

# 上转换荧光技术在食品安全检测中的应用

贾国超<sup>1,2</sup>, 职爱民<sup>1</sup>, 宋春美<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 李梦琴<sup>2</sup>, 张改平<sup>1\*</sup>

(1. 河南省农业科学院农业部动物免疫学重点实验室, 河南省动物免疫学重点实验室, 郑州 450002;  
2. 河南农业大学食品科学技术学院, 郑州 450002)

**摘要:** 上转换荧光技术是基于上转换磷光体的新型检测技术, 因其独特优越性, 成为标记检测技术中新的研究热点。本文综述了上转换荧光技术的研究机制、国内外实际应用和发展状况等。发现该技术在大肠杆菌、布鲁氏菌、链球菌等食品安全检测中应用效果极佳, 但当前技术仍有一定缺陷, 亟需通过改进合成工艺、表面修饰等方法完善, 进一步推进其在食品安全检测领域的应用。

**关键词:** 上转换荧光技术; 上转换磷光体; 食品安全应用

## Up-converting phosphor technology and its application in the field of food safety detection

JIA Guo-Chao<sup>1,2</sup>, ZHI Ai-Min<sup>1</sup>, SONG Chun-Mei<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, LI Meng-Qin<sup>2</sup>, ZHANG Gai-Ping<sup>1,\*</sup>

(1. Key Laboratory of Animal Immunology of the Ministry of Agriculture, Henan Provincial Key Laboratory of Animal Immunology, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China;  
2. Institute of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**ABSTRACT:** The up-converting phosphor technology (UPT) based on up-converting phosphor (UCP) is a new kind of detection technology and because of its unique features it has become the topic of much new research in mark detection technology. This article mainly reviewed the mechanism, application and developmental situation of UPT. It was found that UPT had a favorable effect on *Escherichia coli*, *brucella* and *streptococcus* in the field of food safety detection, but the current technology still had some certain defects. Through the improvement of synthesis technology and surface modification methods, the UPT could be enhanced and its application in the field of food safety detection could be more useful.

**KEY WORDS:** up-converting phosphor technology; up-converting phosphor; food security applications

## 1 前言

食品安全是事关经济发展、社会和谐和人民切身利益的重大战略问题。解决好食品安全是一个复杂的系统工程, 其中合适的检测技术不可或缺。传统的理化检测方法如高压液相色谱法<sup>[1]</sup>、气质联用法<sup>[2]</sup>、毛细管电泳法<sup>[3]</sup>等虽具有准确的突出特点, 但存在样品前处理复杂、耗时费力、成本居高不下等问题, 难以

适应现场检测。免疫学快速检测技术因其具有简便、快速、特异、敏感和低成本等优势, 可以在极短时间内检测出粮食、蔬菜、奶制品等多种食品中的小分子污染物, 因而一直得到国内外高度重视<sup>[4]</sup>。“十一五”期间在国家科技部、农业部等科研项目的支撑下, 我国在该领域的技术发展非常迅速, 特别是 ELISA 及胶体金免疫试纸, 涌现出来多个优秀的科研团队及科技创新性企业。但是, 对于某些特殊的检测靶标

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003008)

\*通讯作者: 张改平, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要研究方向: 动物免疫学和药物残留。

E-mail: zhanggaiping2003@yahoo.com.cn

来说,传统的免疫学快速检测方法很难在较短的开发周期内迅速满足食品安全检测的需要,亟待研制一种可以在抗体特异性确定的前提下提高靶标检测灵敏度的快速检测技术与方法,以便最大限度地保护我国消费者的健康。上转换荧光技术(up-converting phosphor technology, UPT)可以大幅度提高特定抗体的检测敏感度,为此问题的解决提供了思路。本文旨在就上转换荧光技术的发展及应用等进行综述,以期为本领域的科研工作者提供有益的参考。

## 2 上转换荧光技术概述

### 2.1 上转换荧光技术及发展

UPT是一种具有高度安全、灵敏、稳定,基于上转换磷光体(up-converting phosphor, UCP)的新型检测技术。UCP是由稀土元素掺杂某些晶体晶格构成的、能产生上转换磷光现象的特殊材料,其磷光颗粒能吸收至少2个光子的低能量,并发射能谱高、单波长的可见光<sup>[5]</sup>,移除激发光源后,在 $10^{-8}$  s以上仍可持续发射光。

法国学者 Auzel 等在 1966 年研究钨酸钠钷玻璃时意外发现,当基质材料中掺入稀土离子 Yb 等时,可以在红外辐射激发下发射出可见光,从而正式提出“上转换发光”的观点,开始上转换荧光相关研究<sup>[6]</sup>。20 世纪 90 年代末,美国国防部准备资助三家公司研制手持式 UPT 生物传感器,计划用于对战场上可能使用的多种生物战剂进行快速预警<sup>[7]</sup>。目前,国外有关 UPT 技术的研究已经相对成熟,而国内只有中国科学院、北京热景生物技术有限公司、军事医学科学院等几家机构从事基于 UCP 免疫层析试纸和 UPT 生物传感器的研究<sup>[8]</sup>。目前,国际上用于检测单链核酸、IFN- $\gamma$  分泌物、布鲁氏菌、耶尔森氏鼠疫杆菌的试纸已经成功问世。

### 2.2 上转换荧光技术的特点

常用的荧光标记物在食品安全检测时,其缺陷不可避免。荧光素和荧光染料因有光稳定性低、光谱重叠等弊端,对食品中微生物成像造成不良影响;量子点虽然具有激发光谱宽和光稳定性好等优点,但含有有毒重金属离子,严重危害被检测的生物体<sup>[9,10]</sup>。研究发现<sup>[11]</sup>,上述标记物在紫外波段下发生激发光时,生物组织及其肽、蛋白质、核酸等会产生强烈的背景荧光,某些荧光素甚至会产生生物学毒性,导致

抗原或抗体的灵敏度和选择性下降,影响实际检测效果。

UCP 作为完全惰性的无机发光材料,具有特殊的物理结构和光学特性,经过表面修饰与活化后,能克服上述标记物的缺点,显示出独特的优势,如灵敏度高,具有独特的上转发光现象,消除了在检测时来自于外界背景因素引起的不良影响<sup>[12]</sup>;耐用性强,稳定性好,UCP 的光学性质能避免检测样品腐蚀和自身衰变所造成的光解、发光淬灭、闪烁以及光漂白<sup>[13,14]</sup>;高度简易,精简样品预处理过程,利用 UCP 可进行直接检测;UCP 的吸收光谱和发射光谱可进行自由组合,多样化光谱使多重分析变成现实;安全无污染,无机惰性好、红外光激发、可见光发射使得基于 UCP 的检测对于测试者、试验样品、环境毫无危害<sup>[15]</sup>。UPT 以其无可比拟的优势如灵敏度好、有效期长、通量高、无干扰,成为标记检测技术中新的研究热点。

尤其是 UCP 具有绝无仅有的上转发光现象,即与一般荧光颗粒“高能光激发、低能光发射”的下转发光有所不同,UCP 颗粒可进行“低能光激发、高能光发射”的上转发光。由此,使得 UCP 颗粒作为标记物应用于食品安全检测领域,具有无背景、无淬灭、可定量等有别于传统标记物的显著优势,并可最终实现高灵敏、特异、稳定的现场定量检测。

### 2.3 上转换发光机制

UPT 本质是一种反斯托克斯发光,即辐射的能量大于所吸收的能量,其通过吸收较低能量的红外光,发射高能量的可见光来实现能量上转换<sup>[16]</sup>,也是一种反斯托克斯现象。一般来说,上转换荧光的基本机制分为激发态吸收、能量转移和光子雪崩三个过程,完成上转换荧光过程大致需要六个步骤,如图 1 所示,APTE 为光子添加能量转移过程,ESA 为激发态吸收,COS 为合作敏化,COL 为合作发光过程,TPAE 为双子光激发过程,PA 为光子雪崩过程<sup>[17-20]</sup>。

#### 2.3.1 激发态吸收(excited state absorption, ESA)

激发态吸收过程为单个离子的吸收,是上转换发光的核心过程,其原理是某一基态水平的离子在连续吸收多光子的条件下跃迁到能量较高的激发态能级的一个过程。此离子吸收一个能量的光子到达至中间亚稳态能级,如果此时出现第二个波长的光,则可将处在亚稳态上的离子激发至一个更高的能级上,

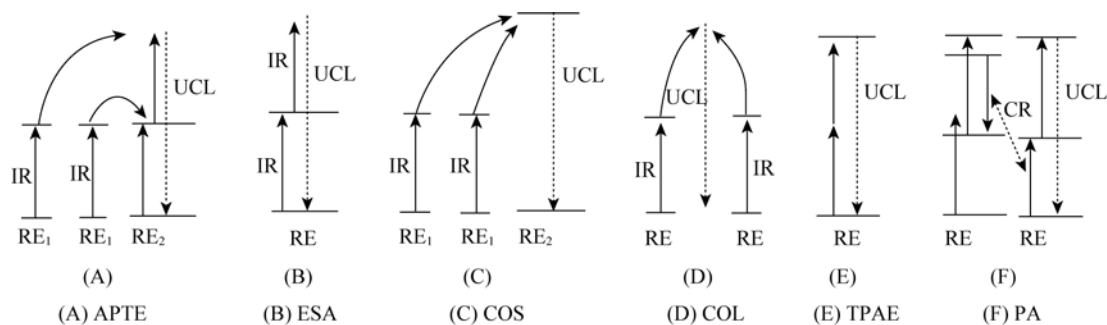


图 1 上转换发光机制

Fig. 1 Mechanism of up-conversion photoluminescence

此过程称为“双光子吸收”过程。如果其能量满足匹配要求, 该离子还有可能跃迁到更高的激发态能级上, 形成三光子、四光子吸收等, 高能级上粒子数越多, 激光发射的频率就越高, 进而产生上转换发光现象<sup>[18]</sup>。

### 2.3.2 能量转移(energy transfer, ET)

根据能量转移方式不同可分为连续能量转移、交叉弛豫、合作上转换三种形式。当处在中间态的离子满足以下条件: (1)被激发到中间态的离子数量足够多; (2)2 个激发态离子, 能量相当接近, 则此激发态离子通过相互作用, 其中一个离子退回到低能态, 另一个离子则被激发至高能态, 由此产生辐射跃迁<sup>[19]</sup>。

### 2.3.3 “光子雪崩”过程(photon avalanche, PA)

该机制的基础是: 一个能级上的粒子在交叉弛豫的作用下, 使另一个能级上产生特殊的抽运效果, 其量子效率大于 1。增大激发光强度, 缩短建立平衡时间, 有利于增强平衡吸收, 出现较好的上转换结果。

## 3 上转换荧光技术在食品安全检测中的应用

常用液相沉积法、Lemieux-von Rudloff 法、无机壳层修饰法、化学修饰等方法将上转换荧光纳米颗粒表面进行氨基化、醛基化、羧基化修饰, 以增强其在水溶液中的分散性和稳定性, 使其易于和生物大分子相结合, 目前研制出了上转换荧光生物探针、上转换荧光免疫层析等, 使用效果极佳。

### 3.1 国外食品检测领域上转换荧光技术的应用

国外对 UPT 在食品安全检测的研究较多。Katri 等<sup>[21]</sup>将上转换荧光原理应用于血清中雌二醇素的检测, 实验中分别将  $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Yb}^{3+}$ 、Oyster-556 与雌二醇素偶联作为能量供体和能量受体, 对实际样品血清中雌二醇素进行免疫检测, 结果十分理想, 检测限为 0.9 nm。John 等<sup>[22]</sup>在食品用水病原体检测的报告称

UPT 无背景荧光干扰, 安全快速, 结合非放射性地高辛标记抗体 UPT 分子仅能检测 1 ng 的病毒 DNA, 是未来检测生活用水、食品工业用水的发展方向之一。Paul 等<sup>[23]</sup>采用 UPT 构建血吸虫检测横向流分析平台, 和 CAA-ELISA 技术相比, UPT-LF 能检测 36 份循环阳性抗原, CAA-ELISA 只能检测到 15 份循环阳性抗原, 此技术将在动物性食品安全检测领域发挥巨大潜能。

### 3.2 国内食品检测领域上转换荧光技术的应用

目前, 国内关于 UPT 的应用主要集中在生物、医学等领域, 军事医学科学院微生物流行病学研究所已经研制完成的多种 UPT 系统, 可对不同类型的靶标如单一靶标、双靶标、多个靶标进行标准检测。在此平台上实现了大肠杆菌 O157、霍乱弧菌 01 群 0139 群、副溶血弧菌、李斯特菌、沙门氏菌等多种食品安全相关病原体的快速定量检测<sup>[24]</sup>。

#### 3.2.1 上转换荧光技术在布鲁氏菌、大肠杆菌中的应用

曲劬等<sup>[25]</sup>成功研制出用于检测动物样品布鲁氏菌的上转换荧光免疫层析检测技术, 检测限  $5 \times 10^6$  cfu/mL, 灵敏度变化范围  $2.0 \times 10^3 \sim 3.9 \times 10^5$  cfu/mg。王静等<sup>[26]</sup>建立了肠出血性大肠杆菌 O157 上转换荧光免疫层析快速检测方法, 该法能在 40 min 内完成检测。应用于 23 种 28 株常见肠杆菌科细菌, 无交叉反应, 检测灵敏度为  $5 \times 10^3$  cfu/mL, 每次至少能检测 50 个细菌, 分别将奶类、面粉类、糕点类、果汁饮品类等中不同的固体、半固体、液体食品样本加以稀释, 同时添加肠出血性大肠杆菌 O157:H7 至  $10^7$  cfu/mL, 静置 10 min 或短暂离心(3000 r/s, 15 s), 吸取上层液体进行检测, 样品类型对实际检测结果没有产生不良影响, 样品检测灵敏度达到  $10^3$  cfu/mL。此法比胶体金技术相

比具有高通量的优势,可用于快速检测食品、环境样品中的污染菌,效果极佳。

### 3.2.2 上转换荧光技术在抗 2 型猪链球菌抗体中的应用

郑峰等<sup>[27]</sup>通过对本研究室表达的溶菌酶释放蛋白(uramidase released protein, MRP)重组蛋白进行 UCP 标记,制备出基于 MRP 双抗原夹心法的 UPT 免疫层析试纸,建立了一种检测抗 2 型猪链球菌抗体的现场快速诊断方法。选择重组 MRP 蛋白检测猪感染 *S.suis* 2 后产生的抗体,结果证明,所建立的 UPT 免疫层析体系可在 15 min 内完成对抗 *S.suis* 2 抗体的检测,快速、灵敏,操作不受实验室限制,非常适于在现场对猪和人的血清中抗 *S.suis* 2 抗体进行高通量快速检测,有利于流行区对该病的疫情监测预警,保证动物性食品安全。

表 1 UPT 系统与 Western blot、ELISA 的检测结果比较<sup>[27]</sup>  
Table 1 Test results by UPT compared with Western blot and ELISA<sup>[27]</sup>

血清编号	UPT 定量 T/C 值	Western blot 检测	ELISA 检测
空白对照	0.0000	-	0.046
A+	0.2293	+	0.727
B+	0.2370	+	0.783
C+	0.2842	+	0.788
A-	0.0401	-	0.111
B-	0.0368	-	0.074
C-	0.0605	-	0.134

### 3.2.3 其他应用

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所<sup>[28]</sup>发明了上转换纳米粒子标记适配子的荧光生物探针,克服了半导体量子点(QDs)标记适配子的生物探针所存在缺陷,如损伤生物体核酸、QDs 的潜在毒性、化学不稳定性等。用水溶性上转换纳米粒子为荧光供体,以亲和素为媒介连接适配子和生物素制备出此探针,适用于大多数靶分子,亲和力高。在 980 nm 光的激发下,相应的荧光信号就可以被检测到。

刘成辉等<sup>[29]</sup>采用聚丙烯酸对 NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 纳米粒子进行表面修饰,由于其表面带有大量羧基,故将带氨基的生物分子通过化学键固定在纳米粒子表面,制成纳米粒子荧光探针,在 980 nm 激光的激发下测定其荧光强度,测试表明其分析灵敏度高,最低可检测到 0.1 ng/mL 的羊抗人 IgG。

刘蕾等<sup>[30]</sup>研发出一种以上转换磷光材料作为标

记物的生物传感器。该系统能通过检测试纸条上颗粒含量,计算出食品样品中特定生物分子浓度,实现了对多种病原体的快速检测和定性、定量分析。该检测系统对系列标准样品的检测结果线性响应特性极佳,且与扫描型检测系统的检测结果十分接近。郭永刚等<sup>[31]</sup>为实现对食品中细菌的检测,合成了 NaYF<sub>4</sub>:Yb,Er 上转换荧光纳米颗粒,并对其表面进行修饰进而作为标记物来检测 DNA 的杂交,达到预期实验结果。他们还通过此颗粒与传统的荧光标记物 Cy3 对比发现,上转换荧光纳米颗粒具有荧光度强、检测成本低和安全无毒等优势,揭示了上转换荧光纳米颗粒在节约疾病诊断成本和细菌监测方面都具有广阔的应用前景。

## 4 上转换荧光技术在食品领域应用中面临的问题

UPT 在检测领域表现出巨大潜力,但其在在食品安全检测应用中还存在一系列问题,如合成工艺问题、表面修饰问题、应用现状问题等。

### 4.1 制备工艺

材料特性和制备工艺联系密切,不同工艺中基质声子态密度变化、敏化剂、质物料配比的变化对上转换效率都会产生一定影响<sup>[32]</sup>。为了便于被扫描仪扫描和检测,需改善稀土发光材料合成工艺,制备出发光度强、相关性能好的新型上转换荧光材料。

目前,要获得高发光强度的 UCP,需在制备过程中加入敏化剂,同时还要保证发光中心、敏化中心的能级匹配且均匀地出现在纳米尺度的基质中<sup>[33,34]</sup>。上转换激光效率最重要重的因素是稀土离子能级的无辐射跃迁的过程,而声子参与无辐射跃迁过程,为了提高上转换激光的运转效率,解决问题的关键就是必须设计制备合适的稀土掺杂基质材料,合理调整、配比基质物料,采用新型敏化剂和恰当的抽运途径,从而降低基质材料的声子能量,提高量子效率。

### 4.2 表面修饰

UCP 在直接使用时易出现分散性和稳定性不佳等问题,因此需要在不影响其荧光强度的前提下进一步研究发光材料表面修饰问题,以期使其具有较好的水溶性和生物相容性。纳米颗粒的核壳结构经过表面修饰,可以极大增强上转换发光强度;采用液相包覆沉积法对 UCP 表面进行氨基修饰,材料的悬浮

性和稳定性都得到了提高,利用 Lemieux-von Rudloff 法氧化材料表面的油酸分子,颗粒经过表面羧基修饰后在水中的分散性能极佳。同时我们还要明确纳米颗粒与抗体的相互作用以及偶联对蛋白质结构与功能的影响,UCP 只有在表面修饰上化学键后才能同抗体成键连接,而且其表面修饰的化学键只能同生物体特定的化学键结合,不能影响生物体其他功能正常运转,如其复制、藕联和杂交等生物过程<sup>[35]</sup>。

### 4.3 应用范围

目前,UPT 大多用于生物、医学等领域,而食品领域相关研究尚处在起步阶段,相关技术还不太成熟,用于检测食品中农药、兽药残留的 UPT 免疫层析试纸还未见报道;制备方法和修饰技术尚还存在一些问题,因此限制了其在食品安全检测中的推广应用。需进一步加速研究用于食品安全检测领域的上转换荧光技术,建立基于 UPT 的竞争型免疫侧向层析试纸技术平台。

## 5 前景展望

上转换荧光纳米材料具有毒性低、理化性质稳定、发光强度高而稳定、斯托克斯位移大、无生物样品自体荧光干扰、散射和成本较低等优点,使得基于 UCP 的上转换荧光技术近年来得到快速发展。现阶段,相关研究者利用 UPT 已在疾病检测等方面取得巨大成功,但在检测食品中农药、兽药残留方面尚未取得突破性进展,所以如何进一步开展新型上转换荧光纳米颗粒制备与表征、抗体标记以及建立 UPT 免疫层析技术平台等相关研究具有深远的意义,尤其是将 UPT 和免疫层析试纸技术相结合,将为高敏感度、定量的食品安全快速检测提供技术支持,与胶体金免疫检测试纸相互补充,广泛应用于农兽药残留及食品违禁添加物的快速检测中,社会和经济意义巨大。

### 参考文献

- [1] Gul S, Sultana N. New Method for Optimization and Simultaneous Determination of Sparfloxacin and Non Steroidal Anti-Inflammatory Drugs: Its In-Vitro Application [J]. *Am J Anal Chem*, 2012, 3: 328–337.
- [2] Hernández F, Portoles T, Pitarch E, *et al.* Gas chromatography coupled to high-resolution time-of-flight mass spectrometry to analyze trace-level organic compounds in the environment, food safety and toxicology [J]. *TrAC-Trends Anal Chem*, 2011, 30(2): 388–400.
- [3] Bergamo AB, Fracassi JA, Jesus DP. Simultaneous determination of aspartame, cyclamate, saccharin and acesulfame-K in soft drinks and tabletop sweetener formulations by capillary electrophoresis with capacitively coupled contactless conductivity detection [J]. *Food Chem*, 2011, 124(4): 1714–1717.
- [4] Wen K, Nölke G, Schillberg S. Improved fluoroquinolone detection in ELISA through engineering of a broad specific single-chain variable fragment binding simultaneously to 20 fluoroquinolones [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2012, 403(9): 2771–2783.
- [5] Niedbala RS, Feindt H, Kardos K. Detection of Analytes by Immunoassay Using Up-converting Phosphor Technology [J]. *Anal Biochem*, 2001, 293: 22–30.
- [6] Auzel F. Materials and Devices Using Double Pumped Phosphors with Energy Transfer [J]. *P IEEE*, 1973, 61(6): 758–787.
- [7] 杜海燕, 杨志萍, 孙家跃. 上转换发光材料及发光效率研究及展望[J]. *化工新型材料*, 2009, 37(9): 5–7.
- [8] 闫中强. 应用基于上转换发光技术的免疫层析法检测鼠疫耶尔森氏菌[D]. 中国人民解放军军事医学科学院, 2006.
- [9] Chatterjee DK, Rufaihah AJ, Zhang Y. Upconversion Fluorescence Imagine of Cells and Small Animal Using Lanthanide Doped Nanocrystals [J]. *Biomaterials*, 2008, 29(7): 937–943.
- [10] Janczewski D, Zhang Y, Das DK, *et al.* Bimodal Magnetic Fluorescence Probes for Bio imaging [J]. *Microsc Res Techniq*, 2010, 74(7): 563–576.
- [11] Zarling DA, Rossi MJ, Reppers NA, *et al.* Up-converting Reporters for Biological and Other Assays Using Laser Excitation Techniques [P]. US Patent, C08g, 6537829. 2003–03–05.
- [12] Wu X, Zhang Q, Wang X, *et al.* One-Pot Synthesis of Carboxyl-Functionalized Rare Earth Fluoride Nanocrystals with Monodispersity, Ultrasmall Size and Very Bright Luminescence [J]. *Eur J Inorg Chem*, 2011, 13: 2158–2163.
- [13] Idris NM, Li ZQ, Ye L, *et al.* Tracking Transplanted Cells in Live Animal Using Upconverting Fluorescent Nan-oparticles [J]. *Biomaterials*, 2009, 30(28): 5104–5113.
- [14] Sia SK, Linder V, Parviz BA, *et al.* An Integrated Approach to a Portable and Low Cost Immunoassay for Resource Poor Settings [J]. *Angew Chem Int Edit*, 2004, 43(4): 498–502.
- [15] Jiang S, Zhang Y. Upconverting Nanoparticles-Based FRET System for Study of SiRNA in Live Cells [J]. *Lang Muir*, 2010, 26: 6689–6694.
- [16] 乌兰图亚. 稀土离子上转换发光材料的研究进展[J]. *内蒙古石油化工*, 2007, 12: 18–20.
- [17] Auzel F. Upconversion and anti-Stokes processes with f and d ions in solids [J]. *Chem Rev*, 2004, 104(1): 139–173.
- [18] 杨建虎, 戴世勋, 蒋中宏. 稀土离子的上转换发光及研究进展

- [J]. 物理学进展, 2003, 23(3): 284–298.
- [19] 郭海, 乔艳敏. 稀土纳米上转换发光材料研究进展[J]. 浙江师范大学学报(自然版), 2007, 30(4): 377–382.
- [20] 密丛丛. 稀土氟化物上转换荧光纳米粒子的磁化功能和生物功能[D]. 东北大学, 2009.
- [21] Kuningas K, Ukonaho T, Pakkila H, *et al.* Upconverting Fluorescence Resonance Energy Transfer in a Homogeneous Immunoassay for Estradiol [J]. *Anal Chem*, 2006, 78(13): 4690–4696.
- [22] John TC, Baeumner AJ. Biosensors for the Detection of Waterborne Pathogens [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2012, 402: 117–127.
- [23] Paul LAM, Claudia J, Jolien J, *et al.* Lateral Flow Assay for Simultaneous Detection of Cellular and Humoral Immune Responses [J]. *Clin Biochem*, 2011, 44: 1241–1246.
- [24] 杨瑞馥, 周蕾. 生物传感器及其在食品安全检测方面的应用[C]. 2010年第三届国际食品安全高峰论坛论文集, 2010.
- [25] Qu Q, Zhu ZW, Wang YF, *et al.* Rapid and Quantitative Detection of Brucella by Up-converting Phosphor Technology Based Lateral Flow Assay [J]. *J Micro Meth*, 2009, 79: 121–123.
- [26] 王静, 周蕾, 李伟, 等. 上转换磷光免疫层析检测肠出血性大肠杆菌 O157 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2007, 19(1): 41–43.
- [27] 郑峰, 周蕾, 葛俊超, 等. 应用上转换发光技术快速检测抗 2 型猪链球菌抗体[J]. *中华流行病学志*, 2008, 29(3): 310–311.
- [28] 刘晓敏, 孔贵祥, 涂浪平. 上转换纳米粒子标记适配子的荧光生物探[P]. 中国. 201110212461. 1, 2011–7–27.
- [29] Liu CH, Wang Z, Wang XK. *et al.* Surface modification of hydrophobic NaYF<sub>4</sub>: Yb, Er upconversion nanophosphors and their applications for immunoassay [J]. *Sci China Chem*, 2011, 54(8): 1292–1297.
- [30] 刘蕾, 周蕾, 黄立华. 基于一维 CCD 的免疫层析试纸条检测系统[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(2): 246–251.
- [31] Guo Y G, Deng W, Guo M, *et al.* The Detection of Bacteria on Microarrays Using Up-Converting Phosphor Na-nanoparticles as Fluorescent Labels [C]. *IEEE International Conference of Nano/Micro Engineered and Molecular System*, 2006.
- [32] 张翔宇, 高当丽, 李林. 影响稀土频率上转换荧光效率的因素[J]. *激光技术*, 2010, 34(6): 855–860.
- [33] 鲍俊萍, 徐晓伟, 范慧俐, 等. 上转换荧光材料在生物芯片技术中的应用[J]. *材料导报*, 2003, 17: 191–193.
- [34] 李鲁平. HBsAb 快速定量检测上转换发光免疫层析试纸的研制及临床应用[D]. 中国医科大学, 2009.
- [35] 赵露晶. 免疫层析定量测定 AFP 和 RNA 干扰 K562 细胞的研究[D]. 上海师范大学, 2010.

(责任编辑: 张宏梁)

### 作者简介



贾国超, 硕士研究生, 研究方向: 食品安全检测。

E-mail: jiaguochao2007@163.com



张改平, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要研究方向: 动物免疫学和药物残留。

E-mail: zhanggaiping2003@yahoo.com.cn