

不同贮藏条件下大麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量变化趋势及加工去除效果分析

娄雨豪^{1,2}, 曹冬梅^{1,2,3,4*}, 刘金明⁶, 张东杰^{1,4,5*}, 崔航^{1,2}, 王冀菲^{1,2}, 杨建^{1,2}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319) (2. 黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江大庆 163319) (3. 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319) (4. 黑龙江省杂粮加工及质量安全工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319) (5. 北大荒现代农业产业技术省级培育协同创新中心, 黑龙江大庆 163319)

(6. 黑龙江八一农垦大学信息与电气工程学院, 黑龙江大庆 163319)

摘要: 通过人工模拟多种不同贮藏环境, 探究大麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON) 含量变化趋势及多种加工工艺去除效果, 并建立相关预测模型。在不同温度 (5、15、25、35 °C)、相对湿度 (55%、65%、75%、85% RH) 条件下贮藏大麦 180、270、360 d 后, 运用蒸制、煮制、发酵工艺加工后, 采用酶联免疫法检测其含量变化趋势, 以遗传算法优化径向基核函数参数构建支持向量机 (SVM) 污染预测模型。结果表明, 在整个贮藏过程中 DON 含量呈上升趋势, 75% RH 是 DON 产生的最适环境。在加工脱毒方面发现三种工艺对 DON 的去除效果均有所不同, 且在加工过程中添加碳酸钠能够有效促进降解, 但当添加到一定程度时, 去除效果降低。其中煮制工艺去除效果最好, 去除率达到了 50.81%~70.99%; 蒸制工艺去除率较低仅为 9.99%~24.37%; 而在啤酒酿造全过程中 (发芽、糖化、发酵), 呈现先降低后升高的趋势, 去除率为 -13.15%~41.67%。该研究对大麦的安全贮藏条件优化及加工过程中有效降低 DON 含量提供了技术指导。

关键词: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇; 大麦; 贮藏; 食品加工; 脱毒; 预测模型

文章编号: 1673-9078(2022)10-133-139

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.10.1221

Changing Trend of Deoxynivalenol Content in Barley under Different Storage Conditions and Its Removal through Processing

LOU Yuhao^{1,2}, CAO Dongmei^{1,2,3,4*}, LIU Jinming⁶, ZHANG Dongjie^{1,4,5*}, CUI Hang^{1,2}, WANG Jifei^{1,2}, YANG Jian^{1,2}

(1.College of Food, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

(2.Key Laboratory of Agro-Products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China)

(3.Chinese National Engineering Research Center, Daqing 163319, China)

(4.Heilongjiang Engineering Research Center for Coarse Cereals Processing and Quality Safety, Daqing 163319, China)

(5.Heilongjiang Province Cultivating Collaborative Innovation Center for the Beidaha, Daqing 163319, China)

(6.College of Information and Electrical Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: The changing trend of deoxynivalenol (DON) content in barley and its removal by various processing technologies were analyzed. The results showed that the DON content in barley increased during the storage process, and 75% RH was the most suitable environment for DON production. In the processing detoxification aspect, it was found that the removal effects of three processing technologies were different, and the addition of sodium carbonate during processing could effectively promote degradation, but when added to a certain extent, the removal effect was reduced. Among the three processing technologies, the cooking process had the best removal effect, with a removal rate of 50.81%~70.99%; the steaming process had a lower removal rate of only 9.99%~24.37%; and in the whole beer brewing process (germination, mashing, fermentation), it showed a trend of first decreasing and then increasing, with a removal rate of -13.15%~41.67%. This study provides technical guidance for the optimization of safe storage conditions of barley and the effective reduction of DON content during processing.

引文格式:

娄雨豪, 曹冬梅, 刘金明, 等. 不同贮藏条件下大麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量变化趋势及加工去除效果分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(10): 133-139

LOU Yuhao, CAO Dongmei, LIU Jinming, et al. Changing trend of deoxynivalenol content in barley under different storage conditions and its removal through processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 133-139

收稿日期: 2021-11-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFE0206300); 杂粮及制品安全风险评估及标准体系建设项目 (2018YFE0206300-10); 黑龙江省优势特色学科资助项目 (黑教联[2018]4号); 黑龙江八一农垦大学研究生创新科研资助项目 (YJSCXZ2021-Y83)

作者简介: 娄雨豪 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 825595790@qq.com

通讯作者: 曹冬梅 (1969-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: caodong3018@sina.com; 共同通讯作者: 张东杰 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与质量安全, E-mail: byndzdj@126.com

examined through simulating different storage environments and establishing relevant prediction models. Barley samples were stored at different temperatures (5, 15, 25, 35 °C) and relative environmental humidities (55%, 65%, 75%, 85% RH) for 180, 270, and 360 d, respectively, before being processed *via* steaming, boiling, and fermentation. Then, the changing trend of the DON content was determined by the enzyme-linked immunosorbent assay, and the radial basis kernel function parameters were optimized by genetic algorithm to construct a support vector machine (SVM) pollution prediction model. The results showed that the DON content increased throughout the whole storage process, and 75% RH was the optimum environment for DON generation. In terms of processing for detoxification, it was found that the removal of DON differed among the three different processes, and the addition of sodium carbonate during processing could effectively promote DON degradation. However, the removal decreased when the added sodium carbonate was up to a certain level. The removal of DON by boiling was the most effective, with the removal rate reaching 50.81%~70.99%. The DON removal rate for the steaming process was lower (only 9.99%~24.37%). In the whole process of beer brewing (germination, saccharification, and fermentation), the DON removal rate first decreased then increased, with the removal rate in the range of 13.15%~41.67%. This study provides technical guidance for optimizing conditions for the safe storage of barley and effective reduction of the DON content during processing.

Key words: deoxynivalenol; barley; store; food processing; detoxication; prediction model

脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON) 是真菌在适宜条件下产生的次级代谢产物, 主要由禾谷镰刀菌和黄色镰刀菌等代谢产生^[1], 谷物在田间受到真菌的侵染, 在适宜的气温和湿度等条件下真菌繁殖并产生 DON, 其在水和极性溶剂中溶解度良好, 理化性质较为稳定, 即使在 170 °C 下加热 30 min 仍然不会降解^[4], 因此原料经过加工后无法保证其绝对的安全性^[5]. 但其在碱性条件下不稳定, 且降解后的产物毒性低于 DON 的毒性^[6], 所以加工脱毒常用此作为一种去除方法。

被 DON 污染的原粮经过加工流入市场被消费者食用后, 则会对健康产生严重威胁, 甚至会引起中毒. 近年来, 国内已有大量关于 DON 污染粮食方面的检测报道^[7-11], 因此如何减少 DON 含量就尤为重要, 赵佳^[12]以不同加工方式对小麦制品中 DON 含量变化进行了研究, 发现能够有效去除部分毒素. 而大麦具有较高的营养价值^[13], 因其不利于面团的成型及口感与色泽的欠缺, 导致在我国多用作饲料饲草^[14]. 已有学者表明以一定比例替代小麦粉, 能够有效提升营养与物性指标^[15], 现如今以大麦为原料的一些制品已逐渐被人们所接受, 如八宝粥^[16]、面条^[17]、饮料^[18]、饼干^[19]、陈醋^[20]等食品, 但此类杂粮食品的制作工艺中对 DON 的去除效果还未见报道。

本文将主要研究大麦在不同温度 (5、15、25、35 °C) 和相对湿度 (55%、65%、75%、85% RH) 条件下贮藏 180、270 与 360 d 中 DON 含量变化趋势, 以及三种加工工艺 (蒸制、煮制、发酵) 对食品中 DON

的模拟脱毒效果, 运用酶联免疫法 (ELISA) 检测各样本中脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量, 为获取最佳贮藏条件、膳食摄入风险评估提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

大麦, CK15, 佳木斯农科院; 小麦粉、谷朮粉, 超市购买; TL-48R 型粉碎研磨仪, 上海万柏生物科技有限公司; QL-901 型旋涡混合器, 海门其林贝尔仪器制造有限公司; H1850 型离心机, 湖南湘仪仪器有限公司; Infinite F50 型酶标仪, 山东博科再生医学有限公司; HWS-150 型恒温恒湿培养箱, 上海森信实验仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 大麦贮藏

通过人工模拟贮藏环境湿度^[21], 依次配制饱和硝酸镁溶液、饱和亚硝酸钠溶液、饱和氯化钠溶液、饱和氯化钾溶液, 分别模拟 55%、65%、75%、85% RH 相对环境湿度. 将 300 g 大麦样品分装在不同湿度的烧杯中, 共 16 份 (每个湿度 4 份), 再将盛有大麦样品的烧杯装入饱和溶液的大烧杯中, 而后将其放入不同温度 (5、15、25、35 °C) 的恒温培养箱中, 分别模拟冷库贮藏、低温粮库贮藏、常温粮库贮藏、南方高温粮库贮藏. 在 180、270、360 d 时进行统一取样用于后续分析, 取样完成后立即放入培养箱中, 以免外界环境对样品进行干扰。

1.2.2 污染预测模型

SVM (支持向量机) 模型是通过所选用的核函数将非线性数据映射到高维度的线性数据上, 并对此进

行线性回归分析^[22],具有良好的泛化能力弥补了神经网络的缺陷。常见的核函数类型主要包括线性内核、多项式内核、径向基内核(RBF)及Sigmoid核等^[23]。其中RBF核函数效率高、速度快,多用于解决非线性多变量回归问题^[24]。为优化SVM学习能力,现拥有网格搜索方法、粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)等一些智能算法,本研究将对回归模型的参数C、 γ 和 ϵ 进行优化^[25],以获得最佳污染预测模型。

1.2.3 不同工艺对DON去除效果影响

1.2.3.1 原料制备

因大麦中谷蛋白分子量较小且醇溶蛋白含量较低,在和面时无法形成稳定的网状结构,导致面团松散,单独以其进行面制品加工时难以成型^[26],故而需要与小麦粉配比使用且添加适量的品质改良剂。将大麦研磨成粉,过100目筛,以1:3的比例加入小麦粉,再加入面粉总质量10%的谷朊粉得到复配后的杂粮面粉,用于后续实验。

1.2.3.2 蒸制加工方法

按照2:1的比例加入杂粮粉与40℃的温水,酵母添加量为1%进行和面。揉面5min直至面团光滑、不粘手,而后将面团放入36℃的培养箱中醒发2.5h,拿出分块,每个50g揉成圆型后在室温下进行2次醒发(20min)。将水加热至沸腾,放入蒸屉中蒸制20min^[27]。加碱面团中碳酸钠添加量与面粉比例分别为1:100及1:200。

1.2.3.3 煮制加工方法

按照2:1的比例加入杂粮粉与40℃的温水,和面5min直至面团光滑、不粘手,静置熟化30min后,用面条机将其逐步压延成厚1mm宽3mm的面条^[28]。称取500mL纯水煮沸,分别加入1、1.25、1.5、1.75g碳酸钠,待溶解后放入做好的杂粮面条50g,煮制8min。

1.2.3.4 啤酒酿造方法

啤酒酿造工艺为:

大麦→浸麦→发芽→除根→粉碎→糊化→糖化→过滤→煮浮→添加酒花→旋沉冷却→发酵→过滤

选取适量优质大麦进行浸麦,使其含水量达到45%~50%左右进行发芽,除根后放入培养箱中干燥。取出粉碎进行糊化,在糊化锅中加入适量的水加热至40℃,进行搅拌投入麦芽,升温至50℃保持20min后升高至63℃继续糊化30min后在75℃下过滤,煮沸得到麦汁,酒花分三次添加依次在10、50、80min时加入10%、60%、30%,然后经过旋沉、冷却至15℃,接种酵母后分别在14℃发酵4d、8℃发酵4d、4℃发酵7d。最终经过过滤得到啤酒。

1.2.4 毒素含量测定

酶联免疫检测试剂盒存放在低温冰箱中,检测时将其移入室温环境(20~25℃),平衡1h以上。准确称取2g样品于50mL离心管中,加入20mL去离子水震荡5min,室温下4000r/min离心10min,取上清液0.5mL并加入0.5mL复溶液混匀后进行分析。取上述溶液50 μ L于试剂盒各微孔中,每个样本做两孔平行,加入酶标记物、抗体工作液各50 μ L在25℃下反应30min。洗涤后加入50 μ L底物液A、B,25℃避光反应15min。最后加入50 μ L中止液,使用酶标仪于450nm测定其吸光度值并计算相应毒素大小,且毒素检测时试验条件应保持一致。

1.2.4.1 标准曲线绘制

分别吸取0、10、30、90、270、810ng/mL浓度的脱氧雪腐镰刀菌烯醇标准品50 μ L进行测定。以标准溶液浓度的对数为横坐标(X, ng/mL),相应百分吸光率值为纵坐标(Y)绘制标准曲线,线性方程为:

$$Y = -0.2979X + 0.984, R^2 = 0.9980$$

线性拟合程度良好,能够满足当前检测需求。

1.3 数据处理

运用Matlab、Origin与SPSS软件进行处理及计算。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏条件下DON含量变化趋势

大麦在贮藏期间若储藏不当会导致发霉、陈化等一系列问题,使其食用品质和营养价值降低。因此,随着时间推移在不同温湿度环境下,研究大麦中DON含量变化趋势可以有针对性的控制贮藏环境,同时确保了储粮的安全性,为实现大麦的安全贮藏、减少储粮损失及提高储粮质量提供了有力依据。但因毒素具有非均匀性分布的特点,导致检测无法十分准确的代表当前环境的全部情况,所以取样时需多点、大量取样充分混匀后进行试验。

由图1可知,不同贮藏条件下随环境温湿度的增加,大麦中DON含量均呈现不同的上升趋势,其中5℃环境下DON波动幅度较小,而随温度的不断上升DON含量也随之增加,可以发现25℃与35℃时DON含量大幅度增加,且各组间差异高于5℃与15℃环境,相对环境湿度对其的影响逐渐加大。而从相对环境湿度角度分析,可以发现随湿度的增加各组间DON含量具有较大的差异,在75%RH条件下DON含量较高,其次为85%RH、65%RH,55%RH时DON含量较低。在5℃与15℃条件下,85%RH与65%RH环境DON无较大差异,而在25℃环境中,85%RH

的 DON 含量高于其他温度, 整个贮藏过程中 DON 含量达到最高的环境为 35 °C 75% RH, 其值为 0.65 mg/kg 比贮藏前的大麦中 DON 含量高了

0.21 mg/kg。从整体角度来看, 75% RH 环境是 DON 生长的最适条件, 且相对湿度环境是影响 DON 含量的重要因素。

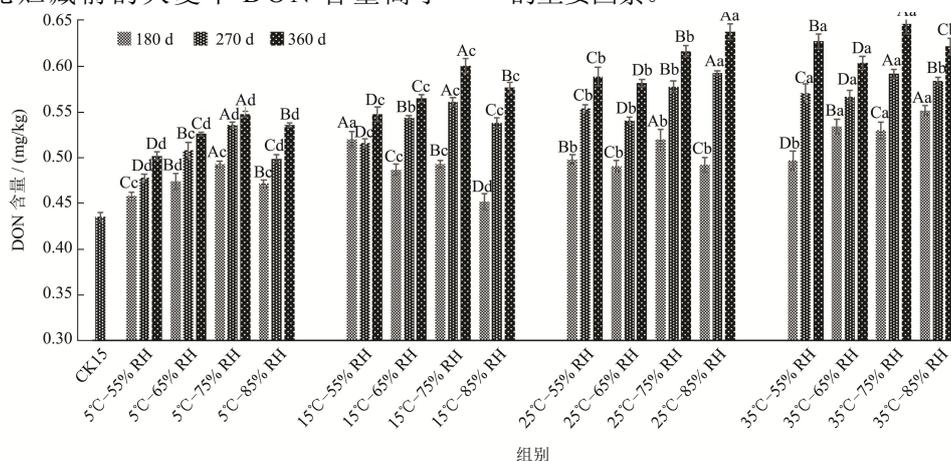


图 1 不同贮藏条件下 DON 含量变化趋势

Fig.1 Change trend of DON content under different storage conditions

注: 数据为平均值±标准偏差, n=3。大写字母为各湿度之间显著性分析, 小写字母为各温度之间显著性分析, 不同上标字母表示显著性差异 (p<0.05), 下同。

在整个贮藏阶段, DON 含量整体呈现上升趋势, 发现贮藏 180 d 时 DON 含量上升趋势较为缓慢, 这是由于刚收获的大麦通常处于休眠状态, 随着贮藏时间的增加, 大麦本身会逐渐脱离休眠状态, 来抵御真菌毒素的进一步污染^[29]。在贮藏 270 d 时 DON 含量上升趋势较大, 由于收获的大麦中附带了田间生长环境中的真菌体系, Manna^[30]发现链格孢属与镰刀菌属在收获前会附着在成熟的谷物上, 而 DON 正是镰刀菌属的次级代谢产物, 经过一段时间的贮藏后逐渐产生代谢产物导致毒素累积, 总体 DON 含量上升, 并且也有研究表明, 毒素在某一阶段含量较高时可能是由于这种毒素的产毒真菌在这一贮藏时间达到了优良生长期, 代谢量增大^[31]。而在贮藏 360 d 时 DON 含量上升趋势较为缓慢, 由于贮藏环境已趋于稳定并且田间真菌逐渐过渡为贮藏真菌, 优势菌属发生了更替, 镰刀菌属相对丰度占比下降, 已有研究发现粮食在贮藏过程中不同类型的微生物代谢产物之间会进行相互抑制^[32], 因此导致 DON 含量上升缓慢。

2.2 污染预测模型

模型以贮藏大麦中 DON 含量作为因变量, 温度、相对环境湿度及时间作为自变量而建立。数据按照 DON 含量从小到大依次排序, 随机抽取 75% 的数据作为校正集, 剩余 25% 数据为验证集。通过校正决定系数 R^2_c 、校正均方根误差 RMSEC、验证决定系数 R^2_p 、预测均方根误差 RMSEP、平均相对误差 MPE 评价模型的准确性。其中 R^2_c 、 R^2_p 代表了自变量对因变量的

解释程度, 越接近于 1 时预测性能越好、RMSEC、RMSEP 代表了模型的准确度与精密度, 越接近于 0 时准确度与精密度越高, 而 MPE 值越小越好。

表 1 不同模型预测结果对比

Table 1 Comparison of prediction results of different models

| 算法类型 | R^2_c | R^2_p | RMSEC | RMSEP | MRE |
|---------|---------|---------|-------|-------|--------|
| 网格-SVM | 0.969 | 0.948 | 0.008 | 0.010 | 1.153% |
| PSO-SVM | 0.973 | 0.964 | 0.007 | 0.008 | 0.905% |
| GA-SVM | 0.975 | 0.967 | 0.007 | 0.008 | 0.958% |

由表 1 可知, 三种 SVM 污染预测模型的拟合效果良好, 其中 GA-SVM 模型与其他 SVM 模型相比, 决定系数最高、均方根误差最小, 说明其预测精度最高。模型如图 2 所示, 校正集与验证集的样本点基本都在对角线上, 说明不同贮藏条件下大麦中 DON 含量的回归预测模型建立成功, 具有良好的预测性能。

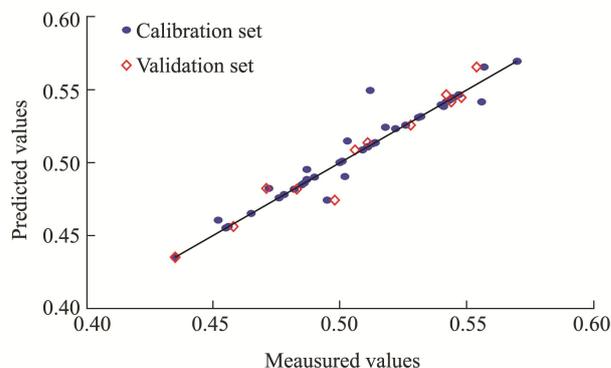


图 2 贮藏大麦中 DON 含量的校正集与验证集分布

Fig.2 Distribution of calibration set and verification set of DON content in barley during storage

2.3 不同加工工艺对 DON 去除效果

2.3.1 蒸煮工艺对 DON 去除效果

蒸煮是我国居民家庭最主要的加工方式,对加工过程中 DON 含量变化进行分析有助于合理加工食物,对降低膳食摄入风险具有重要作用。在蒸煮过程中加入适量碳酸钠(Na_2CO_3)能够有效去除面团中的酸味、改善食用口感。碳酸钠是我国食品加工中常用的添加剂,其水溶液呈碱性,因 DON 理化性质较为稳定,对高温具有较强的耐受性导致去除程度有限,而碱能够有效破坏 DON 的稳定结构,因此将以天然污染的大麦与小麦粉为原料探究各因素对 DON 含量变化的影响。

由表 2 可知,经过不同加工工艺处理后的杂粮食品其 DON 含量都会存在明显的降低,且各工艺之间均存在显著性差异。其中无碱蒸制方法与其他方法相比去除率较低仅为 9.99%,其原因可能为蒸制工艺时所接触水分较少,没有达到破坏 DON 结构的温度,而添加了一定量的碳酸钠具有一定效果但并不明显,去除率为 19.70%~24.37%; DON 去除效果最好的工艺为煮制,去除率为 50.81%~70.99%,且随添加碳酸钠含量增加而升高,而添加 0.3wt%碳酸钠和 0.35wt%碳酸钠去除效果并无显著差异,表明高浓度的碱性溶液对 DON 的去除效果也是有限的,当达到一定限值后,降解效果将会降低。在煮制过程中,发现无碳酸钠添加的去除率也高于蒸制工艺,这充分利用了 DON 溶于水、在碱性条件下不稳定的特点,随着长时间的高温处理, DON 一部分受热分解,另一部分溶于水中转

移了样本中的部分毒素以此达到去除的效果。

2.3.2 啤酒酿造过程中对 DON 去除效果

大麦是啤酒酿造的主要原料,其质量直接影响到啤酒的质量与口感,在田间生长与贮藏阶段会受到不同程度的污染,尽管有一部分在洗麦与浸麦阶段中被去除,但在制麦过程中其含量会成倍增长。麦芽制造的主要目的是为了激活大麦中的酶,使胚乳中的物质适当分解获得足够的浸出物与酶,其次为产生啤酒所需独特的色、香、味,制麦工艺是决定麦芽品质的重要因素之一。因此,将以天然污染的大麦研究啤酒酿造各阶段 DON 含量的变化趋势。

由表 3 可知,啤酒酿造整个过程中 DON 含量呈现先降低后上升的趋势,这与前人得到的结论略有不同,Lancova 等^[33]发现啤酒经过酿造后最终含量可降低 30%,这可能与加工工艺不同及原料差异有关。在大麦发芽制麦过程中麦芽毒素含量为初始大麦的 58.33%,去除率为 41.67%,原因可能为在浸麦过程中部分毒素溶于水,且在发芽时生成了毒素较低的代谢产物 DON-3-葡萄糖苷与乙酰基 DONs 从而导致整体毒素含量降低;糖化过程中 DON 含量升高,与麦芽相比其含量增加了 22.11%,但并未超过大麦中的毒素含量,去除率为 25.11%;而发酵制得啤酒阶段 DON 含量显著升高,与麦芽相比毒素含量增加了 48.45%,与大麦相比毒素含量增加了 13.15%,原因可能为之前制麦发芽中生成的 DON-3-葡萄糖苷与乙酰基 DONs 通过酶的作用进一步转化为 DON,且发酵环境适合毒素生长,导致整体毒素增加。

表 2 蒸煮工艺对 DON 的去除效果

Table 2 Effect of baking and cooking on DON removal

| 工艺 | 初始面团毒素含量/(mg/kg) | 经加工后毒素含量/(mg/kg) | 毒素去除率/% |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|---------|
| 无碳酸钠蒸制面团 | 1.98 ^a ±0.05 | 1.78 ^b ±0.03 | 9.99 |
| 0.5%碳酸钠添加量蒸制面团 | 1.98 ^a ±0.05 | 1.59 ^c ±0.02 | 19.70 |
| 1%碳酸钠添加量蒸制面团 | 1.98 ^a ±0.05 | 1.50 ^d ±0.04 | 24.37 |
| 无碳酸钠煮制面条 | 1.98 ^a ±0.05 | 0.98 ^b ±0.04 | 50.81 |
| 0.2%碳酸钠添加量煮制面条 | 1.98 ^a ±0.05 | 0.85 ^c ±0.02 | 56.91 |
| 0.25%碳酸钠添加量煮制面条 | 1.98 ^a ±0.05 | 0.73 ^d ±0.02 | 63.12 |
| 0.3%碳酸钠添加量煮制面条 | 1.98 ^a ±0.05 | 0.63 ^e ±0.03 | 68.11 |
| 0.35%碳酸钠添加量煮制面条 | 1.98 ^a ±0.05 | 0.58 ^e ±0.02 | 70.99 |

表 3 啤酒酿造各阶段对 DON 去除效果

Table 3 The removal effect of DON in different stages of beer brewing

| 工艺 | 初始大麦毒素含量/(mg/kg) | 经加工后毒素含量 | 毒素去除率/% |
|----|--------------------------|---------------------------------|---------|
| 发芽 | 1.85 ^b ±0.046 | 1.08 ^d ±0.03/(mg/kg) | 41.67 |
| 糖化 | 1.85 ^b ±0.046 | 1.38 ^e ±0.03/(mg/L) | 25.11 |
| 发酵 | 1.85 ^b ±0.046 | 2.09 ^f ±0.04/(mg/L) | -13.15 |

3 结论

本文以多个贮藏条件进行模拟贮存,发现不同贮藏条件下大麦中 DON 含量变化趋势均有所不同,运用径向基核函数构建了 SVM 模型,并以遗传算法优化了其预测能力,成功建立了预测模型,且拟合效果良好。在整个贮藏过程中,不同贮藏条件下大麦中 DON 含量均呈现不同的上升趋势,其中 75% RH 环境含量较高,是 DON 生长的最适条件,且相对湿度环境是影响 DON 含量的重要因素。在整个贮藏阶段, DON 含量最高增长了 0.21 mg/kg,但均未超过国家规定标准。

采用三种常见的加工方式(蒸制、煮制、发酵)对 DON 的去除效果进行研究,发现煮制去除效果最好,去除率为 50.81%~70.99%,其次为蒸制,去除率为 9.99%~24.37%,且添加碳酸钠能够有效增加去除率;而在啤酒发酵过程中呈现先降低后升高的趋势,发芽过程去除率为 41.67%,糖化过程去除率为 25.11%比麦芽中毒素含量高了 22.11%,发酵过程毒素含量比初始大麦高了 13.15%、比麦芽高了 48.45%。而多个加工工艺毒素含量变化的原因主要有两个,其一为 DON 的结构遭到破坏从而分解,其次是通过一些外部因素导致 DON 生成次级代谢产物,例如 DON-3-葡萄糖苷与乙酰基 DONs 从而降低整体毒性。

参考文献

- [1] Kumera N, Ali M. Mycotoxin occurrence in grains and the role of postharvest management as a mitigation strategies. A review [J]. Food Control, 2017, 78: 412-425
- [2] Jaukovi M M, Veselinka M, Stankovi S, et al. Presence of deoxynivalenol in wheat milling products in Serbia during 2016 - 2017 [J]. Zbornik Matice Srpske Za Prirodne Nauke, 2017
- [3] Jia R, Cao L R, Liu W B, et al. Detoxification of deoxynivalenol by *Bacillus subtilis* ASAG216 and characterization the degradation process [J]. European Food Research and Technology, 2020, 6: 1-10
- [4] Pronyk C, Cenkowski S, Abramson D. Superheated steam reduction of deoxynivalenol in naturally contaminated wheat kernels [J]. Food Control, 2006, 17: 789-796
- [5] Yao Y Z, Long M. The biological detoxification of deoxynivalenol: A review [J]. Food and Chemical Toxicology, 2020, 145: 1-9
- [6] 常敬华,何志明,赵月菊,等.挂面煮制方法对脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)的去除效果研究[J].现代食品科技,2016,32(5):138-143,131
- [7] 宋丹,李蕴玉,杨彩然,等.河北省蛋鸡配合饲料及原料中霉菌毒素的污染情况[J].中国家禽,2019,41(10):78-80
- [8] 张正征,王丹,李娜,等.山东省谷物粮食脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量检测分析[J].中国预防医学杂志,2019,20(11):1063-1066
- [9] 朱风华,朱连勤.2019年山东省饲料原料及配合饲料主要霉菌毒素污染状况调查[J].中国畜牧杂志,2020,56(11):189-194
- [10] 王庆伟,安纲,王金勇,等.2019年中国饲料与原料霉菌毒素检测报告[J].饲料工业,2020,41(24):52-57
- [11] 陆晶晶,杨大进.2013年中国小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染调查[J].卫生研究,2015,44(4):658-660
- [12] 赵佳.小麦及其加工制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量变化的研究[D].西安:陕西科技大学,2020
- [13] Czubaszek A, Wjciechowicz B A, Spychaj R, et al. Baking properties of flour and nutritional value of rye bread with brewer's spent grain [J]. LWT, 2021, 150
- [14] 赵锋,潘永东,包奇军,等.甘肃省大麦产业发展现状及发展对策[J].甘肃农业科技,2020,11:78-84
- [15] 朱爽,宋莉莎,张佰清,等.大麦超微粉的营养品质及物理特性分析[J].现代食品科技,2022,38(1):289-295,93
- [16] 梁霞,周柏玲,王海平,等.低升糖藜麦八宝粥的配比优化及其人体GI值测定[J].现代食品科技,2021,37(7):162-168,100
- [17] 李真,高文倩,姬生鑫,等. β -葡聚糖酶对大麦-小麦混合粉面条物理特性及感官品质的影响[J].现代食品科技,2019,35(4):124-129,123
- [18] Liu S, Zhao L P, Zhang J, et al. Functional drink powders from vertical-stone-milled oat and highland barley with high dietary-fiber levels decrease the postprandial glycemic response [J]. Journal of Functional Foods, 2021, 83: 104548
- [19] 祝莹,孙鑫娟,赵延胜,等.大麦粉对面团特性及薄脆饼干品质的影响[J].现代食品科技,2019,35(3):33-37,160
- [20] Zhang H, Zhou J L, Lang F F, et al. Highland barley replaces sorghum as raw material to make Shanxi aged vinegar [J]. Applied Sciences, 2021, 11(13): 6039-6039
- [21] Xihai, Wang, Qilong, et al. Moisture adsorption isotherms and heat of sorption of *Agaricus bisporus* [J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2013, 37(4): 299-305
- [22] Yang Y, Liu X, Li W, et al. Rapid measurement of epimedin A, epimedin B, epimedin C, icariin, and moisture in *Herba epimedii* using near infrared spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2017, 171: 351-360
- [23] Pan S, Wei J, Pan H. Study on evaluation model of Chinese P2P online lending platform based on hybrid kernel support vector machine [J]. Scientific Programming, 2020, 2020:

- 4561834
- [24] Li Y, Li F, Yang X, et al. Quantitative analysis of glycated albumin in serum based on ATR-FTIR spectrum combined with SiPLS and SVM [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, 201: 249-257
- [25] Devos O, Ruckebusch C, Durand A, et al. Support vector machines (SVM) in near infrared (NIR) spectroscopy: focus on parameters optimization and model interpretation [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2009, 96(1): 27-33
- [26] 赵芳芳.高添加苦荞挂面加工技术研究及其降血糖功能评价[D].镇江:江苏大学,2018
- [27] 石晶红,朱效兵,郭淑文,等.挤压膨化玉米粉对小麦粉面团特性及馒头质构特性的影响[J].现代食品科技,2021,37(3): 187-193
- [28] 范会平,李菲菲,符锋,等.紫薯全粉面条的制备及其品质影响研究[J].现代食品科技,2019,35(5):151-158,273
- [29] Meyer S E, Stewart T E, Clement S. The quick and the deadly: growth vs virulence in a seed bank pathogen [J]. *The New Phytologist*, 2010, 187(1): 209-216
- [30] Mannaa M, Kim K D. Influence of temperature and water activity on deleterious fungi and mycotoxin production during grain storage [J]. *Mycobiology*, 2017, 45(4): 240-254
- [31] 聂秀美.贮藏年限对燕麦种子种带真菌和真菌毒素的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2020
- [32] Benjamin Y, Favre B S, Josselin B, et al. Comparative genomics of environmental and clinical *Stenotrophomonas maltophilia* strains with different antibiotic resistance profiles [J]. *Genome Biology and Evolution*, 2015, 7(9): 2484-2505
- [33] Lancova K, Hajslova J, Poustka J, et al. Transfer of *Fusarium mycotoxins* and 'masked' deoxynivalenol (deoxynivalenol-3-glucoside) from field barley through malt to beer [J]. *Food Additives and Contaminants*, 2008, 25(6): 732-744