

真菌毒素在赤霉病小麦研磨及其湿法加工中的分布研究

何慧慧, 李力, 韩小贤, 郑学玲, 卞科

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘要: 小麦赤霉病不仅会导致粮食减产, 更会引起多种真菌毒素的高污染风险。将染病小麦进行实验室制粉并湿法分离统粉中的粗淀粉、谷朊粉, 采用酶联免疫吸附测定法(Enzyme-Linked Immuno Sorbent Assay, ELISA)测定各系统的呕吐毒素(Deoxynivalenol, DON)、黄曲霉毒素 B1 (Aflatoxin B1, AFB1)、玉米赤霉烯酮(Zearalenone, ZEN)以及赭曲霉毒素 A (Ochratoxin A, OTA) 的含量, 以探究赤霉病小麦在制粉及其湿法加工中四种常见真菌毒素的分布变化规律。结果显示: 研磨制粉及湿法加工对真菌毒素的分布影响显著。制粉加工后, 皮磨和心磨系统粉的 DON、AFB1、ZEN 和 OTA 含量比原粮显著降低, 降低率分别为 1.38~16.24%、20.47~71.77% 及 26.71~69.51%; 湿法加工产物中, DON 消减为相应统粉的 4.88~12.11%, AFB1 与 OTA 浓缩富集, 富集率分别可达统粉的 2.55、3.65 倍, 粗淀粉中 ZEN 消减为统粉的 12.70~15.83%, 谷朊粉则富集为统粉的 4.11 倍。研究表明, 在工业生产中, 可根据赤霉病小麦的感染类型及程度, 适当选用研磨或湿法加工等合适的方法加工处理。

关键词: 赤霉病小麦; 真菌毒素; 研磨; 湿法加工

文章编号: 1673-9078(2016)9-260-266

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.9.038

Distribution of Mycotoxins in Milling and Wet Processing of Scabby Wheat

HE Hui-hui, LI Li, HAN Xiao-xian, ZHENG Xue-ling, BIAN Ke

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Wheat scab not only leads to loss of grain but also poses a high risk of contamination by various mycotoxins. To study the distribution of four kinds of mycotoxins in scabby wheat after milling and wet processing, infected wheat was milled into flour in the laboratory, after which crude starch and gluten were obtained by wet separation. Content of deoxynivalenol (DON), aflatoxin B1 (AFB1), zearalenone (ZEN), and ochratoxin A (OTA) in flour and separated products was measured by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). The results showed that milling and wet processing had a significant influence on the distribution of mycotoxins. After grinding, the content of DON, AFB1, and ZEN in break flour and reduction flour were significantly lower than that in raw grain, ranging from 1.38% to 16.24%, 20.47% to 71.77%, and 26.71% to 69.51%, respectively. The products of wet processing showed DON content ranging from 4.88% to 12.11% of that obtained in corresponding straight flour. While AFB1 and OTA were concentrated and enriched in the products, their concentration was 2.55 and 3.65 times that in straight flour, respectively. The content of ZEN in crude starch was approximately 12.70% to 15.83% of that in straight flour, while wheat gluten concentration increased 4.11 times that in corresponding straight flour. The results from this study indicates that appropriate wheat treatment methods, such as grinding and wet processing, should be selected for wheat processing according to the fungal infection type and severity of scabby wheat during industrial production.

Key words: scabby wheat; mycotoxins; grinding; wet processing

随着农业发展和社会进步, 粮食安全问题愈来愈

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 国家小麦产业技术体系专项(CARS-03); 河南省小麦产业技术体系建设专项(S2010-01-G06)

作者简介: 何慧慧(1991-), 女, 硕士生, 研究方向: 谷物化学与品质

通讯作者: 郑学玲(1972-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 谷物化学与品质

受到人们关注, 其中, 粮食安全对于人类生存、发展的根基性的重要作用日益凸显。据调查显示, 全球每年约有 25% 的农作物遭受真菌及其毒素污染, 约 2% 因污染严重而失去营养和经济价值, 造成了巨大的损失^[1]。近年来, 我国长江中下游、江淮以及黄淮等小麦主产区赤霉病发生形势尤为严峻, 小麦赤霉病蔓延十分严重, 给小麦农业生产带来严重威胁。

小麦赤霉病不仅会导致粮食减产,更会引起多种真菌毒素尤其是呕吐毒素的高污染风险。小麦感染赤霉病以后,籽粒干瘪,品质降低,加工出粉率降低,严重影响小麦加工品质,造成产量损失^[2],更重要的是病麦所含的真菌毒素影响食品安全,对人畜危害巨大,食用毒素污染的病麦会引起眩晕、发烧、恶心、腹泻等急性中毒症状,严重时甚至引起出血,影响机体免疫力和生育力等,直接威胁人畜健康和生命安全。因此,真菌毒素防控与消减研究是关系到整个小麦农业生产的重要一环。

长期以来,赤霉病小麦合理利用的研究集中于将病麦用于酒精发酵^[3,4],但仍会造成较大的浪费。Bullerman等人的研究表明,在小麦及其制品的加工过程中,真菌毒素的分布会发生明显降低^[5,6],Lancova K等人发现真菌毒素在研磨时集中在皮层的外层^[7],王华等也发现小麦中DON主要分布在皮层,并且心粉和皮粉之间、粗麸和细麸之间的DON含量差异微小^[8],张慧杰发现粗麸皮、细麸中DON含量为小麦籽粒的35%和27%,ZEN含量可达小麦籽粒的1.2~3.3倍^[9],姬建生等人研究表明小麦制品中DON含量由高到低依次为麦麸、全麦粉、全麦粉面筋、小麦粉干面筋^[10]。因此,为了了解赤霉病小麦真菌毒素在加工过程中的具体流向,明确毒素在病麦籽粒中的分布特性,探究赤霉病麦的广度加工与应用,本文通过研磨赤霉病小麦制粉,并从相应小麦粉中分离提取谷朊粉及淀粉,检测各系统中的呕吐毒素(Deoxynivalenol, DON)、黄曲霉毒素B1(Aflatoxin B1, AFB1)、玉米赤霉烯酮(Zearalenone, ZEN)以及赭曲霉毒素A(Ochratoxin A, OTA)这四种真菌毒素的含量,以期对赤霉病小麦的加工处理、合理利用与深度研究提供新思路。

1 材料与方法

1.1 原料

实验选用两批赤霉病感染程度不同的小麦,经谷物筛选器初步清理,编号试样A、试样B,均自行取样于河南省粮食主产区南阳市。

1.2 主要仪器设备

SKCS-4100单籽粒谷物硬度测定仪,瑞典Perten仪器公司;MLU-202型布勒实验磨,瑞士布勒公司;JXFM110锤式旋风磨,杭州其伟光电科技有限公司;LXJ-11B低速大容量多管离心机,上海安亭科学仪器厂;LGJ-10C冷冻干燥机,北京四环科学仪器厂有限公司;呕吐毒素、黄曲霉毒素B1、玉米赤霉烯酮及赭

曲霉毒素A四种真菌毒素ELISA检测试剂盒,新加坡Pribolab公司;Multiskan FC酶标仪,Thermo Fisher仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 实验室制粉

采用近红外水分仪测取赤霉病小麦试样A和B的水分含量,使用单籽粒谷物硬度仪测定试样的单颗粒硬度,参照AACC26-20方法,根据小麦水分含量及籽粒硬度确定加水量以及润麦时间,润麦处理,并采用布勒实验磨磨粉。根据各系统的出粉率,采用混粉机将皮磨粉和心磨粉混合,制得统粉。采用锤式旋风磨直接将小麦籽粒破碎制得全麦粉。

1.3.2 分离提取粗淀粉、谷朊粉^[11,12]

取面粉500g与浓度为20g/L的NaCl溶液250mL混合,揉成面团,于室温下静置30min以使面筋充分形成。并加水洗涤,离心,重复该步骤直至洗涤用水无色,洗涤用水量约为面粉质量的8~10倍,将得到的面筋挤干保存。淀粉浆过100目筛后静置6~8h,弃去上清液,将余下的淀粉浆在4000r/min下离心10min,弃去上清液,刮下收集下层物质,即为粗淀粉。将所得粗淀粉和面筋放入冰箱于-20℃下冷冻24h左右,再放入冷冻干燥机中冻干备用。将制得的淀粉和谷朊粉粉碎后过60目筛,备用。

1.3.3 四种真菌毒素的检测^[10]

采用ELISA试剂盒法检测,其主要原理是通过抗原与抗体的特异反应将待测物与酶连接,再通过酶与底物产生颜色反应,根据吸光值的大小可对相应的真菌毒素定量分析。

根据ELISA试剂盒的检测说明方法,选取合适的溶剂稀释提取样品。将样品和一系列标准品加到包被有针对相关真菌毒素的抗体的微孔板中,加入酶标记物,均匀混合,避光孵育一段时间后,洗板5次,加显色液,继续避光孵育,最后加入终止液并混合均匀,于酶标仪波长450nm处其测量吸光度值。针对不同的真菌毒素,具体操作方法略有不同。

1.3.4 实验数据的分析处理

本次实验所得数据运用Excel初步统计分析,显著性采用SPSS进行相关的显著性分析。

表1 小麦试样的水分和硬度指数

Table 1 Moisture and hardness index of wheat samples

试样	水分/%	硬度
A	11.83±0.06	51.06±0.29
B	11.37±0.07	55.68±0.32

2 结果与讨论

2.1 试样水分和硬度指数

两种小麦试样的水分和硬度指数检测结果如表 1 所示,数据采用平行试验测试法,利用 SPSS 软件进行数据分析。两试样均为中等硬度小麦,参照 AACC

表 2 各系统粉流 DON 含量 (μg/kg)

Table 2 DON content in milling streams (μg/kg)

样品	1B	2B	3B	1M	2M
A	4944.62 ± 3.24 ^d	4705.39 ± 67.92 ^d	4894.44 ± 22.48 ^c	4988.44 ± 26.18 ^b	4565.68 ± 74.89 ^e
B	4602.86 ± 5.59 ^b	4276.46 ± 56.12 ^d	4370.56 ± 4.34 ^{cd}	4469.00 ± 100.36 ^c	3955.72 ± 41.53 ^e

样品	3M	粗麸	细麸	全麦粉
A	4262.42 ± 3.98 ^f	5208.38 ± 23.92 ^a	5201.71 ± 74.62 ^a	5058.32 ± 6.64 ^b
B	4003.47 ± 24.02 ^e	4865.39 ± 89.38 ^a	4610.64 ± 3.85 ^b	4722.68 ± 24.79 ^b

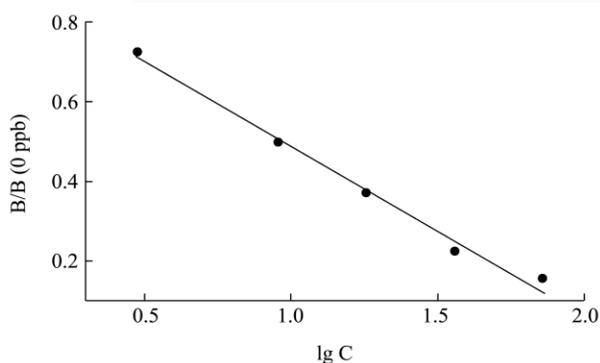


图1 DON标准曲线1

Fig.1 Standard curve 1 for DON

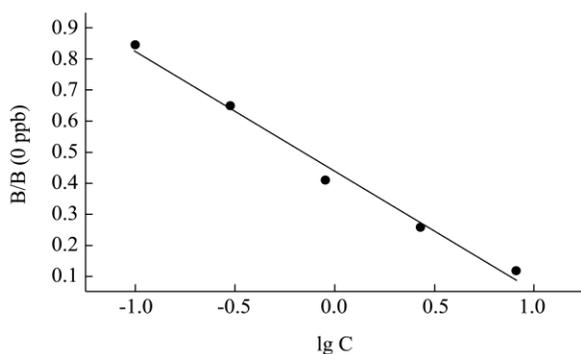


图2 AFB1标准曲线1

Fig.2 Standard curve 1 of AFB1

两种小麦试样感染赤霉病均比较严重,且各系统的DON含量存在显著性差异(两种试样 p 值均 <0.00),检测结果如表 2 所示。ELISA 检测通常以标准溶液浓度的常用对数值 ($\lg C$)为横坐标,以样品的吸光度与 0 ppb 标准孔吸光度的比值纵坐标 ($B/B_{(0\text{ ppb})}$)绘制标准曲线。DON 检测标准曲线如图 1,标准曲线方程为: $Y=-0.4236X+0.9113$, $R^2=0.9896$ 。八个系统粉中,粗麸所含 DON 最高,全麦粉和细麸次之,这与 Hallier

方法,将水分含量调节至 15.6%,润麦处理 20 小时。经过布勒试验磨制粉,得到 1 皮 (1B)、2 皮 (2B)、3 皮 (3B)、1 心 (1M)、2 心 (2M)、3 心 (3M)、粗麸以及细麸共八个系统的粉流。

2.2 研磨加工各系统毒素含量分析

等人的研究结果一致^[13,14]。粗麸来自于皮磨系统中物料的外皮,相对于整个小麦籽粒,粗麸中外皮特别是外果皮所占的相对含量高于全麦粉和细麸,说明 DON 毒素在赤霉病小麦外皮中分布最多,产生呕吐毒素的脱氧雪腐镰刀菌首先浸染小麦籽粒的外皮,尤其是外果皮。除麸皮外,各系统中 DON 污染情况总体上为 1B、1M $>$ 2B、3B $>$ 2M 和 3M,说明脱氧雪腐镰刀菌菌丝由外皮逐步、逐层深入至小麦内部,部分已经深入至小麦胚乳^[15],导致这两种小麦试样有大量籽粒在外观上已完全皱缩。

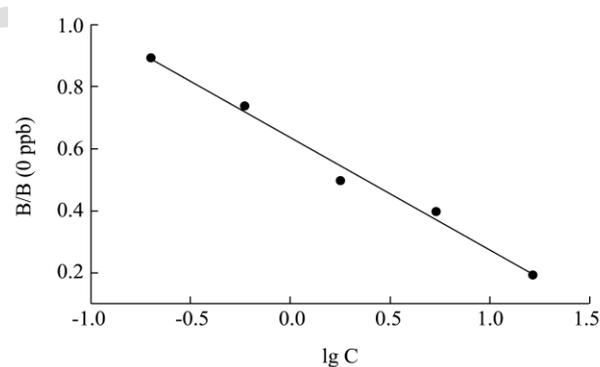


图3 ZEN标准曲线1

Fig.3 Standard curve 1 of ZEN

两种小麦各粉流中的AFB1具体含量如表3所示,标准曲线如图2,标准曲线方程为: $y=-0.3867x+0.4384$, $R^2=0.9897$ 。两种小麦中,试样A仅有粗麸、细麸及全麦粉毒素含量超标,其他粉流所含 AFB1 毒素均在国标限量内。分析可知,皮磨和心磨的六种系统粉的 AFB1 含量无显著性差异,而与粗麸、细麸及全麦粉的比较分析中,差异性显著 ($p<0.001$),说明产生黄曲霉毒素的黄曲霉只浸染试样A的皮层部分。因此,在赤霉病小麦的工业生产中,感染程度较轻的原粮在一定范

国内可用于制粉生产，但需注意麸皮的收集与处理。对于污染程度较重的B小麦，各系统中AFB1污染情况大致为粗麸>全麦粉>麸皮>2M>3M>1M>1B、2B和3B，各个系统粉的AFB1含量均超过国标允许范围，并且存

在显著性差异 ($p<0.001$)。这些数据表明该小麦在受到镰刀菌污染的同时，也受到黄曲霉菌的逐步浸染并深入至内部，这种多种真菌混合严重感染的情况在我国小麦产区发生普遍。

表 3 各系统粉流 AFB1 含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Table 3 AFB1 content in milling streams ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

样品	1B	2B	3B	1M	2M
A	3.30±0.36 ^d	3.33±0.17 ^d	3.11±0.69 ^d	3.96±0.29 ^d	3.42±0.33 ^d
B	6.29±0.07 ^f	5.59±0.29 ^f	6.12±0.84 ^f	7.77±0.31 ^e	13.09±0.46 ^e

样品	3M	粗麸	细麸	全麦粉
A	4.04±0.11 ^d	8.24±0.29 ^b	10.42±0.30 ^a	5.08±0.86 ^c
B	11.36±0.02 ^d	24.01±0.22 ^a	19.13±0.11 ^b	19.80±0.79 ^b

表 4 各系统粉流 ZEN 含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Table 4 ZEN content in milling streams ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

样品	1B	2B	3B	1M	2M
A	63.25±1.94 ^g	91.01±10.73 ^f	103.27±0.70 ^e	108.20±7.97 ^e	98.10±9.58 ^e
B	72.85±2.89 ^e	74.18±1.62 ^e	93.69±0.42 ^d	72.04±2.46 ^e	95.36±6.53 ^d

样品	3M	粗麸	细麸	全麦粉
A	152.04±5.26 ^d	267.09±7.64 ^b	325.90±7.85 ^a	207.44±0.99 ^c
B	134.19±1.51 ^c	237.72±7.69 ^b	269.22±0.04 ^a	236.30±2.20 ^b

ZEN 检测标准曲线如图 3，标准曲线方程为： $y=-0.3643x+0.6359$ ， $R^2=0.9897$ 。与前述两种毒素分布规律类似，镰刀菌属产生的 ZEN 毒素在试样中的分布也主要集中在小麦的皮层部分，因此 A、B 两种试样中的粗麸、细麸和全麦粉的 ZEN 含量远远高于皮磨粉和心磨粉，心磨和皮磨的各系统中 ZEN 毒素含量虽然存

在一定差异，但规律性并不明显^[9]。各粉流中具体 ZEN 含量检测结果如表 4 所示，均超过国家限定的含量 60 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。据 Spss 软件分析，各系统 ZEN 含量存在显著性差异 (p 值均 <0.001)，说明研磨制粉对小麦籽粒中 ZEN 的重新分布效果显著。

表 5 各系统粉流 OTA 含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Table 5 OTA content in milling streams ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

样品	1B	2B	3B	1M	2M
A	0.17±0.01 ^{de}	0.07±0.01 ^e	0.13±0.01 ^e	0.37±0.04 ^c	0.27±0.02 ^{cd}
B	0.67±0.01 ^d	0.99±0.11 ^c	1.07±0.15 ^c	1.46±0.11 ^b	1.57±0.11 ^b

样品	3M	粗麸	细麸	全麦粉
A	0.27±0.02 ^{cd}	0.31±0.02 ^c	1.65±0.05 ^a	0.76±0.13 ^b
B	1.83±0.01 ^a	1.07±0.02 ^c	0.88±0.13 ^{cd}	0.66±0.17 ^a

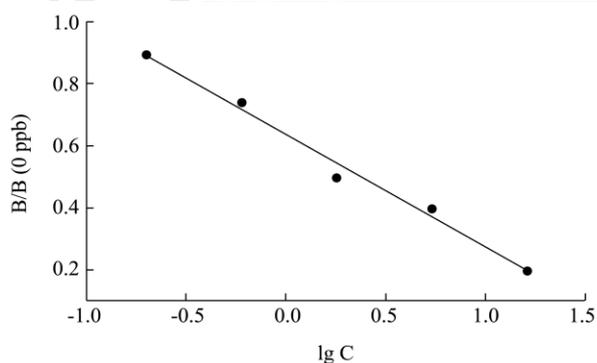


图 4 OTA 标准曲线 1

Fig.4 Standard curve 1 of OTA

A、B 两批小麦的赭曲霉毒素 A 的 OTA 检测结果如表 5 所示，检测标准曲线如图 4，标准曲线方程为： $y=-0.3078x+0.6530$ ， $R^2=0.9851$ 。样品中 OTA 含量均未超过国家标准限量，产生赭曲霉毒素 A 的青霉属和曲霉属浸染试样 A、B 程度较轻。鉴于整个籽粒的 OTA 含量较低，因此各系统粉 OTA 分布规律较不明显，只有心磨粉 OTA 含量稍高于皮磨粉。据 Spss 软件进行分析可知，这些系统粉流之间 OTA 含量存在显著性差异 (p 值均 <0.001)。

综上所述，两批赤霉病小麦均受到了脱氧雪腐镰刀菌、黄曲霉菌及其他等多种真菌的混合污染。真菌

污染造成试样 DON、AFB1 和 ZEN 三种真菌毒素的含量都远远超过国家限量。经过制粉加工，皮层部分含量高的粗麸、细麸和全麦粉中真菌毒素含量远高于其他系统粉流。皮磨和心磨系统粉与相应全麦粉相比，DON、AFB1 和 ZEN 含量分别降低了 1.38~16.24%、20.47~71.77% 及 26.71~69.51%，OTA 含量较低，降低效果不显著。据 SPSS 分析知，各系统粉流中真菌毒素含量存在显著性差异，因此制粉对小麦籽粒中真菌毒素的流向与重新分布效果显著。

2.3 统粉、粗淀粉以及谷朊粉各毒素含量分析

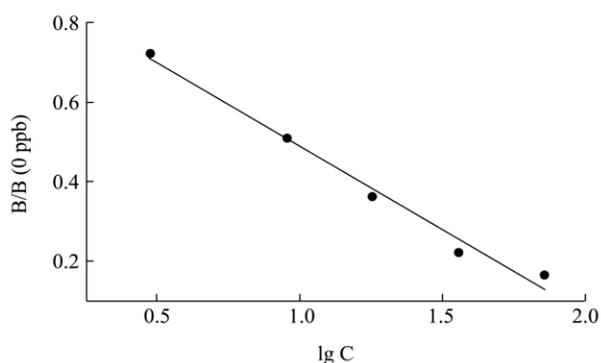


图5 DON标准曲线2

Fig.5 Standard curve 2 of DON

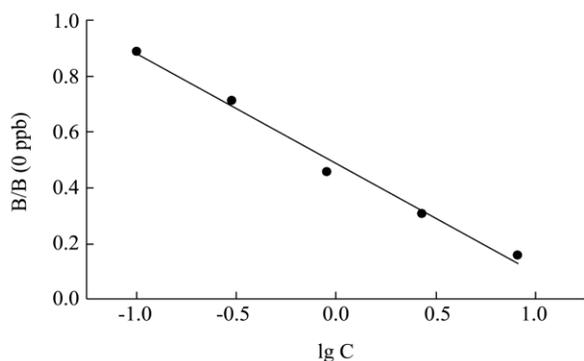


图6 AFB1标准曲线2

Fig.6 Standard curve 2 of AFB1

根据皮磨、心磨各系统出粉率配制统粉并混合均匀，湿法分离统粉中的粗淀粉、谷朊粉，分别测定四种真菌毒素含量，具体检测结果如表 6 所示。DON、AFB1、ZEN 及 OTA 的标准曲线见图 5、图 6、图 7 与图 8，标准曲线方程分别为： $y=-0.4206x+0.9864$ ， $R^2=0.9863$ 、 $y=-0.3919x+0.4872$ ， $R^2=0.9902$ 、 $y=-0.3691x+0.5439$ ， $R^2=0.9854$ 、 $y=-0.3724x+0.5448$ ， $R^2=0.9738$ 。

由检测结果可知，对于两种试样小麦，统粉、谷朊粉、粗淀粉的DON含量依次降低。粗淀粉、谷朊粉的DON含量降为统粉的4.88~12.11%，且远低于国家限量，且三类物料的DON含量存在显著性差异（ p 值

均 <0.001 ）。在湿法加工后，由小麦蛋白部分组成的谷朊粉的DON含量要高于粗淀粉部分，说明DON更易与蛋白质结合；AFB1毒素在统粉、谷朊粉、粗淀粉中的含量虽然差异显著（A试样 p 值 <0.001 ，B试样小麦 p 值 $=0.027$ ），但无明显规律性。粗淀粉、谷朊粉的AFB1含量最高可达统粉的2.55倍；粗淀粉和谷朊粉中ZEN的含量变化差异较大，粗淀粉消减为统粉的12.70~15.83%，谷朊粉中ZEN含量可达统粉的4.11倍，且三类物料的ZEN含量差异性显著（ p 值均 <0.001 ）。此外，谷朊粉与粗淀粉中ZEN含量的显著性差异，说明小麦粉中ZEN与蛋白的结合远远多于淀粉；OTA含量的变化与黄曲霉毒素类似，毒素在淀粉和谷朊粉中得到了较大程度的浓缩，富集程度达2.47~3.65倍。

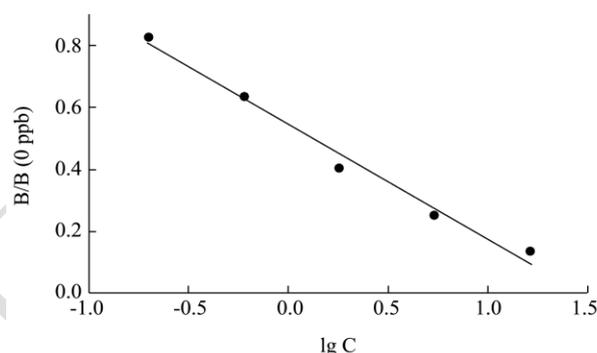


图7 ZEN标准曲线2

Fig.7 Standard curve 2 of ZEN

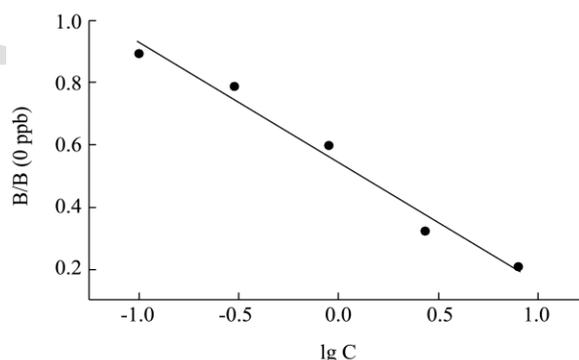


图8 OTA标准曲线2

Fig.8 Standard curve 2 of OTA

四种毒素在加工过程中不同的变化规律很大程度上与水溶特性以及真菌自身特性有关。由于DON具有易溶于水溶液的性质，在湿法加工统粉的过程中，随着洗涤水的加入，DON随之流失，造成粗淀粉和谷朊粉中的含量很大程度的降低，而AFB1及OTA相对难溶于水，收集粗淀粉和谷朊粉相当于浓缩产物中的真菌毒素的过程。此外，真菌呼吸、繁殖等需要大分子物质的参与，以及自身性质的不同，使得粗淀粉和谷朊粉中ZEN含量呈现相反的变化趋势。据各系统真菌毒素含量的差异性分析可知，湿法加工显著影响真菌毒

素的分布。

表6 统粉、粗淀粉以及谷朊粉的DON、AFB1、ZEN和OTA含量(μg/kg)

Table 6 DON, AFB1, ZEN, and OTA content of straight flour, crude starch, and gluten flour (μg/kg)

毒素种类	A			B		
	统粉	粗淀粉	谷朊粉	统粉	粗淀粉	谷朊粉
DON	4352.01±62.28 ^a	212.66±4.55 ^b	277.12±19.10 ^b	3934.53±87.83 ^a	207.72±8.10 ^c	476.30±9.90 ^b
AFB1	3.36±0.03 ^c	5.08±0.15 ^b	8.56±0.10 ^a	9.57±0.05 ^b	10.10±0.40 ^b	11.25±0.40 ^a
ZEN	110.96±0.90 ^b	14.09±0.34 ^c	456.69±9.23 ^a	46.55±1.13 ^b	7.37±0.15 ^c	219.07±1.77 ^a
OTA	0.17±0.00 ^c	0.42±0.01 ^b	0.62±0.06 ^a	0.47±0.14 ^b	1.38±0.10 ^a	1.32±0.04 ^a

3 讨论

3.1 赤霉病小麦随感染程度变化,真菌菌丝逐渐侵入籽粒内部,在各部分代谢产生各种真菌毒素。研磨把小麦籽粒剥开并刮下胚乳,不同粒度的物料通过筛理转移至不同系统粉流。由于皮层、胚乳等籽粒的不同部位抵抗外界机械能力不同,因此转移至不同系统的几率也不同。真菌浸染程度会影响小麦籽粒各部位中真菌毒素含量,而籽粒各个部位在各个系统中所占比例不同,因此真菌毒素转移至各系统中的比例具有一定差异。本研究结果表明,病麦经研磨加工后,麸皮与全麦粉中的真菌毒素含量高于皮磨、心磨系统粉。各系统DON等真菌毒素含量的分布具有明显规律性,说明真菌首先浸染小麦籽粒的皮层,并由外向内,逐步深入。四种真菌毒素在各系统粉中的含量都具有显著性差异,说明研磨制粉是消解降低赤霉病麦真菌毒素含量的有效加工途径。由于两小麦真菌感染均较为严重,相应的皮磨粉和心磨粉的真菌毒素含量都远超国家标准限量(OTA含量及试样A的AFB1含量除外),研磨加工方法对于消减病麦中毒素程度有限。

3.2 湿法加工统粉,分离提取出其中的淀粉和谷朊粉。研究表明,湿法加工对小麦粉中真菌毒素的分布影响显著。由于真菌自身性质不同,DON易溶于水,AFB1与OTA不易溶于水,因此,随着湿法加工过程的进行,大部分DON会转移至洗涤水中,使得粗淀粉、谷朊粉的DON含量降为统粉的4.88~12.11%,AFB1与OTA分别浓缩富集为统粉的1.06~2.55和2.47~3.65倍。而ZEN不易溶于水,但倾向于与蛋白质结合,使得粗淀粉中ZEN消减为统粉的12.70~15.83%,谷朊粉中ZEN则富集为统粉的4.11倍。因此,真菌毒素的水溶特性、真菌自身适宜生长条件的差异、呼吸、繁殖等所需能量的来源等都会影响真菌毒素在湿法加工产物中的分布,粗淀粉与谷朊粉中各真菌毒素的分布说明DON、AFB1、ZEN更易于小麦籽粒中的蛋白质结合,尤以ZEN显著。

3.3 通过对赤霉病小麦研磨及湿法加工的各产物中

真菌毒素的研究,进一步了解真菌毒素在工业生产中的分布与流向问题。赤霉病感染小麦通过研磨制粉,所得到的系统粉中各毒素含量都低于全麦粉,说明研磨制粉是赤霉病小麦合理利用的方法之一。在实际生产中,鉴于制粉的毒素消减作用有限,仍需严格检测与掌控产品的残留物含量,并妥善做好面粉的后处理以及麸皮的处理工序,以使产品能符合国家标准要求。湿法加工产物中的DON含量低于相应小麦粉,粗淀粉中ZEN含量显著低于小麦粉,但AFB1与OTA以及谷朊粉中ZEN则浓缩富集。因此,针对单纯感染镰刀菌的小麦,湿法分离淀粉、谷朊粉是有效的加工途径;而针对处理真菌污染严重以及混合污染的小麦,还需要继续研究与摸索。此外,湿法加工路线的消减或富集程度与产物自身性质之间的关系以及加工过程中产生的洗涤水的处理方式,都需进一步探索研究。

参考文献

- [1] Whiting R C. Microbiological modeling [J]. *Critical Rev. in Food Sci. and Nutrition*, 1995, 35: 467-494
- [2] 丁卫新.赤霉病对小麦品质影响的研究[J].*现代面粉工业*,2013,4:28-31
DING Wei-xin. Studies on the effect of scab on the quality of wheat [J]. *Modern Flour Milling Industry*, 2013, 4: 28-31
- [3] 金昭,蔡国林,陆健.制麦和酿造过程中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的初步研究[J].*啤酒科技*,2010,8:29-35
JIN Zhao, CAI Guo-lin, Lu Jian. Study of deoxynivalenol in the process of malting and brewing [J]. *Beer Science and Technology*, 2010, 8: 29-35
- [4] 余元善,邱礼平,吴晖,等.玉米干磨酒精生产期间原料内呕吐毒素和赤霉烯酮的去向[J].*食品工业科技*,2011,6:208-211
YU Yuan-shan, QIU Li-ping, WU Hui, et al. Fate of deoxynivalenol and zearalenone during dry grind corn ethanol production [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 6: 208-211
- [5] Bullerman L B, Bianchini A. Stability of mycotoxins during

- food processing [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2007,119(1-2): 140-146
- [6] 白小芳.真菌毒素在食品加工过程中的变化规律[J].农产品加工(创新版),2010,8:68-71,74
BAI Xiao-fang. Change regularity of mycotoxins be used in food processing [J]. *Innovational Edition of Farm Products Processing*, 2010, 8: 68-71, 74
- [7] Lancova K, Hajslova J, Kostelanska M, et al. Fate of trichothecene mycotoxins during the processing: Milling and baking [J]. *Food Additives and Contaminants: Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2008, 25(5): 650-659
- [8] 王华,唐洁,张志航,等.制粉对小麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)的迁移作用[J].粮食储藏,2014,43(4):13-16
WANG Hua, TANG Jie, ZHANG Zhi-hang, et al. The transference effect of deoxynivalenol (DON) in wheat milling [J]. *Grain Storage*, 2014, 43(4): 13-16
- [9] 张慧杰.小麦真菌毒素在加工过程中的消解、转移规律研究[D].北京:中国农业科学院,2014
ZHANG Hui-jie. Degradation and diverting rules of wheat mycotoxins in the processing [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014
- [10] 姬建生,张红云,高海军,等.加工对不同小麦制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版), 2012,33(1):50-52,83
JI Jian-sheng, ZHANG Hong-yun, GAO Hai-jun, et al. Influence of processing treatment on deoxynivalenol of various wheat products [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 33(1): 50-52, 83
- [11] 顾正彪,王良东.小麦A淀粉和B淀粉的比较[J].中国粮油学报,2004,19(6):27-30,42
GU Zheng-biao, WANG Liang-dong. Comparion between a-starch and b-starch from wheat [J]. *Joumal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2004, 19(6): 27-30, 42
- [12] 孙小凡,曾庆华.小麦淀粉实验室制备工艺研究[J].粮油加工,2008,1:96-98
SUN Xiao-fan, ZENG Qing-hua. Study on the preparation of wheat sarch for laboratory [J]. *Ereals and Oils Processing*, 2008, 1: 96-98
- [13] Hallier A, Celette F, David C. Effects of sampling and extraction on deoxynivalenol quantification [J]. *Food Chemistry*, 2011,127(1): 303-307
- [14] Lancova K, Hajslova J, Kostelanska M, et al. Fate of trichothecene mycotoxins during the processing: milling and baking [J]. *Food Additives and Contaminants: Part A -Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2008, 25(5):650-659
- [15] 赵亚娟.赤霉病感染小麦品质特性的研究[D].郑州:河南工业大学,2013
ZHAO Ya-juan. Studies on quality of fusarium heat blight wheat [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013