

基于监测过氧化氢酶活性对储藏玉米 AFB₁ 污染的早期预警

Early warning of AFB₁ contamination in stored
maize by monitoring catalase activity

张耀磊

翟焕趁

张帅兵

蔡静平

ZHANG Yao-lei ZHAI Huan-chen ZHANG Shuai-bing CAI Jing-ping

(河南工业大学生物工程学院, 河南 郑州 450001)

(College of Bioengineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:早期预警是防控储藏玉米污染黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁) 的重要手段。将不同含水量的玉米置于各种温度环境下进行储藏试验,研究过氧化氢酶活性变化与玉米污染黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁) 的关系,结果表明,两者数据变化的趋势一致, AFB₁ 是过氧化氢酶活性的二次曲线函数(相关性系数大于 0.95)。储藏温度和玉米含水量等条件可改变所含霉菌产生 AFB₁ 和升高过氧化氢酶活性的速度,但不影响数值变化的趋势。在各种储藏条件下,过氧化氢酶活性变化可比玉米中 AFB₁ 含量显著变化的起始点提前 4~21 d。因此,借助检测过氧化氢酶活性的方法可以早期预警储藏玉米污染 AFB₁。

关键词:玉米;过氧化氢酶; AFB₁; 预警; 储藏

Abstract: The early warning is significant for preventing stored maize from aflatoxin B₁ (AFB₁) contamination. To reveal the relationship between the change of catalase activity and AFB₁ contamination in stored maize, the storage experiments of maize were carried out at different temperatures and moisture contents. The results showed the increasing trend of catalase activity and contaminated AFB₁ was accordant, which displayed a quadratic equation with the correlation coefficient of more than 0.95. The rates of catalase activity increase and AFB₁ production by mould in maize could be affected by storage temperature and maize moisture content, but their increasing trend was not changed. Moreover, it was found that catalase activity increase 4 to 21 days before the significant increase of AFB₁ content

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号: 2013CB127804); 河南省教育厅自然科学项目(编号: 14A180004); 河南省高校科技创新团队支持计划(编号: 15IRTSTHN019)

作者简介: 张耀磊,男,河南工业大学在读硕士研究生。

通信作者: 翟焕趁(1975—),女,河南工业大学讲师,博士。

E-mail: huanchenzhai@126.com

蔡静平(1957—),男,河南工业大学教授,硕士。

E-mail: caijp163@163.com

收稿日期: 2016-10-25

under each maize storage condition. Therefore, the early warning of AFB₁ contamination in stored maize could be achieved by the detection of catalase activity of mould in stored maize.

Keywords: maize; catalase; aflatoxin B₁; early warning; storage

玉米是中国主要的粮食作物,同时也是主要的工业和饲料原料。中国玉米的种植面积和总产量仅次于美国,居世界第二位^[1]。与小麦及稻谷相比,玉米的胚部占比大,吸湿性强,容易受到霉菌的侵袭^[2]。虽然玉米种植期间容易受镰孢霉等病原菌的危害而污染脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)、玉米赤霉烯酮(ZEN)等真菌毒素^[3],但当玉米收获转入储藏环节后,腐生型的黄曲霉菌很容易在玉米籽粒上生长。研究^[4-5]表明,玉米是黄曲霉菌产生黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁) 最适合的基质之一,一旦玉米储藏条件符合黄曲霉菌产毒的要求,就会导致 AFB₁ 的污染。据中国部分地区真菌毒素污染状况调查^[3],国内近 10 个主要玉米生产地区黄曲霉毒素污染率达到了 92.3%,超标率达 13.8%。玉米易污染毒素的特性对人和动物的食用安全形成严重的威胁,世界各地每年均有食用毒素污染玉米导致严重中毒的报导^[6-7]。

根据食品安全的相关法规, AFB₁ 超标的玉米不得直接作为食品和饲料的原料,必须经过去除毒素处理才能被利用。近几年,国内外在黄曲霉毒素削减或降解处理方面投入了大量的人力和物力进行研究,取得了可喜的成就,如生物发酵法^[8-9]、酶学降解法^[10]、臭氧氧化法^[11]、机械去除法^[12] 等均可以有效地降低玉米中的毒素含量。但这些减毒的处理均要提高玉米的价格成本,且可能改变玉米的性状或原用途,因此,防控黄曲霉毒素危害最经济和安全的方法是避免玉米被毒素污染。

对储藏玉米进行霉菌活动监测是防控黄曲霉菌产毒的有效方法。当发现玉米中有潜在产毒可能的真菌活动时,及时发出储粮安全预警,利用通风、干燥等技术对储藏玉米进

行降温、去湿处理,即可有效遏制黄曲霉菌等产毒霉菌的生长、代谢,从而消除 AFB₁ 污染的威胁。这方面目前已经有较多相关的基础性研究,有些在实际应用中展示出良好的效果^[13-14]。例如,通过检测粮堆中 CO₂ 含量变化对玉米可能产生黄曲霉毒素进行预警^[15],利用好氧性微生物体内过氧化氢酶活性值的变化反映其生理活动状态对微生物的生长进行预测等^[16-17]。这些方法通过间接的检测指标了解粮食中微生物活动状态,在检测的灵敏度和检测数据的稳定性方面比传统的微生物检测方法及现有国家大型粮库使用的粮情检测方法有较好的改进。过氧化氢酶与好氧性微生物生长的相关性已经有较多的研究^[17],但尚不明确玉米所含真菌过氧化氢酶活性变化与污染 AFB₁ 的联系。本试验主要研究储藏玉米所含霉菌细胞中过氧化氢酶的特性,试图构建酶活性变化与黄曲霉菌产生 AFB₁ 的直接关系,通过监测过氧化氢酶活性的变化,分析、判断玉米储藏期间污染 AFB₁ 的风险程度,旨在为玉米安全储藏的早期预警提供基础性数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

玉米样品:河南当年产玉米,购于郑州粮食市场;
黄曲霉毒素 B₁ 酶联免疫定量试剂盒:江苏苏微微生物研究有限公司;
过氧化氢等其他试剂,分析纯,市售。

1.2 试验仪器

过氧化氢酶活性检测仪:SK.WJH-2 型,成都华粮仓储设备有限公司;
酶标仪:DNM-9606,北京普朗新技术有限公司;
恒温恒湿培养箱:KMF720 型,德国 binder GmbH 公司;
净化工作台:SW-CJ-2F 型,苏州净化设备有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 玉米的水分调节和模拟储藏 将玉米放置在洁净的容器内,根据试验水分的要求,定量喷洒无菌水至玉米表面,然后放置 4℃ 冰箱内使水分逐渐吸收,并达到籽粒的水分平衡,该过程一般为 36~48 h。然后将玉米分装在容器内,瓶口用浸泡有保湿剂的 10 层纱布封口,放置在调节到所需温度和相对湿度的恒温恒湿培养箱中进行模拟储藏(玉米颗粒表面自然携带有黄曲霉菌)。

1.3.2 霉菌带菌量检测 称取 25 g 玉米,置于含 225 mL 无菌水和玻璃珠的具塞三角瓶中,在振幅大于 5 cm 的振荡器中高速震荡 30 min,制成 10⁻¹ g/mL 浓度菌悬液,将其分别稀释到 10⁻²~10⁻⁶ 稀释度,取各稀释梯度菌悬液 1 mL 加入到无菌平皿,同时加改良察氏培养基,每个稀释度做 3~5 个重复,28℃ 培养,5 d 菌落计数,7 d 对菌落进行菌种鉴定。

1.3.3 过氧化氢酶活性检测 称取待测玉米样品 100 g,用无菌水分 3 次振荡洗涤,定容制得 500 mL 菌悬液。将待测菌悬液加入到过氧化氢酶活性检测仪的反应室后加热,当检测液温度升高到 30℃ 时,加入 10 mL 30% 的 H₂O₂,然后密闭反应室上盖开始检测。10 min 后仪器显示器显示测量的过氧化氢酶活性检测值。过氧化氢酶活性检测单位(U):由

传感器检测反应容器中过氧化氢酶催化分解 H₂O₂ 产生的氧气,当传感器产生 1 μA 的电流时定义为 1 过氧化氢酶活性单位。

1.3.4 黄曲霉毒素 B₁ 检测 使用黄曲霉毒素 B₁ 酶联免疫定量测试盒进行检测。依据固相酶联免疫吸附(ELISA)原理,通过抗黄曲霉毒素 B₁ 抗体与酶标抗原、待测抗原的竞争免疫反应以及酶的催化显色反应相结合来检测黄曲霉毒素 B₁。

1.3.5 水分测定方法 按 GB/T 5497—1985 执行。

1.3.6 数据处理方法 使用 SPSS 17 软件和 EXCEL 软件。

2 结果与分析

2.1 玉米储藏过程中过氧化氢酶与 AFB₁ 变化的相关性

现有研究^[16-17]表明,在粮食储藏期间生长的霉菌均具有过氧化氢酶阳性的特征,通过检测粮食洗涤液的过氧化氢酶活性,可以了解霉菌生长活动的状况。Zhai 等^[15]对有霉菌生长的玉米进行黄曲霉菌和 AFB₁ 含量监测,结果显示无论储藏玉米中黄曲霉菌是否为优势菌,只要玉米中有霉菌的显著活动,AFB₁ 含量就会以不同的速率增加。这些研究结果提示,即使过氧化氢酶与黄曲霉菌代谢产生 AFB₁ 没有直接的联系,但仍有可能对玉米储藏期的 AFB₁ 污染进行间接的监测。

对不同性状的玉米进行 AFB₁ 产毒试验,跟踪监测玉米洗涤液的过氧化氢酶活性和玉米中 AFB₁ 含量的变化,研究玉米污染 AFB₁ 与过氧化氢酶活性变化的相关性,结果表明(表 1),对于不同的玉米品种、储藏条件,各试验组黄曲霉菌产生 AFB₁ 的速率及最终玉米被毒素的污染量均有较大的差异。比较 AFB₁ 含量和酶活性值的变化数据,可发现 AFB₁ 含量变化幅度高的试验组过氧化氢酶活性变化也更大,两者具有相同的变化趋势,但两组数据显然不是线性关系。通过对 AFB₁ 和酶活性变化数据进行曲线拟合,发现各试验组数据均可拟合出相关性系数达到 0.95 或更高的二次曲线方程。这与前期研究^[17]发现真菌过氧化氢酶活性伴随着真菌的生长而升高,两者呈现线性关系的现象不同;导致玉米污染 AFB₁ 和过氧化氢酶活性变化呈二次曲线函数关系的原因是多方面的,其中主要有两个方面:① 真菌毒素属次生代谢产物,在真菌生命过程的后期形成,时间上显著迟后于真菌的菌丝体生长;② 玉米中所有可生长的霉菌均可产生过氧化氢酶,即使黄曲霉菌不生长,干生性的灰绿曲霉生长也会使酶活性缓慢升高。尽管如此,真菌菌丝的生长、AFB₁ 的产生与其酶活性变化趋势是一致的,因此利用过氧化氢酶活性变化间接衡量真菌毒素产生的设想是合理的,只要进行充分的试验,建立一系列如表 1 所示的曲线方程,即有可能计算或预测某一条件下玉米中 AFB₁ 可能的污染量,评估玉米储藏的风险程度。

2.2 玉米储藏条件对过氧化氢酶活性及 AFB₁ 含量变化的影响

2.2.1 玉米水分的影响 储藏玉米的含水量是影响霉菌生长和产毒的主要因素。将不同含水量玉米置于 25℃ 条件下储藏,结果表明(图 1),各试验组玉米中的霉菌生长产毒及相

表 1 过氧化氢酶活性变化与 AFB₁ 含量变化的关系[†]Table 1 Relationship between the change of catalase activity and AFB₁ contamination in stored maize

储藏时间/ d	AFB ₁ / ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	过氧化氢酶 活性/U	拟合曲线方程	相关性 系数(<i>r</i>)
42	0.2~2.2	0~355	$y=3.0 \times 10^{-5}x^2-3.7 \times 10^{-3}x+0.3$	0.98
42	0.2~5.9	0~502	$y=4.0 \times 10^{-5}x^2-1.6 \times 10^{-2}x+0.4$	0.96
28	0.5~50.3	0~645	$y=8.0 \times 10^{-5}x^2+2.4 \times 10^{-2}x+0.6$	0.95
28	0.5~105.0	0~787	$y=-8.0 \times 10^{-5}x^2+0.2x-10.5$	0.96
35	0.4~320.0	0~825	$y=-2.0 \times 10^{-4}x^2+0.5x-44.7$	0.96
28	0.4~996.0	0~839	$y=-2.1 \times 10^{-3}x^2+3.1x-116.9$	0.96

[†] 曲线方程中 x 为过氧化氢酶活性值, y 为 AFB₁ 含量。

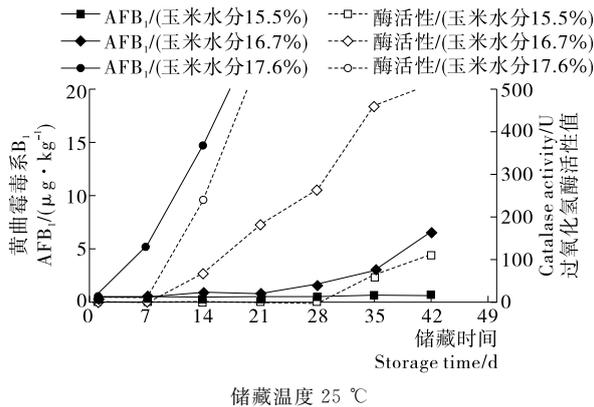


图 1 玉米含水量对过氧化氢酶活性及 AFB₁ 含量变化的影响

Figure 1 Effects of maize moisture content on changes of catalase activity and AFB₁ production

应的过氧化氢酶活性变化差异非常显著($P < 0.01$)。玉米储藏 14 d 时,15.5% 含水量组过氧化氢酶活性和 AFB₁ 含量数据均无显著变化,16.7% 含水量玉米组可检出过氧化氢酶活性显著增高,17.6% 水分组玉米则两项指标均发生显著变化,过氧化氢酶活性从零检出增加到 240 U, AFB₁ 含量从检测阴性增加到 14.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。对两种方法检测的结果进行比较还可发现,在整个玉米储藏试验期间,3 个含水量玉米试验组过氧化氢酶活性的日均变化率分别为 2.6,12.2,19.4 U, AFB₁ 含量日均增加速率分别为 0.0,0.2,1.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$,显然,在储藏玉米含水量发生变化的状态下,检测洗涤液过氧化氢酶活性相比直接检测 AFB₁ 可更加精确地细分储藏过程中的量值变化,两者的数值波幅相差近 10 倍,这一特性对评估玉米储藏污染 AFB₁ 风险有重要的意义。

从图 1 还可看出,玉米含水量为 15.5% 时, AFB₁ 含量 42 d 一直维持不变,过氧化氢酶活性在储藏至 28 d 后开始显著升高,两者似乎没有完全对应。检测 15.5% 水分玉米所含的霉菌菌群特征,发现储藏至 28 d 后玉米中主要优势菌为灰绿曲霉,这些霉菌属于干生性的霉菌,它们的生长使过氧化氢酶活性缓慢升高。Zhai 等^[17] 的研究认为,干生性霉菌本身不产毒,但这些霉菌可作为储粮的先导性生长菌群,通过它们的生长改变储藏粮食的生态,使玉米中所含的菌群发生演替,形成黄曲霉等霉菌可生长的环境,从而可能在更长

的储藏期后产生 AFB₁ 或其他毒素。鉴于过氧化氢酶活性检测对于玉米污染 AFB₁ 先导性生长霉菌的高灵敏响应,赋予该方法对玉米常规储藏污染 AFB₁ 具有可靠、灵敏的预警特性。可满足粮库储粮实践中对具有安全水分玉米进行储藏监测的需要。

2.2.2 温度的影响 对于含水量较高的玉米,各类霉菌均可在常规储藏的温度范围内生长。不同的温度可显著影响霉菌生长和代谢的速度,从而对霉菌的过氧化氢酶活性和产生 AFB₁ 有同步的影响。由图 2 可知,在设定的玉米水分条件下(17.0%),较高的温度更适合霉菌产生 AFB₁,在 30 °C 和 35 °C 条件下储藏 7 d 时玉米中的毒素含量分别增加到 4.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 2.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$,25 °C 条件下玉米储藏 35 d 后 AFB₁ 含量才增加到 3.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。尽管各种温度条件对过氧化氢酶活性变化和 AFB₁ 含量增加速率影响的差异性较大,但其影响的方向是完全一致的。数据的相关性分析结果显示,在 42 d 监测试验中,25~35 °C 的温度条件在不同的时间点产生 AFB₁,与各时间点过氧化氢酶活性变化数据的相关性系数大于 0.95,说明在不同的温度条件下,过氧化氢酶活性与 AFB₁ 含量变化具有相同的变化规律。

将玉米储藏在 20 °C 条件下,过氧化氢酶活性在储藏至 28 d 时出现显著升高($P < 0.05$)(图 2),主要是玉米中一些适合低温环境的青霉菌等菌群生长所致,但在较低温度环境下

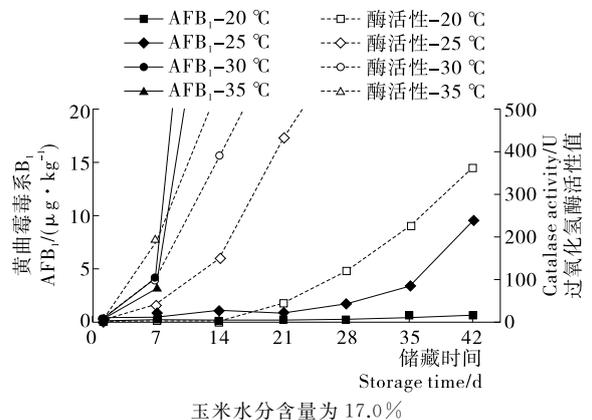


图 2 储藏温度对过氧化氢酶活性值变化及 AFB₁ 含量变化的影响

Figure 2 Effects of storage temperature on changes of catalase activity and AFB₁ production

黄曲霉菌也会缓慢的生长,一般黄曲霉菌产毒的起始温度在12℃左右。在本试验中,20℃试验组玉米产生AFB₁的时间延迟到第56天,表明只要在霉菌可生长的温度范围,储藏玉米就存在污染毒素的概率。因此,与AFB₁无关的青霉菌生长可显示储藏玉米具备霉菌可生长的环境,间接预警储藏的安全风险。在实际应用中,可将过氧化氢酶活性变化与环境温度等因素结合,量化评估玉米储藏的安全性,对储粮处理方案进行科学决策。

2.3 利用过氧化氢酶活性变化预警玉米污染AFB₁的特性和方法

在常规玉米储藏的条件下,受环境湿度或粮堆微环境湿热扩散等因素的影响,玉米可能因籽粒外层含水量的升高而导致霉菌的生长,这个过程通常比较缓慢,如果在霉菌产毒前发现预警信号,只需几天的粮仓常规通风或降温等方法处理,就能有效遏制玉米污染AFB₁[2]。

由表2可知,在不同的储藏条件和玉米基质中,AFB₁的产生和过氧化氢酶活性变化速率均有较大的差异,但在无论在哪一种储藏条件下,过氧化氢酶活性的变化始终先于AFB₁的产生。在6组试验中,过氧化氢酶活性出现显著升高(P<0.05)的时间比AFB₁含量显著增加(P<0.05)的时间分别提前4~21d,比玉米中AFB₁达到食品安全临界点的20μg/kg分别提前6~42d。这一时间提前量可以满足对具有染毒风险玉米进行控制处理的需求。比较表2的各组数据还可发现,产毒速率越慢的试验组霉菌产毒与酶活性变化的数值差异越大,这一特性有其独特的价值。实仓储藏的粮食一般原始水分均会符合安全储藏要求,但在储藏期间受吸湿等多种因素影响而引发霉菌的缓慢生长,在这种情况下,储粮中霉菌的呼吸、代谢作用较弱,没有明显的产热和产生二氧化碳的现象,现有检测粮温和粮堆二氧化碳浓度等监测方法对其活动难以有显著的反应,因此,检测过氧化氢酶活性变化的方法可弥补现有各种储粮监测方法的缺陷。

由于霉菌合成AFB₁与过氧化氢酶活性变化的关系是非线性的,增加了根据过氧化氢酶活性推导玉米毒素污染量的难度。虽然根据储藏的温度、玉米水分含量等参数可以找到过氧化氢酶活性变化预测AFB₁的关系(见图1、2),但实际应用时当粮堆温度、相对湿度等参数发生复杂变化时将增大

表2 过氧化氢酶对储藏玉米AFB₁变化的响应特性
Table 2 Respond characteristics of catalase activity on AFB₁ contamination of stored maize

AFB ₁ 含量显著增加的时间/d	酶活性显著升高的时间/d	AFB ₁ 显著升高时酶活性值/U	AFB ₁ 达到20μg/kg的时间/d	AFB ₁ 达到20μg/kg酶活性值/U
5	1	155	7	391
7	1	170	10	276
8	2	218	10	280
9	3	200	10	260
12	4	227	18	400
28	7	463	49	1 024
35	14	704	56	1 276

检测的误差。因此,需要构建一个有效的预警程序。对不同储藏条件玉米进行产毒试验,检测过氧化氢酶活性变化,并对数据进行回归分析,结果表明(表3),尽管各玉米储藏试验组之间的霉菌产毒速率差异高达1.5万倍,但在玉米AFB₁含量变化期间过氧化氢酶活性变化呈现线性关系,试验数据与函数式的相关性系数大于0.95。进一步分析过氧化氢酶活性变化的特征,发现在一个时间段中过氧化氢酶活性的增速决定线性方程的参数,只要计算出某一定时间段的过氧化氢酶活性增加速率,即可在表3中找到适用的线性方程,可利用该函数式简单地计算出未来任何时间点预测的酶活性值。有了这种方式,就可以正确地选择过氧化氢酶活性与AFB₁的二次曲线函数式,预测玉米污染AFB₁的趋势。

表3 玉米污染AFB₁期间过氧化氢酶活性的变化规律
Table 3 Regularity of catalase activity changes in maize contaminated by AFB₁

储藏42d AFB ₁ 含量/(μg·kg ⁻¹)	过氧化氢酶活性(y)与储藏时间(x)的函数关系	酶活性检测值与函数式的相关系数(r)	过氧化氢酶活性增速/(U·d ⁻¹)
0.3±0.2	y=4.6x-5.2	0.96	<5
0.6±0.2	y=8.2x-2.5	0.98	5~10
2.2±0.5	y=12.2x-6.1	0.99	10~20
7.6±1.2	y=27.8x-74.9	0.98	20~30
167.8±12.0	y=32.4x-44.6	0.96	30~50
4 500.0±58.2	y=76.7x-128.7	0.98	>50

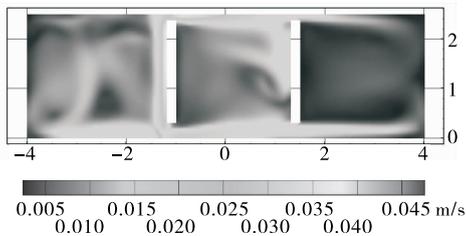
3 结论

过氧化氢酶活性值可反映玉米中霉菌的生理活动状态,与玉米储藏期间污染AFB₁可以建立间接的联系。在不同的储藏条件和各种产毒特性下,可以拟合出一系列AFB₁产生量与过氧化氢酶活性值变化的二次函数式,这是进行玉米污染AFB₁预警的基础。在储藏温度和玉米含水量不变的条件下,可以根据预先试验获得的酶活性与AFB₁变化关系曲线评估玉米储藏的风险,其准确性、稳定性和灵敏度均可满足保障玉米安全储藏的要求。

在常规储藏条件下,玉米霉变的发生源于含水量和储藏温度的变化,为了对玉米污染AFB₁进行预警,需要监测过氧化氢酶活性的变化,先根据酶活性的变化速率确定适用的过氧化氢酶活性变化线性方程,然后计算出一定时间后的过氧化氢酶活性变化预测值,找到相匹配的酶活性值与AFB₁产生量函数式,计算出玉米储藏安全最高容许的过氧化氢酶变化峰值,通过控制玉米的储藏温度和含水量达到遏制污染AFB₁超标的目标。

当然,玉米的储藏条件有大量的组合,而且可能处于变化状态;玉米品种、品质等因素也可能影响黄曲霉菌产毒的速率。因此,要确保玉米储藏的安全性,还需研究更多的影响参数,通过系统的试验构建完善的数据库,实现对玉米污染AFB₁的准确预警。

(下转第121页)

图 7 $x=1$ 截面速度分布云图Figure 7 Velocity contour in cross-section of $x=1$

6 结论

冷藏运输车供冷受限于驱动条件,一般功率较小,因此,保证温度均匀,合理分配冷量是气流组织过程的重点内容,本研究结论如下:

(1) 多温区冷藏车中靠近出风口最近的冷间流场流速分布不均匀,中间区域温度较高,气流组织过程中应采用导流手段使中间区域流速增加。

(2) 沿车厢宽度方向温度分布中间低,两端高,在布置风口时可以采用多个风口在宽度方向平均分配的方式,有利于宽度方向温度均匀。

(3) 本研究基于空载工况下,考虑实际工况食品的冷藏要求,建议冷风机出风速度在 $1\sim 5$ m/s 左右。

(4) 适当增加冷冻室长度,使冷冻间、冷藏间和常温间之间沿车长方向长度保持合理比例,避免冷气冲击隔板产生摩擦热量,有利于冷却出风口下部区域。

(5) 出风口方向可以适当向上倾斜,有利于沿车长方向冷空气均匀分布。

(6) 冷间之间尽量采用导热系数小的隔板,更有利于保持温度分区。

参考文献

- [1] 于学军. 冷冻冷藏食品贮藏与运输[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 25-28.
- [2] LIU Ming, BRUNO F, SAMAN W. Thermal performance analysis of a flat slab phase change thermal storage unit with liquid-based heat transfer fluid for cooling applications [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(11): 3 017-3 027.
- [3] LIU Ming, SAMAN W. Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material [J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 336-342.
- [4] ORO E, MIRO L, FARID M M, et al. Thermal analysis of a low temperature storage unit using phase change materials without refrigeration system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(6): 1 709-1 714.
- [5] ORO E, MIRO L, FARID M M. Improving thermal performance of freezers using phase change materials [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(4): 984-991.
- [6] 张哲, 田津津. 冷藏车内部流场的数值研究[J]. *低温与超导*, 2009, 37(8): 59-61.
- [7] 郭嘉明, 陆华忠, 吕恩利. CFD 在食品储运设备研发中的应用 [J]. *农机化研究*, 2012(8): 219-222.
- [8] 谢品, 汤毅, 王金锋. 三维流体力学预测风机不同布置形式对冷库气流的影响[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(11): 349-351.
- [9] 赵鑫鑫, 王家敏, 李丽娟. 多温区冷藏车回风导轨对厢内温度场的影响分析[J]. *食品与机械*, 2014, 30(1): 149-154.
- [10] JEBALI R, ABBÈS S, SALAH-ABBÈS J B, et al. Ability of *Lactobacillus plantarum* MON03 to mitigate aflatoxins (B_1 and M_1) immunotoxicities in mice [J]. *Journal of Immunotoxicology*, 2015, 12(3): 1-10.
- [11] 曹铭, 樊明涛. 黄曲霉毒素去除技术研究进展[J]. *食品与机械*, 2015, 31(1): 260-264.
- [12] 罗小虎, 齐丽君, 王韧, 等. 臭氧降解黄曲霉毒素 B_1 污染玉米的体内毒性评价[J]. *食品与机械*, 2016, 32(8): 58-62.
- [13] 蔡静平, 蒋澎, 张燕燕, 等. 储粮早期霉变监测方法测试研究 [J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(11): 58-62.
- [14] 黄曲霉毒素高快准检测技术难题破解[J]. *食品与机械*, 2012, 28(6): 44.
- [15] ZHAI Huan-chen, ZHANG Shuai-bing, HUANG Shu-xia, et al. Prevention of toxigenic fungal growth in stored grains by carbon dioxide detection [J]. *Food Additives & Contaminants Part A Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2015, 32(4): 596-603.
- [16] 翟焕趁, 张帅兵, 黄淑霞, 等. 小麦和玉米中微生物污染和生长的快速检测[J]. *现代食品科技*, 2014(8): 231-237.
- [17] ZHANG Shuai-bing, ZHAI Huan-chen, HU Yuan-sheng, et al. A rapid detection method for microbial spoilage of agro-products based on catalase activity [J]. *Food Control*, 2014, 42(2): 220-224.

(上接第 113 页)

参考文献

- [1] 温丽洁, 李争艳. 我国玉米生产现状及发展趋势[J]. *农业技术与装备*, 2013(24): 31-31.
- [2] 刘焱, 翟焕趁, 蔡静平. 利用监测 CO_2 方法预警储藏玉米中黄曲霉毒素产毒[J]. *现代食品科技*, 2015(5): 309-315.
- [3] 龚阿琼, 李文华, 戴晋军. 2015 年国内市场玉米霉菌毒素污染情况分析[J]. *中国饲料*, 2016(4): 42-44.
- [4] 李瑞芳, 韩北忠, 陈晶瑜. 黄曲霉生长预测模型的建立及毒素含量变化[J]. *食品研究与开发*, 2007, 28(12): 129-132.
- [5] 罗小虎, 齐丽君, 房文苗, 等. 黄曲霉毒素 B_1 污染玉米的比重筛分研究[J]. *食品与机械*, 2016, 32(6): 13-18.
- [6] 高秀芬, 蔺士安, 张宏元, 等. 中国部分地区玉米中 4 种黄曲霉毒素污染调查[J]. *卫生研究*, 2011, 40(1): 46-49.
- [7] 王后苗, 廖伯寿, 雷永, 等. 黄曲霉菌主要真菌毒素次级代谢与调控的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2014, 41(7): 1 425-1 438.
- [8] 计成, 赵丽红, 马秋刚, 等. 黄曲霉毒素生物降解的研究及前景展望[J]. *动物营养学报*, 2009, 31(21): 6-9.
- [9] DAS A, BHATTACHARYA S, PALANISWAMY M, et al. Aflatoxin B_1 degradation during co-cultivation of *Aspergillus flavus* and *Pleurotus ostreatus* strains on rice straw [J]. *3 Biotech*, 2015, 5(3): 279-284.