

- [3] 周少君, 顿中军, 梁骏华, 等. 基于半定量风险评估的食品风险分级方法研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(5): 576-585.
- [4] EFSA. Scientific opinion on the development of a risk ranking framework on biological hazards[J]. The EFSA Journal, 2012, 10(6): 2724-2812.
- [5] REIST M, JEMMI T, STÄRK K D C. Policy-driven development of cost-effective, risk-based surveillance strategies [J]. Prev Vet Med, 2012, 105(3): 176-184.
- [6] BAPTISTA F M, ALBAN L, OLSEN A M, et al. Evaluation of the antibacterial residue surveillance programme in Danish pigs using Bayesian methods[J]. Prev Vet Med, 2012, 106(3/4): 308-314.
- [7] ANDERSON M, JAYKUS L, BEAULIEU S, et al. Pathogen-produce pair attribution risk ranking tool to prioritize fresh produce commodity and pathogen combinations for further evaluation (P³ARRT) [J]. Food Control, 2011, 22 (12): 1865-1872.
- [8] FISCHHOFF B, MORGAN G. The science and practice of risk ranking[J]. Horizons, 2009, 10(3): 40-47.
- [9] Australian/New Zealand Standard. AS/NZS 4360 Risk management [S]. Australia Standards Australia International Ltd, 2004.
- [10] The U. S. Food and Drug Administration. Risk ranking tool user's guide [EB/OL]. (2009-04-17) [2017-01-30]. http://foodrisk.org/default/assets/File/RRT_Users_Guide.pdf.
- [11] VRC. Annual report on surveillance for veterinary residues in food in the UK 2010 [R]. UK Veterinary Residues Committee, 2010.
- [12] VAN ASSELT E D, VAN DER SPIEGEL M, NOORDAM M Y, et al. Risk ranking of chemical hazards in food—a case study on antibiotics in the Netherlands[J]. Food Res Int, 2013, 54(2): 1636-1642.
- [13] STORNETTA A, ENGELI B E, ZARN J A, et al. Development of a risk management tool for prioritizing chemical hazard-food pairs and demonstration for selected mycotoxins [J]. Regul Toxicol Pharm, 2015, 72(2): 257-265.
- [14] 周萍萍, 刘兆平, 张磊, 等. 化学物健康风险分级模型研究及其初步应用[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(2): 185-189.
- [15] LENARTOWICZ P, MICHIE N. Risk-based sampling of food. Risk assessment for sampling, Vol 1. [EB/OL]. (2002-07-01) [2017-01-30]. <http://www.testinginabox.co.uk/Documents/risk%20sampling.pdf>.
- [16] MAUDOUX J P, SAEGERMAN C, RETTIGNER C, et al. Food safety surveillance through a risk based control programme: approach employed by the Belgian Federal Agency for the safety of the food chain [J]. Vet Q, 2006, 28(4): 140-154.
- [17] WEBSTER K, JARDINE C, CASH S B, et al. Risk ranking: investigating expert and public differences in evaluating food safety hazards [J]. J Food Pro, 2010, 73(10): 1875-1885.
- [18] 纪丽君, 姚卫蓉, 钱和, 等. 食源性致病菌风险排名方法[J]. 中国微生态学杂志, 2010, 22(4): 377-381.
- [19] BATZ M B, HOFFMANN S A, KRUPNICK A J, et al. Identifying the most significant microbiological foodborne hazards to public health: a new risk ranking model [J]. General Information, 2004, 33(4): 26-30.
- [20] ROSS T, SUMNER J. A simple, spreadsheet-based, food safety risk assessment tool [J]. Int J Food Microbiol, 2002, 77 (1/2): 39-53.

综述

表面等离子共振技术在真菌毒素检测中的应用研究进展

赵芳¹, 黄雪玲², 葛丽雅¹, 吕敬章¹, 黄欣迪¹, 何庆华²

(1. 深圳出入境检验检疫局食品检验检疫技术中心, 广东 深圳 518045;

2. 深圳大学化学与环境工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 真菌毒素污染的食品严重影响人类的健康, 对真菌毒素的监测与防控是构建食品安全保障体系的重要一环。表面等离子共振(surface plasmon resonance, SPR)生物传感器以快速、免标记、高通量、高灵敏等优点, 已广泛应用于药物筛选、食品检测、环境监测、临床诊断等领域。本文就 SPR 生物传感器在食品中真菌毒素快速筛查方面的应用研究进行了综述。

关键词: 真菌毒素; 表面等离子共振; 食品安全; 检测; 综述

中图分类号: R155 **文献标识码:** R **文章编号:** 1004-8456(2017)03-0378-05

DOI: 10. 13590/j. cjfh. 2017. 03. 025

收稿日期: 2017-03-19

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2015IK251)

作者简介: 赵芳 女 高级工程师 研究方向为食品安全检测 E-mail: 5021665571@163.com

通信作者: 何庆华 男 副教授 研究方向为系统生物学与食品安全 E-mail: qinghua.he@szu.edu.cn

Progress of surface plasmon resonance technology application in the detection of mycotoxins

ZHAO Fang¹, HUANG Xue-ling², GE Li-ya¹, LYU Jing-zhang¹, HUANG Xin-Di¹, HE Qing-Hua²

(1. Food Inspection and Quarantine Center, Shenzhen Entry-Exit Inspection and Quarantine

Bureau, Guangdong Shenzhen 518045, China; 2. School of Chemistry and Environmental Engineering, Shenzhen University, Guangdong Shenzhen 518060, China)

Abstract: Mycotoxin contamination in crops and food seriously affects human health, monitoring and prevention of mycotoxin is an important part of food safety assurance system. With the superiorities of rapidness, lable-free, high throughput and sensibility, surface plasmon resonance (SPR) has been widely used in drug screening, food testing, environment monitoring, clinical diagnosis and other fields. In this paper, the application of SPR biosensor in rapid screening of mycotoxins in food was reviewed.

Key words: Mycotoxin; surface plasmon resonance; food safety; test; review

真菌毒素是产毒真菌在适宜的环境条件下产生的有毒代谢产物,是农产品的主要污染物之一,一般都具有较强的毒性。由于真菌毒素的稳定性很好,一般的产品加工过程不能破坏其结构,误食真菌毒素会导致人和动物出现急、慢性中毒现象,所以真菌毒素是食品和饲料中重要的检测内容。

目前,食品中常用的真菌毒素的检测方法有气相色谱-质谱(GC-MS)法、高效液相色谱(HPLC)法、液相色谱-质谱(LC-MS)法、酶联免疫吸附(ELISA)法等^[1],但是这些检测技术在检测时间、检测精度、设备成本、可操作性等方面存在一定的局限性^[2]。食品中真菌毒素常见检测方法比较见表1。

表1 食品中真菌毒素常见检测方法比较
Table 1 Comparison of common detection methods of mycotoxins in food

检测方法	优点	缺点
GC-MS	灵敏度和准确性高,可高通量检测	不适宜使用在沸点高、热稳定性差、相对分子质量大的分析物,操作复杂
LC-MS	高选择性和高灵敏度,便于同时检测单一样品中多种分析物	设备昂贵,且需要经过专业培训的操作人员,检测步骤较为繁琐,不利于在基层单位的推广使用
HPLC	灵敏度高、特异性强、分辨率高、重复性好	设备昂贵,样品前处理过程复杂、检测周期长、对操作人员的技能要求高
ELISA	灵敏、快速、前处理简单、成本低,对样品的纯度要求不高,适用于大批量样品的检测	检测准确度不高,实际操作过程中需要多次洗涤,重复性较差

近年来逐渐有更加高效灵敏、适合快速筛查的检测方法被研究应用,如红外光谱分析、荧光偏振免洗分析、生物传感器等。其中,表面等离子共振(surface plasmon resonance,SPR)生物传感器检测法(以下简称 SPR 生物传感器法)因具备操作便捷、灵敏度高、前处理简单、样品用量少、无需标记、可实时监测等明显优势^[3],被广泛应用于食品安全^[4-7]、环境监测^[8-9]、临床诊断^[10-12]、药物研发^[13-14]、分子工程^[15-17]等领域。本文就 SPR 生物传感器在真菌毒素快速检测方面的应用进展进行了综述。

1 SPR 生物传感器的工作原理

SPR 是一种物理光学现象,当电磁波沿着金属和电介质界面传播时,会形成表面等离子体^[18]。一束偏振光以一定角度入射,当这个角度为偏振角,即发生全反射时,入射光被耦合进表面等离子体,光能被大量吸收,反射的光明显减少,在界面上以一种与界

面平行的波延伸外出,这束波称为消失波。当消失波的频率和金属表面振荡的自由电子频率一致时,光线耦合进金膜,产生电子共振,这一现象称为 SPR^[19]。SPR 生物传感器是利用 SPR 现象和 SPR 谱峰对金属表面上电介质变化敏感的特点,通过将受体固定在金属膜上,当流经金属表面的溶液中含有配体时,检测其与液相配体的特异性结合,并转化为电信号^[20]。

由于真菌毒素一般为小分子物质,直接结合在传感芯片表面时,SPR 生物传感器不能灵敏地检测到明显的信号变化,因此利用 SPR 生物传感器对真菌毒素进行检测时一般采用间接竞争法^[21-22]。利用真菌毒素抗原抗体特异性结合的特征,将小分子抗原通过共价偶联方式结合在传感芯片上,注入已知浓度的抗体与抗原发生特异结合,通过 SPR 生物传感器检测抗原抗体结合情况;芯片再生后,再注入抗体与目标分析物的混合液,抗原与分析物竞争过量抗体,此时结合信号与分析物浓度成反比,进

而计算二者差量可得分析物浓度,实现对小分子的定量检测^[23]。

2 SPR生物传感器在真菌毒素检测中的研究进展

2.1 传统的真菌毒素 SPR 生物传感器法研究

1983年,LIEDBERG等^[24]首次将SPR技术应用于化学和生物传感器研究领域,经过几十年的发展,SPR生物传感器法已广泛应用在食品、环境、药物、生命科学等领域。研究者对食品中真菌毒素的SPR检测,首先从研究单个真菌毒素的SPR生物传感器法开始,检测技术也在不断成熟。1998年,MULLETT等^[25]建立了样品中伏马菌素B₁(fumonisin B₁,FB₁)的SPR生物传感器法,检测限为50 ng/ml,整个检测过程只需要10 min。2003年,TÜDÖS等^[26]使用SPR生物传感器法检测食物、动物饲料和谷物中的脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON),检测限为2.5 ng/ml,通过6 mol/L的盐酸胍溶液再生传感芯片,传感芯片可重复使用500次。2010年,MENEELY等^[27]建立了小麦、小麦制品和玉米为基础的婴儿食品中DON的SPR生物传感器法,该方法的检测限为57、9和6 µg/kg,加标回收范围在92%~115%,且整个检测过程只需要9 min。2015年,ZHU等^[28]使用SPR生物传感器法检测葡萄酒和花生油中的赭曲霉毒素A(ochratoxin A, OTA),该方法的检测限为0.005 ng/ml,远低于最大残留限量(2.0 ng/ml),其线性检测范围为0.094~100 ng/ml,加标回收率在86.9%~116.5%之间,显示研究方法具有高灵敏度,而且重现性和稳定性良好。

SPR生物传感器法在单个真菌毒素的检测应用方面已经相当成熟,基本呈现高灵敏度的特征,因此,近年来人们把研究重心转移到多重真菌毒素的同步检测上。2003年,GAAG等^[29]建立了能同时检测玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)、DON、FB₁和黄曲霉毒素B₁(aflatoxin B₁, AFB₁)的SPR生物传感器法,ZEN、DON、FB₁和AFB₁的检测限分别达到了0.01、0.5、50和0.2 ng/g,整个检测过程在25 min内完成。2010年,KADOTA等^[30]建立同时检测小麦中的雪腐镰刀菌烯醇(nivalenol, NIV)和DON的SPR生物传感器法,NIV和DON的检测限分别为0.1和0.05 mg/kg。而使用免疫亲和柱分离NIV和DON,单独测定NIV和DON的检测限分别为0.2和0.1 mg/kg,说明SPR生物传感器法具有更高的灵敏度及高通量优势。2011年,DOROKHIN等^[31]建立了同时检测DON和ZEN的SPR生物传感器法。该方法检测小麦样品中DON和ZEN的检测限分别

为68和40 µg/kg,玉米样品中DON和ZEN的检测限分别为84和64 µg/kg,检测限均低于欧盟规定的真菌毒素限量值(DON限量值为1 750 µg/kg,ZEN限量值为100 µg/kg),检测结果与LC-MS测定结果一致。2012年,MENEELY等^[32-34]建立了3种单端孢霉属真菌毒素的SPR生物传感器法。对小麦、谷物早餐和玉米为基础的婴儿食品进行DON和A类单端孢霉烯族毒素主要代谢物(HT-2)的检测,DON的检测限分别为12、1和29 µg/kg,HT-2毒素的检测限分别为31、47和36 µg/kg。该方法基于SPR生物传感器建立了多种真菌毒素的检测方法,其稳定性和准确性都较高。2016年,JOSHI等^[35]建立了啤酒中的DON和OTA的SPR生物传感器法,DON和OTA检测限分别为17和7 ng/ml。同年,JOSHI等^[36]开发了大麦中6种真菌毒素的SPR生物传感器法。大麦中DON、ZEN、A类单端孢霉烯族毒素(T-2)、OTA、FB₁和AFB₁的检测限分别为26、6、0.6、3、2、1 µg/kg,DON、ZEN、T-2和FB₁的检测限在欧盟规定的最大限量之下。

2.2 SPR生物传感器法与其他技术的联合应用研究

传统SPR生物传感器法与其他技术的结合,可以有效改善SPR生物传感器法的重复性、分辨率和灵敏度等性能参数,因此,SPR生物传感器法与其他技术的联合应用一直是研究的热点。

2.2.1 SPR生物传感器-分子印迹联用技术

传统的SPR传感芯片是在金属有效层表面覆盖生物活性材料作为识别敏感元件,但长期保存和反复使用会对生物活性造成损失,而且生产成本低;因此,寻找开发稳定的替代生物材料成为了研究热点^[37]。

分子印迹技术是以某一特定的分子为模板,制备对该分子具有特异选择性聚合物的过程。分子印迹聚合物(molecular imprinted polymers, MIP)在空间结构上与模板分子吻合,具有类抗体性质,对模板分子的识别具有专一性,而且稳定性好,耐酸碱和有机溶剂,不易被降解破坏,具有成本低、可多次重复利用、易于保存等优点^[38]。将分子印迹技术和SPR生物传感器法联用,在传统的传感芯片上聚合形成MIP膜,制备出稳定的传感芯片,对SPR传感芯片进行改良。而这一技术早在1998年就得到应用。LAI等^[39]成功制备了茶碱、黄嘌呤和咖啡因分子印迹膜SPR传感芯片,其对识别物质的结构类似物无交叉反应。茶碱在水溶液中的检测限为0.4 mg/ml。表明SPR生物传感器-MIP联用技术具有可行性,满足于被测物质的特异性结合。这是

SPR 生物传感器-MIP 联用技术的首次应用,此后, SPR 生物传感器-MIP 联用技术随着技术发展有了更稳定的应用。2004 年,YU 等^[40]首次证明了掺氯聚吡咯膜对 OTA 具有特异结合能力。在 1 mmol/L NaCl 水溶液中以 0.76 V 电离吡咯,在金膜上形成 2~5 nm 的 MIP 膜,并在 0.1~10 $\mu\text{g/ml}$ 的 OTA 溶液浓度范围内与结合速率成线性相关。2009 年,CHOI 等^[41]通过电聚合方法将吡咯聚合在 SPR 芯片表面,制备 ZEN 的 MIP 膜。该 SPR 生物传感器-MIP 联用技术检测 ZEN 的线性检测范围为 0.3~3 000 ng/g,检测限为 0.3 ng/g,加标回收率为 89%,具有良好的应用前景。2011 年,GUPTA 等^[42]通过电聚合方式,将 3-氨基苯硼酸与 T-2 的原位聚合,形成 MIP 膜。该传感器对 T-2 毒素的检测限为 0.05 $\mu\text{g/ml}$ 。

2.2.2 SPR 信号放大技术

使用 SPR 生物传感器对样品进行检测时,如果待测物质含量较低,会导致检测信号较弱^[43],因此,研究者通过引进新材料来增强检测信号。

2009 年,YUAN 等^[44]利用 SPR 生物传感器法进行 OTA 检测,通过金纳米颗粒对检测方法进行改良,将检测限从 1.5 ng/ml 降低至 0.042 ng/ml,建立的检测方法具有很好的稳定性,循环再生 600 次对传感器活性没有太大的影响。2011 年,URUSOV 等^[45]开发了 OTA 的 SPR 生物传感器法,检测限达到 0.4 ng/ml。使用胶体金颗粒对检测系统进行优化,结果显示检测信号放大超过 10 倍,检测限达到 0.06 ng/ml。2014 年,HU 等^[46]制备了金纳米颗粒改良芯片,用于 AFB₁、OTA、ZEN 3 种真菌毒素的多重检测,检测限分别为 8、30 和 15 $\mu\text{g/ml}$ 。

3 展望

综上所述,SPR 生物传感器在真菌毒素检测上已经有了成熟的应用。未来的发展趋势主要有两个重点:①建立多重真菌毒素的检测方法;②通过联用其他技术,来提高 SPR 生物传感器的灵敏度和稳定性。基于 SPR 生物传感器的应用优势,在真菌毒素检测领域具有很好的发展前景。

参考文献

[1] HODNIK V, ANDERLUH G. Toxin detection by surface plasmon resonance[J]. *Sensors*, 2009, 9(3): 1339-1354.
[2] 徐华, 顾大勇. 基于 SPR 技术的生物传感器研究进展[J]. *国际检验医学杂志*, 2013, 34(15): 1993-1995.
[3] LI Y, LIU X, LIN Z. Recent developments and applications of surface plasmon resonance biosensors for the detection of mycotoxins in foodstuffs[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(3): 1549-1554.

[4] PETZ M. Recent applications of surface plasmon resonance biosensors for analyzing residues and contaminants in food[J]. *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*, 2009, 140(8): 953-964.
[5] DUNNE L, DALY S, BAXTER A, et al. Surface plasmon resonance-based immunoassay for the detection of aflatoxin B₁ using single[J]. *Spectroscopy Letters an International Journal for Rapid Communication*, 2007, 38(3): 229-245.
[6] CHOI G H, LEE D H, MIN W K, et al. Cloning, expression, and characterization of single-chain variable fragment antibody against mycotoxin deoxynivalenol in recombinant *Escherichia coli* [J]. *Protein Expression and Purification*, 2004, 35(1): 84-92.
[7] LOTIERZO M, HENRY O Y F, PILETSKY S, et al. Surface plasmon resonance sensor for domoic acid based on grafted imprinted polymer[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2004, 20(2): 145-152.
[8] MAURIZ E, CALLE A, LECHUGA L M, et al. Real-time detection of chlorpyrifos at part per trillion levels in ground, surface and drinking water samples by a portable surface plasmon resonance immunosensor[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 561(1/2): 40-47.
[9] LIM T, OYAMA M, IKEBUKURO K, et al. Detection of atrazine based on the SPR determination of P450 mRNA levels in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Analytical Chemistry*, 2000, 72(13): 2856-2860.
[10] VAISOCHEROV Á H, FACA V M, TAYLOR A D, et al. Comparative study of SPR and ELISA methods based on analysis of CD166/ALCAM levels in cancer and control human sera[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, 24(7): 2143-2148.
[11] LADD J, TAYLOR A D, PILIARIK M, et al. Label-free detection of cancer biomarker candidates using surface plasmon resonance imaging[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, 393(4): 1157-1163.
[12] HAES A J, CHANG L, KLEIN W L, et al. Detection of a biomarker for Alzheimer's disease from synthetic and clinical samples using a nanoscale optical biosensor[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(7): 2264-2271.
[13] ANDERSSON H O, KERSTIN F, SEVED L, et al. Optimization of P1-P3 groups in symmetric and asymmetric HIV-1 protease inhibitors[J]. *European Journal of Biochemistry*, 2003, 270(8): 1746-1758.
[14] DAS A, ZHAO J, SCHATZ G C, et al. Screening of type I and II drug binding to human cytochrome P450-3A4 in nanodiscs by localized surface plasmon resonance spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(10): 3754-3759.
[15] RAZAVI M, POPE M E, SOSTE M V, et al. MALDI immunoscreening (MiSCREEN): a method for selection of anti-peptide monoclonal antibodies for use in immunoproteomics[J]. *Journal of Immunological Methods*, 2011, 364(1/2): 50-64.
[16] DIJK D V, ERTAYLAN G, BOUCHER C A, et al. Identifying potential survival strategies of HIV-1 through virus-host protein interaction networks[J]. *BMC Systems Biology*, 2010, 4(1): 1-17.
[17] HEARTY S, CONROY P J, AYYAR B V, et al. Surface plasmon resonance for vaccine design and efficacy studies: recent applications and future trends[J]. *Expert Review of Vaccines*, 2014, 9(6): 645-664.

[18] YEH W H, KLEINGARTNER J, HILLIER A C. Wavelength tunable surface plasmon resonance-enhanced optical transmission through a chirped diffraction grating[J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82(12): 4988-4993.

[19] 刘星, 黄庆. 表面等离子共振生物传感器的研究进展及发展趋势[J]. *国际检验医学杂志*, 2011, 32(3): 341-343.

[20] WU L, CHU H S, KOH W S, et al. Highly sensitive graphene biosensors based on surface plasmon resonance[J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14395-14400.

[21] 高志贤, 柳明. 基于表面等离子体共振传感技术检测小分子物质的研究进展[J]. *国际生物医学工程杂志*, 2010, 33(1): 1-6.

[22] SHANKARAN D R, GOBI K V, MIURA N. Recent advancements in surface plasmon resonance immunosensors for detection of small molecules of biomedical, food and environmental interest[J]. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2007, 121(1): 158-177.

[23] 徐霞, 叶尊忠, 吴坚, 等. 表面等离子体共振免疫传感器在蛋白质检测中的应用及其研究进展[J]. *分析化学*, 2010, 38(7): 1052-1059.

[24] LIEBERG B, NYLANDER C, LUNDSTROM I. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing[J]. *Sensors and Actuators*, 1983, 4(83): 299-304.

[25] MULLETT W, LAI E P, YEUNG J M. Immunomimetics by a surface plasmon resonance biosensor[J]. *Analytical Biochemistry*, 1998, 258(2): 161-167.

[26] TUDÖS A J, ER L D B, STIGTER E C. Rapid surface plasmon resonance-based inhibition assay of deoxynivalenol[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(20): 5843-5848.

[27] MENEELY J, FODEY T, ARMSTRONG L, et al. Rapid surface plasmon resonance immunoassay for the determination of deoxynivalenol in wheat, wheat products, and maize-based baby food[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(16): 8936-8941.

[28] ZHU Z L, FENG M X, ZUO L M, et al. An aptamer based surface plasmon resonance biosensor for the detection of ochratoxin A in wine and peanut oil[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 65(10): 320-326.

[29] GAAG B V D, SPATH S, DIETRICH H, et al. Biosensors and multiple mycotoxin analysis[J]. *Food Control*, 2003, 14(4): 251-254.

[30] KADOTA T, TAKEZAWA Y, HIRANO S, et al. Rapid detection of nivalenol and deoxynivalenol in wheat using surface plasmon resonance immunoassay[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 673(2): 173-178.

[31] DOROKHIN D, HAASNOOT W, FRANSSEN M C, et al. Imaging surface plasmon resonance for multiplex microassay sensing of mycotoxins[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, 400(9): 3005-3011.

[32] MENEELY J P, QUINN J G, FLOOD E M, et al. Simultaneous screening for T-2/HT-2 and deoxynivalenol in cereals using a surface plasmon resonance immunoassay[J]. *World Mycotoxin Journal*, 2012, 5(2): 117-126.

[33] MENEELY J P, RICCI F, EGMOND H P V, et al. Current methods of analysis for the determination of trichothecene mycotoxins in food[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2011, 30(2): 192-203.

[34] MENEELY J P, SULYOK M, BAUMGARTNER S, et al. A rapid optical immunoassay for the screening of T-2 and HT-2 toxin in cereals and maize-based baby food[J]. *Talanta*, 2010, 81(1/2): 630-636.

[35] JOSHI S, ANNIDA R M, HAN Z, et al. Analysis of mycotoxins in beer using a portable nanostructured imaging surface plasmon resonance biosensor[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(43): 8263-8271.

[36] JOSHI S, SEGARRA-FAS A, PETERS J, et al. Multiplex surface plasmon resonance biosensing and its transferability towards imaging nanoplasmonics for detection of mycotoxins in barley[J]. *Analyst*, 2016, 141(4): 1307-1318.

[37] 姚婷, 李腾飞, 秦玉昌, 等. 分子印迹表面等离子共振传感器在食品安全检测中的最新研究进展[J]. *分析测试学报*, 2015, 34(2): 237-244.

[38] 何皓, 张涛, 姚佳, 等. 多孔分子印迹膜修饰的表面等离子体共振微囊藻毒素 LR 检测传感器[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 723-728.

[39] LAI E P, FAFARA A, VANDERNOOT V A, et al. Surface plasmon resonance sensors using molecularly imprinted polymers[J]. *Canadian Journal of Chemistry*, 1998, 76(3): 265-273.

[40] YU J C C, LAI E P C. Polypyrrole film on miniaturized surface plasmon resonance sensor for ochratoxin A detection[J]. *Synthetic Metals*, 2004, 143(3): 253-258.

[41] CHOI S W, CHANG H J, LEE N, et al. A surface plasmon resonance sensor for the detection of deoxynivalenol using a molecularly imprinted polymer[J]. *Sensors*, 2011, 11(9): 8654-8664.

[42] GUPTA G, BHASKAR A S, TRIPATHI B K, et al. Supersensitive detection of T-2 toxin by the in situ synthesized π -conjugated molecularly imprinted nanopatterns. An in situ investigation by surface plasmon resonance combined with electrochemistry[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2011, 26(5): 2534-2540.

[43] 张娟, 彭媛, 吕小毅, 等. 表面等离子体共振传感技术及其在临床检验中的应用[J]. *国际生物医学工程杂志*, 2016, 39(2): 65-73.

[44] YUAN J, DENG D, LAUREN D R, et al. Surface plasmon resonance biosensor for the detection of ochratoxin A in cereals and beverages[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 656(1/2): 63-71.

[45] URUSOV A E, KOSTENKO S N, SVESHNIKOV P G, et al. Ochratoxin A immunoassay with surface plasmon resonance registration: lowering limit of detection by the use of colloidal gold immunoconjugates[J]. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2011, 156(1): 343-349.

[46] HU W H, CHEN H M, ZHANG H H, et al. Sensitive detection of multiple mycotoxins by SPRi with gold nanoparticles as signal amplification tags[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, 431(6): 71-76.