

青稞原粮真菌毒素产生影响因素分析

连倩¹, 崔明明², 李继荣³, 贾湃湃¹, 肖明^{1,2*}

(1. 青海大学农牧学院, 西宁 810016; 2. 青海大学农林科学院, 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室, 西宁 810016; 3. 西藏自治区农牧科学院, 农业质量标准与检测研究所/农业农村部农产品质量监督检验测试中心, 拉萨 850032)

摘要: **目的** 分析四川、甘肃、西藏、青海4省青稞真菌毒素污染情况和影响青稞原粮真菌毒素产生的因素。**方法** 从4省采集青稞429份, 经乙酸-乙腈-水提取, 氮气吹干后, 采用高效液相色谱-串联质谱法, 对青稞样品中14种真菌毒素进行检测, 采用Pearson相关性分析确定毒素与影响因素之间的相关性。**结果** T-2毒素、赭曲霉毒素A及玉米赤霉烯酮3种毒素被检出, 检出范围分别为ND~810 μg/kg、ND~75 μg/kg和ND~387 μg/kg。T-2在青海门源地区检出率达60.17%, 在北青八号、肚里黄品种中检出率达57%以上, 含水量在12.5%以下的青稞原粮无毒素检出, 雨养农业模式下的青稞原粮中T-2毒素检出率是灌溉农业的8.45倍, 储存3年及以上样品毒素检出率较高。Pearson相关性分析表明, T-2毒素与产地、含水量、收获方式及耕地类型有显著相关性。**结论** T-2毒素、OTA、ZEN在不同品种、含水量、储存年限、取样环节及耕地类型中存在显著性差异, T-2毒素为青稞原粮中主要污染物, 污染状况应引起关注。

关键词: 青稞; 真菌毒素; 污染

Analysis on factors affecting mycotoxin production in highland barley raw grains

LIAN Qian¹, CUI Ming-Ming², LI Ji-Rong³, JIA Pai-Pai¹, XIAO Ming^{1,2*}

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment Laboratory, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. Institute of Agricultural Quality Standards and Testing, College of Agriculture and Animal Husbandry of Tibet Autonomous Region/Agricultural Product Quality Supervision, Inspection and Testing Center, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Lhasa 850032, China)

ABSTRACT: Objective To clarify the mycotoxins contamination situation of highland barley raw grains in Sichuan, Gansu, Tibet and Qinghai, and study the factors affecting the production of mycotoxins in highland barley raw grains. **Methods** 429 samples of highland barley raw grains were collected from 4 provinces. After extraction with acetic acid-acetonitrile-water and drying with nitrogen, 14 kinds of mycotoxins in highland barley samples were detected by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. Pearson correlation analysis was used to determine the correlation between toxins and influencing factors. **Results** T-2 toxin, ochratoxin A and zearalenone were detected and the detection ranges were ND-810, ND-75 and ND-387 μg/kg respectively. The

基金项目: 农业农村部2020农业投入品质量检验及调查专项(125D0203)

Fund: Supported by the Special Project for Quality Inspection and Investigation of Agricultural Input Products 2020 of Ministry of Agriculture and Rural Areas (125D0203)

*通信作者: 肖明, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全风险评估。E-mail: mhmdxiao@163.com

*Corresponding author: XIAO Ming, Associate Researcher, Engaged in Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment, Xining 810016, China. E-mail: mhmdxiao@163.com

detection rate of T-2 toxin in Menyuan area of Qinghai province was 60.17%, and the varieties of Beiqing No.8 and Belli yellow were all over 57%, no toxin was detected in the highland barley raw grains with the water content less than 12.5% and the detection rate of T-2 in rain farming model was 8.45 times than that of irrigation agriculture model. The detection rate of toxin in samples stored for more than 3 years was high. Pearson correlation showed that T-2 was significantly correlated with the origin, water content, harvest mode and cultivated land type. **Conclusion** T-2 toxin, ochratoxin A and zearalenone have significant differences in different varieties, water content, storage life, sampling links and cultivated land types, T-2 toxin is the main pollutant in highland barley raw grains, which should be concerned.

KEY WORDS: highland barley; mycotoxin; pollution

0 引言

真菌毒素(mycotoxin)是由可产毒的真菌在特定环境下产生的小分子次级代谢产物^[1], 迄今为止, 已有 400 种真菌毒素被发现^[2], 主要包括黄曲霉毒素(aflatoxin, AFT)、赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)和伏马毒素(fumonisin, FUM)等, 这些毒素对动物及人体健康具有威胁, 可造成肾功能损伤和免疫力下降, 影响生殖系统, 甚者会引起急性肝炎、神经系统急性中毒等^[3-4]。粮食在生长、收获、储存期间都容易被真菌的污染^[5], 其中较易受真菌毒素污染的有小麦、玉米、花生和大豆等粮谷类食品^[6-8]。任贝贝等^[9]分析河南省 2016—2019 玉米、小麦及其制品真菌毒素污染情况, 发现 ZEN 在玉米及其制品中检出率达到 93.2%; 金少华等^[10]分析安徽省沿淮地区 2010—2014 年粮食及其制品真菌毒素污染情况, 研究发现脱氧雪腐镰刀菌稀醇(deoxynivalenol, DON)在被监测的 709 份样品中检出率达到 100%, ZEN 在 2010 年样品中检出率达到 78%。

我国青稞主要分布在青海、西藏、四川、甘肃、云南等高海拔地区^[11], 青稞是青藏高原地区主要种植农作物。本团队在 2018—2020 年调研时发现, 青稞原粮在收获、仓储环节均有原发生霉变和真菌毒素检出情况, 以黄曲霉毒素、赭曲霉毒素 A、T-2 毒素(T-2 toxin)为主。魏娜等^[12]对青藏高原主要粮油作物中真菌毒素污染分布研究发现, 在 5 种粮油作物中, 青稞样品毒素污染较为严重, 毒素检出率为 2.99%, 且不同种类毒素污染具有明显的地域性。真菌毒素产生由多种因素影响。郭英^[13]研究发现玉米在不同水分条件下储藏 3 个月后, 籽粒含水量在 13.5% 以下时, 黄曲霉毒素 B₁ 产生速度较慢。刘笑笑等^[14]对内蒙古 11 个春小麦品种进行毒素污染差异的比较分析发现, 白麦、内麦 19、龙春 33、新春 35 和 2038 这 5 个品种更耐生物毒素污染。由此可见, 真菌毒素污染与区域、品种、含水量等多种因素相关。

高效液相色谱-串联质谱法简单、快速、稳定性好、灵敏度高, 且可同时测定样品中的多种真菌毒素。陈宁周

等^[15]利用高效液相色谱-串联质谱法测定腐乳中 16 中真菌毒素, 各真菌毒素在各自的浓度范围内线性相关性良好。李梅等^[16]利用高效液相色谱-串联质谱法测定食品中 10 种真菌毒素, 线性相关系数均不低于 0.999, 检出限为 0.006~1 μg/L。可见, 高效液相色谱-串联质谱法是同时快速检测真菌毒素的优选。

基于此, 本研究利用高效液相色谱-串联质谱法对四川、甘肃、西藏、青海 4 省青稞原粮中 14 种主要真菌毒素进行检测, 分析地区、品种、含水量、储存年限、取样环节及耕地类型对真菌毒素产生的影响, 探索青稞中真菌毒素产生影响因素, 为青稞产区监管及防控措施的建立提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

从甘肃、西藏、青海、四川 4 省获得青稞样品共 429 份, 详见表 1。取样品种主要有肚里黄、昆仑 14 号、农家品种、藏青 320、藏青 2000、黑青稞、白青稞、喜拉 19、喜拉 22、春青稞、北青 8 号、昆仑 4 号、门农 1 号、甘青 4 号、昆仑 12 号。

伏马毒素 B₁ (fumonisin B₁, FB₁)、伏马毒素 B₂ (fumonisin B₂, FB₂)、伏马毒素 B₃ (fumonisin B₃, FB₃)、黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁)、黄曲霉毒素 B₂ (aflatoxin B₂, AFB₂)、黄曲霉毒素 G₁ (aflatoxin G₁, AFG₁)、黄曲霉毒素 G₂ (aflatoxin G₂, AFG₂)、赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA)、3-乙酰脱氧雪腐镰刀菌稀醇(3-acetyldeoxynivalenol, 3-ADON)、15-乙酰脱氧雪腐镰刀菌稀醇(15-acetyldeoxynivalenol, 15-ADON)、脱氧雪腐镰刀菌稀醇(deoxynivalenol, DON)、雪腐镰刀菌稀醇(nivaleno, NIV)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)、T-2 毒素标准品(纯度 > 99%, 北京美正检测技术有限公司); 乙腈、甲酸(色谱纯, 上海安普实验科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

LCMS-8050 三重四极杆液质联用仪[岛津企业管理(中国)有限公司]; VORTEX-5 涡旋振荡器(北京海天友诚科

技术有限公司); Milli-Q 纯水超纯水机[默克化工技术(上海)有限公司]; DC-12 氮吹仪(上海安谱实验科技股份有限公司); H1850R 型离心机(长沙高新技术产业开发区湘仪离心机仪器有限公司)。

表 1 样品信息采集
Table 1 Sample information collection

因素	样品来源	样品数
省份(429)	甘肃(30)	天祝县 20
		夏河县 10
		阿里普兰县 45
		波密县 2
		察隅县 6
		工布江达 4
		隆子县 14
		日喀则 4
	西藏(117)	墨竹工卡 2
		江孜 13
		扎囊 2
		乃东 4
		扎塘 2
		香格里拉 10
青海(246)		其他 9
		门源县 118
	都兰	18
	乌兰县	110
	阿坝县	18
	四川(36)	若尔盖县 18
取样环节(429)	生产	155
	流通	253
	储存	21
	雨养农业	297
耕地类型(429)	灌溉农业	132
	机械	317
收获方式(429)	人工	112
	1 年	233
	2 年	47
	3 年及以上	149

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理方法

参考杨帅等^[17]的方法。

1.3.2 色谱质谱条件

色谱条件: C₁₈ 液相色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm), 流动相 A: 1%乙酸和 5 mmol/L 乙酸铵水溶液; 流动相 B: 甲醇, 进样量: 2 μL, 流速: 0.3 mL/min, 柱温: 35 °C^[17-18]。梯度洗脱程序: 0~2 min, 10.0% B; 3~10.5 min, 20%~60% B; 13.5~18.0 min, 60%~75% B, 18.1~22.0 min, 95%~10% B。

质谱条件: 电喷雾电离源(electrospray ionization, ESI); 雾化气: 氮气(99.999%); 碰撞气: 氮气(99.999%); 雾化气压力: 40 psi; 干燥器温度: 350 °C; 干燥器流量: 10 L/min; 毛细管电压: 4000 V^[19]。

1.3.3 水分测定

水分的测定参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》。

1.3.4 数据分析

每个样品重复测 3 次。使用软件 Excel 2007、SPSS 23.0 进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 各地青稞真菌毒素污染情况

所有样品中检出 3 种真菌毒素, 分别为 T-2 毒素、OTA、ZEN。T-2 毒素广泛存在于大自然, 主要污染田间作物和库存谷物, 因易对神经系统、血液系统造成损害, 对人畜危害均较大^[20-21]。由表 2 可知, T-2 毒素在四川、甘肃、青海 3 个地区均有检出, 其中青海门源 T-2 毒素检出率最高, 高达 60.17%(限量值 100 μg/kg), 是四川地区检出率的 4.33 倍, 超标率、超限率分别为乌兰地区 25.14、1.52 倍, 均值未超出限量值。四川、甘肃地区均未超标。青海 T-2 毒素检出主要集中在门源地区, 推测是因其气候湿润、水量充足且青稞黑穗病发生普遍, 故 T-2 毒素检出频率高^[22]。

OTA 是由赭曲霉和鲜绿青霉代谢产生的次级代谢产物, 毒性强, 分布广, 可对动物的肝脏及肾脏造成损伤, 与人类及动植物健康关系最密切^[23]。由表 3 可知, OTA 毒素在四川及青海门源地区检出, 且检出率较低, 检出样品均超标(限量值 5 μg/kg), 超限率均为 100%, 平均值均未超过限量值。四川地区检出率是青海门源检出率 2.93 倍。

ZEN 是由玉米赤霉菌产生的一种甾体类霉菌毒素, 主要污染玉米、大麦、高粱、大米和小米等, 它具有雌激素样作用, 可使动物的生长及繁殖性能下降^[24-25]。由表 4 可知, ZEN 只有在西藏地区的青稞原粮中检出, 检出率为 3.41%(限量值 60 μg/kg), 2 个样品超标, 超限率 50%。

表 2 各地区青稞原粮 T-2 毒素检出情况
Table 2 Detection of T-2 toxins in highland barley raw grains in different regions

采样区	样本数	检出数	检出范围/(μg/kg)	平均值/(μg/kg)	检出率/%	超标率/%	超限率/%
四川	36	5	ND~27	1.04	13.89	0	0
甘肃	30	5	ND~73	6.83	16.67	0	0
西藏	117	0	ND	ND	0	0	0
乌兰	110	4	ND~100	2.45	3.64	0.91	25
青海	18	0	ND	ND	0	0	0
都兰	18	0	ND	ND	0	0	0
门源	118	71	ND~810	86.67	60.17	22.88	38.03

注: ND 表示低于检出限的值, 检出率为检出数比样本数, 超标率为检出数中超过限量值的数量与总量的比值, 超限率为超标率与检出率的比值, 下同。

表 3 各地区青稞原粮 OTA 检出情况
Table 3 Detection of OTA in highland barley raw grains in different regions

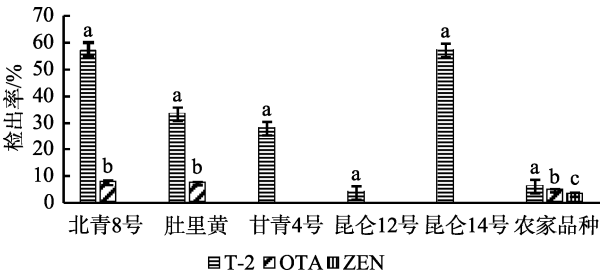
采样区	样本数	检出数	检出范围/(μg/kg)	平均值/(μg/kg)	检出率/%	超标率/%	超限率/%
四川	36	3	ND~50	3.03	8.33	8.33	100
甘肃	30	0	ND	ND	0	0	0
西藏	117	0	ND	ND	0	0	0
乌兰	110	0	ND	ND	0	0	0
青海	18	0	ND	ND	0	0	0
都兰	18	0	ND	ND	0	0	0
门源	118	7	ND~75	1.79	2.84	2.84	100

表 4 各地区青稞原粮 ZEN 检出情况
Table 4 Detection of ZEN in highland barley raw grains in different regions

采样区	样本数	检出数	检出范围/(μg/kg)	平均值/(μg/kg)	检出率/%	超标率/%	超限率/%
四川	36	0	ND	ND	0	0	0
甘肃	30	0	ND	ND	0	0	0
西藏	117	4	ND~387	4.93	3.41	1.71	50
乌兰	110	0	ND	ND	0	0	0
青海	18	0	ND	ND	0	0	0
都兰	18	0	ND	ND	0	0	0
门源	118	0	ND	ND	0	0	0

2.2 各青稞品种中毒素污染情况

北青 8 号、肚里黄、甘青 4 号、昆仑 14 号及农家品种是青稞样品中采集较多的品种。由图 1 所示, T-2 毒素在各个品种中均有检出, 且在北青 8 号及昆仑 14 号中检出最多, 高达 57%以上; OTA 毒素在北青 8 号、肚里黄及农家品种中检出, 且检出率较低; ZEN 仅在农家品种中检出。各个品种 T-2 毒素检出率与 OTA、ZEN 均存在显著性差异 ($P<0.05$), 其中北青 8 号不抗倒伏, 倒伏发生以后, 部分叶片被损坏, 叶片无法进行正常光合作用, 甚者叶片会腐烂, 滋生毒素。昆仑 14 号虽抗倒伏性较强, 但该品种主要种植在青海门源地区, 受地区因素影响, 毒素检出率较高。

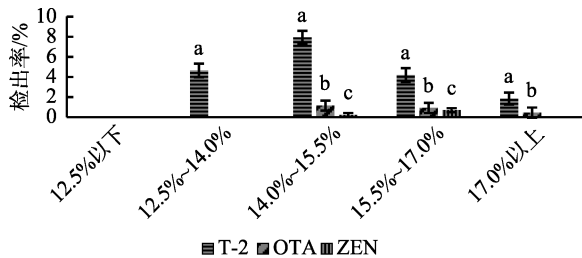


注: a~c: 不同字母表示同一品种中不同毒素检出率有显著差异 ($P<0.05$)。

图 1 毒素在不同品种青稞原粮中分布情况
Fig.1 Distribution of toxins in different varieties of highland barley raw grains

2.3 毒素在不同含水量青稞原粮中检出情况

不同含水量青稞原粮中真菌毒素检出结果见图 2, 含水量在 12.5%以下的青稞样品均未检出毒素。当青稞样品含水量在 12.5%~14.0%之间时, 仅有 T-2 毒素被检出。T-2 毒素在含水量大于 12.5%时均有检出, 在含水量 14.0%~15.5%之间检出率最高。OTA 及 ZEN 在青稞样品含水量在 14.0%以上才有检出, 且与 T-2 毒素检出率存在显著性差异($P<0.05$)。

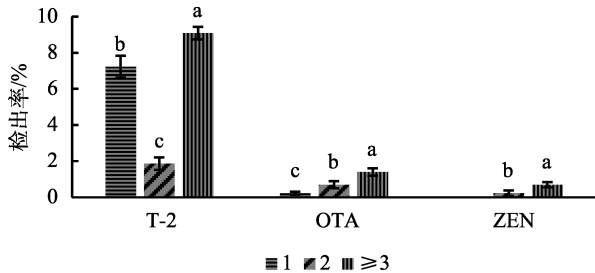


注: a~c: 不同字母表示同一含水量范围内不同毒素检出率有显著差异($P<0.05$)。

图 2 毒素在不同含水量青稞原粮中检出情况
Fig.2 Detection of toxins in highland barley raw grains with different water content

2.4 毒素在不同储存年限青稞原粮中检出情况

不同储存年限青稞原粮中真菌毒素检出结果见图 3, 3 种毒素在不同储存年限中均有检出, 在储存年限 3 年及以上时, 3 种毒素检出率均较高。3 种毒素检出率在储存年限大于 3 年时与 3 年以下储存年限存在显著性差异($P<0.05$)。T-2 毒素在储存 1 年时检出率也较高, 仅次于储存年限大于 3 年时, 由此说明 T-2 毒素产生不止存在储存环节。OTA 及 ZEN 检出率在储存年限 3 年及以上时最高, 表明青稞原粮中真菌毒素会随着储存年限的增加而增加。

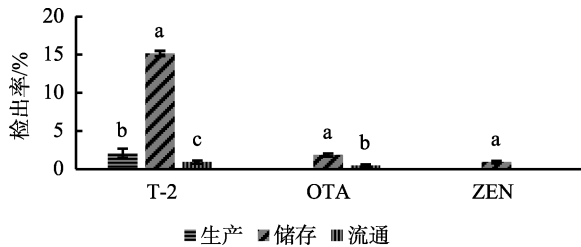


注: a~c: 不同字母表示同一储存年限内不同毒素检出率有显著差异($P<0.05$)。

图 3 毒素在不同储存年限青稞原粮中检出情况
Fig.3 Detection of toxins in highland barley raw grains with different storage years

2.5 毒素在不同取样环节及耕地类型青稞原粮中分布情况

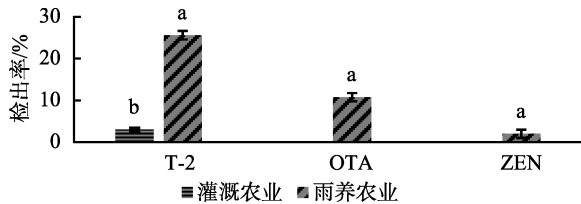
不同取样环节及耕地类型青稞原粮中真菌毒素检出结果见图 4 和图 5, 3 种毒素在储存环节中均有检出, 且高于其他取样环节。OTA 在流通环节中也有检出, ZEN 仅在储存环节中检出。3 种毒素在储存环节检出率显著高于生产、流通环节($P<0.05$)。事实上, 收获过程中机械收获对青稞籽粒破坏较多, 或者收获后没有及时晾晒, 储存条件没有进行科学调整, 都会造成青稞储存过程中霉菌污染和毒素产生^[26]。



注: a~c: 不同字母表示同一取样环节中不同毒素检出率有显著差异($P<0.05$)。

图 4 毒素在青稞原粮不同取样环节中分布情况
Fig.4 Distribution of toxins in different sampling links of highland barley raw grains

雨养农业所产青稞原粮中 3 种毒素均有检出, 且 OTA、ZEN 仅在雨养农业中检出, 而灌溉农业 T-2 毒素检出率远小于雨养农业($P<0.05$), 雨养农业模式下的青稞原粮中 T-2 毒素检出率是灌溉农业的 8.45 倍。灌溉农业指在干旱时以大水灌溉的方式保证农业生产, 而雨养农业仅靠自然降水, 降雨量过少, 作物干旱容易枯黄腐烂; 降雨量过多, 土壤过度潮湿, 都会引起霉菌污染和毒素产生。



注: a~b: 不同字母表示同一耕地类型下不同毒素检出率有显著差异($P<0.05$)。

图 5 毒素在不同耕地类型青稞原粮中分布情况
Fig.5 Distribution of toxins in highland barley raw grains from different cultivated land types

2.6 真菌毒素与影响因素相关性分析

对真菌毒素与影响因素进行相关性分析, 结果(表 5)表明, T-2 毒素与产地、含水量、收获方式、耕地类型 4 个

因素具有显著相关性($P<0.01$), 其中, T-2 毒素与产地因素相关性最强, 耕地类型、收获方式、含水量次之。OTA 与 取样环节具有显著相关性($P<0.01$)。ZEN 与影响因素之间相关性均较弱或无相关性。

表 5 真菌毒素与影响因素相关性分析
Table 5 Correlation analysis of mycotoxins and influencing factors

真菌毒素	Pearson 相关系数						
	取样环节	品种	产地	年限	含水量	收获方式	耕地类型
T-2 毒素	0.093	-0.044	-0.238*	0.023	0.136*	-0.145*	-0.152*
OTA	-0.117*	-0.054	-0.5	0.012	0.102	0.082	0.034
ZEN	0.039	-0.071	0.007	0.082	0.068	0.004	0.046

注: *表示有统计学差异($P<0.01$)。

3 结论与讨论

4 省不同地区的青稞样品存在不同程度的真菌毒素污染, 其中 T-2 毒素为青稞原粮中主要污染物, 在青海门源地区真菌毒素污染状况较为严重, 其余 3 省状况良好。3 种毒素在不同品种、含水量、储存年限、取样环节及耕地类型中均存在显著性差异($P<0.05$)。真菌毒素的产生受多重因素共同影响, 为防止真菌毒素污染, 可选择抗逆性、抗倒伏性强的品种, 且在降雨量少时进行灌溉, 避免干旱, 收货后及时晾晒, 控制含水量在 12.5%以下进行储存。

粮食的真菌毒素污染已经在全球范围内引起重视, 主流研究主要针对玉米、小麦、大豆等常见的粮食作物进行监测, 本研究对青藏高原地区广泛种植的青稞进行污染监测, 只是分析单个因素对毒素产生的影响, 对于温度、气候、土壤类型等因素还需要再进行持续监测, 继续扩大样本量, 进一步分析各因素对毒素产生的交互影响。

参考文献

[1] 孟繁磊, 牛红红, 何智勇, 等. 基于 UPLC-MS-MS 技术定量确证小麦中 10 种真菌毒素[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 149-153.
MENG FL, NIU HH, HE ZY, *et al.* Quantitative determination of 10 kinds of mycotoxins in wheat by UPLC-MS-MS [J]. Food Ind, 2018, 39 (1): 149-153.

[2] 张新娜, 马丽艳, 潘赛超, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定杂粮豆类中 11 种真菌毒素[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 306-310.
ZHANG XN, MA LY, PAN SC, *et al.* Simultaneous determination of 11 mycotoxins in minor food legumes by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS) [J]. Food Sci, 2019, 40(8): 306-310.

[3] 黄晓静, 王少敏, 毛丹, 等. 曲霉属真菌毒素的毒性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(8): 1679-1687.
HUANG XJ, WANG SM, MAO D, *et al.* Research progress on toxicity of *Aspergillus* mycotoxins [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(8): 1679-1687.

[4] 吴限鑫, 林秋君, 郭春景, 等. 国内外主要粮油产品中真菌毒素限量、检测标准及风险评估现状分析[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(9): 130-138.
WU XX, LIN QJ, GUO CJ, *et al.* Analysis of mycotoxin limit, detection

standard and risk assessment status in major grain and oil products at home and abroad [J]. J Cere Oils Ass, 2019, 34(9): 130-138.

[5] 税丕容. 食品中真菌毒素的污染与检测研究进展[J]. 现代食品, 2018, (13): 130-131, 136.
SHUI PR. Research progress on contamination and detection of mycotoxins in food [J]. Mod Food, 2018, (13): 130-131, 136.

[6] 王颖, 王建忠, 林秋君, 等. 花生黄曲霉毒素防控及检测方法研究进展[J]. 辽宁农业科学. 2019, (5): 66-68.
WANG Y, WANG JZ, LIN QJ, *et al.* Research progress on control and detection methods of aflatoxin in peanut [J]. Liaoning Agric Sci, 2019, (5): 66-68.

[7] 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.
GONG AQ, LI WH, DAI JJ. Analysis of corn mycotoxin pollution in domestic market in 2015 [J]. China Feed, 2016, (4): 42-44.

[8] 孙利, 霍江莲, 崔维刚, 等. 粮食产品中真菌毒素的色谱及质谱检测技术研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(19): 367-375.
SUN L, HUO JL, CUI WG, *et al.* Research progress of chromatography and mass spectrometry for detection of mycotoxins in food products [J]. Food Sci, 2013, 34(19): 367-375.

[9] 任贝贝, 王丽英, 路杨, 等. 河北省小麦、玉米及其制品中 16 种真菌毒素污染水平调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(5): 1670-1676.
REN BB, WANG LY, LU Y, *et al.* Investigation and analysis of 16 mycotoxins in wheat, corn and their products in Hebei province [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(5): 1670-1676.

[10] 金少华, 刘柏林, 崔杰, 等. 安徽省沿淮地区沿淮地区 2010-2014 年粮食及其制品中真菌毒素污染状况分析[J]. 安徽预防医学杂志, 2016, 22(5): 340-342.
JIN SH, LIU BL, CUI J, *et al.* Analysis of mycotoxin contamination in grain and its products in Anhui province from 2010 to 2014 [J]. Anhui J Prev Med, 2016, 22(5): 340-342.

[11] 冯朵, 王靖, 季晓娇, 等. 青稞功效成分和保健功能研究进展[J]. 食品科技, 2020, 45(9): 57-61.
FENG D, WANG J, JI XJ, *et al.* Recent progress in research on nutritional qualities and health benefits of highland barley [J]. Food Sci Technol, 2020, 45(9): 57-61.

[12] 魏娜, 张飞龙, 张一帆. 青藏高原主要粮油作物真菌毒素污染分布研究[J]. 农产品质量与安全, 2018, (3): 66-70.

- WEI N, ZHANG FL, ZHANG YF. Distribution of mycotoxins in main grain and oil crops in Tibet plateau [J]. *Qual Saf Agro-Prod*. 2018, (3): 66–70.
- [13] 郭英. 玉米水分含量对黄曲霉毒素 B₁ 含量的影响[J]. *现代畜牧科技*, 2018, 4: 5.
- GUO Y. The effect of water content of maize on aflatoxin B₁ content [J]. *Mod Anim Husb Sci Technol*, 2018, 4: 5.
- [14] 刘笑笑, 王晶晶, 张振都, 等. 不同品种春小麦籽粒品质与毒素污染比较分析[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(2): 87–90.
- LIU XX, WANG JJ, ZHANG ZD, *et al.* Comparative analysis on grain quality and toxin pollution of different spring wheat cultivars [J]. *J Northeast Agric Sci*, 2020, 45(2): 87–90.
- [15] 陈宁周, 颜玉婷, 王海波, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定腐乳中 16 种真菌毒素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(15): 5169–5179.
- CHEN NZ, YAN YT, WANG HB, *et al.* Determination of 16 mycotoxins in sufu by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(15): 5169–5179.
- [16] 李梅, 毛劼, 刘倩, 等. 高效液相色谱串联质谱法测定食品中的 10 种真菌毒素[J]. *国际药学研究杂志*, 2018, 45(4): 314–319.
- LI M, MAO J, LIU Q, *et al.* Determination of ten mycotoxins in food by HPLC-MS/MS [J]. *J Int Pharm Res*, 2018, 45(4): 314–319.
- [17] 杨帅, 穆蕾, 杨悠悠, 等. 高效液相色谱-串联质谱法同时测定小麦粉中 28 种真菌毒素[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(6): 160–164.
- YANG S, MU L, YANG YY, *et al.* Simultaneous determination of 28 mycotoxins in wheat flour by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *J Cere Oils Ass*, 2020, 35(6): 160–164.
- [18] 陈慧菲, 郁海菲, 秦施奇, 等. 超高效液相色谱串联质谱法检测谷物中 8 种真菌毒素[J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(2): 97–100.
- CHEN HF, YU HF, QIN SQ, *et al.* Determination of eight mycotoxins in cereals by ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *Cere Oils*, 2017, 30(2): 97–100.
- [19] 张淑琼. 超高效液相色谱-三重四极杆质谱联用法同时测定粮谷类食品中的 5 种真菌毒素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(5): 1601–1606.
- ZHANG SQ. Simultaneous determination of 5 kinds of mycotoxins in the grain by ultra performance liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(5): 1601–1606.
- [20] JAČEVIĆ V, WU Q, NEPOVIMOVA E, *et al.* Efficacy of methylprednisolone on T-2 toxin-induced cardiotoxicity *in vivo*: A pathohistological study [J]. *Environ Toxicol Pharm*, 2019, 71: 103221.
- [21] DAI CS, XIAO XL, SUN FF, *et al.* T-2 toxin neurotoxicity: Role of oxidative stress and mitochondrial dysfunction [J]. *Arch Toxicol*, 2019, (3): 1–16.
- [22] 王虎军, 薛华丽, 赵军, 等. T-2 毒素的产生、毒性及脱毒研究进展[J]. *食品质量安全检测学报*, 2014, 5(8): 2393–2398.
- WANG HJ, XUE HL, ZHAO J, *et al.* The progress of the production, toxicity and detoxification of T-2 toxin [J]. *J Food Saf Qual*, 2014, 5(8): 2393–2398.
- [23] 马晓宇, 林英庭. 饲料中霉菌毒素的检测技术[J]. *粮食与饲料工业*, 2018, (3): 57–61.
- MA XY, LIN YT. Detection technology of mycotoxins in feed [J]. *Cere Feed Ind*, 2018, (3): 57–61.
- [24] AL-JAAL BA, JAGANJAC M, BARCARU A, *et al.* Aflatoxin, fumonisin, ochratoxin, zearalenone and deoxynivalenol biomarkers in human biological fluids: A systematic literature review, 2001–2018 [J]. *Food Chem Toxicol*, 2019, 15(129): 211–228.
- [25] 彭凯, 吴薇, 龙蕾, 等. 饲料中霉菌毒素的危害及脱毒方法[J]. *饲料工业*, 2015, 36(6): 58–61.
- PENG K, WU W, LONG L, *et al.* Harm and detoxification methods of mycotoxins in feed [J]. *Feed Ind*, 2015, 36(6): 58–61.
- [26] 金诺. 农产品中有害微生物及其产生的生物毒素污染与防控探析[J]. *中国食物与营养*, 2017, 23(2): 19–21.
- JIN N. Prevalence and prevention of harmful microorganism and biotoxin in agro-products [J]. *Food Nutr China*, 2017, 23(2): 19–21

(责任编辑: 郑 丽 张晓寒)

作者简介



连 倩, 硕士, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 1401330566@qq.com



肖 明, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全风险评估。

E-mail: mhmdxiao@163.com