

纳米传感器在食品和水质安全监测方面的应用及展望

张金玲¹, 李 凯¹, 孙 军¹, 房灵军², 高 彦¹

(1. 潍坊出入境检验检疫局, 山东 潍坊 261041; 2. 滨州六和隆达农牧有限公司, 山东 滨州 256600)

摘 要:近年来,食品和水质安全已成为社会经济生活中最重要的安全问题,同时也是最脆弱的体系。本论文综述了近年来纳米传感器科学在食品和水质安全检测方面的应用情况,分析其在中面临的挑战和问题,并对其应用前景作出展望。

关键词:纳米传感器;食品安全分析;水质安全分析

中图分类号: S-1

文献标志码: A

文章编号: 1005-4944(2013)05-0012-06

Application and Perspective of Nano-sensors in the Detection of Food and Water Safety

ZHANG Jin-ling¹, LI Kai¹, SUN Jun¹, FANG Ling-jun², GAO Yan¹

(1. Weifang Exit-entry Inspection and Quarantine Bureau, Weifang 261041, China; 2. Binzhou Liuhe Longda Farming Limited, Binzhou 256600, China)

Abstract: Recently, safety of food and water have become the greatest threats to our nation in socioeconomic life, while at the same time being the most vulnerable system. Here, the application and perspective of food and water safety analyzation nano-sensors (FWSs) were reviewed. The critical issues and challenges of FWSs, as well as future outlook, were also analyzed.

Keywords: Nano-sensor; food safety analysis; water safety analysis

近年来,食品和水质安全问题频出,已经成为人们关注的焦点问题,关系到广大人民群众的身体安全和生命健康,是急需解决的头等大事。而对食品和水质安全监测来说,如何获取第一手信息就显得非常重要。实时、动态监测体系能够更加快速进行危害评估,对食品和水质等各环节中化学污染物、食源性致病菌以及食源性疾病可更好地实施布控和预防,及时发现安全隐患,因此,打造这样一个监测系统是十分必要的。然而,目前还没有一个真正意义上的全过程监测系统问世。最近几年已经有大量关于食品和水质监测的传感器被开发出来,这些仪器和系统都是各种交叉学科融合的结晶,其中以融合纳米科技的传感器尤为突出。

1 纳米传感器的优缺点

采用纳米技术开发新的食品和水质安全监测传

感器是目前的一个研究趋势,这是因为纳米尺度的监测体系具有以下优点:(1)与传统材料相比,纳米材料具有更高的面积/体积比,即在其表面进行监测功能化修饰的效率更高^[1-5];(2)因具有 1~100 nm 的体积使其展现更高的灵敏度^[6-8];(3)具有独特的光电性能^[9];(4)纳米材料的高弹性常数使其具有更快的反应速度;(5)对于同它们体积相似的物体可以进行高度密集的小范围检测。通常用于生物传感器上的纳米材料有纳米颗粒(如金、硅、磁复合材料、聚合物)^[10]、纳米线(如金、聚合物、复合材料)、纳米多孔表面材料^[11]、碳材料(大部分是纳米管),或者量子点等物质^[10]。然而,虽然这些纳米材料具有许多明显的优点,但仍面临着一些挑战。例如,纳米材料的高灵敏度来自于其纳米尺寸的体积,然而因其体积过小(纳米级别),在与被检测物相互作用时互相吸引碰撞的几率也大大减小。因此,在利用纳米材料优点的同时还需要增加测量次数和时间以弥补其不足,尤其是在使用纳米传感器进行“痕量检测”(10⁻⁶ 或 10⁻⁹)时,样品需经过预浓缩,否则检测时间的延长可能会导致更强的背景噪音。遗憾的

收稿日期: 2013-05-16

作者简介: 张金玲(1973—),女,山东潍坊人,硕士研究生,兽医师,主要从事食品检验研究。E-mail: zhj17302@163.com

是,关于针对纳米传感器测试的预浓缩技术报道并不多见,据我们所知,仅有数篇文献报道^[11-12]。另外,还有一些纳米传感器,如碳纳米管类传感器,因其纳米材料是靠范德华力作用制备的^[13],测试温度变化也可能会对检测结果产生一定影响。

将纳米材料与导电聚合物复合在一起制备传感器是目前研究的一个热点,这是因为该体系更易进行功能化修饰,引入生物识别元素,进行电讯号的直接传导及增强其生物的相容性^[8]。例如,导电聚合物纳米颗粒^[4]和纳米线^[7]可进行分子印迹功能化应用,噬菌体功能化应用(对沙门氏菌^[14]和大肠杆菌^[1]检测),以及抗体功能化应用(对病毒^[15]和细菌^[2]免疫检测)等。然而,该传感器却难以适应复杂环境,这是由于:(1)大多难溶于有机溶剂中;(2)机械性能差,且弹簧系数低;(3)电阻率高;(4)驱动电压高;(5)对环境条件,如湿度、离子、酸碱度、二氧化碳含量等的变化敏感。

微/纳米流体技术或数字微/纳米流体技术为检测

微体积样品提供了可能,也为制备芯片实验室绘制了美好的蓝图,基于芯片实验室的检测平台具有全自动化多组分检测、高灵敏度、低成本以及易操作的特点^[16-17],尤其是在对生物病原菌和寄生虫进行检测时可以显著地减少样品用量,因此也就减少了人力对这些病原菌或寄生虫进行辛苦的培育^[18]。在这些优点的驱使下,近几年基于微/纳米流体系统的食品、水质传感器不断涌现出来^[19-27]。然而这些设备使用起来相当困难,其中严重限制其应用的问题是生物淤积以及如何有效地实现宏观外部系统和芯片系统的衔接^[28]。

2 纳米传感器在食品和水质检测方面的应用

目前开发出的食品、水质传感器已被用于检测多种潜在危害,如图 1 所示。例如,在美国,弯曲杆菌、沙门氏菌、李斯特菌以及大肠杆菌等被认为是食品中的首要致病菌^[29],针对这些细菌的传感器研究已经有很多。在世界范围内,通过水介质传播疾病的病原菌有

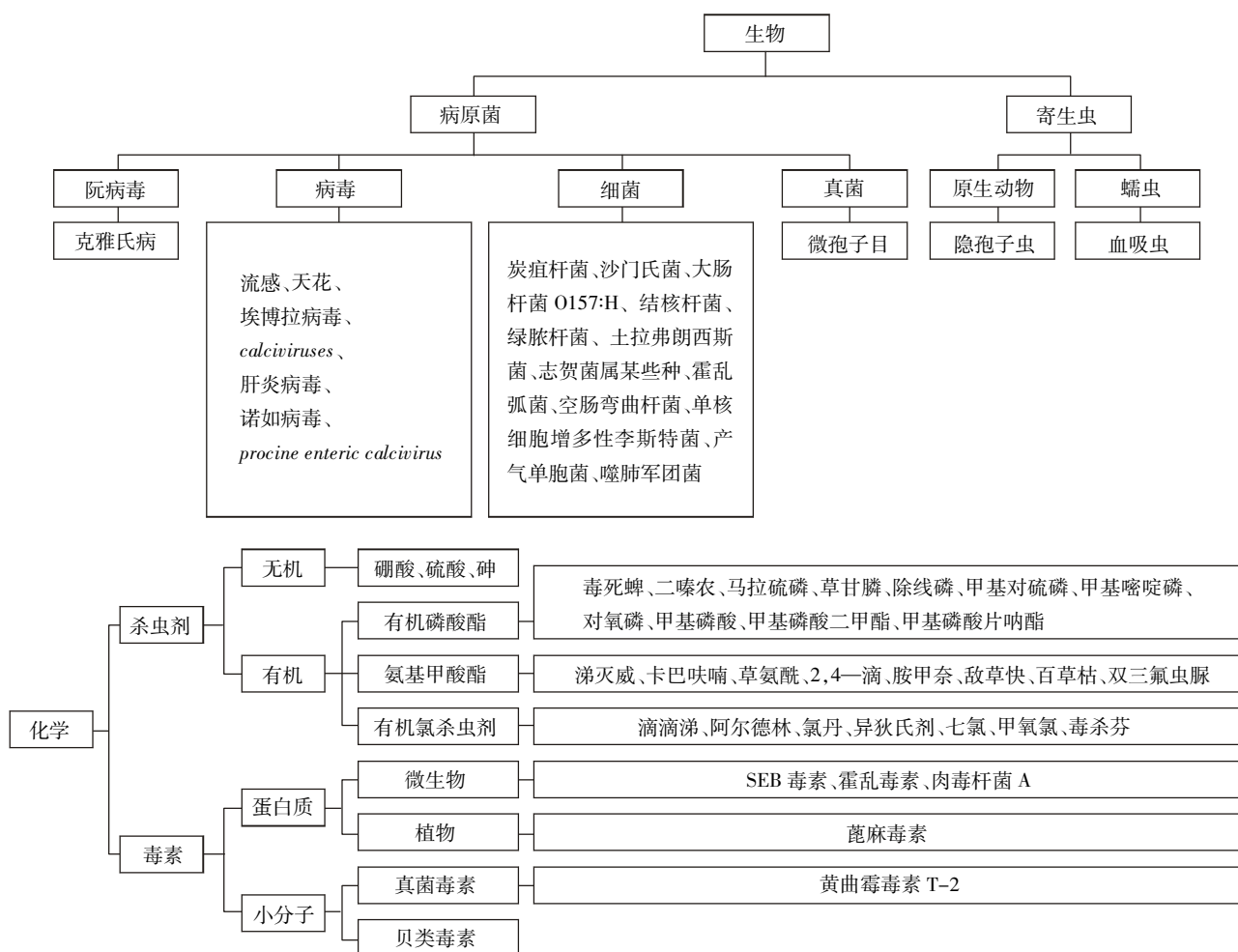


图 1 目前开发出可用于食品、水质检测的传感器

霍乱弧菌 O139、肠出血性大肠杆菌 O157:H、抗氯隐孢子虫或抗药性绿脓杆菌等^[30],在人口增长、迁移以及社会经济动荡时期时有爆发。与此同时,毒素传感器也要相应地进行深入研究^[31-32],虽然食品杀菌方法可以消除很多蛋白毒素,但是有一些热稳定的毒素如真菌毒素和贝类毒素等即使在煮熟的食品中仍然存在。近年来,关于蓖麻毒素可被用作生化武器对人类造成危害的争论一直存在^[33],因此,对新型蓖麻毒素传感器的开发也屡见报道^[34-37]。另外,对食物或水源中的农药污染检测也是重中之重^[38-39],因为这些污染在环境中会持续地产生毒性^[40]。因此,针对污染物的多样性,食品和水质传感器的开发既要做到具有针对性,又要能够对食物源头和环境等进行监测,同时所开发的传感器更要易于操作。

敏感的配体是制备食品、水质传感器的必须物之一。目前大部分的配体都是生物配体和化学配体,例如生物催化剂(“锁-钥”模式)^[24,41]和受/配体吸附^[2-3,5,9,18,23,27]技术是较常用的研究技术,它们可对分子进行高选择性识别。此外,细胞中通过生化途径产生的细胞响应也可作为检测病原菌和毒素的工具,Banerjee 等^[42]对此进行了较详细研究。采用噬菌体的展示技术对细菌进行检测的方法也有很多报道^[1,43]。最近,采用融合适体^[44-45]和分子印迹^[4,7]等技术的非生物仿生学食品、水质传感器也成为研究热点。然而,一些基于待测物物理特性的配体还很少有人开发,这恰恰是未来研究的重点。制备传感器的一般步骤是将含有配体的材料均匀覆盖到传导装置表面,进而使这些装置对某些特定的生物或化学物质产生信号。物理型传感器一般是采用通过对样品特性进行直接检测的方式,若特征明显,则检测结果可作为鉴别被测物的方法。该方法是对一般使用的化学方法,如酶转化、受-配体结合、适体或分子印迹的纳米材料等的进一步补充,一般来说远程检测手段都属于这个范畴。

通过自组装方法制备稳定和耐用的功能化识别薄膜也是目前研究的热点,但是还存在许多挑战,因此大家将兴趣转为研究材料内部如待测物独特的光谱或者热指纹特性等的响应。Wig 等^[46]通过光热辐射和热处理过程制备出了非功能化识别的微悬梁臂,并对炭疽杆菌进行靶向检测。类似的实例还有采用微换热器对化学武器进行检测^[47],以及采用微量热传感器来检测热源或者爆炸源等^[48-49]。然而迄今为止,这些方法在食品或水质检验方面的应用实例并不多见。

理想的传感器应基于材料对识别元素最原始的

响应,经过扩大和过滤,然后产生最低可检测到的信号(检测限)。目前检测器敏感性和识别准确性之间的不匹配可能导致检测过程异常灵敏(艾克^[50]和仄克^[51]级的检测限),但识别系统却无法识别,例如,表面声波(SAW)、石英晶体微天平(QCM)、微悬梁臂、表面等离子共振(SPR),以及其他一些高灵敏度传感器需要配备相应的化学和物理识别系统,因此,未来的研究方向之一是要向着消除传感器和识别器之间的不匹配来进行。最近一些研究结果表明,虽然高灵敏度的检测器和稳定灵敏的识别元素都可获得,但是它们之间的通讯问题还需进行深入研究^[52]。表1列举了一些对电化学、电磁学、热力学以及纳米力学性能等环境变量敏感的材料研制而成的食品或水质纳米传感器。

3 食品和水质传感器开发过程中面临的挑战

开发食品或水质传感器的最终目标是建立区域化的动态监测系统,这些监测系统可以分布在农田中、食品加工厂以及消费场所等。但在现实世界中建立这样的系统却是困难重重。例如,食品和饮料的成分复杂,其中所包含的蛋白质、脂肪、碳水化合物、添加剂以及在生产制造或消费过程中产生的污染都需要考虑进去,另外食品或水中的化学或生物污染物也不均匀。譬如小剂量的有害菌(10~10 000个)就会对人体产生相当大的伤害,但相同量的益生菌株则不会产生危害,而且这2种类型的细菌经常是同时存在的^[44]。农田、工厂或运输集装箱等多变的环境因素也可能干扰到传感器检测的稳定性,因为这些地点的温度、压力、机械性能、化学因素以及电磁因素的变化情况很难掌握。即使是使用热稳定的传感器,因食品状态如可能是固体或液体等不同,也要求传感器能够适应一定的范围。而不同的是,在实验室环境下,食物或水质样品大多会进行前处理,以便使之适应传感器的检测。

虽然传感器普遍具有很高的灵敏度,但对待测物的选择性则很差。通常情况下传感器对环境因素的改变会产生不同程度的响应,或者在相同刺激下识别元素将响应传导给传感器。样品—传感器之间的传导一定要同环境因素区别开来,这样就可最大限度地减少“假阳性”,在增加结果可信度的同时也使定量更为准确。例如,在温度变化下一些特性,如导电性、弹性、膨胀系数、阻尼、表面张力、电介质功能、能带隙、噪音等发生变化的传感器和/或识别元素必须不能影响到对温度敏感的食品或水样。即使是在相同温度下,pH

表 1 可应用于食品、水质传感器的潜在的传导方法和传导平台

传导方法	传导机理	实例
电化学	检测两电极之间的电化学反应,如: 1.电容 2.电流或电压 3.电势 4. 阻抗 5. 电导率 6. 电化学反应 7. 热变化	微/纳米流体系统 微电极 MEMS 电极(微悬臂梁) 相互交叉传感器电极 无碳纳米线电极 碳纳米管和纳米纤维电极 场效应晶体管 表面声波装置 晶体微量天平
机电传导	表面张力变化或质量增减所导致的机械变化: 1.静态模式-弯曲度 2.动态模式-弯曲度、共振频率变化	音叉 微悬臂梁 导电聚合物丝-聚苯胺、聚吡咯 碳纳米管和碳纳米纤维
光传导	光传导检测: 1.光散射 2. 荧光特性 3. 化学发光 4. 比色法 5. 消光波 6. 光-热活性	纤维-光学系统 光波导 干涉法 细胞微流体 傅立叶变换红外光谱学 荧光共振能量转移 表面等离子共振(SPR)和 SPR 光谱学 表面增强拉曼光谱(SERS) 微分光学外差

值、亲水/亲油性的改变以及机械性能的改变也会对传感器产生影响^[14],因此,理想的传感器需要只对识别元素产生响应而不会被环境所影响。这对于开发可移动检测装置来说就是较大的挑战。

随着检测手段不断增多,检测条件也开始变得更加宽松,食品或水质传感器装置可以在现实环境中直接应用于样品检测,例如直接对西红柿^[53]、牛奶^[54]、牛肉^[55]以及菠菜^[56]等检测。Horgan 等^[57]认为虽然新的检测方法在选择性、灵敏度和检测限方面都有明显提高,但是对于检测器的评估还需考虑一些组织和机构如临床实验室标准化协会等的意见。食品或水质传感器也要经由受试者工作特征(ROC)分析来评估,这与采用 ROC 评估免疫生物传感器在医学中的应用类似^[58]。一个理想的食品、水质传感器应该具有良好的 ROC 曲线,并且适用于任何场地或环境。

4 展望

未来的研究应将传感器平台和识别元素更加紧密地结合起来,更加注重传统分析方法和纳米化非

传统方法的结合。为了适应食品和水质检测中污染物种类繁多的情况,未来开发的传感器应融合光学、机械学以及化学模型为一体,更大程度地扩展其检测范围,同时新型物理型(非受体)检测器也应大力开发。在食品或水质传感器方面的研究成果对于食品科学、粮食安全、农业生产率以及质量方面^[58]都会有着极大的促进作用,而且这些研究对于实现食品工业的纳米化,制备纳米食品方面也有着良好的推动作用^[59]。另外,在纳米科技领域的任何突破性发现都可能用于食品、水质传感器开发,这些发现或多或少的能给打破传感器使用中的某种局限提供方法。

模仿人类嗅觉的“电子鼻”也是目前研究的热点之一^[55]。通过分子识别(锁-钥分子配对或电子量子轨道程序^[60])来进行检测的“电子鼻”可以将可食用的和不可食用的食材分开,用于防止食物早期腐害。在未来的个人消费领域,它可以组装到一些常见的装置上,例如冰箱温度感应器、婴儿用品或者手机上来辨别食材的新鲜程度。

5 结论

目前食品和水质传感器的发展仍面临着多方面挑战。虽然在实验室里其选择性和灵敏度已经取得了很大进展,但是仍很少有将其置于现实环境中进行检测的报道。在未来的研究中,不仅应加强对传感器的基础研究,尤其是将传感器的灵敏度和识别元素对于待测物的识别效率匹配起来,同时减少环境因素对于传感系统的影响,而且更重要的是开发出适用于各种环境的检测终端。

参考文献:

- [1] Arter J A, Taggart D K, McIntire T M, et al. Virus-PEDOT nanowires for biosensing[J]. *Nano Letters*, 2010,10:4858-4862.
- [2] García-Aljaro C, Bangar M A, Baldrich E, et al. Conducting polymer nanowire-based chemiresistive biosensor for the detection of bacterial spores[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 25:2309-2312.
- [3] Luo Y, Nartker S, Miller H, et al. Surface functionalization of electrospun nanofibers for detecting E. coli O157:H7 and BVDV cells in a direct-charge transfer biosensor[J]. *Biosensors & bioelectronics*, 2010,26:1612-1617.
- [4] Morelli I, Chiono V, Vozzi G, et al. Molecularly imprinted submicron-spheres for applications in a novel model biosensor-film[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010,150:394-401.
- [5] 刘蓉,薛文通,张惠,等.浅析生物传感器在食品分析中的应用[J]. *食品工业科技*, 2009,30:318-321.
- [6] Alvarez M, Lechuga L M. Microcantilever-based platforms as biosensing tools[J]. *Analyst*, 2010, 135:827-836.
- [7] Berti F, Todros S, Lakshmi D, et al. Quasi-monodimensional polyaniline nanostructures for enhanced molecularly imprinted polymer-based sensing[J]. *Biosensors & bioelectronics*, 2010,26:497-503.
- [8] Hangarter C M, Bangar M, Mulchandani A, et al. Conducting polymer nanowires for chemiresistive and FET-based bio/chemical sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010,20:3131-3140.
- [9] Chang Y -F, Wang S -F, Huang J C, et al. Detection of swine-origin influenza A (H1N1) viruses using a localized surface plasmon coupled fluorescence fiber-optic biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 26:1068-1073.
- [10] Kaittanis C, Santra S, Perez J M. Emerging nanotechnology-based strategies for the identification of microbial pathogenesis[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2010, 62:408-423.
- [11] Farahi R H, Passian A, Ferrell T L, et al. Microfluidic manipulation via Marangoni forces[J]. *Applied Physics Letters*, 2004,85:4237-4239.
- [12] Li D, Li D-W, Fossey J S, et al. Portable surface-enhanced raman scattering sensor for rapid detection of aniline and phenol derivatives by on-site electrostatic preconcentration[J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82:9299-9305.
- [13] Tetard L, Passian A, Farahi R H, et al. Spectroscopy and atomic force microscopy of biomass[J]. *Ultramicroscopy*, 2010,110:701-707.
- [14] Dadarwal R, Namvar A, Thomas D F, et al. Organic conducting polymer electrode based sensors for detection of Salmonella infecting bacteriophages[J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2009,29:761-765.
- [15] Shirale D J, Bangar M A, Park M, et al. Label-free chemiresistive immunosensors for viruses[J]. *Environ Sci Technol*, 2010,44(23):9030-9035.
- [16] Yager P, Edwards T, Fu E, et al. Microfluidic diagnostic technologies for global public health[J]. *Nature*, 2006,442:412-418.
- [17] Mark D, Haeberle S, Roth G, et al. Microfluidic lab-on-a-chip platforms: requirements, characteristics and applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2010,39:1153-1182.
- [18] Mairhofer J, Roppert K, Ertl P. Microfluidic systems for pathogen sensing: a review[J]. *Sensors*, 2009(9):4804-4823.
- [19] Ricciardi C, Canavese G, Castagna R, et al. Integration of microfluidic and cantilever technology for biosensing application in liquid environment[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2010,26:1565-1570.
- [20] Piliarik M, Parova L, Homola J. High-throughput SPR sensor for food safety[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2009,24:1399-1404.
- [21] Peng Z, Soper S A, Pingle M R, et al. Ligase detection reaction generation of reverse molecular beacons for near real-time analysis of bacterial pathogens using single-pair fluorescence resonance energy transfer and a cyclic olefin copolymer microfluidic chip[J]. *Analytical Chemistry*, 2010,82:9727-9735.
- [22] Narakathu B B, Atashbar M Z, Bejcek B E. Improved detection limits of toxic biochemical species based on impedance measurements in electrochemical biosensors[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2010,26:923-928.
- [23] Mujika M, Arana S, Castano E, et al. Magnetoresistive immunosensor for the detection of Escherichia coli O157:H7 including a microfluidic network[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2009,24:1253-1258.
- [24] Heinze B C, Gamboa J R, Kim K, et al. Microfluidic immunosensor with integrated liquid core waveguides for sensitive Mie scattering detection of avian influenza antigens in a real biological matrix[J]. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2010,398:2693-2700.
- [25] Dykstra P, Hao J, Koev S T, et al. An optical MEMS sensor utilizing a chitosan film for catechol detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009,138:64-70.
- [26] Do J, Ahn C H. A polymer lab-on-a-chip for magnetic immunoassay with on-chip sampling and detection capabilities[J]. *Lab on a chip*, 2008(8):542-549.
- [27] Cretich M, Sedini V, Damin F, et al. Functionalization of poly(dimethylsiloxane) by chemisorption of copolymers; DNA microarrays for pathogen detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008,132:258-264.
- [28] Freimund D L, Aflatooni K, Batelaan H. Observation of the Kapitza-Dirac effect[J]. *Nature*, 2001,413:142-143.
- [29] Chemburu S, Wilkins E, Abdel-Hamid I. Detection of pathogenic bacteria in food samples using highly-dispersed carbon particles[J].

- Biosensors and Bioelectronics*, 2005, 21: 491–499.
- [30] Sharma S, Sachdeva P, Viridi J S. Emerging water-borne pathogens[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 61: 424–428.
- [31] Zhu S, Du C, Fu Y. Localized surface plasmon resonance-based hybrid Au Ag nanoparticles for detection of Staphylococcus aureus enterotoxin B[J]. *Optical Materials*, 2009, 31: 1608–1613.
- [32] Tetard L, Passian A, Farahi R H, et al. Optomechanical spectroscopy with broadband interferometric and quantum cascade laser sources[J]. *Opt Lett*, 2011, 36: 3251–3253.
- [33] Schep L J, Temple W A, Butt G A, et al. Ricin as a weapon of mass terror—Separating fact from fiction[J]. *Environment International*, 2009, 35: 1267–1271.
- [34] Zhuang J, Cheng T, Gao L, et al. Silica coating magnetic nanoparticle-based silver enhancement immunoassay for rapid electrical detection of ricin toxin[J]. *Toxicon*, 2010, 55: 145–152.
- [35] Suresh S, Gupta A K, Rao V K, et al. Amperometric immunosensor for ricin by using on graphite and carbon nanotube paste electrodes[J]. *Talanta*, 2010, 81: 703–708.
- [36] Melchior W B Jr, Tolleson W H. A functional quantitative polymerase chain reaction assay for ricin, Shiga toxin, and related ribosome-inactivating proteins[J]. *Analytical Biochemistry*, 2010, 396: 204–211.
- [37] Bevilacqua V L, Nilles J M, Rice J S, et al. Ricin activity assay by direct analysis in real time mass spectrometry detection of adenine release[J]. *Anal Chem*, 2010, 82: 798–800.
- [38] Du D, Huang X, Cai J, et al. An amperometric acetylthiocholine sensor based on immobilization of acetylcholinesterase on a multiwall carbon nanotube-cross-linked chitosan composite[J]. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2007, 387: 1059–1065.
- [39] 干宁, 王峰, 杨欣, 等. 采用纳米修饰双酶电极生物传感器检测有机磷与氨基甲酸酯类农药[J]. *农药学报*, 2008(10): 329–334.
- [40] Jiang X, Li D, Xu X, et al. Immunosensors for detection of pesticide residues[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2008, 23: 1577–1587.
- [41] Mandal P K, Choi A K B K, Pal U K. Methods for rapid detection of foodborne pathogens: An overview[J]. *American Journal of Food Technology*, 2011(6): 87–102.
- [42] Banerjee P, Bhunia A K. Mammalian cell-based biosensors for pathogens and toxins[J]. *Trends Biotechnol*, 2009, 27: 179–188.
- [43] Mao C, Liu A, Cao B. Virus-Based Chemical and Biological Sensing[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2009, 48: 6790–6810.
- [44] Tombelli S, Minunni M, Mascini M. Analytical applications of aptamers[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2005, 20: 2424–2434.
- [45] Ding S, Gao C, Gu L-Q. Capturing Single molecules of immunoglobulin and ricin with an aptamer-encoded glass nanopore[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81: 6649–6655.
- [46] Wig A, Arakawa E T, Passian A, et al. Photothermal spectroscopy of *Bacillus anthracis* and *Bacillus cereus* with microcantilevers[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, 114: 206–211.
- [47] Taylor C J C R E, V E W, Ellzy M W, et al. Chemical warfare agent detection using MEMS-compatible microsensor arrays[J]. *Sensors Journal*, 2005, IEEE5: 712–725.
- [48] Senesac L R, Yi D, Greve A, et al. Micro-differential thermal analysis detection of adsorbed explosive molecules using microfabricated bridges[J]. *The Review of scientific instruments*, 2009, 80(3): 035102.
- [49] Greve A, Olsen J, Privorotskaya N, et al. Micro-calorimetric sensor for vapor phase explosive detection with optimized heat profile[J]. *Micro-electronic Engineering*, 2010, 87: 696–698.
- [50] Tetard L, Passian A, Eslami S, et al. Virtual resonance and frequency difference generation by van der Waals interaction[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(18): 180801.
- [51] Tetard L, Passian A, Farahi R H, et al. Atomic force microscopy of silica nanoparticles and carbon nanohorns in macrophages and red blood cells[J]. *Ultramicroscopy*, 2010, 110: 586–591.
- [52] Kim S, Yi D, Passian A, et al. Observation of an anomalous mass effect in microcantilever-based biosensing caused by adsorbed DNA[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(15): 153703.
- [53] Concina I, Falasconi M, Gobbi E, et al. Early detection of microbial contamination in processed tomatoes by electronic nose[J]. *Food Control*, 2009, 20: 873–880.
- [54] Suarez G, Jin Y H, Auerswald J, et al. Lab-on-a-chip for multiplexed biosensing of residual antibiotics in milk[J]. *Lab on a chip*, 2009(9): 1625–1630.
- [55] Arshney M, Li Y, Srinivasan B, et al. A label-free, microfluidics and interdigitated array V microelectrode-based impedance biosensor in combination with nanoparticles immunoseparation for detection of Escherichia coli O157:H7 in food samples[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 128: 99–107.
- [56] Leach K M, Stroot J M, Lim D V. Same-day detection of Escherichia coli O157:H7 from spinach by using electrochemiluminescent and cytometric bead array biosensors[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76: 8044–8052.
- [57] Horgan A M, Moore J D, Noble J E, et al. Polymer- and colloid-mediated bioassays, sensors and diagnostics[J]. *Trends in Biotechnology*, 2010, 28: 485–494.
- [58] Lee W S, Alchanatis V, Yang C, et al. Sensing technologies for precision specialty crop production[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74(1): 2–33.
- [59] Chun A L. Will the public swallow nanofood[J]. *Nature Nanotechnology*, 2009(4): 790–791.
- [60] 刘宁晶, 史波林, 赵镭, 等. 电子鼻检测技术研究进展[J]. *食品科技*, 2012, 37(10): 248–252.