

我国花生黄曲霉毒素污染影响因素分析

王 龔^{1*} 管 乐¹, 韩紫怡¹, 李 可², 张晓峰²

(1. 浙江工业大学食品科学与工程学院, 杭州 310014; 2. 浙江省检验检疫科学技术研究院, 杭州 310016)

摘 要: 花生是我国重要的油料经济作物, 也是我国出口欧盟、日本等国家的主要农产品之一, 但其在收获后到出口这段时间内, 极易受到各种真菌的污染, 引起霉变、品质下降、黄曲霉毒素含量超标, 从而给食品安全造成极大隐患。黄曲霉毒素超标已成为制约我国花生产品出口的重要瓶颈因素, 给我国出口企业造成了巨大的经济损失。目前, 花生贮藏过程中黄曲霉毒素发生原因尚不完全明确, 本文主要分析了花生从收获到出口的贮藏、运输过程中, 环境因子、花生自身品质、食品包装材料等因素对黄曲霉毒素产生的影响, 为花生产品的出口在风险预警、监管与防控等方面提供一定的理论指导, 为科学制定花生贮藏、运输过程中黄曲霉毒素污染的防控措施奠定基础。

关键词: 花生; 出口; 黄曲霉毒素; 污染; 影响因素

Analysis on the influencing factors of aflatoxin contamination in peanut in China

WANG Yan^{1*}, GUAN Yue¹, HAN Zi-Yi¹, LI Ke², ZHANG Xiao-Feng²

(1. College of Food Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. Zhejiang Academy of Science & Technology for Inspection & Quarantine, Hangzhou 310016, China)

ABSTRACT: Peanut is an important oil cash crop in China, and also one of the important agricultural products exported to European Union, Japan and other countries. However, during the period from harvest to export, it is easily contaminated by various fungi, resulting in mildew, deterioration of quality and excessive aflatoxin content, which will bring great hidden dangers to food safety. Aflatoxin exceeding the allowed has become an important bottleneck factor restricting the export of peanut products in China, which has caused huge economic losses to the export enterprises. At present, the cause of aflatoxin during peanut storage is not completely clear, therefore, this paper mainly analyzed the effects of environmental factors, peanut quality, food packaging materials and other factors on the production of aflatoxin during the period of storage and transportation of peanut from the harvest to export, in order to provide some theoretical guidance for the export of peanut products in the aspects of risk warning, supervision and control, and lay the foundation for scientific formulation of aflatoxin pollution prevention and control measures in the process of peanut storage and transportation.

KEY WORDS: peanut; exports; aflatoxin; contamination; influence factors

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C02058)、十三五国家重点研发专项项目(2017YFC1600904)

Fund: Supported by the Key Research and Development Projects of Zhejiang Province (2021C02058), and the National Key Research and Development Projects in the 13th Five Year Plan (2017YFC1600904)

*通信作者: 王龔, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与质量安全。E-mail: wangyan062006@zjut.edu.cn

*Corresponding author: WANG Yan, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China. E-mail: wangyan062006@zjut.edu.cn

0 引言

花生作为一种重要的经济作物, 常用于生产制造油、糖果、糊状物等产品, 同时花生仁含有钙、碳水化合物、脂肪酸、纤维、磷、蛋白质和维生素等多种营养素, 使其具有较高的营养和商业价值, 因而成为了我国重要的出口农产品之一^[1]。花生被黄曲霉和黄曲霉毒素污染被认为是世界上最严重的食品安全问题之一^[2]。黄曲霉毒素均为二呋喃香豆素的衍生物, 主要有 B₁、B₂、G₁、G₂, 以及 2 种代谢产物 M₁、M₂。天然污染的食品中 B₁ 为最多, 且致癌性和毒性也最强。然而, 目前对花生类产品中黄曲霉毒素限量尚无统一规定, 导致各国制定不同的检验标准, 使得花生类产品贸易严重受限^[3]。

由表 1 可知, 日本的黄曲霉毒素最高限量为 10 μg/kg, 远低于我国规定的最高限量 20 μg/kg; 这说明日本对黄曲霉毒素的限量要求十分严格, 也是我国出口到日本的农产品在黄曲霉毒素这一限量指标上受阻的原因之一; 而欧盟在黄曲霉毒素的限量要求上更加严格细致, 将其细分为 B₁、B₂、G₁ 和 G₂, B₁ 限量为 2 μg/kg, B₁、B₂、G₁、G₂ 总量的限量是 4 μg/kg; 美国的标准限量虽然和中国相同, 但规定却为黄曲霉毒素总量, 而非仅针对 B₁ 而言。由此可见, 我国花生制品黄曲霉毒素限量标准与欧盟、日本、美国相比存在一定差距, 这是制约我国花生制品出口各国的重要原因, 因此引起了花生出口企业和国家海关出入境部门的高度关注。

出口花生常因为黄曲霉毒素超标问题而被召回、警告等, 而黄曲霉毒素主要由黄曲霉产生。黄曲霉是一种腐生真菌, 可感染花生、玉米、棉花和坚果等重要农作物^[7], 在收获之前, 黄曲霉可能会感染作物中的子实体或种子, 并产生几种有毒的次生代谢产物, 包括聚酮衍生的黄曲霉毒素、环视子酸等^[8]。在收获前或收获后立即入侵并产生毒素的真菌, 通常被称为野外真菌, 这与花生所种植的土壤、当地的气候、病虫害的侵染有一定的关系^[9]。在收获后造成花生污染的称为储藏真菌, 花生从收获后到出口的这段时间内被污染属于被储藏真菌污染, 而这段时间造成花生污染的因素主要可以分为 3 类: 环境因素^[10]、花生自身品质^[11]、食品包装材料^[12]。

黄曲霉菌的繁殖和黄曲霉毒素的形成与多种环境因

素和营养因素密切相关, 包括 pH、光照、温度、水分活性、养分有效性等^[13]。然而, 很难去准确描述一组有利于黄曲霉生长和黄曲霉毒素产生的条件, 因为不同种属的黄曲霉菌在不同的基质上都有其特定的最适生长和最适产毒条件, 而环境条件会直接影响黄曲霉毒素合成基因簇的表达, 或通过相关调控因子间接影响毒素合成过程^[14]。由于花生及以花生为原料生产的食品在人们饮食中的占比日益提高, 了解影响花生中黄曲霉毒素产生的环境条件也变得越来越重要, 而这对于预测花生的安全储存条件是十分必要的^[15]。与国内销售农产品不同, 出口农产品受贮运等因素的影响, 销售周期变长。但随着贮运时间的延长, 霉菌更容易侵染繁殖, 一旦温湿度条件适合, 真菌毒素就会大量积累。因此本文详细分析了收获后影响花生黄曲霉毒素污染的各种因素, 以期为花生的储藏和出口创造一个安全有利的条件。

1 收获后影响花生黄曲霉生长和产毒的主要因素

1.1 环境因素

1.1.1 水分活度

水分活度对花生中黄曲霉的生长有着重要的影响^[16]。黄曲霉在花生中生长的最低含水量为 8%~10%, 环境相对湿度为 82%, 而当籽粒含水量高 10%时容易产生黄曲霉毒素。堆放花生可以引起热量积聚和水分凝聚, 继而导致真菌生长和黄曲霉毒素污染。据报道, 未脱壳花生的最大储藏含水量为 9%, 而脱壳花生的最大储藏含水量为 7%。在这样的水分含量下, 如果将环境相对湿度保持在 70%, 温度保持在 25~27 °C 则可以保证花生安全储存 1 年左右^[17]。

李瑞芳等^[18]研究发现水分活度小于 0.8 时, 黄曲霉基本零生长, 而随着水活度的升高, 黄曲霉的生长越旺盛, 毒素合成量也随之增加。梁雅婷等^[19]发现, 当水分活度较低时, 水分子可以结合可溶物如糖、盐、蛋白质等, 而此时底物中没有可以利用的水分, 因此黄曲霉不能正常生长。路子显等^[20]研究发现水分活度与真菌生长和毒素合成呈显著正相关, 在水分活度为 0.7~0.75 时, 真菌不生长, 孢子萌发停止, 在水分活度小于 0.85 时, 真菌生长和孢子萌发较为缓慢。NORLIA 等^[21]研究了温度和水分对花生粕提取

表 1 我国黄曲霉毒素与主要国家的标准对比
Table 1 Comparison of standards of aflatoxin in China and other major countries

花生及其制品黄曲霉毒素最高限量/(μg/kg)	中国 ^[4]		欧盟 ^[5]		美国 ^[5]	日本 ^[6]
	B ₁	B ₁	B ₁ +B ₂ +G ₁ +G ₂	M ₁	总量	总量
直接食用	20	2	4	-	20	10
食用前经物理处理		8	15	-	20	10

注: -表示无此项。

物琼脂中 2 株黄曲霉生长速率的影响, 结果表明在温度为 20 °C, 水分活度小于 0.94 时, 2 种菌株均不能正常生长, 在温度为 30 °C, 水分活度为 0.98 时, 2 种菌株有最高的生长速率, 且方差分析表明水分活度对真菌生长和黄曲霉毒素的产生均有显著影响。刘肖等^[22]研究了水活度和温度对花生黄曲霉生长、黄曲霉毒素生物合成基因表达和黄曲霉毒素产生的影响, 结果表明, 当温度小于 20 °C, 水分活度小于 0.85 时, 黄曲霉生长速率较低, 在 28 °C, 水分含量为 0.96 时, 花生中的黄曲霉生长最快。实时荧光定量聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)分析表明, 在温度为 28 °C, 水分活度为 0.92 下, 黄曲霉毒素生物合成 25 个基因中有 16 个表达水平最高, 而在温度为 37 °C, 水分活度为 0.92 下, 只有 9 个基因有最高的表达水平。岳晓禹等^[23]建立了温度和水活度对黄曲霉生长的影响的函数模型, 结果发现, 当温度一定时, 水分活度越高, 其最大比生长速率越高, 最大菌落直径也最大, 当水分活度大于 0.90 时, 黄曲霉生长速率较快, 而当水分活度小于 0.90 时, 黄曲霉明显生长延缓。MEDINA 等^[24]研究了水活度与温度对黄曲霉转录组和黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁)产生的相互作用, 结果表明在 30 和 37 °C, 水分活度为 0.99 时, AFB₁ 的产量无显著性差异, 然而, 与 30 °C, 水分活度为 0.99 时相比, AFB₁ 在温度 37 °C, 水分活度 0.91 处有显著的增加。

关于水分活度对黄曲霉生长和毒素合成的影响已有很多报道, 由以上总结可知, 花生中水分活度对黄曲霉生长和产毒不尽相同。在温度一定时, 花生中黄曲霉生长与花生水分活度呈正相关, 即水分活度越大, 黄曲霉生长越旺盛, 而花生中黄曲霉产毒并不随水分活度增高而升高, 而是受温度的影响, 在不同的温度下, 有不同的最适产毒水分活度。

1.1.1.2 花生储藏温度

储藏温度对黄曲霉生长和产毒有很大影响^[25]。黄曲霉的生长温度为 8~42 °C, 其中最佳生长温度为 37 °C。温度显著影响黄曲霉的产毒, 其最佳产毒温度范围为 25~30 °C, 不同于其最佳生长温度。随着温度的升高, 黄曲霉产毒能力下降^[26]。YU 等^[27]的研究发现在 37 °C 的条件下, 培养基中的黄曲霉不完全产毒, 温度对黄曲霉毒素合成的影响与黄曲霉侵染的基质是直接相关的。通过不同基质培养黄曲霉, 随着温度的升高黄曲霉产毒都表现出先升高后降低的趋势, 都有一个最适温度, 温度对这种趋势的影响一般不依赖于培养基质^[26]。BAI 等^[28]研究发现黄曲霉在 28 °C 时产生的黄曲霉毒素最多, 在 37 °C 时几乎不产生。大多数研究从转录组的角度上, 揭示了相比 37 °C, 黄曲霉在 28 °C 下产生更多黄曲霉毒素的原因, 是由于生长温度的变化改变了 28 °C 和 37 °C 下黄曲霉的氨基酸代谢^[29]。在 KONG 等^[30]的研究中, 转录因子 *ROLA* 是控制黄曲霉毒素生物合成的潜在靶点, 它参与了真菌中疏水表面的粘附。在—

水活度和温度相互作用产生黄曲霉毒素 B₁ 的转录组研究中, 研究者发现转录因子 *ROLA* 在 30 °C 时明显下调, 而在 37 °C 时则显著下调^[24]。

储藏温度对黄曲霉毒素合成相关基因表达也会有一定的影响^[31]。多个转录组分析和实时荧光定量(real time-quantitative fluorescence polymerase chain reaction, RT-qPCR)实验结果表明, 温度对黄曲霉毒素合成基因簇基因的转录表达有着显著影响, 黄曲霉毒素合成基因簇调控基因和大多数结构基因在相对低温的条件下被诱导表达^[14]。GALLO 等^[32]研究了温度和水分对杏仁培养基黄曲霉基因表达和黄曲霉毒素生物合成的影响, 结果表明, 在 28 °C 和水分活度 0.96 时获得了真菌生物量和 AFB₁ 产量的最大积累, 在干燥的实验条件下, 在 20 °C 时未观察到黄曲霉生长和 AFB₁ 的产生, 温度对黄曲霉毒素的产生有关键影响, 它与诱导毒素生物合成结构基因(*aflD* 和 *aflO*)的表达密切相关, 但与毒素调控基因(*aflR* 和 *aflS*)的表达无关。吕聪^[33]研究了温度调控稻米上黄曲霉生长和产毒的机制, 结果显示, 低温 25 °C 可以促进产毒基因表达, 但由于低温影响基因转录过程中相关蛋白活性以及转录后期发生的基因修饰, 所以导致黄曲霉产毒量降低; 高温 37 °C 则抑制产孢基因及部分重要结构基因的表达, 从而阻抑毒素的生成。与水分活度 0.96 相比, 低水分活度 0.90 和高水分活度 0.99 时都降低了大部分产毒基因的表达, 从而导致 AFB₁ 合成显著减少。谢华里等^[34]研究建立了以黄曲霉菌为代表的丝状真菌的非靶标代谢组学方法, 并利用该方法研究温度对黄曲霉菌代谢的影响, 研究发现温度主要影响三羧酸循环、脂肪酸生物合成、糖代谢和氨基酸代谢等能量代谢通路以及黄曲霉毒素、曲酸、黄四阿尼酸、3a'-二聚吡咯吡啉生物碱等次生代谢通路。这表明温度通过影响上述代谢通路调控黄曲霉菌的生长和黄曲霉毒素、曲酸、黄四阿尼酸等次生代谢物的产生。由此可以看出温度对黄曲霉毒素合成的影响机制是一个多途径交互的复杂过程。

综上, 花生中黄曲霉最适生长温度和产毒温度不一致, 花生中最佳生长温度为 37 °C, 而最适产毒温度 28 °C。温度对黄曲霉产毒基因表达量的作用表现在影响其调控基因, 37 °C 下黄曲霉基因表达量不及 28 °C, 推测是因为温度较高时, 产孢基因的表达量不足以促进毒素的合成。

1.1.1.3 温度和水分活度双因素

温度和水分活度对黄曲霉生长的影响从来都不是独立的, 而是交叉相互作用的^[35]。GIZACHEW 等^[36]研究了真菌生长的温度、水活动和孵育期等条件, 通过线性回归模型表明, 真菌生长和 AFB₁ 产生均受到水分活度和温度的显著影响。结果表明黄曲霉和寄生曲霉产生 AFB₁ 的最适温度为 27 °C, 这 2 种真菌在水分活度为 0.99 时都可能产生高水平的 AFB₁。研究发现, 在温度为 28 °C、水分活度为 0.96 和 0.99 的条件下黄曲霉毒素合成基因簇中结构

基因 *afID* 和 *afIO* 的表达量较高^[37], AFB₁ 产量较高。NORLIA 等^[21]从花生中分离出了 2 株黄曲霉菌, 观察其生长和黄曲霉毒素的产生情况后, 模拟了其在花生粕提取物培养基(peanut meal extract agar, PMEAs)上随温度和水分活度变化, 菌落生长速率和毒素产生情况的变化规律。表 2^[21]给出了黄曲霉菌在 PMEAs 培养基上培养 21 d 后, 以菌落生长速率为指标, 温度和水分活度对总黄曲霉毒素产量的影响及方差分析。由表 2 知, 以下所有单一因素及其相互作用对黄曲霉菌株 A8R 和 A82R 的产毒均具有显著影响($P < 0.05$)。基于 F 值, 水分活度对黄曲霉毒素产量的影响最大, 其次是温度, 而温度和水分活度相互作用对黄曲霉毒素的影响最小。因此, 若能在储存过程中合理规避花生最佳产毒温度和水分活度, 可有效降低黄曲霉毒素的污染。

1.1.4 二氧化碳含量

MEDINA 等^[38]首次研究了温度、水分活度、二氧化碳(350、650、1000 mg/L) 3 个环境因子对黄曲霉生长、AFB₁ 产生以及对合成基因 *afID*、调控基因 *afR* 基因表达量的影响。研究发现在 37 °C, 水分活度为 0.97 和 0.95, 二氧化碳含量为 650 和 1000 mg/L 时, 黄曲霉毒素的产量会大大增加。GARCIA-CELA 等^[39]评估了非生物条件下, 呼吸时间和二氧化碳累积、干物质损失、以及黄曲霉毒素和环吡嗪酸积累的交互作用对带壳花生储存的影响。自然污染的花生和接种黄曲霉的花生在不同的水分活度和温度下储藏 7 d, 在较潮湿和较温暖的条件下, 二氧化碳的产生率增加, 在水分活度为 0.95 时, 真菌毒素污染率最大。这个结果表明二氧化碳的产生与真菌毒素的积累之间存在相关性^[39]。TANIWAKI 等^[40]研究了含有 80%二氧化碳和 20%氧气的气体环境对毛霉、尖孢镰刀菌、黄曲霉、青霉等真菌的影响, 结果表明在 80%二氧化碳和 20%氧气的气体环境下并未检测到黄曲霉毒素。在高二氧化碳和氧气时, 黄曲霉生长受限, 会抑制产孢和色素沉着。GIORNI 等^[41]研究了二氧化碳水平对黄曲霉生长和黄曲霉毒素产生的影响, 气体

实验表明, 用 25%的二氧化碳处理可以有效地减缓黄曲霉的发育, 但至少需要 50%的二氧化碳才能使黄曲霉毒素的合成显著减少。EIIIS 等^[42]对不同花生储藏温度、氧气和二氧化碳浓度下花生上黄曲霉毒素的积累进行检测, 数据回归分析表明, 储存温度和初始空间氧气浓度都是影响黄曲霉生长和黄曲霉毒素生产的重要因素, 并且黄曲霉可以在二氧化碳富集的大气中生长和产生黄曲霉毒素。

有研究表明, 粮油原料对二氧化碳有吸附作用, 在密封的袋子中吸附了二氧化碳的原料容易产生结块, 产生类似于抽真空状态, 能延缓花生的氧化酸败^[43]。KABAK 等^[44]研究表明由于产生真菌毒素的真菌是专性需氧菌, 因此通过气调保存, 例如加入二氧化碳、氮气、一氧化碳或二氧化硫等, 可以防止或减少真菌毒素的产生。据报道, 增加储存仓库中二氧化碳的浓度会显著减少黄曲霉毒素的产生^[15]。综上, 二氧化碳对黄曲霉毒素产生的影响与温度和水分活度是有一定联系的, 在一定范围内增加二氧化碳浓度就会抑制黄曲霉毒素的产生。

1.2 花生自身品质

1.2.1 花生品种

我国花生品种繁多, 有据可查的有 540 种, 优良品种有 30 多种^[45]。花生品种抗性会影响黄曲霉的侵染及黄曲霉毒素的产生, 而抗旱、抗病虫害的特性会间接影响花生品种对黄曲霉毒素的抗性^[46]。

花生对黄曲霉毒素污染的抗性分为抗侵染和抗产毒。花生收获后的黄曲霉侵染抗性由母体基因控制, 表现为一对主效基因和微效基因混合遗传的数量性状^[47], 主要受到花生种皮和果实完整性的影响; 而产毒抗性是受加性基因控制的数量性状。花生采后处理过程中带来的机械损伤, 为黄曲霉菌侵入、生长创造条件, 种皮的完整性能有效抵御黄曲霉的产毒^[48]。此外, 花生果壳和种皮的物理性质及其特有的生化物质在抵御黄曲霉菌侵染方面具有重要作用, 如花生果壳中木犀草素与白藜芦醇含量、种皮蜡层厚度等均具有抵御黄曲霉菌侵染的重要作用^[49]。

表 2 菌株(S), 温度(T)和水分活度(a_w)对黄曲霉菌总黄曲霉毒素产量影响的方差分析

Table 2 Variance analysis of the effects of strain (S), temperature (T) and water activity (a_w) on the total aflatoxin production of *A. flavus*

来源	自由度	均方差	F 值	自由度	均方差	F 值
S	1	35.09	37.89*	1	51.62	46.84*
T	4	576.03	622.09*	4	667.33	605.52*
a_w	6	1044.14	1127.63*	6	1232.37	1118.24*
$S \times T$	4	18.54	20.02*	4	29.89	27.13*
$S \times a_w$	6	12.06	13.02*	6	16.95	15.38*
$T \times a_w$	24	331.84	358.38*	24	388.16	352.21*
$S \times T \times a_w$	24	11.17	12.06*	24	16.09	14.60*

注: * $P < 0.05$ 表示差异显著。

王后苗^[49]研究了花生收获前黄曲霉毒素污染抗性及其与花生安全贮藏关系的分析, 结果表明: 不同花生品种(系)在生长期抵抗黄曲霉菌侵染或产毒能力不同, 中花 6 号和 J091 收获前黄曲霉菌侵染率较高, 但产毒量与其他材料相当, 表明收获前中花 6 号和 J091 具有一定水平的抗黄曲霉产毒抗性, 即收获前产毒抗性。收获前抗性与收获后抗性无相关性, 但收获前黄曲霉菌侵染率与贮藏花生的黄曲霉毒素含量显著正相关。王春玮等^[50]研究了黄曲霉侵染对不同品种花生生理特性的影响, 结果表明, 各花生品种的种皮内毒素含量随侵染时间增加而升高, 到最大值后保持稳定; 而籽仁中的毒素含量较低, 不同品种花生受侵染后毒素含量大小表现为高抗品种<普通品种<高感品种。杨文兰等^[51]的研究中说明不同品种间的花生黄曲霉感染率有所差异, 在生产上选用抗性强的花生品种是预防黄曲霉感染的主要方法。武林霞^[17]根据花生对逆境和病虫害的抗性, 将采集的花生品种对黄曲霉毒素的抗性分为高、中、低 3 类, 研究了超标与未超标样品中对黄曲霉毒素具有不同抗性的花生品种占比。在未超标的样品中, 黄曲霉毒素高抗品种占比较高(13.61%), 约为超标样品的 1.5 倍(8.51%); 中抗样品在未超标和超标样品中占比分别为 47.77%和 48.94%, 比例基本相当; 低抗品种在超标样品(42.55%)中占比稍高于未超标样品(38.61%)。综上, 花生品种对黄曲霉毒素的抗性影响了花生黄曲霉毒素的污染水平。

1.2.2 菌株产毒力

菌株产毒力也是影响黄曲霉毒素产生的一项重要指标^[52]。张杏等^[53]研究了中国西南花生产区黄曲霉菌的分布、产毒力及花生黄曲霉毒素污染的情况。菌株产毒力研究结果表明, 88.6%的菌株能产生黄曲霉毒素, 产毒类型以 B 族毒素为主, 尤其是 AFB₁, 而不产毒菌株仅占 11.4%, 远小于产毒菌株。

MAMO 等^[54]在关于控制花生中黄曲霉毒素的实地研究中发现, 使用不产黄曲霉毒素的黄曲霉菌株作为生物防治剂可以显著降低黄曲霉毒素污染。HULIKUBTE 等^[55]研究发现, 在田间花生种植阶段通过生物防治的手段, 使用非产毒黄曲霉菌株, 可以有效地排除产毒黄曲霉菌株。武林霞^[17]研究了超标与未超标样品中不同产毒力菌株(黄曲霉与寄生曲霉)的占比未超标样品中, 低产毒力菌株占比(33.33%)高于超标样品(23.08%), 中、高产毒力菌株均在超标样品中占比较多, 分别为 53.85%和 23.08%, 在未超标样品中占比分别为 50.00%和 16.67%。以上数据表明根系土壤菌株的产毒力会影响花生中黄曲霉毒素的污染水平。

1.3 食品包装材料

JOHN 等^[56]在 2019 年研究了不同包装材料对黄曲霉和寄生曲霉在贮藏花生中产生黄曲霉毒素 B₁ 的影响, 在低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)、聚丙烯

(polypropylene, PP)和聚乳酸-聚乙二醇共聚物[poly (lactic acid-polyethylene glycol) copolymer (pela), PELA] 3 种材料下培养黄曲霉, 并检测接种黄曲霉的花生仁中 AFB₁ 水平, 结果表明, 装在 PELA 中的花生仁产生的 AFB₁ 最低, 其次是 PP 和 LDPE。这是由于 PELA 材料具有多层结构和出色的热封性能, 在 3 种测试的包装材料中具有最佳的隔热和隔氧性能。PP 这种包装材料倾向于将热量保持在一定温度内, 从而为真菌生长和随后的 AFB₁ 污染创造了一个稍微有利的条件, 但观察到较低的 AFB₁ 水平可能是由于 PP 还具有出色的防潮性能和足够的水分氧气阻隔层, 这种水分和氧气的阻塞将进一步防止真菌繁殖和随后的毒素产生。LDPE 包装材料具有最低软化点和熔点, 它非常适合热封, 但防潮和防氧气性能最差, 从而为包装内的真菌增殖和随后的高毒产生提供了有利的微环境。MACRI 等^[57]研究了 4 种不同类型的塑料包装对花生贮藏期间黄曲霉毒素 B₁ 的影响, 测试的 4 种塑料薄膜分别是 LDPE、PP、聚乙烯(polyethylene, PE)和聚对苯二甲酸乙二酯(polyethylene terephthalate, PET)。结果表明, 用 LDPE 材料包装的花生中黄曲霉毒素 B₁ 的浓度最高, 其次是 PP、PE 和 PET。一般用 LDPE 包装和储存的花生更容易受到黄曲霉毒素的污染, 而 PET 更适合保持这些产品的质量和安全。

付晓记等^[58]研究了 4 种不同的包装材料密闭储藏花生, 对花生色泽、品质、发芽率、虫害和黄曲霉毒素防控效果的影响。结果表明, 不同包装材料储藏花生效果差异非常显著。铝箔袋包装花生种皮颜色在储藏期间没有发生变化, 尼龙/聚乙烯(nylon/polyethylene, PA/PE)薄膜袋包装花生的种皮颜色变化速度比 PE 膜缓慢, 编织袋包装的花生种皮颜色变化最快; 铝箔袋、PA/PE 复合膜密闭包装储藏 18 月后, 花生米品质依然保持较好; 铝箔袋密闭包装能长期保持花生发芽率较低; 4 种密闭包装方式抑制虫害繁殖作用差异显著, 高通透性的编织袋包装的花生害虫侵蚀严重, 而铝箔袋和 PA/PE 袋包装可以有效地抑制虫害的发生; 铝箔袋、PA/PE 复合膜包装花生米原料储藏 18 个月均没有黄曲霉毒素产生, 但是 PA/PE 复合膜包装的部分花生有明显霉菌滋生。陈红等^[59]探讨了包装材料对常温贮藏条件下花生耐贮性的影响, 结果表明, 包装对花生贮藏质量指标的影响非常显著。薄膜袋包装花生的红衣种皮颜色变化速度比编织袋和麻袋包装的缓慢; 薄膜袋较强的保水能力能够有效地防止花生水分散失; 但在贮藏初期, 密闭的薄膜袋包装环境易造成无氧呼吸, 引起花生种皮细胞膜结构和种胚损伤, 导致电导率急剧增大; 种皮是花生抵抗黄曲霉菌侵染的重要屏障, 因此, 薄膜袋包装的抗黄曲霉菌侵染能力低于编织袋和麻袋包装; 编织袋和麻袋包装花生的发芽率略高于薄膜袋包装; 3 种包装方式抑制虫害繁殖作用差异显著, 高通透性的编织袋和麻袋包装的花生害虫侵蚀严重, 而薄膜袋包装可以有效地抑制虫害的发生。同

时,更有研究表明,安全水分含量内的花生仁适合高阻隔性包装材料,较高水分含量的花生仁不适合用密闭性包装方式^[60]。因此,花生包装材料的选择可以根据花生对品质的要求来确定,如果花生储藏期较短,可以选择 PE 膜。若对花生外观和品质较高,可以选择阻隔性能更加良好的 PELA 膜或 PA/PE 复合膜。

2 结 论

本文综述了花生收获后引起花生黄曲霉菌及黄曲霉毒素污染的主要影响因素。研究发现,在花生收获后,造成其黄曲霉菌及黄曲霉毒素污染的主要影响因素有 3 类,分别是环境因素、花生自身品质以及食品包装材料。环境因素中,水分活度对花生黄曲霉毒素产量的影响最大,其次是温度,而温度和水分的相互作用对黄曲霉毒素的影响相对小,同时,气体组成与含量也是影响黄曲霉菌生长和产毒的重要因素。花生自身品质主要与花生品种及其种植时的田间菌株的产毒力有关。食品包装材料中使用 PELA、PA 等防潮和防氧性能较好的包装效果比较好,LDPE 效果稍差。因此,在经济允许并不影响农产品生产的情况下,使用高抗菌株生产抗侵染、抗产毒的花生可以在一定程度上降低后期储存过程中花生中黄曲霉毒素的污染。而在实际储存过程中,为了减轻花生中黄曲霉毒素污染,避免堆放造成热量的大量积累,实现更好的通风和热传递,可以在储存设施中使用适当的通风系统降低温度,采用 PELA 或 PP 等阻隔性能较好的塑料薄膜包装。

3 展 望

黄曲霉毒素污染会严重影响我国花生的质量安全,是制约我国花生出口各国的重要原因,但如何有效控制其污染仍然是一个世界性难题。花生收获后,在加工、贮运等产业链关键环节中,花生中黄曲霉毒素的产生与环境因素密切相关,影响其产生的环境因素主要是温度、湿度、气体等,因花生自身品质特性和微生物优势菌群的差异,不同环境条件下花生中产毒真菌的分布、发生和侵染过程不同,继而导致黄曲霉毒素不同程度的积累。已有的研究表明,开展花生黄曲霉毒素污染的产后预警是可行的,研究产后花生中不同因素对黄曲霉毒素产生的影响,以便在早期发现并及时有效地控制花生中黄曲霉毒素污染,也是未来黄曲霉毒素污染控制技术的一个新热点。目前,出口农产品质量安全体系建设相对薄弱,各国对花生类产品中黄曲霉毒素限量尚无统一规定,所以在实际生产中我们需要构建有效的黄曲霉毒素控制技术体系,定期抽样检查,及时发现储存中的问题,避免大规模的污染,切实提升花生产品的质量,以保障出口花生产品的质量安全。

参考文献

- [1] LI Z, TANG X, SHEN Z, *et al.* Comprehensive comparison of multiple quantitative near-infrared spectroscopy models for *Aspergillus flavus* contamination detection in peanut [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(13): 5671–5679.
- [2] KHAN SA, CHEN H, DENG Y, *et al.* High-density SNP map facilitates fine mapping of QTLs and candidate genes discovery for *Aspergillus flavus* resistance in peanut (*Arachis hypogaea*) [J]. *Theor Appl Genet*, 2020, 133(7): 2239–2257.
- [3] 孙玉鼎. 黄曲霉毒素检验标准下的中国花生类产品出口管理[J]. *经营管理者*, 2021, (2): 110–112.
SUN YD. The export management of China's peanut products under the inspection standard of aflatoxin [J]. *Manag J*, 2021, (2): 110–112.
- [4] 李俊玲, 王书舟, 吴俊威, 等. 河南省粮食及其制品中真菌毒素污染情况调查[J]. *中国食品卫生杂志*, 2020, 32(4): 418–421.
LI JL, WANG SZ, WU JW, *et al.* Investigation on mycotoxin pollution in grain and its products in Henan province [J]. *Chin J Food Hyg*, 2020, 32(4): 418–421
- [5] 尚艳娥, 杨卫民. CAC、欧盟、美国与中国粮食中真菌毒素限量标准的差异分析[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(1): 10–15.
SHANG YE, YANG WM. Analysis of the differences in the limit standards of mycotoxins in grain between CAC, EU, U.S. and China [J]. *J Food Sci Technol*, 2019, 37(1): 10–15.
- [6] 丁小霞, 李培武, 周海燕, 等. 黄曲霉毒素限量标准对我国居民消费安全和花生业的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2011, 33(2): 180–184.
DING XX, LI PW, ZHOU HY, *et al.* The impact of aflatoxin limit standard on consumer safety and peanut industry in my country [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 2011, 33(2): 180–184.
- [7] ARIAS RS, MOHANNED A, ORNER VA, *et al.* Sixteen draft genome sequences representing the genetic diversity of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* colonizing peanut seeds in Ethiopia [J]. *Microbiol Resour Ann*, 2020, 9(30). DOI: 10.1128/MRA.00591–20
- [8] GILBERT M, MEDINA A, MACK B, *et al.* Carbon dioxide mediates the response to temperature and water activity levels in *Aspergillus flavus* during infection of maize kernels [J]. *Toxins*, 2018, 10(1): 5.
- [9] MUTEKI CK, WAGACHA JM, CHRISTIE ME, *et al.* Effect of storage conditions on quality and aflatoxin contamination of peanuts (*Arachis hypogaea* L.) [J]. *Int J Agrisci*, 2013, 3(10): 746–758.
- [10] CASTANO SM, MEDINA A, MAGAN N. Comparison of dry matter losses and aflatoxin B₁ contamination of paddy and brown rice stored naturally or after inoculation with *Aspergillus flavus* at different environmental conditions [J]. *J Stored Prod Res*, 2017, 73.
- [11] 张杏. 中国典型花生产区黄曲霉菌分布、产毒力与侵染研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
ZHANG X. Study on the distribution, toxigenicity and infection of *Aspergillus flavus* in typical peanut producing areas in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [12] SHAKERARDEKANI A, KARIM R. Effect of different types of plastic packaging films on the moisture and aflatoxin contents of pistachio nuts during storage [J]. *J Food Sci Technol*, 2013, 50(2): 409–411.
- [13] 刘志婷, 池岚, 屠鸿薇, 等. 广东省稻谷中真菌毒素污染状况研究[J]. *中国食品卫生杂志*, 2020, 32(6): 654–659.
LIU ZT, CHI L, TU HW, *et al.* Study on mycotoxin pollution in rice in

- Guangdong province [J]. *Chin J Food Hyg*, 2020, 32(6): 654–659.
- [14] 邢福国, 李旭, 张晨曦. 黄曲霉毒素的产生机制及污染防控策略[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(1): 13–26, 64.
- XING FG, LI X, ZHANG CX. Biosynthesis mechanism and control strategies of aflatoxin [J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 39(1): 13–26, 64.
- [15] LASRAM S, HAMDI Z, CHENENAOU S, *et al.* Comparative study of toxigenic potential of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus niger* isolated from barley as affected by temperature, water activity and carbon source [J]. *J Stored Prod Res*, 2016, 69: 58–64.
- [16] LAHOUAR A, MARIN S, CRESPO-SEMPERE A, *et al.* Effects of temperature, water activity and incubation time on fungal growth and aflatoxin B₁ production by toxinogenic *Aspergillus flavus* isolates on sorghum seeds [J]. *Rev Argent Microbiol*, 2016, 48(1): 78–85.
- [17] 武琳霞. 中国花生黄曲霉毒素污染风险预警模型研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- WU LX. Researches on risk prediction model of aflatoxin contamination in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [18] 李瑞芳, 韩北忠, 陈晶瑜, 等. 黄曲霉生长预测模型的建立及其在玉米储藏中的应用[J]. *中国粮油学报*, 2008, 23(3): 144–147.
- LI RF, HAN BZ, CHEN JY, *et al.* Establishment of predictive model, for growth of *Aspergillus flavus* and its application in maize storage [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2008, 23(3): 144–147.
- [19] 梁雅婷, 晏石娟, 刘春明, 等. 黄曲霉毒素合成的影响因素概述[J]. *江苏农业科学*, 2013, (10): 255–256, 257.
- LIANG YT, YAN SJ, LIU CM, *et al.* Overview of the factors influencing the synthesis of aflatoxin [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2013 (10): 255–256, 257.
- [20] 路子显, 伍松陵, 孙长坡. 黄曲霉合成相关基因表达与环境因素的关系[J]. *生物技术通报*, 2010, (11): 56–61, 67.
- LU ZX, WU SL, SUN CP. The relationship of aflatoxin biosynthetic gene expression and environmental factors [J]. *Biotechnol Bull*, 2010, (11): 56–61, 67.
- [21] NORLIA M, JINAP S, NOR-KHAIZURA MAR, *et al.* Modelling the effect of temperature and water activity on the growth rate of *Aspergillus flavus* and aflatoxin production in peanut meal extract agar [J]. *Int J Food Microbiol*, 2020, 335: 108836.
- [22] LIU X, GUAN X, XING F, *et al.* Effect of water activity and temperature on the growth of *Aspergillus flavus*, the expression of aflatoxin biosynthetic genes and aflatoxin production in shelled peanuts [J]. *Food Control*, 2017, 82: 325–332.
- [23] 岳晓禹, 李自刚, 郝修振, 等. 主要生态因子对贮藏玉米中黄曲霉生长影响的模拟[J]. *农业工程学报*, 2013, (18): 269–276.
- YUE XY, LI ZG, HAO XZ, *et al.* Simulation of effect of main ecological factors on radial growth of *Aspergillus flavus* during storage period of corn [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, (18): 269–276.
- [24] MEDINA A, GILBERT MK, MACK BM, *et al.* Interactions between water activity and temperature on the *Aspergillus flavus* transcriptome and aflatoxin B₁ production [J]. *Int J Food Microbiol*, 2017, 256: 36–44.
- [25] ALDARS-GARCÍA L, RAMOS AJ, SANCHIS V, *et al.* Modelling the probability of growth and aflatoxin B₁ production of *Aspergillus flavus* under changing temperature conditions in pistachio nuts [J]. *Proc Food Sci*, 2016, 7: 76–79.
- [26] 刘肖. 花生储藏过程中水活度、温度对黄曲霉生长和产毒的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- LIU X. Impact of water activity and temperature on *aspergillus flavus* growth and aflatoxin production in stored peanuts [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [27] YU JJ, FEDOROVA ND, MONTALBANO BG, *et al.* Tight control of mycotoxin biosynthesis gene expression in *Aspergillus flavus* by temperature as revealed by RNA-Seq [J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2011, 322(2): 145–149.
- [28] BAI Y, WANG S, ZHONG H, *et al.* Integrative analyses reveal transcriptome-proteome correlation in biological pathways and secondary metabolism clusters in *A. flavus* in response to temperature [Z].
- [29] WANG P, CHANG P, KONG Q, *et al.* Comparison of aflatoxin production of *Aspergillus flavus* at different temperatures and media: Proteome analysis based on TMT [J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 310: 108313.
- [30] KONG Q, CHI C, YU J, *et al.* The inhibitory effect of *Bacillus megaterium* on aflatoxin and cyclopiazonic acid biosynthetic pathway gene expression in *Aspergillus flavus* [J]. *Appl Microbiol Biot*, 2014, 98(11): 5161–5172.
- [31] LV C, JIN J, WANG P, *et al.* Interaction of water activity and temperature on the growth, gene expression and aflatoxin production by *Aspergillus flavus* on paddy and polished rice [J]. *Food Chem*, 2019, 293: 472–478.
- [32] GALLO A, SOLFRIZZO M, EPIFANI F, *et al.* Effect of temperature and water activity on gene expression and aflatoxin biosynthesis in *Aspergillus flavus* on almond medium [J]. *Int J Food Microbiol*, 2016, 217: 162–169.
- [33] 吕聪. 水活度和温度调控稻米上黄曲霉生长和产毒的机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- LV C. Modulation mechanism of water activity and temperature on *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin production in rice [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [34] 谢华里, 李培武, 王秀媛, 等. 非靶标代谢组研究温度对黄曲霉菌代谢的影响[J]. *分析测试学报*, 2017, 36(11): 1304–1311.
- XIE HL, LI PW, WANG XP, *et al.* Study on effects of temperature on metabolism of *Aspergillus flavus* based on untargeted metabolomics [J]. *J Instrum Anal*, 2017, 36(11): 1304–1311, 1317.
- [35] PEROMINGO B, RODRIGUEZ A, BERNALDEZ V, *et al.* Effect of temperature and water activity on growth and aflatoxin production by *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* on cured meat model systems [J]. *Meat Sci*, 2016, 122: 76–83.
- [36] GIZACHEW D, CHANG C, SZONYI B, *et al.* Aflatoxin B₁ (AFB₁) production by *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* on ground Nyjer seeds: The effect of water activity and temperature [J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 296: 8–13.
- [37] 王刚, 王玉龙, 张海永, 等. 真菌毒素形成的影响因素[J]. *菌物学报*, 2020, 39(3): 477–491.
- WANG G, WANG YL, ZHANG HY, *et al.* Factors that affect the formation of mycotoxins: A literature review [J]. *J Fungi*, 2020, 39(3): 477–491.
- [38] MEDINA A, RODRIGUEZ A, SULTAN Y, *et al.* Climate change factors and *Aspergillus flavus*: Effects on gene expression, growth and aflatoxin production [J]. *World Mycotoxin J*, 2015, 8(2): 171–179.
- [39] GARCIA-CELA E, GARI SANCHEZ FJ, SULYOK M, *et al.* Carbon dioxide production as an indicator of *Aspergillus flavus* colonisation and aflatoxins/cyclopiazonic acid contamination in shelled peanuts stored under different interacting abiotic factors [J]. *Fungal Biol*, 2020, 124(1):

- 1-7.
- [40] TANIWAKI MH, HOCKING AD, PITT JI, *et al.* Growth and mycotoxin production by fungi in atmospheres containing 80% carbon dioxide and 20% oxygen [J]. *Int J Food Microbiol*, 2010, 143(3): 218-225.
- [41] GIORNI P, BATTILANI P, PIETRI A, *et al.* Effect of a_w and CO_2 level on *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin production in high moisture maize post-harvest [J]. *Int J Food Microbiol*, 2008, 122(1-2): 109-113.
- [42] ELLIS WO, SMITH JP, SIMPSON BK, *et al.* Growth of and aflatoxin production by *aspergillus-flavus* in peanuts stored under modified atmosphere packaging (map) conditions [J]. *Int J Food Microbiol*, 1994, 22(2-3): 173-187.
- [43] 刘光宪, 祝水兰, 周巾英, 等. CO_2 密闭贮藏对花生脂肪氧化及黄曲霉生长的影响[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(6): 197-200.
- LIU GX, ZHU SL, ZHOU JY, *et al.* Effect of peanut carbon dioxide sealed storage on fat oxidation and growth of *Aspergillus flavus* [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(6): 197-200.
- [44] KABAK B, DOBSON ADW, VAR I. Strategies to prevent mycotoxin contamination of food and animal feed: A Review [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2006, 46(8): 593-619.
- [45] 布衣. 花生的种类[J]. *农村实用技术*, 2013, (10): 50.
- BU Y. Types of peanuts [J]. *Appl Technol Rural Area*, 2013, (10): 50.
- [46] 刘宇. 花生(*Arachis hypogaea* L.) NBS 类抗病基因的克隆及黄曲霉侵染对花生的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- LIU Y. The cloning of peanut NBS resistance gene and the impact of *Aspergillus flavus* infection on peanut [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [47] 周桂元, 梁炫强. 花生抗黄曲霉侵染主微效基因分析[J]. *花生学报*, 2002, (3): 11-14.
- ZHOU GY, LIANG XQ. Analysis of major-minor genes conferring resistance to infection by *Aspergillus flavus* in peanut [J]. *J Peanut Sci*, 2002, (3): 11-14.
- [48] 姜慧芳, 任小平, 王圣玉, 等. 花生黄曲霉侵染抗性持久性及种皮完整性对产毒的影响[J]. *作物学报*, 2006, (6): 851-855.
- JIANG HF, REN XP, WANG SY, *et al.* Durability of resistance to *Aspergillus flavus* infection and effect of intact testa without injury on aflatoxin production in peanut [J]. *Acta Agron Sin*, 2006, (6): 851-855.
- [49] 王后苗, 潘婷, 魏杰, 等. 花生收获前黄曲霉毒素污染抗性及其与花生安全贮藏关系的分析[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 39(3): 58-62, 90.
- WANG HM, PAN T, WEI J, *et al.* Resistance to preharvest aflatoxin contamination in peanut and the relationship of the resistance with safe storage [J]. *J Yangzhou Univ (Agric Life Sci)*, 2018, 39(3): 58-62, 90.
- [50] 王春玮, 张廷婷, 陈凯, 等. 黄曲霉侵染对不同品种花生生理特性的影响[J]. *资源开发与市场*, 2012, 28(10): 865-867.
- WANG CW, ZHANG TT, CHEN K, *et al.* Effect of physiological traitson different peanut varieties treated with *Aspergillus flavus* [J]. *Res Dev Mark*, 2012, 28(10): 865-867.
- [51] 杨文兰, 马桂珍. 花生黄曲霉与其他寄生真菌的种群及动态分析[J]. *河北职业技术师范学院学报*, 2003, 17(3): 19-22.
- YANG WL, MA GZ. Population and dynamic analysis of *Aspergillus flavus* and other fungi in groundnut [J]. *J Hebei Norm Univ Sci Technol*, 2003, 17(3): 19-22.
- [52] 唐兆秀, 纪荣昌, 李光星, 等. 花生 *A.flavus* 菌株产毒性与致病性研究[J]. *福建农业学报*, 2000, 15(2): 19-22.
- TANG ZX, JI RC, LI GX, *et al.* Toxicogenicity and pathogenicity of groundnut *A. flavus* strain [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2000, 15(2): 19-22.
- [53] 张杏, 岳晓凤, 丁小霞, 等. 中国西南花生产区黄曲霉菌分布、产毒力及花生黄曲霉毒素污染[J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(5): 773-780.
- ZHANG X, YUE XF, DING XX, *et al.* Distribution and aflatoxin contamination by *Aspergillus flavus* in peanut from the southwest China [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41(5): 773-780.
- [54] MAMO FT, SHANG B, SELVARA JN, *et al.* Isolation and characterization of *Aspergillus flavus* strains in China [J]. *J Microbiol*, 2018, 56(2): 119-127.
- [55] HULIKUNTE MN, JAYAPALA N, PUTTASWAMY H, *et al.* Characterization of non-aflatoxigenic strains of *Aspergillus flavus* as potential biocontrol agent for the management of aflatoxin contamination in groundnut [J]. *Microb Pathogenesis*, 2017, 102: 21-28.
- [56] JOHN JM, JINAP S, HANANI ZAN, *et al.* The effects of different packaging materials, temperatures and water activities to control aflatoxin B1 production by *Aspergillus flavus* and *A. parasiticus* in stored peanuts [J]. *J Food Sci Technol*, 2019, 56(6): 3145-3150.
- [57] MACRI AM, POP I, SIMEANU D, *et al.* The occurrence of aflatoxins in nuts and dry nuts packed in four different plastic packaging from the romanian market [J]. *Microorganisms*, 2020, 9(1): 61.
- [58] 付晓纪, 幸胜平, 闵华, 等. 不同包装材料密闭储藏对花生品质影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(10): 118-122.
- FU XJ, XIN SP, MIN H, *et al.* Influence of packaging materials on storage property of peanut stored in air tight [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2017, 32(10): 118-122.
- [59] 陈红, 熊利荣, 王晶, 等. 包装材料对常温花生耐贮性的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 269-273.
- CHEN H, XIONG LR, WANG J, *et al.* Influence of packaging materials on storage property of peanut under normal temperature [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2012, 28(3): 269-273.
- [60] 林勇敢, 付晓纪, 周巾英, 等. 包装材料对不同水分含量花生贮藏效果影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(19): 331-334.
- LIN YG, FU XJ, ZHOU JY, *et al.* Effect of packaging materials on storage property of different moisture content peanut [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(19): 331-334.

(责任编辑: 于梦娇 郑丽)

作者简介



王 龔, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与质量安全。

E-mail: wangyan062006@zjut.edu.cn