

# 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的检测方法

马江媛<sup>1,2</sup>, 桑晓霞<sup>1,2</sup>, 黄登宇<sup>1,2\*</sup>

(1. 山西大学生命科学学院, 太原 030006; 2. 山西大学食品药品快检技术中心, 太原 030006)

**摘要:** 随着农业市场的不断发展, 伴随产生了一系列的食品安全质量问题, 尤其是毒性最强的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 所引起的安全问题。粮食安全问题是一个不容小觑的重大问题, 现在也越来越受到老百姓的重视。本文介绍了黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>(aflatoxin B<sub>1</sub>, AFB<sub>1</sub>)及其毒性危害; 综述了几种黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的检测方法, 分别包括: 薄层层析法(thin-layer chromatography, TLC)、高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、酶联免疫吸附法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)、金标试纸法(gold labeled immunochromatographic assay, GICA)等, 并对这几种方法进行了分析和比较, 以期黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的监测提供参考。

**关键词:** 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>; 薄层层析法; 高效液相色谱法; 酶联免疫吸附法; 金标试纸法

## Detection method for aflatoxin B<sub>1</sub>

MA Jiang-Yuan<sup>1,2</sup>, SANG Xiao-Xia<sup>1,2</sup>, HUANG Deng-Yu<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;  
2. The Food & Drug Safety Rapid Inspection Center, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**ABSTRACT:** A series of food safety and quality problems have arisen with the continuous development of the agricultural market, especially the safety problems caused by the most toxic aflatoxin B<sub>1</sub>. Food security is a major issue that should not be underestimated, and now people are paying more and more attention to it. This paper introduced aflatoxin B<sub>1</sub>, its toxicity harm and detection methods, analyzed and compared the methods for the detection of aflatoxins B<sub>1</sub>, including thin-layer chromatography (TLC), high performance liquid (HPLC), enzyme linked immunosorbent assay (ELISA) and gold labeled immunochromatographic assay (GICA), in order to provide reference for the monitoring of aflatoxin B<sub>1</sub>.

**KEY WORDS:** aflatoxin B<sub>1</sub>; thin-layer chromatography; high performance liquid chromatography; enzyme-linked immunosorbent assay; gold labeled immunochromatographic assay

## 1 引言

由寄生曲霉和黄曲霉所产生的次级代谢产物的集合叫黄曲霉毒素(aflatoxin, AFB)<sup>[1]</sup>, 产生的次生代谢产物包括黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 以及其他的重要代谢产物, 其中毒性最强的是黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>(aflatoxin B<sub>1</sub>, AFB<sub>1</sub>)<sup>[2]</sup>, 是粮食污染中一种常见的具有强致癌性、致毒性、致畸性的真菌毒素。

双呋喃环和氧杂萘邻酮两者构成了 AFB<sub>1</sub> 的主要结构。AFB<sub>1</sub> 的急性毒性是砒霜的 68 倍, 氰化钾的 10 倍<sup>[3]</sup>, 而且是目前世界上公认的最强的化学致癌物质<sup>[4]</sup>。其毒性作用主要表现在人体的肝脏部位<sup>[5]</sup>, 还有研究表明 AFB<sub>1</sub> 可以通过阻止一些酶的合成而使 DNA 的合成受到干扰, 使细胞不能合成蛋白质, 最终导致生物体生命周期紊乱<sup>[6]</sup>; AFB<sub>1</sub> 还能够破坏机体的氧化系统, 引起生命体的衰老现象, 这是因为 AFB<sub>1</sub> 会直接影响超氧化物歧化酶、过氧化氢

\*通讯作者: 黄登宇, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品快速检测。E-mail: Huangdy1110@126.com

\*Corresponding author: HUANG Deng-Yu, Ph.D, Associate Professor, School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China. E-mail: Huangdy1110@126.com

酶、谷胱甘肽硫转移酶等酶浓度的下降,因此 AFB<sub>1</sub> 会引起机体内细胞的凋亡<sup>[7]</sup>。国际癌症研究机构的第一组致癌物质中包含 AFB<sub>1</sub><sup>[8]</sup>。黄曲霉毒素的毒性作用还表现在动物上,如果黄曲霉毒素感染的粮食或饲料被动物食用了,便会引起动物中毒,并且这些动物所产生的副产物(奶及奶制品)也会含有黄曲霉毒素<sup>[9]</sup>。AFB<sub>1</sub> 会随着食物链(食物网)进入人和动物体内<sup>[10]</sup>,危害健康,还会造成直接的经济损失。黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的污染在花生、玉米、大米、花生油等粮油作物中比较常见<sup>[11-13]</sup>,所以黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的检测很有必要,可以进一步保障食品卫生质量,让百姓吃得放心,这就要求检测粮食中 AFB<sub>1</sub> 的方法能够快速、准确、灵敏度高,这也是现在快速检测的研究方向。现在许多国家都制定严格的法律法规来限定食品中 AFB<sub>1</sub> 的含量。我国现行的标准是 GB 5009.22-2016《食品安全国家标准 食品中黄曲霉毒素 B 族和 G 族的测定》<sup>[14]</sup>。目前,有很多 AFB<sub>1</sub> 检测方法的研究,可以是不同实验材料,可以是不同方法,比如赵磊等<sup>[15]</sup>同时使用了酶联免疫法和薄层层析法检测茶叶中的 AFB<sub>1</sub>,还对这 2 种方法进行了方法学评价。郭金喜等<sup>[16]</sup>使用超高压相法测定了新疆巴旦木中的 AFB<sub>1</sub>,为建立有效的质量控制方法提供参考。

本文对现有的 AFB<sub>1</sub> 检测方法进行了综述和分析比较,使大家对 AFB<sub>1</sub> 的检测有了更深的认识,为进一步研究 AFB<sub>1</sub> 新的检测方法提供理论支持。

## 2 检测方法

对于 AFB<sub>1</sub> 检测方法的研究,国内外研究者一直在探索。目前国外使用传感器检测 AFB<sub>1</sub> 的研究比较多,其中有最新开发的一种基于智能手机的新型光学仿生传感器,该传感器基于独立式分子印迹聚合物(molecularly imprinted polymers, MIP)膜,可用于快速、灵敏的即时检测 AFB<sub>1</sub>。

目前我国用于检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的实验室检测方法主要有薄层层析法(thin-layer chromatography, TLC),快速检测的方法有高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、酶联免疫吸附法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)、金标免疫层析检测技术(gold labeled immunochromatographic assay, GICA)等<sup>[17-20]</sup>,其中得到广泛推广的是酶联免疫吸附法。下面就对我国的这几种方法进行概述。

### 2.1 薄层层析法

我国测定黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的标准方法之一就是薄层层析法,该方法是检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 最早使用的方法。在 GB 5009.22-2016 中规定,薄层板上黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的最低检出量为 0.0004 μg,检出限为 5 μg/kg,回收率 75%以上。其原理就是各样品中的 AFB<sub>1</sub> 经过合适的有机溶剂而被提取出来,再经萃取纯化,在薄层板上层析展开,分离,在

365 nm 波长处 AFB<sub>1</sub> 将会产生蓝紫色荧光,应用 AFB<sub>1</sub> 的荧光特性,根据荧光斑点的大小和强弱,比较测定黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 含量<sup>[21,22]</sup>。其中有机溶剂的选取是比较关键的一步。TLC 有单向展开和双向展开法 2 种<sup>[23]</sup>。使用薄层层析测定黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的方法在一般实验室都可以完成,但是由于在检测过程中其他荧光物质会对测定干扰,使测定结果不准确,所以这种测定方法只作化学分析法的一般佐证法<sup>[5]</sup>。后来,随着高效液相色谱法和酶联免疫法的发展,逐渐代替了薄层层析法的使用。

尚瑛达等<sup>[24]</sup>在薄层层析法的基础上,做出了进一步改进,使改进后的回收率大幅度提高,可以达到 78%以上,且改进后的测定结果比国标法还高。改进的地方主要有 3 处,分别是:在提取净化时,先向提取液中加入质量分数为 2%的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液,再用三氯甲烷萃取;提前将 AFB<sub>1</sub> 水解生成 AFB<sub>2</sub>,然后再进行薄层分析;用乙醚-甲醇-水混合展开剂进行一次性展开。张慧丽等<sup>[25]</sup>使用黄曲霉菌感染花生并产生黄曲霉毒素,对产生的毒素进行提取,实验完成后,观察各品种的峰面积,从而得出各品种花生的黄曲霉毒素质量浓度,结果显示为红崖子小白沙品种质量浓度为 30.92 ng/mL。张鹏等<sup>[26]</sup>通过多功能净化柱(multifunction cleanup column, MFC)净化,单相展开的薄层色谱法,可同时测定花生中除 AFB<sub>1</sub> 以外的其他黄曲霉毒素,检出限均可达到 0.5×10<sup>-9</sup> μg/kg,平均回收率为 86.5%~99.0%,其中 AFB<sub>1</sub> 的回收率为 96.3%~99.0%。通过比较可以发现,可以使用薄层层析法得到比较客观结果,但是前处理却不相同,比较复杂。

### 2.2 高效液相色谱法

使用高效液相色谱法检测 AFB<sub>1</sub> 是一个定量检测的方法,为了只分离得到黄曲霉毒素 B<sub>1</sub><sup>[27,28]</sup>,需要辅助利用荧光检测器,选择的是反相 C<sub>18</sub> 柱和合适的流动相。其原理是 AFB<sub>1</sub> 的量由色谱峰的面积来确定,一般分提取、净化、衍生和测定等几个步骤<sup>[29,30]</sup>。净化的目的是使含量本身较少的 AFB<sub>1</sub> 尽可能的富集和除去多余杂质。采用高效液相色谱法检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 具有灵敏度高、特异性好、速度快及测定结果准确可靠等优点,但前处理比较复杂,所使用的仪器也比较昂贵,对操作人员的技术要求比较高。

在 GB 5009.22-2016 中规定,当称取样品 5 g 时,柱前衍生法和柱后衍生法 AFB<sub>1</sub> 的检出限为 0.03 μg/kg,定量限为 0.1 μg/kg。

陈强胜<sup>[31]</sup>在检测大米样品中的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 时使用了高效液相色谱-柱后衍生法,得出结论是均回收率为 88.95%,检出限为 0.1 μg/kg。实验过程中有机溶剂的选取为乙腈-水溶液的混合溶液,经净化、分离后进入柱后衍生系统,荧光检测器检测,外标法定量。程树峰等<sup>[32]</sup>建立了一种碘柱前衍生-高效液相色谱法来快速检测粮食中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>,结果黄曲霉毒素的测定最多耗

时 7 min, 检出限均在 pg 水平。卢朝婷等<sup>[33]</sup>利用高效液相色谱法, 从不同角度对比对食品中的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 进行检测, 发现当提取液是甲醇-水、用多功能净化柱净化, 通过柱后衍生, 在 440 nm 的发射波长、360 nm 的激发波长时黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的检出限达到最大。

液相色谱-质谱联用法是在高效液相色谱法的基础上建立的一种检测方法, 该方法最大的特点是既可以做到定性检测又可以做到定量检测, 而且操作简单, 杂峰干扰小, 检出限低, 能满足检测的需求<sup>[34]</sup>。郑燕等<sup>[35]</sup>对食品(以花生、玉米等为样品)中的 4 种黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 进行定性定量快速液相色谱串联质谱法分析, 分析结果中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 检出限是 0.012 μg/kg。岳亚军等<sup>[36]</sup>在对大米中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 检测时建立了一种高效液相色谱-质谱联用仪的快速定性定量分析方法, 结果 AFB<sub>1</sub> 在 1.0~21.0 ng/mL 呈良好线性关系, 平均回收率 50%~92%。

高效液相色谱法已经是一项比较成熟的技术, 在以后的研究中除了可以使用液相-质谱联用法以外, 我们还可以探索使用高效液相色谱法和其他检测技术的联用, 使我们的选择更多。

### 2.3 酶联免疫吸附法

酶联免疫法检测 AFB<sub>1</sub> 是以抗原抗体反应为理论基础, 采用了单克隆或多克隆抗体技术, 其原理是抗原(或抗体)吸附于载体上的免疫吸附剂和用酶标记的抗体(或抗原)与标本中的待测物起特异的免疫学反应, 然后加入酶底物进行显色反应, 通过显色反应产生的颜色的深浅来判断样品中待测物的含量<sup>[37]</sup>。酶联免疫吸附法目前主要有 3 种测定方法: 竞争法、抗体夹心法和间接法<sup>[38,39]</sup>。

酶联免疫吸附法的优点有很多, 比如操作简单、反应速度快、安全等, 但因为酶的活性受条件影响比较大, 所以 ELISA 法测定结果稳定性较差, 容易出现假阳性结果<sup>[40,41]</sup>, 导致分析结果的准确性不高, 精确度有待提高。由于酶联免疫试剂盒种类多, 标准不一, 所以在使用之前应该对试剂盒的质量进行定量限和回收率方面验证, 以检验试剂盒是否合适。目前, 酶联免疫吸附法是我国检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 最简便、快速的方法。

王洁莲等<sup>[42]</sup>检测小米中的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 时使用酶联免疫吸附法, 检出限可达 0.1 μg/L, 回收率可达 75%以上。蔡正森等<sup>[43]</sup>做实验对比了 ELISA 法和 HPLC 法, 得出在采用 2 种方法同时测定样品中的 AFB<sub>1</sub> 时, 当 AFB<sub>1</sub> 浓度为 0.5~12.5 μg/L 时, ELISA 法比 HPLC 回收率高、效果更为理想的结论。刘冬儿<sup>[44]</sup>使用了 ELISA 方法检测了玉米样品中的 AFB<sub>1</sub>, 在实验过程中采用了辣根过氧化氢酶标记 AFB<sub>1</sub> 抗体, 检测到 AFB<sub>1</sub> 的线性范围 0.25~0.5 ng/ml, 检测灵敏度可达 0.15 μg/kg, 整个测定时间为 4 h。所以要求短时间内出具结果时, 可以使用 ELISA 方法测定 AFB<sub>1</sub>。当出现假阳性结果时, 需要进一步进行复检。

### 2.4 金标免疫层析检测技术

金标免疫层析检测技术, 标记物为纳米金, 通过单克隆抗体的原理而制成的免疫分析法, 在 5~10 min 完成对样品中黄曲霉毒素的定性测定<sup>[45,46]</sup>。黄曲霉毒素快速检测试纸条具有耗时短、简便、有较高的灵敏度、重复性好、特异性强等优点, 且能够实现对黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的半定量检测。胶体金免疫层析试纸条因为使用时方便快捷, 适合当场检测的优点已经发展成为一个独立的市场。

赵晓联等<sup>[47]</sup>的实验中试纸条是由样品垫、金标垫、硝酸纤维素膜和样品吸收垫 4 部分组成, 通过对 AFB<sub>1</sub> 标准溶液的测定, 观察试纸条对标准浓度的抑制情况而得出低检出限为 2.5 ng/mL。Shim 等<sup>[48]</sup>对 172 份谷物和饲料样本中的 AFB<sub>1</sub> 用金标试纸条检测, 最低检测限可达 0.5 ng/mL。邓省亮<sup>[49]</sup>建立了一种快速检测食品中 AFB<sub>1</sub> 的胶体金免疫层析技术, 样品为大米、花生、玉米, 胶体金颗粒由柠檬酸三钠还原法制得, 玻璃纤维上喷有被标记的抗 AFB<sub>1</sub> 单克隆抗体, 将胶体金试纸条装入检测卡中进行检测, 测试结果表明 AFB<sub>1</sub> 快速检测试纸条的检测时间仅需 10 min, 灵敏度为 5 ng/mL, 重复性高, 且无假阳(阴)性现象。

### 2.5 其他方法

在检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的免疫分析方法中除了酶联免疫法和金标免疫层析技术以外, 还包括放射性免疫分析法(radioimmunoassay, RIA)<sup>[50]</sup>。其中, 放射免疫法的应用极大地受到了限制, 主要是由于需要特殊设备和安全保护; 由于免疫层析法检测 AFB<sub>1</sub> 是一种新兴方法, 所以在灵敏度方面还有很大地提升空间。Velky 等<sup>[51]</sup>设计了一种免疫亲和荧光生物传感器, Ammida 等<sup>[52]</sup>还设计了一种建立在间接竞争的酶联免疫吸附法基础上的电化学免疫传感器。

## 3 检测方法的比较

每种方法都有其优、缺点, 在日常生产中具体使用哪种方法需要具体针对其当前条件做出选择。对于各种方法的比较见表 1。

## 4 展 望

随着人们生活水平的提高, 食品质量安全也被逐渐的重视起来, 对毒性最强的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的快速检测方法的研究十分必要。现在市场在发展, 消费观念在更新, 对毒素的检测更是日益突出, 毒素的快速检测必定是未来很长一段时间的发展重点, 其中就包括对 AFB<sub>1</sub> 的快速检测。在现有的基础之上, 需要开发出更方便、更快速、更准确的方法。近些年, 我国对检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 方法的研究发展迅速, 专业队伍不断扩大, 技术水平不断提高, 产品性能不断增强。国家现在对科学技术的发展很是重视, 相信通过国家的支持, 我国的快速检测将面临较好的前景。需

表1 各种方法的比较  
Table 1 Comparison of various methods

方法	优缺点	同时检测样品的个数
薄层层析法	一般实验室都可完成,但样品处理较复杂,测定所需时间长,不适合现场快速检测,容易受到杂质的干扰,安全性较差,灵敏度低。	1个
高效液相色谱法	灵敏度、分辨率、准确度高,重复性较好。但检测所需设备较昂贵,对检测人员的技术要求较高,检测所需周期较长。	1个
酶联免疫法	灵敏,快速,操作简单,且无污染,但会出现假阳性的现象,实验结果不准确,精确度有待提高。	可同时多个
金标免疫层析检测技术	可同时实现对 AFB <sub>1</sub> 的定性和半定量检测,简便、快速,特异性强,不需要仪器。但并没有得到广泛的应用。	1个

要注意的是黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 作为一种剧毒物质,在检测过程中会不可避免的接触到毒素标准品,对人体健康造成不可挽回的损害。为避免这种危害,首先在实验过程中要做好防护措施,其次许多专家学者已经开始研制毒素标准品的替代品。无毒或低毒的替代品将会成为黄曲霉毒素检测方法研究新热点。

对于黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 检测方法的研究,我们一直在路上,通过上面的综述,我认为在以后的研究中可以考虑一下拉曼技术和太赫兹等光谱快速检测技术在黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的应用,还可以考虑将几种方法联用,为 AFB<sub>1</sub> 的检测提供新思路,以便更方便、快速、准确的检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>。

#### 参考文献

- [1] 蔡璋玲,林长虹,董超先. 食品中的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 的超高效液相色谱—串联质谱检测[J]. 广东化工, 2016, 43(7): 192–194.  
Cai TL, Lin CH, Dong CX. Determination of aflatoxins B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, G<sub>1</sub> and G<sub>2</sub> in food by ultra performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry [J]. Guangdong Chem Ind, 2016, 43(7): 192–194.
- [2] 宫晓平,董琨,崔璐璐,等. 超临界萃取–超临界色谱–串联质谱法快速检测谷物中 4 种黄曲霉毒素[J]. 中国食品卫生杂志, 2019, 31(2): 146–149.  
Gong XP, Dong K, Cui LL, *et al.* Rapid detection of four aflatoxins in cereals with supercritical fluid extraction–supercritical fluid chromatography–mass spectrometer/mass spectrometer [J]. Chin J Food Hygi, 2019, 31(2): 146–149.
- [3] 赵巧灵,王萍亚,戴意飞,等. SMART 柱在线净化-HPLC/UVE 荧光同时检测花生中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>[J]. 食品科技, 2016, 41(12): 286–290.  
Zhao QL, Wang PY, Dai YF, *et al.* Simultaneous determination of aflatoxins B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> in peanut using on–line SMART column clean–up and HPLC/UVE fluorescence detector [J]. Food Sci Technol, 2016, 41(12): 286–290.
- [4] 陈琛,王炳彦,钟兴文,等. ELISA 与 HPLC–MS 检测玉米中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的比较分析[J]. 中国饲料, 2019, (9): 87–92.  
Chen S, Wang BY, Zhong XW, *et al.* Comparative analysis of aflatoxin B<sub>1</sub> in corn by ELISA and HPLC–MS [J]. China Feed, 2019, (9): 87–92.
- [5] Blake R, Rushing, Mustafa IS. Aflatoxin B<sub>1</sub>: A review on metabolism, toxicity, occurrence in food, occupational exposure, and detoxification methods [J]. Food Chem Toxicol, 2019, 124: 81–100.
- [6] Cupid BC, Lightfoot TJ, Russell D, *et al.* The formation of AFB<sub>1</sub>–macromolecular adducts in rats and humans at dietary levels of exposure [J]. Food Chem Toxicol, 2004, 42(4): 559–560.
- [7] Rastogi R, Sricastaba AK, Rastogi AK. Long term effect of aflatoxin B<sub>1</sub> on lipid peroxidation in rat liver and kidney: effect of picroliv and silymarin [J]. Phytother Res, 2001, 15(4): 307–310.
- [8] Wang C, Sun LL, Zhao Q. A simple aptamer molecular beacon assay for rapid detection of aflatoxin B<sub>1</sub> [J]. Chin Chem Lett, 2019, 30: 1017–1020.
- [9] 张丽,朱妹,张文海. 高效液相色谱后衍生法测定食品中的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>[J]. 中国卫生检验杂志, 2006, 16(1): 70–71.  
Zhang L, Zhu S, Zhang WH. Determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in food by high performance liquid column post–derivatization [J]. Chin J Health Lab Technol, 2019, 30: 1017–1020.
- [10] Fang LQ, Chen H, Ying XT, *et al.* Micro–plate chemiluminescence enzyme immunoassay for aflatoxin B<sub>1</sub> in agricultural products [J]. Talanta, 2011, 84(1): 216–222.
- [11] 胡玲玲,项瑜芝,蔡增轩,等. 4 种黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 酶联免疫试剂盒与液相法检测结果比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(3): 813–818.  
Hu LL, Xiang YZ, Cai ZX, *et al.* A comparative study on 4 kinds of aflatoxin B<sub>1</sub> assay kits and liquid chromatography [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(3): 813–818.
- [12] 李红梅,朱聿元,韩华,等. 高效液相色谱–柱后光化学衍生法测定大米粉中黄曲霉 B<sub>1</sub> 含量[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(15): 135–137.  
Li HM, Zhu YY, Han H, *et al.* Separation and Identification of aflatoxin B<sub>1</sub> in rice meal by high performance liquid chromatography with post–column photochemical reaction [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2017, 23(15): 135–137.
- [13] 冯靓,蔡增轩,谭莹,等. HPLC 同时测定食品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(3): 511–513.  
Feng L, Cai ZX, Tan Y, *et al.* Simultaneous detection of aflatoxin B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> in foods by HPLC [J]. Chin J Health Lab Technol, 2007, 17(3): 511–513.
- [14] GB 5009.22–2016 食品安全国家标准 食品中黄曲霉毒素 B 族和 G 族的测定[S].  
GB 5009.22–2016 National food safety standard–Determination of aflatoxin B and G in foods in national food safety standards [S].
- [15] 赵磊,吴明宸,于亚楠,等. 酶联免疫和薄层层析法检测茶叶中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的评价[J]. 黑龙江医药, 2018, 31(6): 1190–1194.

- Zhao L, Wu MC, Yu YN, *et al.* Evaluation of aflatoxin B<sub>1</sub> in tea by enzyme linked immunosorbent assay and thin layer chromatography [J]. *Heilongjiang Med*, 2018, 31(6): 1190–1194.
- [16] 郭金喜, 远辉. 超高效液相色谱法测定新疆巴旦木中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 不确定度评定[J]. *酿酒科技*, 2017, (5): 107–110, 116.
- Guo JX, Yuan H. Evaluation of uncertainty in determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in badanmu from Xinjiang by ultra performance liquid chromatography [J]. *Liquor-Making Sci Technol*, 2017, (5): 107–110, 116.
- [17] 余以刚, 邱杨, 吴晖, 等. 几种传统食品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的检测与安全评价[J]. *食品与机械*, 2007, 23(4): 110–111.
- Yu YG, Qiu Y, Wu H, *et al.* Detection and safety evaluation of aflatoxin B<sub>1</sub> in several traditional foods [J]. *Food Mach*, 2007, 23(4): 110–111.
- [18] 林建忠, 邹伟, 张志刚, 等. LC/MS/MS 测定食品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的研究[J]. *检验检疫学刊*, 2004, 14(12): 31–33.
- Lin JZ, Zou W, Zhang ZG, *et al.* Determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in Food by LC/MS/MS [J]. *Inspect Quarant Sci*, 2004, 14(12): 31–33.
- [19] 王君, 刘秀梅. 食品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 的高效液相色谱测定方法[J]. *中国食品卫生杂志*, 2005, 17(6): 498–500.
- Wang J, Liu XM. Determination of aflatoxin B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> in food by high performance liquid chromatography [J]. *Chin J Food Hygi*, 2005, 17(6): 498–500.
- [20] 于成广, 黄辉. UPLC-MS-MS 法快速测定玉米中的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>[J]. *化学分析计量*, 2012, 21(2): 81–83.
- Yu CG, Huang H. Rapid determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in maize by UPLC-MS-MS [J]. *Chem Anal Meter*, 2012, 21(2): 81–83.
- [21] 窦玉平. 薄层层析法测定粮食中的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>[J]. *吉林农业*, 2011, (1): 23.
- Dou YP. Determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in grain by thin layer chromatography [J]. *Jilin Agric*, 2011, (1): 23.
- [22] 郑立新. 浅谈黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 测定中应注意的问题[J]. *粮食加工*, 2004, 29(4): 63–64.
- Zheng LX. Talking about the problems that should be paid attention to in the determination of aflatoxin B<sub>1</sub> [J]. *Grain Process*, 2004, 29(4): 63–64.
- [23] 王盛良, 韩承平. 双侧 TLC 法对食品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的检测[J]. *中国卫生检验杂志*, 1996, (1): 60–62.
- Wang SL, Han CP. Detection of aflatoxin B<sub>1</sub> in food by double-sided TLC [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 1996, (1): 60–62.
- [24] 尚瑛达, 曹素芳. 薄层色谱法测定黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 探讨[J]. *粮食与油脂*, 1993, (4): 50–51.
- Shang YD, Cao SF. Discussion on determination of aflatoxin B<sub>1</sub> by thin layer chromatography [J]. *Cere Oil*, 1993, (4): 50–51.
- [25] 张慧丽, 杨松, 苏君伟, 等. 黄曲霉菌感染花生的不同检测方法的应用[J]. *食品与生物技术学报*, 2013, 32(8): 868–874.
- Zhang HL, Yang S, Su JW, *et al.* Different detections on peanut infected by *aspergillus flavus* [J]. *J Food Biotechnol*, 2013, 32(8): 868–874.
- [26] 张鹏, 张艺兵, 赵卫东. 花生中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> 的多功能净化柱—高效薄层色谱分析[J]. *分析测试学报*, 1999, 18(6): 62–64.
- Zhang P, Zhang YB, Zhao WD. Multifunctional purification column of aflatoxin B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, G<sub>1</sub> and G<sub>2</sub> in peanut—high performance thin layer chromatography [J]. *J Instrum Anal*, 1999, 18(6): 62–64.
- [27] 叶雪珠, 王小骊, 赵燕申, 等. 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 检测方法的分析[J]. *食品与发酵工业*, 2003, 29(10): 90–92.
- Ye XZ, Wang XL, Zhao YS, *et al.* Analysis of determination methods of AFB<sub>1</sub> [J]. *J Food Ferment Ind*, 2003, 29(10): 90–92.
- [28] 李区. 黄曲霉毒素分析方法进展[J]. *广西水产科技*, 2005, (3): 16–19.
- Li Q. Progress in analytical methods for aflatoxins [J]. *Guangxi Fish Sci Technol*, 2005, (3): 16–19.
- [29] 李梅. 光化学衍生—高效液相色谱法测定大米中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 含量[J]. *粮食加工*, 2017, 42(6): 81–82.
- Li M. Determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in Rice by photochemical derivatization-high performance liquid chromatography [J]. *Grain Process*, 2017, 42(6): 81–82.
- [30] 姜兆兴, 曹旭, 李智瑾. 高效液相色谱法测定稻谷中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的研究[J]. *粮食与食品工业*, 2005, (6): 61–63.
- Jiang ZX, Cao X, Li ZJ. Determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in cereals by RP—HPLC [J]. *Cere Food Ind*, 2005, (6): 61–63.
- [31] 陈强胜. 高效液相色谱—柱后衍生法检测大米中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 方法分析[J]. *现代食品*, 2018, (15): 147–149.
- Chen QS. High performance liquid chromatography—post column derivative method for the detection of aflatoxin B<sub>1</sub> in Rice [J]. *Mod food*, 2018, (15): 147–149.
- [32] 程树峰, 唐芳, 伍松陵. 碘柱前衍生—高效液相色谱法快速测定粮食中黄曲霉毒素[J]. *粮油食品科技*, 2008, 16(6): 40–42, 55.
- Chen SF, Tang F, Wu SL. Rapid—determining aflatoxins in grain by HPLC with iodine precolumn derivatization [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2008, 16(6): 40–42, 55.
- [33] 卢朝婷, 林巧, 巩发永, 等. 高效液相色谱法(HPLC)检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的研究发展[J]. *南方农业*, 2015, 9(24): 174–176.
- Lu CT, Lin Q, Gong FY, *et al.* Development of high performance liquid chromatography (HPLC) for detection of aflatoxin B<sub>1</sub> [J]. *South Chin Agric*, 2015, 9(24): 174–176.
- [34] 唐菊, 周海珍, 王淑霞, 等. 食品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的液相色谱-串联质谱测定法[J]. *肉类工业*, 2014, (6): 24–26.
- Tang J, Zhou HZ, Wang SX, *et al.* Determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in food by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Meat Ind*, 2014, (6): 24–26.
- [35] 郑燕, 王远兴, 李瑾瑾. 液相色谱串联质谱法检测食品中的黄曲霉毒素[J]. *食品科学*, 2010, 31(24): 385–388.
- Zheng Y, Wang YX, Li JJ. Determination of aflatoxins in food by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Food Sci*, 2010, 31(24): 385–388.
- [36] 岳亚军, 张律, 朱波, 等. LC—MS/MS 法测定大米和食用油中的黄曲霉毒素[J]. *中国卫生检验杂志*, 2013, 23(9): 2046–2048.
- Yue YJ, Zhang L, Zhu B, *et al.* LC—MS/MS for determination of aflatoxin in rice and edible oil [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2013, 23(9): 2046–2048.
- [37] 赵晓联. 酶联免疫法在食品分析中的应用[J]. *卫生研究*, 1998, 27(2): 82–84.
- Zhao XL. Application of enzyme-linked immunosorbent assay in food analysis [J]. *Inst Health*, 1998, 27(2): 82–84.
- [38] 田素梅. 粮食中酶联免疫法和高效液相色谱法检测黄曲霉毒素探讨[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2012, 28(1): 53–56.
- Tian SM. Study on detection of aflatoxin by enzyme-linked immunosorbent assay and high performance liquid chromatography in food [J]. *Grain Oil Storage Technol Newsletter*, 2012, 28(1): 53–56.
- [39] 徐荣, 张佩华. 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的检测方法[J]. *湖南饲料*, 2018, (1):

- 38–39, 48.  
Xu R, Zhang PH. Method for detecting aflatoxin B<sub>1</sub> [J]. Hunan Feed, 2018, (1): 38–39, 48
- [40] 龚燕, 赵春城, 张东升, 等. ELISA 法检测五类食品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 前处理方法的改进研究[J]. 食品工业科技, 2003, 24(4): 82–84.  
Gong Y, Zhao CC, Zhang DS, *et al.* Improvement of pretreatment method for aflatoxin B<sub>1</sub> in five foods by ELISA [J]. J Food Ind Sci Technol, 2003, 24(4): 82–84.
- [41] 赵春城, 赵晓联, 蔡正森. 有机相萃取法消除 ELISA 法检测 AFB<sub>1</sub> 假阳性的研究[J]. 饲料工业, 2003, 24(3): 40–43.  
Zhao CC, Zhao XL, Cai ZS. Study on elimination of AFB<sub>1</sub> false positive by organic phase extraction and elimination of ELISA [J]. Feed Ind, 2003, 24(3): 40–43.
- [42] 王洁莲, 闫征, 刘俐君, 等. 应用 ELISA 检测小米中的 AFB<sub>1</sub>[J]. 农业技术与装备, 2013, (6): 38–39.  
Wang LJ, Yan Z, Liu LJ, *et al.* Detection of AFB<sub>1</sub> in millet by ELISA [J]. Agric Technol Equip, 2013, (6): 38–39.
- [43] 蔡正森, 钟文辉, 张东升, 等. ELISA 法和 HPLC 法检测粮油食品中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 含量的比较研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2004, 14(3): 302–304.  
Cai ZS, Zhong WH, Zhang DS, *et al.* Comparison of ELISA with HPLC in detection of aflatoxin B<sub>1</sub> in corn and vegetable oil foods [J]. Chin J Health Lab Technol, 2004, 14(3): 302–304.
- [44] 刘冬儿. 酶联免疫吸附分析法测定食品中的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>[J]. 食品工业科技, 2002, (10): 79–80.  
Liu DE. Determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in food by enzyme-linked immunosorbent assay [J]. J Food Ind Sci Technol, 2002, (10): 79–80.
- [45] 陈南. 黄曲霉毒素检测方法的若干问题[J]. 江西化工, 2009, (4): 9–11.  
Chen N. Some problems in the detection method of aflatoxin [J]. Jiangxi Chem Ind, 2009, (4): 9–11.
- [46] 刘晓玥, 侯亚楠, 吕丽卿. 饲料中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 快速筛查胶体金免疫层析检测方法应用研究[J]. 吉林农业, 2017, (18): 64–65.  
Liu XY, Hou YN, Lv LQ. Application of aflatoxin B<sub>1</sub> rapid screening for detection of colloidal gold immunochromatography in feed [J]. Jilin Agric, 2017, (18): 64–65.
- [47] 赵晓联, 龚燕, 孙秀兰, 等. 金标免疫层析法检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的方法[J]. 粮油食品科技, 2005, 13(6): 49–51.  
Zhao XL, Long Y, Sun XL, *et al.* Study on the methodology of gold labeled immunochromatographic strip assay for detection of AFB<sub>1</sub> in food [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2005, 13(6): 49–51.
- [48] Shim WB, Yang ZY, Kim JS, *et al.* Development of immunochromatography strip-test using nano colloidal gold antibody probe for the rapid detection of aflatoxin B<sub>1</sub> in grain and feed sample [J]. J Microbiol Biotechnol, 2007, 17(10): 1629–1637.
- [49] 邓省亮, 赖卫华, 许杨. 胶体金免疫层析法快速检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(2): 232–236.  
Deng SL, Lai WH, Xu Y. Study on gold immunochromatography assay for rapid detection of aflatoxin B<sub>1</sub> [J]. Food Sci, 2007, 28(2): 232–236.
- [50] 付学文, 王爱军. 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 测定方法概述[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(12): 187–189.  
Fu XW, Wang AJ. Aflatoxins B<sub>1</sub> outlined determination [J]. Food Res Dev, 2007, 28(12): 187–189.
- [51] Carlson MA, Barger CB, Velky JT. An automated, handheld biosensor for aflatoxin [J]. Biosens Bioelectron, 2000, 14(10): 841–848.
- [52] Ammidia NHS, Micheli L, Palleschi G. Electrochemical immunosensor for determination of aflatoxin B<sub>1</sub> in barley [J]. Anal Chim Acta, 2004, 520(1–2): 159–164.

(责任编辑: 于梦娇)

## 作者简介



马江媛, 硕士研究生, 主要研究方向为食品快速检测。  
E-mail: 442105546@qq.com



黄登宇, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品快速检测。  
E-mail: Huangdy1110@126.com