

呕吐毒素污染对小麦质量安全和品质指标及利用价值的影响

张春娥¹, 廖若宇¹, 刘新保¹, 牛莹¹, 孙悦¹, 郭宝元^{1,2,*}

(1.宁夏回族自治区粮油产品质量检测中心, 宁夏 银川 750001; 2.国家粮食和物质储备局科学研究院, 北京 100037)

摘要: 本研究选取17个呕吐毒素污染的小麦籽粒样本, 对其容重、面筋吸水量、粗蛋白质含量、不完善粒含量、生芽粒含量、赤霉病粒含量、虫蚀粒含量等质量安全和品质指标、呕吐毒素和重金属污染状况进行分析; 并进一步分析小麦籽粒呕吐毒素含量与其他参数之间的关系; 考察在将皮磨粉和心磨粉制备成为面筋和淀粉的加工过程对呕吐毒素污染水平的影响。结果表明: 小麦籽粒中呕吐毒素的污染水平与容重、面筋吸水量、粗蛋白质、不完善粒含量、生芽粒、赤霉病粒、虫蚀粒能够建立良好的线性相关性。而其中面筋吸水量与呕吐毒素含量相关性不明显, 说明呕吐毒素含量高低不会影响小麦的储存品质; 考察营养物质、重金属与小麦粗麸、细麸、皮磨粉、心磨粉、全麦粉中呕吐毒素含量的相关性时发现, 重金属As和Cd、元素Ca和P与呕吐毒素含量无相关性, 仅全麦粉中的Ca与呕吐毒素含量存在相关性; 进一步将皮磨粉和心磨粉制备为面筋和淀粉, 测得其呕吐毒素水平均低于200 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 说明呕吐毒素超标小麦可以通过制备面筋或淀粉实现商业化应用。

关键词: 小麦; 污染籽粒; 呕吐毒素; 多元线性回归; 产品应用

Effect of Deoxynivalenol Contamination on the Safety, Quality Indexes and Utilization Rate of Wheat

ZHANG Chun'e¹, LIAO Ruoyu¹, LIU Xinbao¹, NIU Ying¹, SUN Yue¹, GUO Baoyuan^{1,2,*}

(1. Ningxia Hui Autonomous Region Grain and Oil Product Quality Inspection Center, Yinchuan 750001, China;

2. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: In this study, 17 deoxynivalenol (DON) contaminated wheat samples were assessed for safety and quality index such as unit weight, water absorption of gluten, crude protein content, unsound kernel content, sprouted kernel content, gibberella damaged kernel content and insect infested kernel content as well as the pollution status of DON and heavy metals. Furthermore, the relationship between the content of DON in wheat grains and other parameters was analyzed. The impact of the processing of gluten and starch in the break and reduction systems on the level of DON contamination was examined. The results showed that the pollution level of DON in wheat samples had a good linear correlation with unit weight, water absorption of gluten, crude protein content, unsound kernel content, sprouted kernel content, gibberella damaged kernel content and insect infested kernel content. The correlation between gluten water absorption and the content of DON was not significant, indicating that DON content could not affect the storage quality of wheat. Additionally, it was found that the heavy metals As and Cd as well as the elements Ca and P were not significantly correlated with DON content, but only Ca in whole wheat flour was correlated with the content of DON. The levels of DON in gluten and starch from the break and reduction systems, respectively were both lower than 200 $\mu\text{g}/\text{kg}$, indicating that wheat with DON over-standard can be used commercially for the preparation of gluten or starch.

Keywords: wheat; contaminated grains; deoxynivalenol; multiple linear regression; product application

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230523-222

中图分类号: TS201.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2024)03-0211-06

收稿日期: 2023-05-23

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF03031)

第一作者简介: 张春娥(1987—)(ORCID: 0000-0003-3448-4149), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为粮油产品质量与安全。

E-mail: zhchune@163.com

*通信作者简介: 郭宝元(1976—)(ORCID: 0000-0002-5402-2745), 男, 研究员, 博士, 研究方向为粮油产品质量与安全。

E-mail: gby@ags.ac.cn

引文格式:

张春娥, 廖若宇, 刘新保, 等. 呕吐毒素污染对小麦质量安全和品质指标及利用价值的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 211-216. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230523-222. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Chun'e, LIAO Ruoyu, LIU Xinbao, et al. Effect of deoxynivalenol contamination on the safety, quality indexes and utilization rate of wheat[J]. Food Science, 2024, 45(3): 211-216. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230523-222. <http://www.spkx.net.cn>

呕吐毒素, 又名脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON), 是污染小麦最主要的真菌毒素^[1]。DON对人类和动物都有负面影响, 食用被DON污染食物, 可以引发腹泻、恶心、呕吐、头晕和发烧等中毒症状^[2-3]; 此外, DON还可以导致反刍动物和非反刍动物的免疫抑制、细胞坏死和平滑肌麻痹等^[4-5]。DON是一种强效核糖体抑制剂, 能够增强食源性基因毒素的遗传毒性, 加剧一种由肠道细菌产生的DNA交联毒素的遗传毒性引起不同形式的DNA损伤, 例如依托泊苷、顺铂和腐霉菌素分别诱发DNA双链断裂、DNA加合物和交联、单链断裂^[1]。鉴于DON的危害, GB 2761—2017《食品中真菌毒素限量》^[6]规定了大多数谷物及其制品中DON限量为1 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$, GB 13078—2017《饲料卫生标准》^[7]规定了不同类型饲料中DON限量: 植物性饲料原料限量5 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 犊牛、羔羊、泌乳期精料补充料、猪配合饲料限量1 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 其他精料补充料、其他配合饲料限量3 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

小麦营养丰富, 富含蛋白质、淀粉、维生素和矿物质元素等, 是人类主粮, 小麦DON污染和品质之间的关系也备受关注。有研究指出, DON污染的小麦, 其籽粒中DON水平很高, 但是小麦谷蛋白亚基和麦醇溶蛋白并未受到影响, 烘焙质量亦未下降^[8]。考虑到DON的水溶特性, 含有DON的面粉制作成面条后, 经煮制后面条中的DON含量与小麦粉相比降低了40%左右^[9-10]。小麦蛋白质是小麦粉中最主要成分之一, 主要由醇溶蛋白和麦谷蛋白两种蛋白组成^[11-12]。小麦在制备淀粉和蛋白等深加工过程中, 其中的真菌毒素和重金属污染水平均有可能下降。因此小麦深加工是解决真菌毒素污染粮食用途的重要手段^[13]。

本实验收集了江苏和安徽等地的17个DON污染的小麦籽料样品, 以其中DON水平为研究对象, 考察质量指标、品质特性和卫生指标与DON含量的关系; 进一步通过深加工工艺, 将皮磨粉和心磨粉分别制成面筋、淀粉和可溶性物质, 测试其DON含量, 探究DON污染在小麦深加工过程中的分布规律。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

DON污染的小麦籽料样品产自江苏连云港、安徽

淮北、安徽阜阳等地, 收获年份为2015—2016年, 样品采集时间为2019—2020年。样品存放于密封的防潮塑料袋, 保存在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷库中直至分析。样品总计数量17份, 每个样品2 kg。

DON标准溶液(CAS: 51481-10-8, 质量浓度 $(199\pm 10)\text{ mg}/\text{L}$) 上海安谱实验科技股份有限公司; 甲醇、乙腈(均为色谱纯) 美国Fisher公司; 氯化钠(分析纯) 成都市科隆化学品有限公司; 硝酸(优级纯) 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

1290-6470型超高效液相色谱-串联三重四极杆质谱仪、ZORBAX Eclipse Plus C_{18} 柱 美国Agilent公司; 3100型锤式实验室粉碎磨、DA7200型近红外分析仪、GM2200面筋数量和质量测定系统、烘干仪 瑞典Pertene公司; PL602E型分析天平 瑞士Mettler Toledo公司; DON免疫亲和柱 北京勤邦科技股份有限公司; IKA Vortex 2型涡旋混匀器 艾卡(广州)仪器设备有限公司; HGG-II横格式分样器、BLH-310K除杂机、BLH-6200微电脑自动数粒仪、GHCS-1000谷物电子容重器 浙江伯利恒仪器设备有限公司; GQ-P600谷物品质分析仪 安徽高哲信息技术有限公司; PlasmaQuant[®]MS电感耦合等离子体质谱仪 德国耶拿分析仪器有限公司; JMF70 \times 30实验室小麦磨粉机 成都施威特科技发展有限公司; Milestone PYRO XL微波灰化系统、ultraCLAVE超微波化学平台 北京莱伯泰科仪器股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

采用BLH-310K除杂机将小麦中的杂质以及异种粮粒等去除, 采用GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》^[14]方法测定清理干净后的小麦中的水分含量, 依据GB/T 21304—2007《小麦硬度测定 硬度指数法》^[15]测定小麦硬度, 依据小麦的硬度选择合适的入磨水分。软麦水分调节到13%~14%, 硬麦水分调节到15%~16%, 按照NY/T 1094.1—2006《小麦实验制粉 第1部分: 设备、样品制备和润麦》^[16]附录A中方法A.2中A.1公式或按方法A.2中表A.1到A.3查表计算出需要的加水量, 称量小麦至密闭容器里, 逐步加入润麦水进行润麦, 采用JMF70 \times 30实验室小麦磨粉机将润好的麦子制粉, 每个样本的粗麸、细麸、皮磨粉、心磨粉分别标记分装。

1.3.2 DON含量测定

依据GB 5009.111—2016《食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰化衍生物的测定》^[17]第一法同位素稀释液相色谱-串联质谱法测定DON, 样本前处理采用免疫亲和柱净化后上机测定。称取(5.00±0.01) g样品, 加入25 mL水, 采用涡旋混合器快速提取5 min, 离心5 min, 取2 mL上清液过免疫亲和柱净化, 收集洗脱液并在50~60 °C加热条件下N₂吹干, 然后用1 mL流动相复溶; 复溶液用0.22 μm微孔滤器过滤后转移至样品瓶中用于超高效液相色谱-串联三重四极杆质谱仪分析。

1.3.3 不完善粒含量测定

依据GB/T 22504.1—2008《粮油检验 粮食感官检验 辅助图谱 第1部分: 小麦》^[18]和GB/T 5494—2019《粮油检验 粮食、油料的杂质、不完善粒检验》^[19], 将小麦样品清杂后, 缩分得到约50.0 g小样, 采用谷物质分析仪对采集的样本中的不完善粒含量、生芽粒含量、赤霉病粒含量、虫蚀粒含量进行测定。

1.3.4 自然水分千粒质量的测定

依据GB/T 5519—2018《谷物与豆类 千粒重的测定》^[20]中6.1要求, 采用微电脑自动数粒仪从实验室样品中随机取出大约500粒试样, 挑出完整粒并称量, 记录完整粒的个数, 按照标准中规定的计算公式计算千粒质量。

1.3.5 粗蛋白质的测定

依据GB/T 24899—2010《粮油检验 小麦粗蛋白质含量测定 近红外法》^[21], 样品经除去杂质整理后, 采用近红外谷物分析仪分析样本中的蛋白质, 每个样品测定两次, 第一次测定后的测定样品应与原待测样品混匀后, 再次取样进行第二次测定。

1.3.6 面筋吸水量的测定

按照GB/T 5506.2—2008《小麦和小麦粉 面筋含量 第2部分: 仪器法测定湿面筋》^[22]和GB/T 5506.4—2008《小麦和小麦粉 面筋含量 第4部分: 快速干燥法测定干面筋》^[23]规定方法, 采用面筋测定仪和烘干炉制取湿面筋和干面筋, 依据GB/T 20571—2006《小麦储存品质判定规则》^[24]中6.2计算面筋吸水量。

1.3.7 容重的测定

依据GB/T 5498—2013《粮油检验 容重测定》^[25]测定样本容重。

1.3.8 重金属(砷、镉)及钙、磷元素的测定

依据GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》^[26]第一法, 称取样品0.2 g(精确至0.001 g)于石英管中, 加入2 mL硝酸, 密封石英管后放入超微波化学平台消解, 消解程序和仪器操作条件参照GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》附录B。

1.3.9 面筋、淀粉和可溶性物质的制取

按照GB/T 5506.2—2008《小麦和小麦粉 面筋含量 第2部分: 仪器法测定湿面筋》^[22], 采用面筋测定仪制取面筋, 选择正确的清洁筛网安装于洗涤室, 并在实验前润湿; 称量待测样品10 g(精确至0.01g), 将称好的样品全部放入洗涤室中, 用可调移液器向待测样品中加入4.2~5.2 mL氯化钠溶液(20 g/L), 移液器流出的水流应直接对着洗涤室壁, 避免其直接穿过筛网, 轻轻摇动洗涤室, 使溶液均匀分布在样品的表面。仪器预设的洗涤时间为5 min, 需要的氯化钠洗涤液250~280 mL, 洗涤完成后, 用金属镊子将湿面筋从洗涤室中取出, 确保洗涤室中不留有任何湿面筋。将面筋分成大约相等的两份, 轻轻压在离心机的筛盒上。启动离心机, 离心60 s, 用金属镊子取下湿面筋, 立即称质量并记录。

依据GB/T 5506.4—2008《小麦和小麦粉 面筋含量 第4部分: 快速干燥法测定干面筋》^[23]规定方法, 取制得的湿面筋球放置在已经预热的干燥器中加热300 s。从干燥器中取出干面筋并称量得到干面筋的质量。将制取的干面筋粉碎后测定其DON含量。洗涤过程中收集的洗涤液静置分层, 将上清液收集于离心管中待测试, 其下层沉淀液(即淀粉)经高速冻干离心机离心冻干后, 置于阳光下晾干, 分别测定上清液和淀粉中的DON含量。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 24.0软件进行多重线性回归相关性分析和配对样本 t 检验分析, 显著性水平 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 小麦籽粒品质特性

本研究中的小麦样本品质特性见表1。其中, 容重为756~788 g/L, 平均值为777 g/L, 符合GB 1351—2008《小麦》规定二等小麦要求^[27]。面筋吸水量为129%~224%, 平均值为204%, 符合GB/T 20571—2006《小麦储存品质判定规则》^[24]宜存吸水量要求。粗蛋白质含量为11.4%~13.3%, 平均值为12.1%。千粒质量为36.2~40.6 g, 平均值为38.1 g。不完善粒含量为4.6%~12.6%, 平均值为7.7%, 符合GB 1351—2008《小麦》规定三等小麦不完善粒含量要求^[28]。生芽粒含量为0.5%~7.4%, 平均值为3.1%。赤霉病粒含量为0.8%~3.1%, 平均值为1.9%。虫蚀粒含量为0.3%~1.7%, 平均值为0.7%。DON含量为0.55~5.39 mg/kg, 平均值为2.12 mg/kg, 不符合食用小麦DON限量要求, 适用于其他精料补充料、其他配合饲料DON限量要求^[6-7]。

表1 小麦样品品质特性
Table 1 Quality characteristics of wheat samples

参数	最小值	最大值	平均值	标准差 (n=3)	变异系数/% (n=3)
容重/(g/L)	756	788	777	2.12	0.28
面筋吸水量/%	129	224	204	0.14	10.41
粗蛋白质含量/%	11.4	13.3	12.1	0.11	0.87
千粒质量/g	36.2	40.6	38.1	0.69	1.83
不完善粒含量/%	4.6	12.6	7.7	0.26	3.72
生芽粒含量/%	0.5	7.4	3.1	0.19	10.89
赤霉病粒含量/%	0.8	3.1	1.9	0.19	10.57
虫蚀粒含量/%	0.3	1.7	0.7	0.09	14.76
DON含量/(mg/kg)	0.55	5.39	2.12	0.13	6.99

2.2 小麦籽粒品质特性与DON关系分析

通过构建多元线性回归模型,分析小麦籽粒中DON与其品质特性的关系,探究DON与容重、面筋吸水量、粗蛋白质、不完善粒含量的相关性。结果表明(表2), $F=4.818$, $P<0.05$, $R^2=0.626$,此多元回归方程描述的小麦籽粒中DON含量与质量品质参数有统计学意义。其中,与小麦籽粒品质密切相关的容重($r=-0.264$, $P=0.030$)、粗蛋白质含量($r=-0.393$, $P=0.021$)与DON含量有显著的负相关性。面筋吸水量($r=-0.099$, $P=0.070$)与DON含量无显著相关性,即DON含量高低不会影响小麦的储存品质。虽然不完善粒含量与DON污染水平之间的相关性并无显著性,但不完善粒中的赤霉病粒含量($r=0.538$, $P=0.028$)、虫蚀粒含量($r=-0.229$, $P=0.039$)与DON含量的相关性却显著。其中赤霉病粒含量与DON含量存在显著的正相关性,与已有研究结果^[28-29]一致。

表2 品质指标对DON含量的预测分析
Table 2 Prediction of DON content based on quality indexes

指标	相关性r	显著水平P	F	R ²
容重	-0.264	0.030		
面筋吸水量	-0.099	0.070		
粗蛋白质	-0.393	0.021		
不完善粒含量	0.255	0.087	4.818	0.626
生芽粒	-0.877	0.059		
赤霉病粒	0.538	0.028		
虫蚀粒	-0.229	0.039		

2.3 小麦籽粒不同部位DON含量

含有DON毒素的小麦籽粒在磨粉过程中,因DON在小麦籽粒不同部位污染水平存在差异,导致制粉产生的不同组分中DON水平也不尽相同。有研究表明,DON主要分布于小麦的表皮附近,其中,胚芽和麸皮部分DON含量最高^[29-31]。将17份DON污染小麦样品制粉,获取粗麸、细麸、皮磨粉和心磨粉,并对不同组分中DON水平分析。从表3结果来看,皮磨粉和心磨粉中的DON水平明显低于粗麸和细麸,但大多数皮磨粉和心磨粉中DON的水平仍高于DON的限量(1 000 μg/kg)。DON

主要集中在粗麸和细麸中,粗麸中DON含量变化幅度为0.45~8.33 mg/kg,平均3.41 mg/kg;细麸中DON含量变化幅度为0.95~6.29 mg/kg,平均2.91 mg/kg。皮磨粉和心磨粉中DON含量相对较低,皮磨粉中DON含量变化幅度为0.56~3.78 mg/kg,平均2.06 mg/kg;心磨粉中DON含量变化幅度为0.24~4.76 mg/kg,平均2.13 mg/kg。全麦粉中DON含量变化幅度为0.55~5.39 mg/kg,平均2.12 mg/kg。

表3 DON在小麦籽粒中的分布
Table 3 DON distribution in wheat grains

部位	含量/(mg/kg)			标准差/(mg/kg) (n=3)	变异系数/% (n=3)
	最小值	最大值	平均值		
粗麸	0.45	8.33	3.41	0.16	3.37
细麸	0.95	6.29	2.91	0.09	3.69
皮磨粉	0.56	3.78	2.06	0.06	3.10
心磨粉	0.24	4.76	2.13	0.08	3.63
全麦粉	0.55	5.39	2.12	0.11	3.52

2.4 全麦粉和小麦粉中钙、磷和重金属含量与DON的相关性

一般而言,小麦中的关键无机元素、金属元素和重金属主要受到种植土壤元素组成和污染状况影响,同时,重金属的累积水平受真菌毒素污染水平影响比较小。为此,测定粗麸、细麸、皮磨粉和心磨粉组分中钙、磷和重金属含量,结果见表4。此17份小麦样品中砷和镉均符合污染物限量要求。总体上,无论是重金属镉和砷,还是磷和钙元素,在心磨粉中的水平均高于皮磨粉、粗麸和细麸,同时,砷在细麸中的水平也明显高于粗麸和皮磨粉。从此结果来看,砷和镉在小麦中累积机制、途径和归宿存在很大差异。

表4 小麦籽粒不同组分中钙、磷和重金属含量
Table 4 Contents of Ca, P and heavy metals in wheat bran and flour mg/kg

指标	粗麸	细麸	皮磨粉	心磨粉	全麦粉
砷含量	最小值	0.000	0.000	0.014	0.000
	最大值	0.044	0.098	0.049	0.079
	平均值	0.008	0.045	0.010	0.049
镉含量	最小值	0.020	0.028	0.022	0.055
	最大值	0.048	0.038	0.050	0.068
	平均值	0.031	0.033	0.031	0.060
钙含量	最小值	3.0	3.0	3.0	4.3
	最大值	6.0	5.9	4.2	12.3
	平均值	3.6	3.9	3.3	7.3
磷含量	最小值	16.8	22.7	10.8	25.3
	最大值	21.6	25.3	22.4	27.0
	平均值	17.8	23.6	18.1	26.2

全麦粉、皮磨粉、心磨粉、粗麸和细麸中DON与元素之间的相关性见表5,全麦粉、皮磨粉、心磨粉、粗麸和细麸中,DON与砷、镉、磷无相关性($P>0.05$);皮

磨粉、心磨粉、粗麸和细麸中DON与钙无相关性。全麦粉中, DON与钙 ($r = -0.699, P = 0.026$) 显著负相关, 可能表明镰刀菌感染的小麦籽粒, 在内部DON累积的过程中, 影响到钙在其中的累积。

表5 全麦粉和小麦粉中钙、磷元素和重金属含量与DON的相关性
Table 5 Correlation between contents of calcium, phosphorus, heavy metals and DON in whole wheat flour and wheat flour

分析组分	相关性 r					显著性水平 P				
	全麦粉	皮磨粉	心磨粉	粗麸	细麸	全麦粉	皮磨粉	心磨粉	粗麸	细麸
砷	0.181	0.240	-0.245	0.171	-0.092	0.494	0.370	0.317	0.549	0.807
镉	-0.173	0.135	0.551	0.118	-0.181	0.476	0.601	0.058	0.712	0.567
钙	-0.699	-0.133	0.102	-0.327	0.201	0.026	0.606	0.817	0.264	0.470
磷	0.469	0.376	0.609	-0.021	0.211	0.085	0.169	0.206	0.095	0.593

2.5 皮磨粉和心磨粉分离制取面筋和淀粉后DON含量变化

通过制粉加工工艺, 虽然可以降低产品中的DON水平, 但对于大多数高DON污染小麦样品制得的皮磨粉和心磨粉都无法达到DON限量要求。本研究试图通过进一步将皮磨粉和心磨粉制备淀粉和面筋, 考察小麦深加工过程中DON污染水平的变化。为考察含有DON的小麦粉在制作面筋和淀粉后DON含量变化情况, 对17份样本采用1.3.9节方法制取面筋和淀粉, 对配对样本DON含量进行 t 检验, 研究结果(表6和表7)表明: 皮磨粉DON平均含量为1 493.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 采用1.3.9节方法处理后, 洗涤液中DON平均含量为1 394.71 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 面筋中DON平均含量为68.59 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 淀粉中DON平均含量为102.59 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。心磨粉DON平均含量为1 970.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 采用1.3.9节方法处理后, 洗涤液中DON平均含量为1 745.29 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 面筋中DON平均含量为153.59 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 淀粉中DON平均含量为125.65 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。结果表明不同含量DON的小麦粉, 在制取淀粉和面筋过程中, 由于DON的水溶性, DON转移至洗涤液中, 面筋和淀粉中的DON含量明显降低。表8配对2中, DON含量高的皮磨粉在面筋洗涤后DON含量有显著变化。表8配对3中, DON含量高的皮磨粉在制成淀粉后DON含量有显著变化。表9配对2中, DON含量高的心磨粉在面筋洗涤后DON含量有显著变化。表9配对3中, DON含量高的心磨粉在制成淀粉后DON含量有显著变化。可见, 通过制取淀粉和面筋, 可将DON超标的小麦深加工利用。

表6 皮磨粉配对样本DON含量统计
Table 6 Statistics of DON content in paired samples of break flour

配对样本	名称	平均值/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	个案数	标准误差平均值
配对1	皮磨粉	1 493.47	17	167.889
	洗涤液	1 394.71	17	144.396
配对2	皮磨粉	1 493.47	17	167.889
	面筋	68.59	17	16.049
配对3	皮磨粉	1 493.47	17	167.889
	淀粉	102.59	17	16.787

表7 心磨粉配对样本DON含量统计

Table 7 Statistics of DON content in paired samples of reduction flour

配对样本	名称	平均值/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$	个案数	标准误差平均值
配对1	心磨粉	1 970.47	17	308.056
	洗涤液	1 745.29	17	292.215
配对2	心磨粉	1 970.47	17	308.056
	面筋	153.59	17	40.504
配对3	心磨粉	1 970.47	17	308.056
	淀粉	125.65	17	25.793

表8 皮磨粉配对样本DON含量相关性及配对样本 t 检验
Table 8 Correlation of DON content in paired samples and t -test of paired samples of break flour

配对样本	名称	个案数	相关性	t	自由度	显著性(双尾)
配对1	皮磨粉&洗涤液	17	0.901	1.349	16	0.196
配对2	皮磨粉&面筋	17	0.984	8.453	16	0.000
配对3	皮磨粉&淀粉	17	0.704	8.326	16	0.000

表9 心磨粉配对样本DON含量相关性及配对样本 t 检验
Table 9 Correlation of DON content in paired samples and t -test of paired samples of reduction flour

配对样本	名称	个案数	相关性	t	自由度	显著性(双尾)
配对1	心磨粉&洗涤液	17	0.985	4.169	16	0.001
配对2	心磨粉&面筋	17	0.814	6.581	16	0.000
配对3	心磨粉&淀粉	17	0.647	6.317	16	0.000

3 结论

本实验选用DON污染的小麦籽粒为研究对象, DON污染水平在0.55~5.39 mg/kg 。同时, 考察了DON污染水平对小麦容重、面筋吸水量、不完善粒含量、粗蛋白质的影响。结果表明: 面筋吸水量与DON含量相关性不明显, 即DON含量高低不会影响小麦的储存品质; 而DON与粗蛋白质含量和容重显著相关($P < 0.05$)。进一步将DON污染小麦制成全麦粉、粗麸、细麸、皮磨粉和心磨粉, DON含量主要集中在粗麸和细麸中, 皮磨粉和心磨粉中DON较全麦粉、粗麸和细麸中的DON含量低。将DON污染的小麦制成皮磨粉和心磨粉, 进一步将其分离制取面筋和淀粉, 制备的面筋和淀粉中的DON水平均低于200 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 表明DON污染超标小麦制备面筋或淀粉的潜在商业价值。

参考文献:

[1] GAROFALO M, PAYROS D, OSWALD E, et al. The foodborne contaminant deoxynivalenol exacerbates DNA damage caused by a broad spectrum of genotoxic agents[J]. Science of the Total Environment, 2022, 820: 153280. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.153280.

[2] JAMES J. PESTKA. Deoxynivalenol: toxicity, mechanisms and animal health risks[J]. Animal Feed Science and Technology, 2007, 137(3/4): 283-298. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2007.06.006.

[3] SOBROVA P, ADAM V, VASATKOVA A, et al. Deoxynivalenol and its toxicity[J]. Interdisciplinary Toxicology, 2010, 3(3): 94-99. DOI:10.2478/v10102-010-0019-x.

- [4] VINICIUS D, OLNEI A M, DIOGO L, et al. Impact of deoxynivalenol on intestinal explants of broiler chickens: an *ex vivo* model to assess antimycotoxins additives[J]. *Toxicon*, 2021, 200: 102-109. DOI:10.1016/J.TOXICON.2021.06.016.
- [5] RICHARD L J. Some major mycotoxins and their mycotoxicoses: an overview[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2007, 119(1/2): 3-10. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.019.
- [6] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品中真菌毒素限量: GB 2761—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 3.
- [7] 国家标准化管理委员会, 国家质量监督检验检疫总局. 饲料卫生标准: GB 13078—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 10.
- [8] KOSTELANSKA M, DZUMAN Z, MALACHOVA A, et al. Effects of milling and baking technologies on levels of deoxynivalenol and its masked form deoxynivalenol-3-glucoiside[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(17): 9303-9312. DOI:10.1021/jf202428f.
- [9] NOWICKI T W, GABA D G, DEXTER J E, et al. Retention of the *Fusarium* mycotoxin deoxynivalenol in wheat during processing and cooking of spaghetti and noodles[J]. *Journal of Cereal Science*, 1988, 8(2): 189-202. DOI:10.1016/S0733-5210(88)80029-8.
- [10] 李娜, 段晓亮, 唐朝晖, 等. 食品加工对小麦制品中DON含量的影响[J]. *粮油食品科技*, 2014, 22(3): 40-44. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2014.03.015.
- [11] 胡晓波, 完颜红影, 闫东旭, 等. 富锌小麦蛋白水解物制备技术及其理化性质研究[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(7): 119-125. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2022.07.017.
- [12] DAY L, AUGUSTIN M, BATEY I, et al. Wheat-gluten uses and industry needs[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(2): 82-90. DOI:10.1016/j.tifs.2005.10.003.
- [13] LOPEZ M M A, OHM J, MANTHEY A F, et al. Gluten extraction from deoxynivalenol contaminated wheat by wet milling[J]. *Food Control*, 2021, 120: 107513. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107513.
- [14] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 小麦硬度测定 硬度指数法: GB/T 21304—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 11.
- [16] 农业农村部. 小麦实验制粉 第1部分 设备、样品制备和润麦: NY/T 1094.1—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 7.
- [17] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰化衍生物的测定: GB 5009.111—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 12.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 粮油检验 粮食感官检验辅助图谱 第1部分: 小麦: GB/T 22504.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-8.
- [19] 国家市场监督管理总局. 粮油检验 粮食、油料的杂质、不完善粒检验: GB/T 5494—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 1-5.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 谷物与豆类千粒重的测定: GB/T 5519—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 2.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 粮油检验 小麦粗蛋白质含量测定 近红外法: GB/T 24899—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 6.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局. 小麦和小麦粉 面筋含量 第2部分: 仪器法测定湿面筋: GB/T 5506.2—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 11.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 小麦和小麦粉 面筋含量 第4部分: 快速干燥法测定干面筋: GB/T 5506.4—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 11.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 小麦储存品质判定规则: GB/T 20571—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 11.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 粮油检验 容重测定: GB/T 5498—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 11.
- [26] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 12.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局. 食品安全国家标准 小麦: GB 1351—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1.
- [28] 邵亮亮, 杜京霖, 盛林霞, 等. 小麦中呕吐毒素的影响因素和污染特性分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(20): 316-323. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201009-060.
- [29] 王海棠, 杨金萍, 王伟, 等. 不同类型病斑粒、热损伤粒及胚部内霉粒对小麦中呕吐毒素含量的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2023(2): 1-4. DOI:10.7633/j.issn.1003-6202.2023.02.001.
- [30] 巩性涛, 王培, 宋永泉, 等. 小麦中呕吐毒素的分布规律及加工影响[J]. *粮食加工*, 2020, 45(1): 27-29.
- [31] 顾雨熹, 王锦, 单晓雪, 等. 不同加工方法对小麦粉中呕吐毒素的影响[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(6): 8-11. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000112.