

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240925006

生物传感器在食品质量安全检测中的应用 研究进展

窦国霞*

(如皋市综合检验检测中心, 南通 226500)

摘 要: 近年来食品质量安全问题频发, 如何有效保障食品质量安全已经成为目前公众最关心的热点问题之一。由于食品在生产加工过程中极易受生化污染物的污染, 因此, 针对食品中污染物的检测方法和技术的研究已成为当前保障食品质量安全的重要前提。目前, 传统的食品污染物检测方法由于操作复杂、仪器设备成本高等无法进行现场的实时监测。生物传感器作为一种新兴检测技术, 由于其操作简单、可重复性好、极易实现现场检测等优点, 已被广泛应用到食品质量安全检测领域。因此, 本文阐述了生物传感器的类型、概念与发展概况, 分析了生物传感器的工作原理, 比较了其与传统检测方法的优缺点, 并深入探讨了生物传感器在检测食品成分、品质、添加剂、微生物和病毒、农药和兽药残留以及生物毒性等方面的应用和研究进展, 最后基于当前的研究对未来的研究方向进行了展望, 以期生物传感器在食品质量安全检测领域的进一步研究和推广应用提供理论基础。

关键词: 食品安全; 污染物检测; 电化学; 生物传感器

Research progress on application of biosensors in food quality and safety detection

DOU Guo-Xia*

(Comprehensive Inspection and Testing Center of Rugao City, Nantong 226500, China)

ABSTRACT: With the frequent occurrence of food quality and safety problems in recent years, how to effectively safeguard food quality and safety has become one of the hot issues of greatest concern to the public at present. Since food is highly susceptible to biochemical contamination during production and processing. Therefore, the research on the detection methods and techniques of contaminants in food will become an important prerequisite to ensure the quality and safety of food. At present, the traditional detection methods are unable to carry out on-site and real-time monitoring due to the complexity of operation and the high cost of instruments and equipment. However, as an emerging detection technology, biosensors have been widely used food quality and safety inspection in the field due to their advantages of simple operation, good repeatability, and extreme ease of on-site detection. Here, this paper described the biosensor types, concepts, and development overview. Meanwhile, the device and working principle of biosensors were analyzed. this paper also compared the advantages and disadvantages of biosensors with traditional detection methods. On this basis, this paper delved into the applications and researched progress of biosensors in

*通信作者: 窦国霞, 工程师, 主要研究方向为粮食真菌毒素、食品添加剂以及农药兽药残留的检测。E-mail: 1649987363@qq.com

*Corresponding author: DOU Guo-Xia, Engineer, Comprehensive Inspection and Testing Center of Rugao City, No.16, Jiefang West Road, Rugao City, Nantong 226500, China. E-mail: 1649987363@qq.com

detecting food composition, quality, additives, microorganisms and viruses, pesticide and veterinary drug residues, and biological toxicity. Finally, this paper prospected the future research direction with a view to providing a theoretical basis for further research and popularization of biosensors of food quality and safety detection in the field.

KEY WORDS: food safety; contaminant detection; electrochemical; biosensors

0 引言

随着工业化的快速发展和人类生活水平的不断提高,食品安全已经成为全世界以及我国社会共同关注的热点问题。由于食品在种植、采摘、加工、运输和储存等过程极易受到环境干扰而被污染,这些被污染的食品在普通感官评价中难以被发现,一旦摄入体内,极易对人体健康产生巨大危害^[1]。因此,亟待开发一种高效、稳定以及可用于现场实时监测的快速食品安全检测技术。一般而言,传统的化学检测方法主要包括高效液相色谱法^[2]、气相色谱-质谱法^[3]以及毛细管电泳法等^[4]。然而,这些检测方法的设备价格昂贵、专业性强,难以实现对现场的实时监测^[5]。因此,传统常规的化学检测已无法满足快速判定的需求,这使得传统检测开始向简便、快捷、灵敏、准确和低成本的方向发展^[6]。近年来,生物传感器作为一种新兴的检测技术,因其简便、快捷、灵敏高等优点已逐渐成为食品安全快速检测领域中的主流方法^[7]。基于此,本文概述了生物传感器的概念及分类,详细阐述了生物传感器的装置、工作原理及优缺点,并深入探讨了生物传感器在食品安全检测领域中的研究及应用进展,以期生物传感器在食品安全检测领域的开发与推广利用提供理论基础。

1 生物传感器的概念、发展阶段和分类

生物传感器一般是指利用酶、免疫制剂、组织、细胞器或全细胞等生物识别元件的特异性生化反应,借助电、热、光等各种信号对生物物质进行快速检测的一类装置^[8]。换言之,生物传感器是一种对生物物质敏感并将其浓度转换为电信号进行检测的仪器^[9]。

早在 20 世纪 60 年代,CLARK 首次提出了生物传感器这一概念^[10],其认为生物传感器主要由生物感应元件和信号转换器两部分组成,生物感应元件主要包括酶、DNA、抗体以及生物体等。当体系中加入待测物质后,其与生物感应元件会发生反应进而产生各种类型的电信号,通过对这些电信号的分析判断以达到检测的目的。UPDIKE 等^[11]在 1967 年将酶固定在电极上制作了第一个可以测定葡萄糖含量的生物传感器。随着研究的不断深入和科技的快速发展,生物传感器的种类、检测灵敏度和响应速度等都得到了迅速发展,并且在各个行业都进行了广泛应用。截止目前,生物传感器发展大致分为 3 个阶段,其中第一代传

感器是通过检测代谢产物的浓度来实现对待测物质的检测,葡萄糖传感器即为典型的代表^[12]。随着科技的不断进步,第二代传感器采用了含有电子中介的化学修饰层(即将生物成分直接吸附或共价结合到转换器表面)^[13],不再间接测定反应产物的浓度,相比于第一代传感器准确度更高。而第三代传感器取消了电子中介体实现了酶和电子的直接电子传递(如生物芯片)^[14],这使得生物传感器的传导效率更好、受外界的干扰更少以及准确度更高。因此,随着生物传感器的不断更新迭代,其较高的灵敏度和准确性使其食品检测领域越来越受到重视。

生物传感器作为一种基于电化学的分析技术,其可根据输出信号、所用敏感物质以及信号转换器的差异分为不同的类型^[15]。例如,根据生物接受器构成材料可分为酶传感器、微生物传感器、免疫传感器、组织传感器、细胞传感器和 DNA 传感器等;依据不同的输出信号可分为生物亲和型传感器、生物催化型传感器以及生物代谢型传感器等;而根据不同的信号转换器可分为电化学生物传感器、介体生物传感器、测热型生物传感器、光学生物传感器、压电生物传感器、半导体生物传感器以及压电晶体生物传感器等^[16]。因此,类型多样的生物传感器可以满足各种环境及条件下的食品污染物快速检测。

2 生物传感器装置分析及工作原理和优缺点

如图 1 所示,生物传感器主要由生物敏感组件、换能器和测量系统构成^[17]。生物传感器的基本工作原理是待测物质经扩散作用进入固定的生物膜敏感层,经分子识别而发生生物学反应,产生的信号被相应的信号转换器处理为可定量的电信号,最后经二次仪表放大,以电极测定电流或电压值,最终换算出待测物质的浓度^[18]。以表面等离子体共振 SPR 传感器为例,表面等离子体对金属表面电介质的折射率非常敏感,不同电介质表明等离子体的共振角不同,因此,同种电介质附着在金属表面的含量存在差异,这会导致表面等离子体的响应强度不同。基于这一原理,通常将具有特异识别属性的配体固定在金属膜表面,监测溶液中被分析物质与配体的结合程度。当复合物形成或溶解时会导致金属表面的折射率发生变化,进而会被表面等离子体共振(surface plasmon resonance, SPR)传感器实时检测。因此,SPR 生物传感器对于抗原/抗体的特异性结合检测具有反应特异性强、灵敏度高和重复性好的优点,具有良好的应用前景。

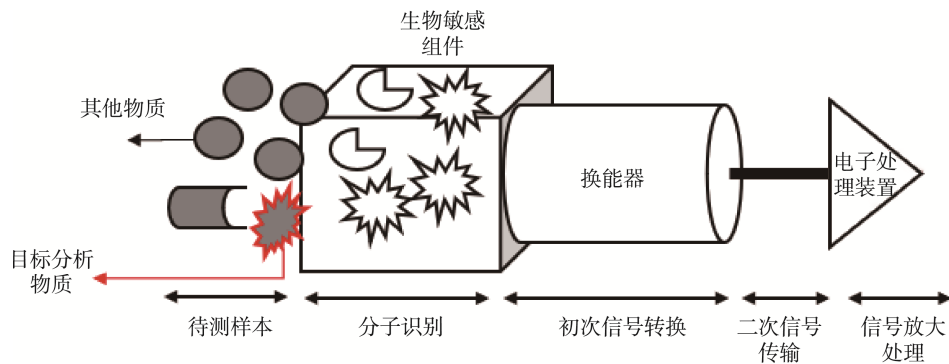


图1 生物传感器的组成与装置分析图
Fig.1 Composition of biosensor and device analysis diagram

此外，目前生物传感器的电信号检测方法可分为循环伏安法、差分脉冲伏安法、电流时间曲线法以及交流阻抗法等^[19]。其中循环伏安法是最常用的检测方法，其主要通过电极电势以不同的速率随时间以三角波的形式进行反复扫描，使电极交替发生氧化还原反应，最后根据峰电流强度进行定量分析^[20]。与传统化学检测方法相比，尽管其具有分离效能高、灵敏度高、应用范围广以及样品易回收等优点(表 1)，但传统检测方法设备成本高、操作难度大的共性缺点使其难以进行大范围推广应用(表 1)。相反，生物传感器因灵敏度高、检出限低、分析时间短和操作简便快捷等优点可适用于大范围的食品质量安全检测(表 1)，且能进行全产业链的食品安全实时监测^[21]。然而，其也具有稳定性差的缺点。

表 1 生物传感器与传统检测方法的优缺点
Table 1 Comparison of advantages and disadvantages between biosensors and traditional detection methods

检测方法	优缺点
高效液相色谱法	优点：分离效能高、灵敏度高、应用范围广、样品量少、易回收；缺点：设备成本高，操作要求高
气相色谱-质谱法	优点：可检测痕量样品(微升级别)；缺点：分析时间长、设备成本高
毛细管电泳法	优点：准确度高、应用范围广；缺点：分析时间长
酶抑制法	优点：能高效分离有机化合物；缺点：样品需要前处理
酶联免疫法	优点：灵敏度高、样品量少、易回收；缺点：设备成本高、操作难度大
生物传感器法	灵敏度高、检出限低、分析时间短、操作简便快捷；稳定性差

3 生物传感器在食品质量安全检测中的应用研究进展

3.1 食品成分的检测

生物传感器可实现对食品成分的快速检测，包括蛋

白质、氨基酸、糖类、有机酸、酚类、维生素、矿质元素和胆固醇等。研究表明，利用氨基酸氧化酶传感器可测定各种氨基酸，包括谷氨酸、L-天冬氨酸以及 L-赖氨酸等。例如冯东等^[22]通过赖氨酸生物传感器测定了 4 批玉米样品的赖氨酸含量为 0.326~0.349 g/100 g。此外，李俊华等^[23]使用戊二醛为交联剂固定葡萄糖氧化酶，并且以二茂铁为电子媒介体构建了检出限为 0.2 mmol/L 的新型葡萄糖传感器，其能有效排除抗坏血酸、尿酸等常见干扰物的影响并成功应用于饮料中葡萄糖含量的测定。另外，干宁等^[24]研制了基于二氧化钛(TiO₂)凝胶的 D 型和 L 型苹果酸脱氢酶安培电化学传感器，该传感器对苹果酸的检出限为 0.32 mmol/L。除上述外，生物传感器还能对维生素和多酚等食品成分进行快速检测，并且显示出良好的灵敏度。

3.2 食品品质的检测

过氧化氢(hydrogen peroxide, H₂O₂)也是造成食品安全隐患的重要因子。过氧化氢具有高效杀菌、易分解和残留量低的优点而被大量应用^[25]。然而，不合理或过渡的消毒剂使用会使过氧化氢在食品中残留并进入人体，从而生成大量的氧化物或过氧化物并对人体产生不可逆的危害^[26]。因此，对食品中过氧化氢的检测也是保障食品质量安全的重要前提。目前，针对过氧化氢的检测方法主要有滴定法、纸片法以及紫外分光光度计法^[27-30]，但均存在耗时长、灵敏度低、检测成本高的缺点。生物传感器因其较高的灵敏度也成为食品中过氧化氢检测的重要方法之一。例如先前的研究通过将过氧化物酶以物理吸附的方式与金属骨架纳米纤维结合，实现了对牛奶和鸡爪试样提取液中 H₂O₂ 的检测，测定 H₂O₂ 浓度范围 12.5~675 μmol/L，最低检出限为 0.97 μmol/L，该传感器对于 H₂O₂ 的测定效果显著，且灵敏度较高^[27]。然而，酶活性极易受到温度、酸碱度以及底物测试浓度的影响，基于酶构建的生物传感器在检测过程中对结果的重复性较差^[31]。丙烯酰胺是含淀粉类食品经高温焙烤、油炸时所产生一种对人体有害物质。AGNIESZK 等^[32]采用单壁碳纳米管/血红蛋白修饰玻碳电

极测定薯片中丙烯酰胺。结果表明,该方法灵敏度、精确度高,且不需复杂前处理,操作简单、仪器费用低。

3.3 食品添加剂的检测

食品添加剂的滥用和超标也是影响食品质量安全的重大隐患,例如 0.3~0.5 g 的亚硝酸盐可能会引起人体中毒甚至死亡。因此,亚硝酸盐在维持肉类新鲜颜色允许其作为发色剂时必须限量使用。LARSEN 等^[33]研制的微型生物传感器信号大小与硝酸盐和亚硝酸盐浓度成正比,响应时间低于 30 s,检出限为 50 $\mu\text{g/mL}$ 。CAMOANNELLA 等^[34]将氨气敏电极与天门冬酶通过聚合固定在渗析膜上,研发了一种直接测定甜味素的生物传感器,其测定的线性范围为 $3.8\times 10^{-3}\sim 2.6\times 10^{-2}$ mol/L,最低检出限为 2.6×10^{-3} mol/L。另外,还有研究使用菠菜叶或牛蒡植物叶与氧电极构成的植物组织电极,可用于食品中的儿茶酚的测定,其测定范围可高至 1500 mg/L。此外,STANISLAV 等^[35]将亚硫酸盐氧化酶固定在电极表面,测定红酒中的亚硫酸盐的含量。其中测定亚硫酸盐的线性范围是 0.01~0.10 mmol/L,最低检出限为 0.01 mmol/L。除此之外,生物传感器还可用于食品防腐剂(如对羟基苯甲酸酯、涕必灵等)、酸味剂(如磷酸、乳酸、乙酸)、鲜味剂(如 L-谷氨酸、肌苷酸)以及色素和乳化剂等方面的快速测定。

3.4 微生物和病毒的检测

食源性感染主要由细菌或病毒引起。因此,对食品中主要致病菌和病毒的检测显得十分必要。目前有关致病菌和病毒的检测主要还是依赖于传统的室内微生物培养,前处理复杂难操作,且检测周期受微生物培养周期的影响,导致检测耗时较长^[36]。因此,具有快速、灵敏和专一性高的生物传感器检测方法逐渐被重视。例如有研究利用双适配子的夹心免疫生物传感器检测水中的金黄色葡萄球菌,结果发现该生物传感器的检测范围为 0.1×10^6 CFU/mL,检出限为 1.0 CFU/mL,表现出了良好的灵敏度和特异性^[37]。同时,还有研究通过光纤倏逝波生物传感器测定食品中的大肠杆菌,其检测灵敏度可达到 50 CFU/mL,测定时间约为 30 min,特异性良好^[38]。此外,ADEGOKE 等^[39]通过将镉(Cd)、锌(Zn)、铈(Se)和硫(S)量子点包裹在二氧化硅(SiO_2)中制备一种分子信标生物传感器,对诺如病毒具有良好的检测效果。基于上述,生物传感器在食源性致病微生物和病毒的检测方面也表现出了良好的检测效果,具有良好的应用前景。尽管生物传感器对食源性致病菌和病毒的检测中解决了低效和低速的问题,但生物传感器对致病菌和病毒的检测主要通过对其抗体或代谢等产物的测定进而推断微生物含量,准确性相对较低,可重复性还有待进一步研究^[40]。同时,致病菌和病毒检测的生物传感器目前仍大量处于实验室试验阶段,大规模的应用相对较少,未来仍需进一步探究其可靠性和准确性,以进行大规模推广应用。

3.5 农药和兽药残留的检测

由于食品领域基质复杂、成品质量需实时监控,且食品中农药和兽药残留均属痕量分析,剂量常小,使得食品中农药和兽药残留的检测成为食品安全领域社会最关注的热点问题,因此,针对食品中农药和兽药残留的检测方法就需要具备选择性好、检出限低和灵敏度高的特点^[41],而生物传感器满足上述要求。食品农药残留检测方面研究表明,通过固定化的乙酰胆碱酯酶为生物识别元件,与底物碘化硫代乙酰胆碱发生特异性反应后,通过微流控芯片与化学发光仪作为检测元件,可被用来检测有机磷和氨基甲酸酯类农药以及有机磷类农药(例如辛硫磷、敌敌畏和乐果),其检测浓度范围达到微升级,并且相关系数均超过 0.99^[42]。此外,还有研究通过纳米四氧化三铁结合壳聚糖以及石墨烯纳米材料复合膜修饰的乙酰胆碱酯酶生物传感器用来测定植物源性食品中毒死蜱农药的浓度,结果表明在检测范围内该方法也呈现出显著的线性关系(相关系数超过 0.99)^[43]。

人体对抗生素的持久或过量使用会使细菌产生耐药性,这可能会导致超级耐药菌的出现,进而对公共健康卫生产生巨大威胁。因此,对动物源性药物的检测显得极为迫切。一般而言,动物源性药物的检测多采用液相色谱-质谱法及毛细管电泳串联质谱法等^[44],但这些方法前处理极为复杂,且设备成本高,操作难度大,难以用于实际的现场检测。而生物传感器因其较高的灵敏度、准确性和专一性已被广泛应用在食品中兽药残留方面的检测^[45]。食品中常见的动物源性药物如氨基糖苷类、磺胺类药物可以有效抑制革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌的感染,且还能将其作为促生长剂用于动物的养殖过程中,因此,这类药物成为了目前最常用的抗生素之一^[46-47]。例如有研究通过光流体的生物传感用于磺胺二甲基嘧啶(2-methanesulfonyl-4,6-dimethoxypyrimidine, SM2)的检测,该传感器的检出限可达到 0.05 $\mu\text{g/L}$,在 0.17~10.73 $\mu\text{g/L}$ 的范围内具有良好的检测线性效果^[48]。类似地,基于乳酸菌固定在电极上测定青霉素、链霉素以及四环素的结果表明,该生物传感器检测的瑞士乳杆菌的最适量为 0.05 g,对应的青霉素、链霉素和四环素的检出限最低,同时检测时间约为 4 min,明显优于国内外对抗生素残留量的检测要求^[49]。尽管目前生物传感器具有灵敏性、响应度高、操作简便、可应用于实际检验的优点,但生物传感器在农药残留和兽药残留检测方面仍存在一定的缺陷,例如每种农药和兽药都需要对应的催化配体,而对合适配体的选择则仍然存在挑战^[50],如何建立集便携、高灵敏度和特异性、可重复利用以及高稳定性的生物传感器亟待后续加强这方面的研究。

3.6 生物毒素的检测

生物毒素一般指来源于生物不可自主复制的有毒化

学物质^[51]。在食品生产、加工、运输和储存过程中生物毒素都会产生。因此,对食品中低浓度生物毒素的检测显得尤为重要。先前针对生物毒素的检测主要以传统的化学检测方法为主,例如高效液相色谱法、气相色谱法和质谱法等^[52]。然而,传统的化学检测尽管具有灵敏度高、重复性好和特异性强的优点,但其耗时长、操作性差的特点使其难以在食品生产、加工、运输以及储存的整个过程进行实时监测^[53]。因此,具有高选择性、高灵敏度和低成本的生物传感器成为目前食品中生物毒素的主要检测方法。研究表明,以磁性铁钴氧共聚物 $\text{Co Fe}_2\text{O}_4$ 纳米粒子为核,普鲁士蓝纳米粒子掺杂二氧化硅为壳层合成的多功能磁珠,其对红辣椒中黄曲霉素 B_1 (aflatoxin B_1 , AFB_1) 的检测效果良好。具体表现为检出限等于 6.0 pg/mL AFB_1 , 反应时间低于 3 s , 样品内和样品间的变异系数都小于 0.075 ^[54]。因此,该方法为生物毒素的检测提供了新途径。此外,还有研究将 AFB_1 抗体固定在纳米金颗粒 Au-NPs 修饰的丝网印刷碳工作电极上,用来检测牛奶和花生油中的黄曲霉素 B_1 , 结果发现该方法的检测浓度低于 100 ng/mL , 检出限为 0.2 ng/mL ^[55]。在此基础上,研究人员进一步改进,以荔枝为碳源,通过水热合成法建立了酶联免疫荧光测定花生中的 AFB_1 抗体,结果表明荧光强度与 AFB_1 抗体浓度在 $1.0 \text{ ng/kg} \sim 10.0 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 具有显著的线性关系,检出限为 0.69 ng/kg ^[56]。因此,生物传感器较高的灵敏度和较低的成本使其在生物毒素的检测方面表现出广阔的应用前景。值得注意的是,检测生物毒素的传感器极易受测试条件和样品前处理的影响,可能会产生假阴或假阳的结果^[57], 未来仍需进一步降低生物传感器的干扰因素,使其真正成为一种可靠的检测设备用于食品中生物毒素的检测。

4 结束语

本文阐述了生物传感器的概念、发展阶段及分类,分析了生物传感器的装置及工作原理并比较了其与传统检测方法的优缺点,最后深入探讨了生物传感器在食品安全领域检测中的研究和应用现状。结果表明,生物传感器相较于传统检测方法具有灵敏度高、检出限低、分析时间短和操作简便快捷的优点,在食品成分、品质、添加剂、微生物和病毒、农药和兽药残留以及生物毒素等方面的检测中被广泛应用,并且都表现出了高灵敏度、高特异性、分析时间短和可实时进行现场监测等优点。因此,生物传感器在未来食品安全领域中的检测中具有大面积推广应用的潜力。值得注意的是,尽管生物传感器在食品安全检测领域具有众多优势,但仍有一些问题未来需要进一步去探究。例如生物传感器对检测条件的要求比较高,极易受外界环境的影响从而对检测结果造成误差。因此,如何提高生物传感器的稳定性仍是未来研究的主要方向之一。此外,目

前的生物传感器表现出明显的专一性,未来能否实现一种生物传感器对多种污染物的集成检测仍需进一步探究。

参考文献

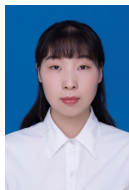
- [1] 朱将伟, 刘国艳, 史贤明. 生物传感器在食品安全检测中的应用[J]. 中国公共卫生, 2006, 22(7): 883–884.
ZHU JW, LIU GY, SHI XM. Application of biosensors in food safety detection [J]. China Public Health, 2006, 22(7): 883–884.
- [2] CACHO JI, CAMPILLO N, VINAS P, *et al.* *In situ*, ionic liquid dispersive liquid-liquid microextraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry for the determination of organophosphorus pesticides [J]. J Chromatogr A, 2018, 1559: 95–101.
- [3] NALLAR M, TENAGLIA N, MOROSE G, *et al.* Safer solvent blends for food, dye, and environmental analyses using reversed-phase high performance liquid chromatography [J]. Chromatographia, 2021, 84: 769–780.
- [4] 刘朋宇. 同位素稀释-气相色谱-三重四极杆质谱法测定食品中丙烯酰胺[J]. 现代食品, 2021(10): 164–166, 171.
LIU PY. Determination of acrylamide in food by isotope dilution gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. Mod Food, 2021(10): 164–166, 171.
- [5] 云雯, 陈世奇, 马丽, 等. 生物传感器在食品安全领域的研究进展[J]. 中国调味品, 2013, 38(9): 14–17.
YUN W, CHEN SQ, MA L, *et al.* Research progress of biosensors in food safety field [J]. China Flavor, 2013, 38(9): 14–17.
- [6] 张泽庆, 张清安. 浅谈食品安全快速检测[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(5): 141–143.
ZHANG ZQ, ZHANG QAN. Rapid food safety testing [J]. Food Res Dev, 2005, 26(5): 141–143.
- [7] LIU Z, TIAN B, FAN X, *et al.* A temperature sensor based on flexible substrate with ultra-high sensitivity for low temperature measurement [J]. Sens Actuat A-Phys, 2020, 315(9): 112341.
- [8] KARYAKIN AA, GITELMACHER OV, KARYAKINA EE. Prussian blue-based first-generation biosensor: A sensitive amperometric electrode for glucose [J]. Anal Chem, 1995, 67(14): 2419–2423.
- [9] KOOPAL CGJ, NOLTE RJM. Highly stable first-generation biosensor for glucose utilizing latex particles as the enzyme-immobilizing matrix [J]. Enzym Microb Technol, 1994, 16(5): 402–408.
- [10] 白冰, 赵玲, 王程程, 等. 生物传感器在检测食品品质及其质量安全中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3(5): 414–420.
BAI B, ZHAO L, WANG CC, *et al.* Application of biosensors in detecting food quality and its quality and safety [J]. J Food Saf Qual, 2012, 3(5): 414–420.
- [11] UPDIKE SJ, HICKS GP. The enzyme electrode [J]. Nature, 1971, 214(5092): 986–988.
- [12] 徐红斌, 叶青. 生物传感器研究进展及其在食品检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(17): 4587–4594.
XU HB, YE Q. Progress of biosensor research and its application in food detection [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(17): 4587–4594.
- [13] MAYORGA MCC, TREO EF, MADRID RE, *et al.* Real-time measurement of glucose using chrono-impedance technique on a second-generation biosensor [J]. Biosens Bioelectron, 2011, 29(1):

- 200–203.
- [14] RENTERIA-GUTIERREZ L, BELANCHE-MUÑOZ LA, GONZALEZ-NAVARRO FF, *et al.* Modeling a second-generation glucose oxidase biosensor with statistical machine learning methods [M]. *Biosensors: Recent Adv Mathemat Challenges*, 2014.
- [15] 范晓燕, 由璐, 葛祎楠, 等. 生物技术在食品检测中的应用进展[J]. 河北科技师范学院学报, 2018, 32(2): 6–11.
FAN XY, YOU L, GE YN, *et al.* Progress in the application of biotechnology in food testing [J]. *J Hebei Sci Technol Norm Coll*, 2018, 32(2): 6–11.
- [16] KOLOSOVA AY, PARK JH, EREMIN SA, *et al.* Fluorescence polarization immunoassay based on a monoclonal antibody for the detection of the organophosphorus pesticide parathion-methyl [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(5): 1107–1114.
- [17] PIRES ACS, SOARES NFF, SILVA LHM, *et al.* A colorimetric biosensor for the detection of foodborne bacteria [J]. *Sensors Actuators B*, 2011, 153(1): 17–23.
- [18] BANERJEE P, BHUNIA AK. Cell-based biosensor for rapid screening of pathogens and toxins [J]. *Biosen Bioelect*, 2010, 26(1): 99–106.
- [19] LIU J, WANG X, WANG T, *et al.* Functionalization of monolithic and porous three-dimensional graphene by one-step chitosan electrodeposition for enzymatic biosensor [J]. *Acs Appl Mater Interf*, 2014, 6(22): 19997–20002.
- [20] MISHRA RK, HAYAT A, CATANANTE G, *et al.* Sensitive quantitation of ochratoxin A in cocoa beans using differential pulse voltammetry based aptasensor [J]. *Food Chem*, 2016(192): 799–804.
- [21] DOMAILLE DW, QUE EL, CHANG CJ. Synthetic fluorescent sensors for studying the cell biology of metals [J]. *Nat Chem Biol*, 2008, 4(3): 168–175.
- [22] 冯东, 刘仲汇, 李大海, 等. 生物传感器法测定玉米中赖氨酸的研究[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(7): 153–155.
FENG D, LIU ZH, LI DH, *et al.* Determination of lysine in corn by biosensor [J]. *Food Ferment Ind*, 2008, 34(7): 153–155.
- [23] 李俊华, 邝代治, 冯泳兰, 等. 基于二氧化钛/碳纳米管/壳聚糖纳米复合薄膜制备葡萄糖生物传感器[J]. 无机化学学报, 2011, 27(11): 2172–2178.
LI JH, KUANG DZ, FENG YL, *et al.* Preparation of glucose biosensor based on titanium dioxide/carbon nanotube/chitosan nanocomposite film [J]. *J Inorganic Chem*, 2011, 27(11): 2172–2178.
- [24] 干宁, 葛从辛. 无试剂二氧化钛凝胶酶传感器检测苹果酸对映异构体研究[J]. 中国食品学报, 2006, 6(6): 105–110.
GAN N, GE CX. Determination of malic acid enantiomers by reagent-free titanium dioxide gel enzyme sensor [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2006, 6(6): 105–110.
- [25] 马广明, 刘骥, 姜鑫, 等. 辣木叶多糖对过氧化氢诱导奶牛乳腺上皮细胞氧化损伤的保护作用[J]. 动物营养学报, 2021, 33(1): 350–358.
MA GM, LIU J, JIANG X, *et al.* Protective effects of moringa leaf polysaccharide on oxidative damage of dairy cow mammary epithelial cells induced by hydrogen peroxide [J]. *J Anim Nutr*, 2021, 33(1): 350–358.
- [26] 窦博鑫, 辛嘉英, 王振兴, 等. 甲烷氧化菌素功能化金纳米层层自组装修饰电极上过氧化氢的催化还原[J]. 分子催化, 2017(6): 534–543.
DOU BX, XIN JY, WANG ZX, *et al.* Multilayer self-assembly modified electrode of methanobactin functionalized gold nanoparticle to catalytic reduction of hydrogen peroxide [J]. *J Mol Catal*, 2017(6): 534–543.
- [27] 程川川, 马保凯, 程永发, 等. 辣根过氧化氢酶-金属有机骨架纳米纤维复合物生物传感器的制备及其用于食品中过氧化氢残留检测的研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 199–204, 212.
CHENG CC, MA BK, CHENG YF, *et al.* Fabrication of horseradish peroxidase-metal organic nanofibers biosensor and its application in detection of hydrogen peroxide residues in food [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(24): 199–204, 212.
- [28] 王春燕, 任彩霞, 任向东, 等. 影响超高温灭菌乳货架期品质的相关蛋白酶类研究进展[J]. 现代食品, 2020(18): 40–47.
WANG CY, REN CX, REN XD, *et al.* Research progress of proteases related to shelf-life quality of UHT milk [J]. *Mod Food*, 2020(18): 40–47.
- [29] JIANG L, WANG H. Application of test paper method in food analysis and health care [J]. *World Sci Res J*, 2020, 6(4): 323–326.
- [30] LIU Z, TIAN B, FAN X, *et al.* A temperature sensor based on flexible substrate with ultra-high sensitivity for low temperature measurement [J]. *Sens Actuat A-Phys*, 2020, 315(9): 112341.
- [31] 薛也, 王艳, 赵宁, 等. 甲烷氧化菌素-纳米金修饰金电极溶出伏安法对 Cu^{2+} 的检测[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 328–332.
XUE Y, WANG Y, ZHAO N, *et al.* Determination of Cu^{2+} by stripping voltammetry with electrodes modified with methanobactin-functionalized gold nanoparticles [J]. *Food Sci*, 2021, 42(14): 328–332.
- [32] AGNIESZKA K, JERZY R, HANNA R. A voltammetric biosensor based on glassy carbon electrodes modified with single-walled carbon nanotubes/hemoglobin for detection of acrylamide in water extracts from potato crisps [J]. *Sensor Actuat B-Chem*, 2008(8): 5832–5844.
- [33] LARSEN L, HAUER D, LARS R, *et al.* Fast responding biosensor for on-line determination of nitrate/nitrite in activated sludge [J]. *Water Res*, 2000, 34(9): 2463–2468.
- [34] CAMOANNEILA L, ATURKI Z, SAMMARTION MP, *et al.* Aspartate analysis in formulations using a new enzyme sensor [J]. *J Pharmaceut Biomed*, 1995, 13(4/5): 439–447.
- [35] STANISLAV M, JAROSLAV K, ANDREA P, *et al.* Amperometric biosensors based on solid binding matrices applied on food quality monitoring [J]. *Biosens Bioelectron*, 1998, 13: 911–923.
- [36] ABBASPOUR A, NOROUZ-SARVESTA F, NOORI A, *et al.* Aptamer-conjugated silver nanoparticles for electrochemical dualaptamer-based sandwich detection of *Staphylococcus aureus* [J]. *Biosens Bioelectron*, 2015, 68: 149–155.
- [37] CHENG YX, LIU YJ, HUANG JJ, *et al.* Amperometric tyrosinase bio-sensor based on Fe_3O_4 nanoparticles-coated carbon nanotubes nano-composite for rapid detection of coliforms [J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54(9): 2588–2594.
- [38] 刘金华, 刘韬, 孟日增, 等. 利用光纤倏逝波生物传感器检测食品中大肠杆菌 O157:H7[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(4): 1142–1146.
LIU JH, LIU T, MENG RZ, *et al.* Detection of *Escherichia coli* O157:H7 in food using fiber optic swift wave biosensor [J]. *J Food Saf Qual*, 2014, 5(4): 1142–1146.
- [39] ADEGOKE O, SEO MW, KATO T, *et al.* An ultrasensitive SiO_2 -encapsulated alloyed Cd Zn Se S quantum dot-molecular beacon nanobiosensor for norovirus [J]. *Biosens Bioelectron*, 2016, 86(86): 135–142.

- [40] SUN Y, ZHAO J, LIANG L. Recent development of antibiotic detection in food and environment: The combination of sensors and nanomaterials [J]. *Microchim Acta*, 2021, 188(1): 1–22.
- [41] PUNDIR CS, MALIK AP. Bio-sensing of organophosphorus pesticides: A review [J]. *Biosens Bioelectron*, 2019, 140: 5–17.
- [42] 王晓朋, 曾梅, 万德慧, 等. 化学发光生物传感器法测定食品中有机磷与氨基甲酸酯类农药残留[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(12): 4163–4171.
- WANG XP, ZENG M, WAN DH, *et al.* Determination of organophosphorus and carbamate pesticide residues in food by chemiluminescent biosensor method [J]. *J Food Saf Qual*, 2014, 5(12): 4163–4171.
- [43] 王辉, 段玉瑶, 李笑, 等. 基于纳米四氧化三铁/壳聚糖/石墨烯纳米复合膜修饰的乙酰胆碱酯酶生物传感器检测毒死蜱农药[J]. *现代食品科技*, 2016(2): 276–282.
- WANG H, DUAN YY, LI X, *et al.* Detection of chlorpyrifos pesticide by acetylcholinesterase biosensor based on iron tetraoxide/chitosan/graphene nanocomposite membrane modification [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2016(2): 276–282.
- [44] HAO XJ, ZHOU XH, ZHANG Y, *et al.* Portable and reusable optofluidics-based biosensing platform for ultrasensitive detection of sulfadimidine in dairy products [J]. *Sensors*, 2015, 15(4): 8302–8313.
- [45] CHEN J, CHEN X, HUANG Q, *et al.* Amphiphilic polymer-mediated aggregation induced emission nanoparticles for highly sensitive organophosphorus pesticide biosensing [J]. *ACS Appl Mater Interf*, 2019, 11(36): 32689–32696.
- [46] 黄昭, 曹亚男, 李跑, 等. 表面等离子体共振传感器在食品安全检测中的应用[J]. *食品科学*, 2020, 41(13): 276–282.
- HUANG S, CAO YN, LI P, *et al.* Application of surface plasma resonance sensor in food safety inspection: A review [J]. *Food Sci*, 2020, 41(13): 276–282.
- [47] YE B, LI S, ZUO P, *et al.* Simultaneous detection of sulfamethazine, streptomycin, and tylosin in milk by microplate-array based SMM-FIA [J]. *Food Chem*, 2008, 106(2): 797–803.
- [48] LIU LH, ZHOU XH, XU WQ, *et al.* Highly sensitive detection of sulfadimidine in water and dairy products by means of an evanescent wave optical biosensor [J]. *Rsc Adv*, 2014, 4(104): 227–233.
- [49] 乔立新, 吴苏生, 庞广昌. 固定化乳酸菌制备生物传感器测定抗生素[J]. *食品科学*, 2015, 36(16): 261–265.
- QIAO LX, WU SS, PANG GC. Preparation of biosensors for the determination of antibiotics by immobilized lactic acid bacteria [J]. *Food Sci*, 2015, 36(16): 261–265.
- [50] HE LH, CUI B, LIU J, *et al.* Novel electrochemical biosensor based on core-shell nanostructured composite of hollow carbon spheres and polyaniline for sensitively detecting malathion [J]. *Sens Actuat B-Chem*, 2018, 17: 796–800.
- [51] ZHOU J, QI Q, WANG C, *et al.* Surface plasmon resonance (SPR) biosensors for food allergen detection in food matrices [J]. *Biosens Bioelectron*, 2019, 142: 111449.
- [52] RASOOLY L, RASOOLY A. Real time biosensor analysis of *Staphylococcal enterotoxin A* in food [J]. *Int J Food Microbiol*, 1999, 49(3): 119–127.
- [53] NEDELKOV D, RASOOLY A, NELSON RW. Multitoxin biosensor-mass spectrometry analysis: A new approach for rapid, real-time, sensitive analysis of staphylococcal toxins in food [J]. *Int J Food Microbiol*, 2000, 60(1): 1–13.
- [54] 张金玲, 杜祎, 李敬龙, 等. 生物传感器法检测奶粉中黄曲霉毒素 B₁ 含量[J]. *饮料工业*, 2017(6): 7–10.
- ZHANG JL, DU Y, LI JL, *et al.* Determination of aflatoxin B₁ in milk powder by biosensor method [J]. *Beverage Ind*, 2017(6): 7–10.
- [55] FERRACCI G, MARCONI S, MAZUET C, *et al.* A label-free biosensor assay for botulinum neurotoxin B in food and human serum [J]. *Anal Biochem*, 2011, 410(2): 281–288.
- [56] TANG D, LIN Y, ZHOU Q. Carbon dots prepared from *Litchi chinensis* and modified with manganese dioxide nanosheets for use in a competitive fluorometric immunoassay for aflatoxin B₁ [J]. *Microchim Acta*, 2018, 185: 476.
- [57] CARLSON MA, BARGERON CB, BENSON RC, *et al.* An automated, handheld biosensor for aflatoxin [J]. *Biosensors Bioelectron*, 2000, 14(10): 841–848.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)

作者简介



窦国霞, 工程师, 主要研究方向为粮食真菌毒素、食品添加剂以及农药兽药残留的检测。

E-mail: 1649987363@qq.com