基于 G-四链体的生物传感器在食品污染物检测中的研究进展

缪金伟

(东营职业学院生物与生态工程学院 东营 257091)

摘 要 食品污染物不仅对人类健康造成了严重威胁,还会给食品工业造成巨大的经济损失。G-四链体(G4)是由鸟嘌呤的碱基配对形成的核酸三维二级结构,具有灵活的绑定能力,已成为生物传感器的重要组成部分。将 G4 与生物传感器结合用于食品中污染物的检测得到了广泛的应用。本文对 G4 进行了简介,综述了 2015~2022 年间 G4 在食品污染物检测中的研究进展,并对其未来的发展趋势进行了展望。

关键词 生物传感器 食品污染物 检测 G-四链体

Research Progress of G-Quadruplex-Based Biosensor in Food Contamination Detection

Miao Jinwei

(School of Biological and Ecological Engineering, Dongying Vocational College, Dongying, 257091)

Abstract Food contaminants not only pose a serious threat to human health, but also cause huge economic losses to the food industry. G-quadruplex (G4) is a three-dimensional secondary structure of nucleic acid formed by pairing four guanine bases, which has flexible binding ability, and it has become an important part of biosensors. The combination of G4 and biosensor has been widely used in the detection of food contaminants. In this paper, the construction methods of G4 is introduced, the research progress of G4 in the detection of food contaminants from 2015 to 2022 is reviewed, and the development trend of G4 in the future is prospected.

Keywords Biosensor, Food contaminant, Detection, G-quadruplex

食品安全一直是人们关注的重要问题。随着 食品供应的全球化,确保食品安全至关重要。不 安全的食物往往可以导致各种疾病,严重者甚至 会导致食用者死亡^[1,2]。目前,严重的食品安全 问题往往是由食品污染物引起的。食品污染物的 来源多种多样,如农药的滥用、食源性致病菌的污 染、毒素的产生以及食品加工过程中有害化学物 质的形成^[3]。因此,为确保食品安全,食品污染 物的测定和监测具有重要意义。为发展定性/定 量检测食品污染物,研究者们已经开发了多种方 法。常用的光谱检测法有气相色谱-质谱(GC-MS)、高效液相色谱(HPLC)、拉曼、荧光和紫外 可见光谱法,这些方法不需要大量破坏食品样本. 但往往受到吸收峰重叠、检测特异性差、耗时长、 需要专业操作等问题的限制^[4]。另外,生物学检 测方法,如免疫分析(ELISA)、酶抑制、快速抗菌 筛选试验(FAST)、侧流试验条(LFTs)和生物传 感等,也被广泛用于食品中的污染物的快速分 析^[5-7]。虽然这些方法具有灵敏度高和特异性强 等优点,但由于食物基质和热不稳定性的干扰,这 些方法可能会产生假阳性的结果。开发高效、低 成本、准确、灵敏、方便的生物传感器,实现对食品 污染物的准确检测,对保障食品安全和人类健康 具有非常重要的意义。

G-四链体(G4)是由鸟嘌呤富集的核酸序列 构建而成的一种特殊的高阶 DNA 结构^[8,9]。G4 具有性价比高、易合成、适应化学改性等优点,可 以用于目标识别和信号转导,因而在生物传感平 台中具有广阔的应用前景^[10]。其中,G4 作为识 别单元,它对靶标具有很高的特异性和亲和力;作 为信号转换单元,可通过多种信号输出满足不同 生物传感平台(荧光、电化学、比色等)的需

缪金伟 男,硕士,讲师,主要从事用于外泌体分离检测的纳米材料和各类生物分子的电化学检测研究。E-mail: dyzyxymjw@

求^[11,12]。因此,基于 G4 的生物传感器在医学、环 境监测和食品工业等领域得到了广泛的研究和应 用。本文拟在简单介绍 G4 的基础上,综述在 2015~2022年间基于 G4 的生物传感器在食品污 染物检测中的研究进展,并对其未来的发展趋势 进行展望。

1 G-四链体

1962年首次发现了鸟嘌呤(G)四链体,自组 装 G4 核酸结构不同于典型的双螺旋结构^[13],G4 是由四个鸟嘌呤碱基通过 Hoogsteen 氢键配对形 成的一种稳定的共面四方二级结构^[14]。G4 结构 具有多种构象,可以由两个、三个或多个 G4 叠加 而成。根据链的方向,G4结构可以分为平行、反 平行和混合(平行和反平行的混合)结构(图1), 这主要是由于 G4 的构象通常受核苷酸链的数量 和极性、阳离子类型和结合靶点等多种因素的影 响^[15,16]。由于其独特的结构和增加的热力学和 化学稳定性,G4 有许多其他核酸结构不具备的优 点,如热稳定性好、免疫原性低、酶活性可调以及 可编程性好等^[17]。另外,由于 G4 结构的负电荷 密度是双链 DNA 的两倍,因此,G4 可以大大提高 其与荷正电配体的静电相互作用。目前,G4 广泛 应用于检测有机分子、核酸和金属离子的生物传 感器。



2 G4 形成的 DNAzyme

脱氧核酶于 1994 年首次合成,单链 DNA 序列显示出酶活性。在稳定金属离子存在的情况下,富含鸟嘌呤的序列与含铁卟啉血红素结合,折叠成 G4,极大地提高了血红素(Hemin)的催化活性^[18]。通过模拟辣根过氧化物酶(HRP)的DNAzyme用于催化 H₂O₂的还原和底物(3,3,5,5-四甲基联苯胺硫酸盐(TMB)、鲁米诺、2,2-氨基二氮(3-乙基苯唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、苯胺、对苯二酚(HQ)以及邻苯二胺(OPD))的氧

化^[19-23],能进一步引发后续反应,提高催化活性 和检测灵敏度(图 2)。值得注意的是,DNAzyme 能够很好地避免天然蛋白酶产生的不溶性沉淀, 从而减少阻断氧化还原探针的电子转移过 程^[24,25]。通过G4和适配体或其他生物组分的结 合,研究人员正试图开发新的生物传感器并拓宽 其应用。因此,G4已成为高选择性和高灵敏度的 生物传感的通用工具。



图 2 G4 形成的 DNAzyme 催化 TMB 显色的机理

Fig. 2 Mechanism of TMB color development catalyzed by DNAzyme formed by G4

3 G4 作为识别单元用于食品污染 物检测

作为识别单元,G4 对赭曲霉毒素 A(OTA)、 Pb²⁺等靶点具有较高的特异性和亲和力,因此,G4 可以用于食品基质中污染物的灵敏检测。

3.1 真菌毒素检测

无论是在人类食品还是动物饲料中,真菌毒素的存在都威胁着食品安全和人类健康。各国政府和国际组织对食品中的真菌毒素残留量制定了 严格的限制。为使真菌毒素水平保持在这些限度 以下,建立可靠和敏感的真菌毒素监测方法是非 常必要的^[26,27]。基于 G4 的生物传感器作为一种 有前景的真菌毒素检测工具受到越来越多的 关注。

作为小分子毒素,OTA 和黄曲霉毒素 B1 (AFB1)可以与特定的 DNA 序列发生特异性反 应,从而形成或破坏 G4 结构,达到检测的目的。 例如,Li 等^[28]构建了一种基于 G4 的荧光传感器 用于 AFB1 的检测。荧光染料硫黄素 T(ThT)与 抗 AFB1 的 G4(G4/ThT)结合形成的复合物能够 显著提高 ThT 的荧光强度。当 AFB1 存在时,游 离的 AFB1 适配体会破坏 G4 的结构,从而降低荧 光强度,达到检测的目的。该方法对植物源性食 品中 AFB1 的检测限为 1ng/mL,同时整个检测过 程在 20min 内即可完成。这种 G4/ThT 荧光探针 具有水溶性、成本效益、操作简单、灵敏度好、背景 信号低等优势,在食品分析检测中有很大的应用 潜力。

研究表明,OTA 的酚环体系与 G4 存在 π-堆 叠作用。这种 OTA 与其 G4 适配体结合机制促进 了基于 G4 的 OTA 检测生物传感器的构建。基于 此,研究人员建立了用于 OTA 检测的高灵敏度、 无标记的 G4 荧光传感器。另外,由于 OTA 本质 上是一种荧光酚类物质,OTA 与其适配体之间的 **π**-堆叠相互作用也可以触发 G4-OTA 之间的能量 转移,从而提供了一种新的能量转换机制"打开" 荧光信号。Armstrong 等^[29]报道据此构建了"打 开"的荧光信号平台,使得适配体-OTA 复合物的 荧光远远强于游离的毒素。G4-OTA 复合物在 256nm 处的选择性激发可使 OTA 荧光增强 4 倍。 G4-OTA 能量转移平台对 OTA 的检测限为 2ng/ mL,这种检测灵敏度与荧光共振能量转移免疫分 析平台类似。此外, Deore 等^[30]构建了 G4 特异 性配体驱动的 G4-G4 纳米装置作为无标记适配 体传感器检测 OTA。作者采用 H-Telo22-配体相 互作用作为 G4-G4 纳米器件的模型。当 OTA 不 存在时,OTA结合适配体折叠成反平行的G4。结 果表明,当荧光染料引起 OTA 结合适配体(平行 或混合)拓扑结构变化时,OTA 介导的染料置换 具有出色的 OTA 检测灵敏度。然而,当荧光染料 未能在 OTA 结合适配体的反平行折叠中诱导构 象变化时,将 OTA 添加到适配体-染料复合物中 会导致染料置换不佳,OTA 检测的发射响应较 弱。这种检测方式作为一种概念验证,为基于 G4 的荧光传感器用于 OTA 检测提供了重要思路。

3.2 金属离子检测

食品中的重金属离子主要来自环境。重金属 污染正威胁着全球粮食安全和人类健康。有效监 测食品和环境中重金属含量是控制食品中重金属 污染的重要手段之一^[31]。与传统的仪器分析(如 电感耦合等离子体质谱法、原子吸收光谱法和原 子发射光谱法等)相比,生物传感方法可以提高 重金属离子的检测效率,使现场分析成为可 能^[32]。许多重金属离子,包括 Tl⁺、Pb²⁺、Ag⁺、 Hg²⁺、Cd²⁺可以通过错配或其他相互作用与 DNA 探针结合,使 DNA 探针的结构产生特殊的构象转 变。G4 是一种常用的重金属离子 DNA 探针。

Khoshbin 等^[33]构建了基于 Pb²⁺适配体从无 规线圈到 G4 结构的构象转换的超灵敏纸基生物 传感器,其主要是利用 Förster 共振能量转移 (FRET)过程和氧化石墨烯(GO)片的超荧光猝 灭特性。在纸基平台上注入 Pb²⁺时会诱导特定 适配体从 GO 表面释放,从而恢复荧光发射。 Pb²⁺不存在时,荧光发生猝灭。利用 GO 薄片的 荧光猝灭特性,大大降低了背景信号,能够检测出 0.5pmol/L的 Pb²⁺。同时,该方法可在 10min 内 实现对 Pb²⁺进行超灵敏检测。该纸基生物传感 器具有简单、高效的特性,此外,通过取代目标特 异性适配体,该方法还可用于检测其他金属离子。

由于实际样品总是含有多种重金属离子。在 这种情况下,同时分析多个目标的适配体传感器 可以使检测过程更加方便。G4 可以在多种重金 属离子同时测量中发挥多种作用。Lu 等^[34]建立 了一种基于荧光标记适配体和 GO 的 Hg²⁺、Pb²⁺ 和 Ag⁺的荧光检测方法。由于荧光团与 GO 之间 的 FRET, 荧光信号极弱。当系统中加入目标离 子时,相应的适配体与目标离子选择性结合,并从 GO 表面释放,荧光信号恢复。Hg²⁺、Pb²⁺和 Ag⁺ 的最低检测限分别为 0.2、0.5 和 2 nmol/L,该方 法在多种离子同时检测中展示出背景信号小、检 测速度快、准确度高、选择性好等特点。此外, Zhang 等^[35]设计了一种新颖的双功能寡核苷酸 (OND)探针,并在 5'端标记了单个荧光基团 HEX 用于实际样品中痕量 Ag⁺和 Pb²⁺的同时检 测。在 Ag⁺存在的情况下,源自 Ag⁺诱导的胞嘧 啶-Ag⁺-胞嘧啶错配的发夹结构会导致 HEX 接 近 G4 的 3'-末端,导致荧光发生猝灭。当存在 Pb²⁺时,通过 Pb²⁺与由分子内氢键连接的两个 G4 平面结合,使 HEX 接近 G4 末端导致荧光猝 灭。该方法在 1.0~20.0 nmol/L 范围内具有良 好的线性关系,对Ag⁺和Pb²⁺的最低检测限分别 为82和92 pmol/L。与针对不同靶标使用特定 适配体的生物传感器相比,基于多功能探针的 平台具有更简单的组成。但由于信号输出可能 是混合的,因此很难同时对多个金属离子进行 定量测量。

尽管 G4 作为识别单元对 OTA、Pb²⁺等靶点具 有较高的特异性和亲和力,但是仍然有很多食物 污染物与 G4 没有特定的结合能力。

4 G4作为信号变换单元用于食品 污染物检测

在生物传感平台中,G4 不仅可以用于目标识

别,还可以用于信号转导。G4利用其优良的催化 能力和荧光猝灭能力,可以将污染物的浓度转化 为比色、电化学、荧光或其他可测量的信号。同 时,G4作为信号探针,能够消除传统方法中繁琐 的步骤,同时又能保证识别策略的敏感性和特异 性。此外,G4-hemin DNAzyme 作为一种通用的信 号发生器被用于许多比色、荧光和电化学生物传 感器,可用于快速检测一系列污染物。

4.1 G4 用于比色传感器

比色生物传感器以颜色反应为基础,可以通 过仪器测量甚至肉眼检测实现污染物的定量检 测。与过氧化物酶相比,G4 DNAzyme 更稳定,更 容易合成。将 G4 DNAzyme 作为催化组分,有利 于建立稳定、无酶、低成本的生物传感平台。

Wu 等^[36] 提出了一种 DNAzyme 可视化的 Hg²⁺检测策略。Hg²⁺诱导两个探针之间的胸腺嘧 啶(T)-Hg²⁺-T碱基对,这些碱基对构成 G4 DNA, 形成 G4-血红素 DNAzyme。从 G4 到发夹状结构 的转变能对 Hg²⁺产生比例和杠杆反应,放大了 Hg²⁺检测的信号-背景比率。与普通适配体探针 相比,采用比率增强的 G4 探针对 Hg²⁺的检测灵 敏度提高了 4.7 倍;同时,该传感器显示了对 Hg²⁺良好的特异性。Sun 等^[37]利用核酸适配体 偶联磁性纳米粒子作为高效捕获探针,建立了 一种用于检测食源性副溶血性弧菌的比色适配 体传感器。该检测策略是基于副溶血性大肠杆 菌的互补 DNA(cDNA)和副溶血性大肠杆菌之 间对其特异性合剂的竞争。与适配体结合的磁 性纳米颗粒被用作捕获探针,而 G4 DNAzyme 酶 被用作信号放大元件。在优化条件下,副溶血 性弧菌检测线性检测范围为 $10^2 \sim 10^7$ CFU/mL, 检测限可低至 10CFU/mL。该方法与标准平板 计数法得到的结果具有良好的一致性。因此, 这种新型的传感器可以成为敏感和选择性地检 测副溶血性大肠杆菌的一个很好的候选者,而 无需复杂的操作。

4.2 G4 用于电化学传感器

生物分子与目标分子之间的相互作用可以转 化为电势、电流、电导、阻抗等电信号,用于食品污 染物的定量测量。与其他信号相比,电化学信号 具有响应快、灵敏度高的特点。由于 G4 DNAzyme的过氧化物酶活性,将其用于电化学生 物传感器中可以作为氧化还原介质,对目标产生 电响应。信号的产生和放大对基于 G4 的电化学 生物传感器至关重要,这主要是因为,对于电化学 信号的产生,适配体和抗体作为捕获探针能够很 好地提高选择性;同时,采用链置换扩增(SDA)、 杂交链式反应(HCR)和纳米技术等放大策略可 以实现对痕量污染物的检测。

以 SDA 和依赖金属离子的 DNAzyme 循环扩 增来生长鸟嘌呤纳米线(G-纳米线)作为信号输 出组件,Xie 等^[38]建立了一种无标记的电化学传 感器用于检测 Hg^{2+} 。随着 T- Hg^{2+} -T 结构的形成, Hg²⁺-介导的 SDA 导致大量 Mg²⁺-依赖的酶序列的 释放,进一步与发夹序列杂交。当 Mg²⁺存在时, 发夹序列的催化解理导致酶促序列的释放进行另 一个解理循环,使 G4 片段留在电极表面。这些 碎片导致 G4/血红素纳米线自组装,产生电化学 信号。该传感器具有较高的灵敏度(最低检测限 为 0. 097 pmol/L) 和对 Hg²⁺的良好选择性,表明多 种信号放大策略的集成具有潜在的价值。另外。 Ma 等^[39] 构建了一种基于二维 Cu-卟啉 (Cu-TCPP)金属有机骨架纳米膜、G4 和 DNA 纳米马 达联合使用的自清洁电化学生物传感器用于 Pb²⁺的循环检测。具有过氧化物酶活性的 Cu-TCPP 纳米膜作为载体用于保持 G4 的亚稳态。 Pb²⁺的引入和血红素的插层有助于 Cu-TCPP 纳 米膜表面亚稳态 G4 向稳定的 G4-血红素 DNAzymes 的转化,形成 G4-血红素 DNAzymes 催 化 H₂O₂ 产生电化学信号,用于测定 Pb²⁺。该传 感器检测 Pb²⁺的线性范围为 5nmol/L~5μmol/L, 检测限为 1.7nmol/L。与已有报道的最佳检测 体系相比,其线性范围扩大了5倍,检出限也 更低。

4.3 基于 G4 的荧光传感器

荧光生物传感器被认为是一种灵敏度更高的 分析工具。作为信号转换元素,G4可以与荧光染 料有选择性地相互作用,在有标记和无标记荧光 生物传感器中都发挥了重要作用。

He 等^[40]精心设计 DNA G4 组装体,构建了 无生物酶、无标签、环保的生物传感器,通过比色 和荧光多模式实现 OTA 的灵敏检测。在比色模 式下,OTA 适配体(AP9)被组装成具有特殊信号 放大序列的 DNA 三螺旋开关。OTA 诱导 AP9 的 G4 打开开关,释放信号放大序列,进行比色信号 放大。随后,进一步利用 AP9 的 G4 结构与荧光 染料 ThT 结合进行荧光模式下的检测。通过巧 妙地将 DNA G4 组装起来进行信号放大,不需要 任何 DNA 扩增或纳米材料标记。比色法和荧光 法的检出限分别为 4µg/kg 和 0.01 µg/kg。将两 种模式应用于具有固有色素和自发荧光的样品中 OTA 的检测,表明了该方法的适用性和优越性。 Li 等^[41]用多壁碳纳米管(MWCNT)和 G4 作为信 号转换器,构建了一种无标记和无酶的低本底方 法检测水胺硫磷(ICP)。将 N-甲基卟啉二丙酸 IX(NMM)与 G4 连接,作为荧光探针。当 ICP 适 配体被拆分为两条链,各自的末端有 G4-NMM 基 序。在没有 ICP 的情况下, MWCNT 吸附了分裂 适配体的单链 DNA 组分,导致荧光猝灭。当与 ICP 结合时,分裂的核酸适配体可以形成三明治 状三元复合物,空间位阻增加使得它们很难被吸 附于 MWCNT 表面,从而增强荧光信号。这种生 物传感策略可以选择性地、灵敏地检测出食品基 质中 10nmol/L 的 ICP。此外, Zhao 等^[42]建立了 一种基于 DNA 三向连接形成的 G4 和 GO 的荧光 传感器用于对乙酰氨基脒的检测,该方法的最低 检测限为 5.73nmol/L。

5 结语

基于 G4 的生物传感器具有成本低、选择性 高、合成简单、输出信号多等优点,引起了研究人 员将其用于食品污染检测的兴趣。然而,实际样 品中不同的阳离子(如钾离子)和 pH 会影响 G4 的形成及其与待测物的结合能力,从而降低基于 G4 的生物传感器的灵敏度和准确性。因此,建立 比率生物传感器和双捕获探针可以帮助提高检测 结果的准确性。另外,适配体和 G4 的结合不需 要化学修饰,也是一种提高检测准确性的方式之 一。G4 与无标记和无酶生物传感技术结合,再与 信号放大策略结合,不仅制备简单,还能实现对待 测目标的超灵敏检测,值得进一步探索。与辣根 过氧化物酶相比,基于 G4-血红素 DNAzyme 的比 色生物传感器的催化活性较低,限制了其实际应 用。因此,设计具有良好催化活性的 G4-血红素 DNAzyme 与 DNA 扩增或纳米材料标记结合,实 现信号扩增值得深入研究。目前,现有的 G4 可 检测毒素的种类较少,这主要是受限于毒素与 G4 的结合能力。因此,还需要发现更多 G4 序列、拓 扑结构和性质的信息,从而促进 G4 与食品污染 物的结合,如开发作为 G4 识别探针的发光铱 (III)过渡金属配合物和聚集体。尽管基于 G4 的 生物传感器比传统的免疫分析和印迹分析更方 便、更便宜,但它们离实际应用还有很长的路 要走。

参考文献

- [1] Li C, Li C, Yu H, et al. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 2021, 61(9): 1545~1555.
- [2] Liu Q, Chen Z, Chen Y, et al. J. Agr. Food Chem., 2021, 69(36): 10450~10468.
- [3] Magri A, Petriccione M, Gutiérrez T. Food Chem., 2021, 354: 129533.
- [4] Belarbi S, Vivier M, Zaghouani W, et al. Food Chem., 2021, 359: 129932.
- [5] Sadighara P, Jahanbakhsh M, Nazari Z, et al. Food Chem., 2021, 12: 100154.
- [6] Zhuang Y, Lin B, Yu Y, et al. Food Chem., 2021, 356: 129720.
- [7] Gan Z, Hu X, Xu X, et al. Food Chem., 2021, 354: 129501.
- [8] Roxo C, Kotkowiak W, Pasternak A. Molecules, 2019, 24 (20): 3781.
- [9] Awadasseid A, Ma X, Wu Y, et al. Biomed. Pharmacother., 2021, 139: 111550.
- [10] Asamitsu S, Takeuchi M, Ikenoshita S, et al. Int. J. Mol.
 Sci., 2019, 20(12): 2884~2898.
- [11] Nishio M, Tsukakoshi K, Ikebukuro K. Biosens. Bioelectron., 2021, 178: 113030.
- [12] Umar M I, Ji D, Chan C Y, et al. Molecules, 2019, 24 (13): 2416.
- [13] Teng F, Jiang Z, Guo M, et al. Cell Mol. Life Sci., 2021, 78(19-20): 6557~6583.
- [14] Lopes-Nunes J, Oliveira P A, Cruz C. Pharmaceuticals, 2021, 14(7): 671~698.
- [15] Xu J, Jiang R, He H, et al. Trends Anal. Chem., 2021, 139: 116257.
- [16] Cadoni E, De Paepe L, Manicardi A, et al. Nucl. Acids Res., 2021, 49(12): 6638~6659.
- [17] Varshney D, Spiegel J, Zyner K, et al. Nat. Rev. Mol. Cell Biol., 2020, 21(8): 459~474.
- [18] Kong DM, Yang W, Wu J, et al. Analyst, 2010, 135(2): 321~326.
- [19] Zhang Y, Ren W, Luo H Q, et al. Biosens. Bioelectron., 2016, 80: 463~470.
- [20] Shao K, Wang B, Nie A, et al. Biosens. Bioelectron., 2018, 118: 160~166.
- [21] Bai S, Wang T, Zhang Z, et al. Sens. Actuat. B, 2017, 239: 447~454.
- [22] Li H, Chang J, Hou T, et al. Anal. Chem., 2017, 89(1): 673~680.
- [23] Li N, Li R, Sun X, et al. Microchim. Acta, 2020, 187
 (3): 158~167.
- [24] Li J, Wu H, Yan Y, et al. Nucl. Acids Res., 2021, 49 (22): 13031~13044.

- [25] Wu X, Chen Q, Huang Y, et al. Anal. Sci., 2022, 38 (4): 675~682.
- [26] Kępińska-Pacelik J, Biel W. Toxins, 2021, 13(11): 822 ~838.
- [27] Chen A, Mao X, Sun Q, et al. J. Agr. Food Chem., 2021, 69(28): 7817~7830.
- [28] Li Y, Wang J, Zhang B, et al. Microchim. Acta, 2019, 186 (4): 214~220.
- [29] Armstrong-Price D E, Deore P S, Manderville R A. J. Agr. Food Chem., 2020, 68(7): 2249~2255.
- [30] Deore P S, Gray M D, Chung A J, et al. J. Am. Chem. Soc., 2019, 141(36): 14288~14297.
- [31] Ding Q, Li C, Wang H, et al. Chem. Commun., 2021, 57
 (59): 7215~7231.
- $\left[\ 32 \ \right]$ $\$ Sivakumar R , Lee N Y. Chemosphere , 2021 , 275 : 130096.
- [33] Khoshbin Z, Housaindokht M, Izadyar M, et al. Anal. Chim. Acta, 2019, 1071: 70~77.
- $[\ 34\]$ $\$ Lu Z, Wang P, Xiong W, et al. Environ. Tech. , 2021, 42

(上接第289页)

- [23] Liger F, Cadarossanesaib F, Iecker T, et al. Eur. J. Org. Chem., 2019, 2019(41): 6968~6972.
- [24] Gao X, Yu B, Zhao Y, et al. RSC Adv., 2014, 4(100): 56957~56960.
- [25] Gao X, Yu B, Yang Z, et al. ACS Catal., 2015, 5(11): 6648~6652.
- [26] Rauch M, Strateer Z, Parkin G. J. Am. Chem. Soc., 2019, 141(44): 17754~17762.
- [27] Liu X F, Li X Y, Qiao C, et al. Angew. Chem. Int. Ed., 2017, 56(26): 7425~7429.

(19): 3065~3072.

- [35] Zhang J, Ma X, Chen W, et al. Anal. Chim. Acta, 2021, 1151: 338258.
- [36] Wu Y, Yue Y, Deng S, et al. J. Agr. Food Chem., 2020, 68(43): 12124~12131.
- [37] Sun Y, Duan N, Ma P, et al. J. Agr. Food Chem., 2019, 67(8): 2313~2320.
- [38] Xie S, Tang Y, Tang D. Anal. Methods, 2017, 9(37): 5478~5483.
- [39] Ma J, Bai W, Zheng J. Biosens. Bioelectron., 2022, 197: 113801.
- [40] He K, Sun L, Wang L, et al. J. Hazard. Mater., 2022, 423: 126962.
- [41] Li X, Tang X, Chen X, et al. Talanta, 2018, 188: 232 ~237.
- [42] Zhao Y, Zhang H, Wang Y, et al. Anal. Bioanal. Chem., 2021, 413(8): 2071~2079.
- [28] Beydoun K, Klankermayer J. Top. Organomet. Chem., 2018, 63: 39~76.
- [29] Zhang B, Du G X, Hang W, et al. Eur. J. Org. Chem., 2018, 2018(14): 1739~1743.
- [30] Li X, Zhang J H, Yang Y, et al. J. Organomet. Chem., 2021, 954-955: 122079.
- [31] Li X, Liu Z B, Hong H L, et al. RSC Adv., 2022, 12: 18107~18114.
- [32] Biswas H, Biswas S, Islam S, et al. New J. Chem., 2019, 43(36): 14643~14652.