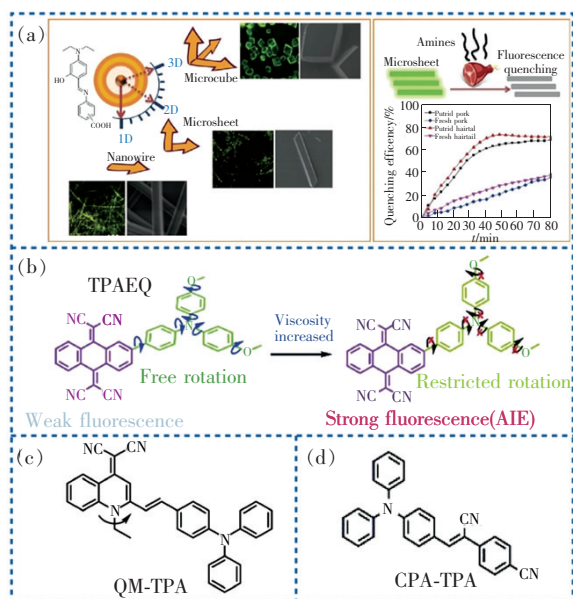


图 6 AIE 探针的化学结构及对食物品质的评估。(a) m-DB 的化学结构式及其与有机胺的作用机理图<sup>[90]</sup>；(b) TPAEQ 的化学结构式及对粘度的荧光响应示意图<sup>[38]</sup>；(c) QM-TPA 的化学结构式<sup>[96]</sup>；(d) CPA-TPA 的化学结构式<sup>[97]</sup>。

Fig. 6 Chemical structures of AIE probes and the detection mechanism towards food quality. (a) Chemical structure of m-DB and the mechanism of detection amines<sup>[90]</sup>. (b) Chemical structure of TPAEQ and "turn on" detection viscosity<sup>[38]</sup>. (c) Chemical structure of QM-TPA<sup>[96]</sup>. (d) Chemical structure of CPA-TPA<sup>[97]</sup>.

通过荧光粘度响应来检测评估液态饮料的变质情况和定量分析食品增稠剂的含量。

食品的加工方法也同样会影响食品的营养成分。例如,油炸食品因其酥脆可口、香气扑鼻,深受人们喜爱,但长期食用油炸食品对身体健康极为不利,容易提高肥胖症、高血脂症和冠心病等的患病率。油炸是一个复杂的化学过程,会发生氧

化、水解、聚合等反应,产生多种有害化合物,例如丙烯酰胺、三酰基甘油 (Triacylglycerol, TAG) 和总极性材料 (Total polar materials, TPM)。其中, TPM 包含了煎炸过程中产生的不饱和脂肪酸、甘油单酸酯、甘油二酸酯和许多氧化物(醛或酮)。特别地,随炸油循环使用次数增多,其中的有害物质会逐渐增加。因此,煎炸油的质量已成为消费者最重点关注的食品安全问题之一。为此,许多国家已经制定了限制煎炸油滥用的法规, TAG 和 TPM 的含量是评估煎炸油安全性的重要指标<sup>[94]</sup>, 其中 TPM 的含量限制为 24% ~ 30%<sup>[95]</sup>。

由于煎炸油系统的粘度随 TAG 或 TPM 的增加而增大,因此对粘度具有超灵敏响应的 AIE 荧光探针是评估煎炸油品质的理想选择。Wu 等<sup>[96]</sup>报告了一种由喹啉腈 (Quinoline-malononitrile, QM) 和三苯胺组成的 AIE 探针 QM-TPA, 可以通过粘度调节机制直接定量检测煎炸油中的 TAG 浓度(图 6(c))。在煎炸过程中,随着 TAG 的产生煎炸油的粘度逐渐增大,限制 AIEgen 分子内运动从而实现荧光响应。在 0, 20, 40, 60, 80, 100 次油炸条件下,测得 TAG 的浓度分别为 3.5%、6.01%、7.59%、9.27%、11.75% 和 13.65%, 与 QM-TPA 荧光强度呈线性相关。Cui 等<sup>[97]</sup>基于对粘度高灵敏度的三苯胺衍生物 (CPA-TPA), 建立了一种有效地定量测定煎炸油中 TPM 含量的方法(图 6(d))。当煎炸油的粘度增大时,荧光强度与 TPM 之间存在着良好的线性关系,这表明 CPA-TPA 可以作为一种便携式工具通过粘度传感实现简单、快速监测煎炸油的 TPM。与基于色谱的检测方法相比,该类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,实现了食品品质的快速评估、实时感测和便携式操作(表 1)。

表 1 AIE 传感器在食品安全检测中的应用

Tab. 1 Application of AIE sensors in the detection of food safety

类别	分析物	AIEgens	激发/发射 波长/nm	检出限	最大 残留限量	真实 检测样品	参考 文献
农药残留	乐果	TPE-1	365/446	0.008 mg · L <sup>-1</sup>	1mg · kg <sup>-1</sup>	湖水	[34]
	对氧磷	PTDNPs-AuNPs	365/475	0.38 ng · mL <sup>-1</sup>	10 ng · mL <sup>-1</sup>	东湖、卷心菜	[48]
	对氧磷	BSPOTPE-SiO <sub>2</sub> -MnO <sub>2</sub>	400/490	1 μg · L <sup>-1</sup>	10 ng · mL <sup>-1</sup>	自来水、河水	[49]
	有机磷	TPE-Peptide	365/510	0.57 μmol · L <sup>-1</sup>	0.05 mg · kg <sup>-1</sup>	白菜	[50]

表1(续)

类别	分析物	AIEgens	激发/发射 波长/nm	检出限	最大 残留限量	真实 检测样品	参考 文献
兽药残留	氯霉素	DSAC <sub>2</sub> N-GO	405/530	1.26 pg · mL <sup>-1</sup>	0.3 μg · kg <sup>-1</sup>	牛奶	[52]
	金霉素	Zn-BTEC	395/540	28 nm	100 μg · kg <sup>-1</sup>	鱼肉	[53]
	金刚烷胺	TPE-Hpro	365/540	0.06 μg · kg <sup>-1</sup>	—	鸡肉	[55]
重金属	Hg <sup>2+</sup>	OFNs@ Au NCs	365/625	22.7 nmol · L <sup>-1</sup>	10 nmol · L <sup>-1</sup>	自来水	[35]
	Hg <sup>2+</sup>	Pyren-DT	367/462	2.88 × 10 <sup>-8</sup> mol · L <sup>-1</sup>	10 nmol · L <sup>-1</sup>	自来水、河水	[58]
	Hg <sup>2+</sup>	MPIPBS	380/495	1.45 nmol · L <sup>-1</sup>	10 nmol · L <sup>-1</sup>	湘江水、饮用水	[59]
	As <sup>3+</sup>	Fe-GQD	330/430	5.1 × 10 <sup>-9</sup>	10 × 10 <sup>-9</sup>	自来水、循环水	[61]
	Cd <sup>2+</sup>	TPE-triazole-CD	330/476	0.01 μmol · L <sup>-1</sup>	44 nm	—	[62]
病原体	大肠杆菌	COS-AMP	340/420	1.25 × 10 <sup>6</sup> CFU · mL <sup>-1</sup>	3 CFU · mL <sup>-1</sup>	—	[67]
	霉菌	IQ-Cm	450/643	10 <sup>6</sup> CFU · mL <sup>-1</sup>	0 CFU · mL <sup>-1</sup>	橙子、面包等	[36]
添加剂	三聚氰胺	OFNs@ Au NCs	365/625	680 nmol · L <sup>-1</sup>	1 × 10 <sup>-6</sup>	奶粉	[35]
	罗丹明 6G	AIE-MIPs-1	360/562	0.26 μmol · L <sup>-1</sup>	7 × 10 <sup>-6</sup>	木瓜干、饮料	[84]
	组胺	TFTP@ Cu NCs	435/590	60 nmol · L <sup>-1</sup>	450 μmol · L <sup>-1</sup>	虾、红酒等	[92]
腐败评估	聚甘油三酯	QM-TPA	430/584	—	—	煎炸油	[96]
	总极性材料	CPA-TPA	420/567	—	30%	煎炸油	[97]

—: no data。

### 3 总结与展望

AIEgens 作为一种新型的荧光材料在食品安全检测领域已经取得了许多创新性成果。基于 AIEgens 开发的荧光传感器具有响应快速、选择性好、效率高等优势,实现了对农药、兽药、重金属、病原体和食品添加剂等的选择性识别和检测。但是,由于 AIEgens 单独使用检测时存在生物相容性差、检测种类少、自发荧光干扰等问题,通常将 AIEgens 进一步修饰以提高生物相容性和荧光量子效率,或与噬菌体、肽、适配体、酶等靶向识别单元结合以提高检测的灵敏度和准确性,甚至与其他检测技术(如 PCR 技术、传感器阵列等)联用以拓展 AIE 荧光传感器的应用范围。

尽管如此,设计更高效、更灵敏的 AIE 荧光传感器仍面临诸多挑战。例如,(1) RIM 是聚集诱导发光的主要机制,但许多新型的 AIEgens(如平面型 AIEgens)<sup>[98]</sup> 不能用 RIM 进行解释,因此需要对 AIE 机理进行更深入系统的研究;(2) 制

备 AIE 纳米颗粒是提高分子亲水性和生物相容性的有效方法,并且可以有效提高荧光量子效率,但目前尚未有研究分析纳米颗粒的修饰方法、尺寸和形状与荧光传感效率的关系,需要进一步优化;(3) 食品组成非常复杂,包含蛋白质、糖、食品添加剂等多种物质,因此提高选择性是准确识别目标分析物的研究重点,需要将 AIEgens 与肽、适配体、分子印迹等结合以进一步提高靶向性;(4) 由于 AIEgens 的信号采集主要依赖于一些大型仪器,开发便携式、可视化的 AIE 荧光传感器用于现场“免仪器”检测对拓展应用市场将具有良好的前景。

总而言之,AIEgens 已成功应用于食品安全领域,但相关应用研究还处于发展阶段。虽然食品多样性和复杂性对 AIE 荧光传感器的选择性和灵敏度要求很高,但是基于 AIEgens 的优异性能,我们相信其将会成为保障食品安全的一种有效工具。随着对 AIEgens 的创新设计和深入研究,其将在食品安全检测领域具有更为广泛的应用。

### 参 考 文 献:

[1] WU Y N, LIU Y M, CHEN Q, *et al.*. Surveillance for foodborne disease outbreaks in China, 2003 to 2008 [J]. *Food*

*Control*, 2018,84:382-388.

- [ 2 ] KOTSANOPOULOS K V, ARVANITTOYANNIS I S. The role of auditing, food safety, and food quality standards in the food industry: a review [J]. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2017,16(5):760-775.
- [ 3 ] ZHANG Z, GODEFROY S B, LYU H, *et al.*. Transformation of China's food safety standard setting system-review of 50 years of change, opportunities and challenges ahead [J]. *Food Control*, 2018,93:106-111.
- [ 4 ] AUNG M M, CHANG Y S. Traceability in a food supply chain: safety and quality perspectives [J]. *Food Control*, 2014,39:172-184.
- [ 5 ] MALIK A K, BLASCO C, PICÓ Y. Liquid chromatography-mass spectrometry in food safety [J]. *J. Chromatogr. A*, 2010,1217(25):4018-4040.
- [ 6 ] PICÓ Y, FONT G, RUIZ M J, *et al.*. Control of pesticide residues by liquid chromatography-mass spectrometry to ensure food safety [J]. *Mass Spectrom. Rev.*, 2006,25(6):917-960.
- [ 7 ] ESTEKI M, SIMAL-GANDARA J, SHAHSAVARI Z, *et al.*. A review on the application of chromatographic methods, coupled to chemometrics, for food authentication [J]. *Food Control*, 2018,93:165-182.
- [ 8 ] 刘晓敏, 许秀丽, 聂雪梅, 等. 食品中化学性有害物的质谱软电离裂解规律及筛查技术研究进展 [J]. *色谱*, 2020,38(7):750-758.
- LIU X M, XU X L, NIE X M, *et al.*. Research progress on the fragmentation mechanisms of mass spectrometry soft ionization and screening of chemical hazardous substances in food [J]. *Chin. J. Chromatogr.*, 2020,38(7):750-758. (in Chinese)
- [ 9 ] HATZAKIS E. Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy in food science: a comprehensive review [J]. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2019,18(1):189-220.
- [ 10 ] MCMULLIN D, MIZAIKOFF B, KRŠKA R. Advancements in IR spectroscopic approaches for the determination of fungal derived contaminations in food crops [J]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2015,407(3):653-660.
- [ 11 ] MARTINS A R, TALHAVINI M, VIEIRA M L, *et al.*. Discrimination of whisky brands and counterfeit identification by UV-Vis spectroscopy and multivariate data analysis [J]. *Food Chem.*, 2017,229:142-151.
- [ 12 ] HOYOS-ARBELÁEZ J, VÁZQUEZ M, CONTRERAS-CALDERÓN J. Electrochemical methods as a tool for determining the antioxidant capacity of food and beverages: a review [J]. *Food Chem.*, 2017,221:1371-1381.
- [ 13 ] SCOGNAMIGLIO V, ARDUINI F, PALLESCHI G, *et al.*. Biosensing technology for sustainable food safety [J]. *TrAc Trends Anal. Chem.*, 2014,62:1-10.
- [ 14 ] 杜斌, 童朝阳, 刘志伟, 等. 基于适配体-表面等离子共振的生物传感技术及应用 [J]. *发光学报*, 2017,38(8):1039-1046.
- DU B, TONG Z Y, LIU Z W, *et al.*. Research and application of biosensing technology based on aptamer-surface plasmon resonance [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017,38(8):1039-1046. (in Chinese)
- [ 15 ] TRIPATHI P, UPADHYAY N, NARA S. Recent advancements in lateral flow immunoassays: a journey for toxin detection in food [J]. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2018,58(10):1715-1734.
- [ 16 ] BOUGADI E T, KALOGIANNI D P. Paper-based DNA biosensor for food authenticity testing [J]. *Food Chem.*, 2020,322:126758.
- [ 17 ] BURTSCHER C, WUERTZ S. Evaluation of the use of PCR and reverse transcriptase PCR for detection of pathogenic bacteria in biosolids from anaerobic digestors and aerobic composters [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2003,69(8):4618-4627.
- [ 18 ] ZHANG H Y, YANG S P, DE RUYCK K, *et al.*. Fluorescence polarization assays for chemical contaminants in food and environmental analyses [J]. *TrAc Trends Anal. Chem.*, 2019,114:293-313.
- [ 19 ] SHEN Y M, YAN F M, HUANG X, *et al.*. A new water-soluble and colorimetric fluorescent probe for highly sensitive detection of organophosphorus pesticides [J]. *RSC Adv.*, 2016,6(91):88096-88103.
- [ 20 ] YUE X Y, LIU L Z, LI Z H, *et al.*. Highly specific and sensitive determination of propyl gallate in food by a novel fluorescence sensor [J]. *Food Chem.*, 2018,256:45-52.
- [ 21 ] HU X, MAO X X, ZHANG X D, *et al.*. One-step synthesis of orange fluorescent copper nanoclusters for sensitive and selective sensing of Al<sup>3+</sup> ions in food samples [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2017,247:312-318.

- [22] ZHAO X Y, YANG D Q, PANG Y H, *et al.*. Quaternary ammonium salt ion pair reagent sensitizing for determination of fluorescence whitening agent 85 in paper food packaging [J]. *Spectrochim. Acta A*, 2020, 231:118125.
- [23] 李龙龙, 赵宁, 李冰, 等. 双氰基荧光染料的合成、光学性质及其生物成像 [J]. *发光学报*, 2017, 38(12):1575-1581.  
LI L L, ZHAO N, LI B, *et al.*. Synthesis, optical properties and biological imaging of a new two-photon fluorescence dye with dicyano-group [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(12):1575-1581. (in Chinese)
- [24] 程晓红, 阮志军, 钟志成, 等. 基于香豆素的荧光传感器及其对次氯酸根的快速检测 [J]. *发光学报*, 2018, 39(8):1182-1191.  
CHENG X H, RUAN Z J, ZHONG Z C, *et al.*. Rapid-responsive fluorescent probes based on coumarin dye for sensitive detection of hypochlorite [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(8):1182-1191. (in Chinese)
- [25] GANDIOSO A, BRESOLI-OBACH R, NIN-HILL A, *et al.*. Redesigning the coumarin scaffold into small bright fluorophores with far-red to near-infrared emission and large Stokes shifts useful for cell imaging [J]. *J. Org. Chem.*, 2018, 83(3):1185-1195.
- [26] TIAN X W, LI Z, PANG Y X, *et al.*. Benzoyl peroxide detection in real samples and zebrafish imaging by a designed near-infrared fluorescent probe [J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2017, 65(43):9553-9558.
- [27] LUO J D, XIE Z L, LAM J W Y, *et al.*. Aggregation-induced emission of 1-methyl-1,2,3,4,5-pentaphenylsilole [J]. *Chem. Commun.*, 2001, (18):1740-1741.
- [28] MEI J, HONG Y N, LAM J W Y, *et al.*. Aggregation-induced emission; the whole is more brilliant than the parts [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(31):5429-5479.
- [29] FU W, YAN C X, GUO Z Q, *et al.*. Rational design of near-infrared aggregation-induced-emission-active probes: *in situ* mapping of amyloid- $\beta$  plaques with ultrasensitivity and high-fidelity [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019, 141(7):3171-3177.
- [30] KANG M M, ZHOU C C, WU S M, *et al.*. Evaluation of structure-function relationships of aggregation-induced emission luminogens for simultaneous dual applications of specific discrimination and efficient photodynamic killing of gram-positive bacteria [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019, 141(42):16781-16789.
- [31] GU X G, ZHANG X Y, MA H L, *et al.*. Corannulene-incorporated AIE nanodots with highly suppressed nonradiative decay for boosted cancer phototheranostics *in vivo* [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(26):1801065-1-9.
- [32] WANG R C, DONG K K, XU G, *et al.*. Activatable near-infrared emission-guided on-demand administration of photodynamic anticancer therapy with a theranostic nanoprobe [J]. *Chem. Sci.*, 2019, 10(9):2785-2790.
- [33] 秦安军, 胡蓉. 聚集诱导发光聚合物的机遇与挑战: 聚合物之美与聚集集体之光相辉映 [J]. *发光学报*, 2020, 41(9):1082-1086.  
QIN A J, HU R. Prospect and challenge of polymers featuring aggregation-induced emission characteristics [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(9):1082-1086. (in Chinese)
- [34] CAI Y, FANG J K, WANG B F, *et al.*. A signal-on detection of organophosphorus pesticides by fluorescent probe based on aggregation-induced emission [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2019, 292:156-163.
- [35] NIU C X, LIU Q L, SHANG Z H, *et al.*. Dual-emission fluorescent sensor based on AIE organic nanoparticles and Au nanoclusters for the detection of mercury and melamine [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(18):8457-8465.
- [36] ZHOU C C, JIANG M J, DU J, *et al.*. One stone, three birds; one AIEgen with three colors for fast differentiation of three pathogens [J]. *Chem. Sci.*, 2020, 11(18):4730-4740.
- [37] ZHAO N, LI P F, ZHUANG J B, *et al.*. Aggregation-induced emission luminogens with the capability of wide color tuning, mitochondrial and arterial imaging, and photodynamic anticancer and antibacterial therapy [J]. *Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(12):11227-11237.
- [38] XU L F, NI L, ZENG F, *et al.*. Tetranitrile-anthracene as a probe for fluorescence detection of viscosity in fluid drinks *via* aggregation-induced emission [J]. *Analyst*, 2020, 145(3):844-850.
- [39] NIU G L, ZHANG R Y, SHI X J, *et al.*. AIE luminogens as fluorescent bioprobes [J]. *TrAc Trends Anal. Chem.*, 2020, 123:115769.
- [40] WANG D, TANG B Z. Aggregation-induced emission luminogens for activity-based sensing [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2019, 52(9):2559-2570.
- [41] SAMANTA S, HE Y, SHARMA A, *et al.*. Fluorescent probes for nanoscopic imaging of mitochondria [J]. *Chem*, 2019, 5

- (7):1697-1726.
- [42] HUANG X L, GUO Q, ZHANG R Y, *et al.*. AIEgens; an emerging fluorescent sensing tool to aid food safety and quality control [J]. *Compr. Rev. Food Sci.*, 2020, 19(4):2297-2329.
- [43] KUSHWAHA M, VERMA S, CHATTERJEE S. Profenofos, an acetylcholinesterase-inhibiting organophosphorus pesticide; a short review of its usage, toxicity, and biodegradation [J]. *J. Environ. Qual.*, 2016, 45(5):1478-1489.
- [44] FAHIMI-KASHANI N, HORMOZI-NEZHAD M R. Gold-nanoparticle-based colorimetric sensor array for discrimination of organophosphate pesticides [J]. *Anal. Chem.*, 2016, 88(16):8099-8106.
- [45] 葛学峰, 吴彦玮, 赵志敏. 荧光光谱法检测蜂蜜中腐霉利农药的含量 [J]. *发光学报*, 2017, 38(7):973-977.  
GE X F, WU Y W, ZHAO Z M. Determination of procymidone residues content in honey by fluorescence spectroscopy [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(7):973-977. (in Chinese)
- [46] 吉海彦, 任占奇, 饶震红. 高光谱成像技术鉴别菠菜叶片农药残留种类 [J]. *发光学报*, 2018, 39(12):1778-1784.  
JI H Y, REN Z Q, RAO Z H. Identification of pesticide residue types in spinach leaves based on hyperspectral imaging [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(12):1778-1784. (in Chinese)
- [47] FENG G X, TAY C Y, CHUI Q X, *et al.*. Ultrabright organic dots with aggregation-induced emission characteristics for cell tracking [J]. *Biomaterials*, 2014, 35(30):8669-8677.
- [48] CHEN J L, CHEN X J, HUANG Q Y, *et al.*. Amphiphilic polymer-mediated aggregation-induced emission nanoparticles for highly sensitive organophosphorus pesticide biosensing [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(36):32689-32696.
- [49] WU X L, WANG P S, HOU S Y, *et al.*. Fluorescence sensor for facile and visual detection of organophosphorus pesticides using AIE fluorogens-SiO<sub>2</sub>-MnO<sub>2</sub> sandwich nanocomposites [J]. *Talanta*, 2019, 198:8-14.
- [50] WANG J Y, ZHANG J Y, WANG J, *et al.*. Fluorescent peptide probes for organophosphorus pesticides detection [J]. *J. Hazard. Mater.*, 2020, 389:122074.
- [51] BAYNES R E, DEDONDER K, KISSELL L, *et al.*. Health concerns and management of select veterinary drug residues [J]. *Food Chem. Toxicol.*, 2016, 88:112-122.
- [52] ZHANG S, MA L, MA K, *et al.*. Label-free aptamer-based biosensor for specific detection of chloramphenicol using AIE probe and graphene oxide [J]. *ACS Omega*, 2018, 3(10):12886-12892.
- [53] YU L, CHEN H X, YUE J, *et al.*. Metal-organic framework enhances aggregation-induced fluorescence of chlortetracycline and the application for detection [J]. *Anal. Chem.*, 2019, 91(9):5913-5921.
- [54] 崔廷婷, 冯才伟, 吴小胜, 等. 金刚烷胺残留化学发光酶免疫法的建立 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(14):275-279.  
CUI T T, FENG C W, WU X S, *et al.*. Establishment of chemiluminescent enzyme immunoassay for determination of amantadine residues [J]. *Sci. Technol. Food Ind.*, 2019, 40(14):275-279. (in Chinese)
- [55] YU W B, LI Y, XIE B, *et al.*. An aggregation-induced emission-based indirect competitive immunoassay for fluorescence “turn-on” detection of drug residues in foodstuffs [J]. *Front. Chem.*, 2019, 7:228-1-7.
- [56] KUMARI N, JHA S, MISRA S K, *et al.*. A probe for the selective and parts-per-billion-level detection of copper( II ) and mercury( II ) using a micellar medium and its utility in cell imaging [J]. *Chempluschem*, 2014, 79(7):1059-1064.
- [57] 赵海燕. 食品中重金属污染、危害及研究危害及对策分析 [J]. *食品安全导刊*, 2020(15):25.  
ZHAO H Y. Establishment of chemiluminescent enzyme immunoassay for determination of amantadine residues [J]. *China Food Saf. Mag.*, 2020(15):25. (in Chinese)
- [58] MA J, XIAO Y, ZHANG C H, *et al.*. Preparation a novel pyrene-based AIE-active ratiometric turn-on fluorescent probe for highly selective and sensitive detection of Hg<sup>2+</sup> [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2020, 259:114582.
- [59] GAO T, HUANG X Y, HUANG S, *et al.*. Sensitive water-soluble fluorescent probe based on umpolung and aggregation-induced emission strategies for selective detection of Hg<sup>2+</sup> in living cells and zebrafish [J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2019, 67(8):2377-2383.
- [60] HUANG L T, LI S W, LING X, *et al.*. Dual detection of bioaccumulated Hg<sup>2+</sup> based on luminescent bacteria and aggregation-induced emission [J]. *Chem. Commun.*, 2019, 55(52):7458-7461.
- [61] PATHAN S, JALAL M, PRASAD S, *et al.*. Aggregation-induced enhanced photoluminescence in magnetic graphene oxide quantum dots as a fluorescence probe for As( III ) sensing [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2019, 7(14):8510-8520.
- [62] ZHANG L F, HU W P, YU L P, *et al.*. Click synthesis of a novel triazole bridged AIE active cyclodextrin probe for specific

detection of Cd<sup>2+</sup> [J]. *Chem. Commun.*, 2015,51(20):4298-4301.

- [63] XU L L, CHEN P, LIU T, *et al.*. A novel sensitive visual count card for detection of hygiene bio-indicator-molds and yeasts in contaminated food [J]. *LWT*, 2020,117:108687.
- [64] YANG S C, LIN C H, ALJUFFALI I A, *et al.*. Current pathogenic *Escherichia coli* foodborne outbreak cases and therapy development [J]. *Arch. Microbiol.*, 2017,199(6):811-825.
- [65] SAXENA T, KAUSHIK P, MOHAN M K. Prevalence of *E. Coli* O157:H7 in water sources; an overview on associated diseases, outbreaks and detection methods [J]. *Diagn. Microbiol. Infect. Dis.*, 2015,82(3):249-264.
- [66] HAMIDIYAN N, SALEHI-ABARGOUEI A, REZAEI Z, *et al.*. The prevalence of *Listeria* spp. food contamination in Iran: a systematic review and meta-analysis [J]. *Food Res. Int.*, 2018,107:437-450.
- [67] DONG Z Z, WANG Y D, WANG C L, *et al.*. Cationic peptidopolysaccharide with an intrinsic AIE effect for combating bacteria and multicolor imaging [J]. *Adv. Healthc. Mater.*, 2020,9(13):2000419.
- [68] GAO M, HU Q L, FENG G X, *et al.*. A multifunctional probe with aggregation-induced emission characteristics for selective fluorescence imaging and photodynamic killing of bacteria over mammalian cells [J]. *Adv. Healthc. Mater.*, 2015,4(5):659-663.
- [69] FENG G X, YUAN Y Y, FANG H, *et al.*. A light-up probe with aggregation-induced emission characteristics (AIE) for selective imaging, naked-eye detection and photodynamic killing of gram-positive bacteria [J]. *Chem. Commun.*, 2015,51(62):12490-12493.
- [70] HE X W, YANG Y J, GUO Y C, *et al.*. Phage-guided targeting, discriminative imaging, and synergistic killing of bacteria by AIE bioconjugates [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2020,142(8):3959-3969.
- [71] WEI X H, WU Q O, FENG Y, *et al.*. Off-on fluorogenic substrate harnessing ES IPT and AIE features for *in situ* and long-term tracking of  $\beta$ -glucuronidase in *Escherichia coli* [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2020,304:127242.
- [72] ROMPRÉ A, SERVAIS P, BAUDART J, *et al.*. Detection and enumeration of coliforms in drinking water; current methods and emerging approaches [J]. *J. Microbiol. Methods*, 2002,49(1):31-54.
- [73] MANAFI M. New developments in chromogenic and fluorogenic culture media [J]. *Int. J. Food Microbiol.*, 2000,60(2-3):205-218.
- [74] ZHANG G G, XU S L, XIONG Y H, *et al.*. Ultrabright fluorescent microsphere and its novel application for improving the sensitivity of immunochromatographic assay [J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2019,135:173-180.
- [75] KONG T T, ZHAO Z, LI Y, *et al.*. Detecting live bacteria instantly utilizing AIE strategies [J]. *J. Mater. Chem. B*, 2018,6(37):5986-5991.
- [76] BAI H T, CHEN H, HU R, *et al.*. Supramolecular conjugated polymer materials for *in situ* pathogen detection [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016,8(46):31550-31557.
- [77] WANG Y, CORBITT T S, JETT S D, *et al.*. Direct visualization of bactericidal action of cationic conjugated polyelectrolytes and oligomers [J]. *Langmuir*, 2012,28(1):65-70.
- [78] YUAN H X, LIU Z, LIU L B, *et al.*. Cationic conjugated polymers for discrimination of microbial pathogens [J]. *Adv. Mater.*, 2014,26(25):4333-4338.
- [79] HU R, ZHOU F, ZHOU T T, *et al.*. Specific discrimination of gram-positive bacteria and direct visualization of its infection towards mammalian cells by a DPAN-based AIEgen [J]. *Biomaterials*, 2018,187:47-54.
- [80] LIESE D, HABERHAUER G. Rotations in excited ICT states-fluorescence and its microenvironmental sensitivity [J]. *Isr. J. Chem.*, 2018,58(8):813-826.
- [81] AI K L, LIU Y L, LU L H. Hydrogen-bonding recognition-induced color change of gold nanoparticles for visual detection of melamine in raw milk and infant formula [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2009,131(27):9496-9497.
- [82] 苏安梅, 余姝轶, 章秀, 等. 基于碳量子点荧光恢复的三聚氰胺测定方法 [J]. *发光学报*, 2017,38(7):967-972.  
SU A M, YU S Y, QIN X, *et al.*. Determination of melamine based on fluorescence recovery of carbon quantum dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017,38(7):967-972. (in Chinese)
- [83] THALER S, HARITOGLOU C, CHORAGIEWICZ T J, *et al.*. *In vivo* toxicity study of Rhodamine 6G in the rat retina [J]. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 2008,49(5):2120-2126.
- [84] LI Y Y, HE W Y, PENG Q C, *et al.*. Aggregation-induced emission luminogen based molecularly imprinted ratiometric

- fluorescence sensor for the detection of Rhodamine 6G in food samples [J]. *Food Chem.*, 2019,287:55-60.
- [85] LI Y Y, HOU L Y, SHAN F J, *et al.*. A novel aggregation-induced emission luminogen based molecularly imprinted fluorescence sensor for ratiometric determination of Rhodamine B in food samples [J]. *ChemistrySelect*, 2019,4(38):11256-11261.
- [86] FLETCHER B, MULLANE K, PLATTS P, *et al.*. Advances in meat spoilage detection: a short focus on rapid methods and technologies [J]. *CyTA J. Food*, 2018,16(1):1037-1044.
- [87] ODEYEMI O A, ALEGBELEYE O O, STRATEVA M, *et al.*. Understanding spoilage microbial community and spoilage mechanisms in foods of animal origin [J]. *Compr. Rev. Food Sci.*, 2020,19(2):311-331.
- [88] 杨春婷, 赵晓娟, 白卫东. 肉类中的生物胺形成及其在肉类新鲜度评价中的应用研究进展 [J]. *肉类研究*, 2017,31(1):55-59.
- YANG C T, ZHAO X J, BAI W D. Formation of biogenic amines during meat storage and their application in assessment of meat freshness [J]. *Meat Res.*, 2017,31(1):55-59. (in Chinese)
- [89] POGHOSSIAN A, GEISSLER H, SCHÖNING M J. Rapid methods and sensors for milk quality monitoring and spoilage detection [J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2019,140:111272.
- [90] HAN J Q, LI Y P, YUAN J, *et al.*. To direct the self-assembly of AIEgens by three-gear switch: morphology study, amine sensing and assessment of meat spoilage [J]. *Sensors Actuat. B Chem.*, 2018,258:373-380.
- [91] HOU J D, DU J R, HOU Y, *et al.*. Effect of substituent position on aggregation-induced emission, customized self-assembly, and amine detection of donor-acceptor isomers: implication for meat spoilage monitoring [J]. *Spectrochim. Acta A*, 2018,205:1-11.
- [92] HAN A L, XIONG L, HAO S J, *et al.*. Highly bright self-assembled copper nanoclusters: a novel photoluminescent probe for sensitive detection of histamine [J]. *Anal. Chem.*, 2018,90(15):9060-9067.
- [93] GHASEMI-VARNAMKHAHASTI M, APETREI C, LOZANO J, *et al.*. Potential use of electronic noses, electronic tongues and biosensors as multisensor systems for spoilage examination in foods [J]. *Trends Food Sci. Technol.*, 2018,80:71-92.
- [94] HACK D M, BORDI JR P L, HESSERT JR S W. Nutrition, sensory evaluation, and performance analysis of hydrogenated frying oils [J]. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 2009,60(8):647-661.
- [95] STIER R F. Ensuring the health and safety of fried foods [J]. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 2013,115(8):956-964.
- [96] WU Y, JIN P W, GU K Z, *et al.*. Broadening AIEgen application: rapid and portable sensing of foodstuff hazards in deep-frying oil [J]. *Chem. Commun.*, 2019,55(28):4087-4090.
- [97] CUI S Q, WANG B W, YAN X L, *et al.*. A novel emitter: sensing mechanical stimuli and monitoring total polar materials in frying oil [J]. *Dyes Pigm.*, 2020,174:108020.
- [98] NI J S, MIN T L, LI Y X, *et al.*. Planar AIEgens with enhanced solid-state luminescence and ROS generation for multidrug-resistant bacteria treatment [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2020,59(25):10179-10185.



吕妍婷(1997 -),女,浙江绍兴人,硕士研究生,2019年于浙江工业大学获得学士学位,主要从事聚集诱导发光荧光探针的研究。

E-mail: lyanting@mail.ecust.edu.cn



朱为宏(1970 -),男,江苏建湖人,博士,教授,博士研究生导师,1999年于华东理工大学获得博士学位,主要从事荧光探针、光致变色染料和有机太阳能电池敏化染料等的研究。

E-mail: whzhu@ecust.edu.cn



王琪(1985 -),女,四川南充人,博士,副教授,硕士研究生导师,2014年于四川大学获得博士学位,主要从事药物载体材料、肿瘤靶向性课题以及诊断治疗相结合、构建新型给药系统等研究。

E-mail: wangqi@ecust.edu.cn



### 通讯作者简介:

王琪(1985-),女,四川达州人,博士,副教授。2014年于四川大学华西药学院获得理学博士学位;2014—2017年,新加坡南洋理工大学化学与生物工程学院 Research Associate。研究方向为材料化工与产品工程,主要从事靶向药物载体材料及递送系统的设计与研制。至今已发表 SCI 论文 40 余篇,他引 700 余次。申请国家发明专利 9 项,已授权 4 项。先后入选上海市“浦江人才计划”、中国抗癌协会纳米肿瘤学专业委员会委员、中国医药生物技术协会造影技术分会委员。

朱为宏(1970-),男,江苏建湖人,博士,华东理工大学教授,博士研究生导师。1999年于华东理工大学获得应用化学博士学位,2001年10月—2003年4月,在日本筑波国立产业技术综合研究院(AIST)纳米研究所做博士后研究,2004年7月—2005年3月,日本筑波大学先进学际研究中心(TARA Center)外国人研究员(高级访问学者)。主要研究领域为精细化工(染料),围绕有机染料功能化及稳定性强化机制展开工作。至今已在 *Angew. Chem. Int. Ed.*, *J. Am. Chem. Soc.*, *Nature Comm.*, *Chem* 等发表 SCI 收录论文 290 余篇,被引 16 000 余次,H 指数 71。申请中国发明专利 32 项,其中 26 项已授权。曾先后获国家杰出青年科学基金、教育部“长江学者”特聘教授,国家自然科学基金二等奖两项(2019年,第一完成人;2007年,第三完成人)、上海市自然科学一等奖两项(2006年,第三完成人;2017年,第一完成人)、上海市牡丹奖等。入选 2018、2020 年度科睿唯安化学领域“高被引科学家”(Highly Cited Researchers)。目前担任 *Green Chemical Engineering* 副主编、*Science China Chemistry* 编委、*ACS Applied Bio Materials (ACS-ABM)* 编委、*Dyes and Pigments* 编委、*Green Energy and Environment* 编委等。