

“粮油质量安全检测与评价” 特约专栏文章之四

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.03.009

北京市郊玉米质量安全风险因子 及影响因素分析

崔 华¹, 陆安祥², 谢 刚¹, 李 森¹, 吴 宇¹, 王松雪¹

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037; 2. 北京农业质量标准与检测技术研究中心/农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 北京 100097)

摘 要: 以北京郊区 10 个农户的玉米种植地为研究对象, 获取种植期土壤样品、扬花期花穗样品、收获期及不同储藏时期的玉米样品, 检测菌相、带菌量和真菌毒素等。结果表明, 玉米产后整个自然晾晒储藏期间, 储藏前期(产后一个月内)的发霉风险最高, 其中镰刀菌属一直是优势菌群, 其产生的毒素主要包括脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)、玉米赤霉烯酮(ZEN)和伏马菌素(FB₁、FB₂), 检出率分别为 100%、95%和 93%, 且 DON 和 ZEN 在储藏期的超标率均大于 40%, 而其他毒素, 如 AFBs、OTA、ST、T-2、HT-2 等均未检出。另外, 采用高通量测序技术分析土壤和花穗样品中真菌多样性与农艺因素的关系, 发现, 种植方式(清种/兼做)、灌溉情况、上季秸秆处理方式等因素会影响玉米植株污染真菌的种类和数量, 进而导致玉米籽粒真菌毒素的污染水平出现差异。

关键词: 玉米; 质量安全; 风险因子; 真菌; 真菌毒素; 高通量测序

中图分类号: TS210.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2020)03-0054-07

Analysis of risk factors and influencing factors of corn quality and safety in suburbs of Beijing

CUI hua¹, LU An-xiang², XIE Gang¹, LI Sen¹, WU Yu¹, WANG Song-xue¹

(1. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;
2. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing (BRCAT) Risk Assessment
Lab for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture. P. R. China, Beijing 100097, China)

Abstract: Taking the corn plantation area of 10 farmers in the suburbs of Beijing as the research object, soil samples from the planting period, flower spike samples from the flowering period, corn samples from the harvest period and different storage periods were taken to detect the mycoflora, microbial contamination and the mycotoxins. The results show that during the whole post-harvest natural drying period of corn, the risk of mold formation is highest in the early storage period (within one month after harvest). Among them, *Fusarium* has always been the dominant flora, and the toxins produced by it mainly include deoxynivalenol (DON), Zearalenone (ZEN), and fumonisin (FB₁, FB₂), the detection rates were 100%, 95%, and 93%, respectively, and the over-standard rates of DON and ZEN during the storage period were greater than 40%, and other toxins such as AFBs, OTA, ST, T-2, and HT-2 were not detected. In addition, the high-throughput

收稿日期: 2020-03-09

基金项目: 农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京)、农产品产地环境监测北京市重点实验室开放课题(kfkt2016)

作者简介: 崔华, 1986 年出生, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为粮食真菌检测技术研究。

通讯作者: 王松雪, 1977 年出生, 男, 博士, 研究员, 研究方向为粮油质量与安全检验检测与防控。

sequencing technology was used to analyze the relationship between fungal diversity and agronomic factors in soil and spike samples, and it was found that factors such as planting methods, irrigation conditions, and last season's straw treatment methods could affect corn. The type and quantity of plant-contaminated fungi resulted in differences in the levels of corn kernel mycotoxins.

Key words: corn; quality and safety; risk factors; fungi; mycotoxins; high-throughput sequencing

粮食在种植、收获、储藏和运输等各个环节均会受到微生物的污染^[1], 包括细菌、病毒和真菌等, 其中真菌污染是影响粮食产量和品质的最主要因素, 其产生的真菌毒素可在谷物食品和饲料中残留, 严重危及人类和动物的安全。因此, 如何减少和控制真菌毒素对谷物的污染危害, 已成为全世界普遍关注的问题^[2]。粮食中真菌的生长和产毒主要受到基质水活度^[3]、种类、完整性及温度、通风、微生物相互作用和昆虫等因素的共同影响^[4], 通过建立影响因素与粮食真菌污染之间的关系, 分析粮食发霉和产生真菌毒素的原因, 将有利于实现预测和防控粮食霉变和真菌毒素的污染。

玉米是世界上重要的粮食、饲料和经济作物, 也是我国重要的粮食作物之一^[5]。近年来我国玉米产量远高于水稻和小麦(2014 年—2018 年国家统计局统计数据), 位居我国粮食作物之首, 玉米产量已成为影响我国粮食供求和畜牧业发展的重要因素^[6], 玉米及其生产制品的质量与安全直接影响着我国农业的可持续发展和国民健康^[7]。我国玉米霉变和真菌毒素污染多发易发, 已成为影响玉米质量安全的主要问题, 但是目前缺乏相关的预测防控技术研究。因此, 研究影响玉米质量安全风险因子的主要种类、来源及其污染影响因素, 将有助于实现玉米霉变和真菌毒素污染风险预测, 进而结合相关科学干预技术, 实现提前防控, 从而保障粮食质量安全。

1 材料与方法

1.1 实验材料与试剂

土壤、玉米花穗和玉米样品采集: 北京市郊玉米种植区; Ezup 柱式真菌基因组 DNA 抽提试剂盒: 生工生物公司; 土壤基因组 DNA 提取试剂盒: 美国 MP 公司; 高盐察氏培养基 (Salt Czapek-Dox Agar)、马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (Potato dextrose agar, PDA): 北京奥博星生物; 乙腈、甲醇、乙酸铵、甲酸、乙酸 (色谱纯): 美国 Fisher 公司; 0.2 μm 聚四氟乙烯针头过滤器: 美国 Pall 公司; 真菌毒素标准

储备溶液及种稳定同位素标准品: 奥地利 Biopure 公司和美国 Sigma 公司。

1.2 实验仪器

HVE-50 高压灭菌锅: 日本 Hirayama 公司; SPX 智能培养箱: 宁波江南仪器厂; 电热恒温鼓风干燥箱: 上海森信实验仪器有限公司; FastprepTM-24 快速样品制备仪: 美国 MP 公司; 3-30K 离心机: 美国 Sigma 公司; GT10-1 高速台式离心机: 北京时代北利离心机有限公司; Roto-Shake Genie 多用途旋转摇床: 美国 Scientific Industries 公司; ACQUITY UPLC 超高压液相色谱仪: 美国 Waters 公司; TSQ QUANTUM ULTRA 四极杆串联质谱仪: 美国 Thermo Fisher Scientific 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品与农艺信息采集

2016 年, 在北京市郊玉米种植区内选取 5 个有代表性的产量大村, 每个村随机选择两个农户做为研究对象, 于播种期扞取土壤样品; 扬花期扞取花穗样品; 分别于收获期、储藏前期 (储藏一个月)、储藏中期 (储藏两个月) 和储藏后期 (储藏四个月) 扞取玉米样品, 并对相关农艺信息进行登记。同时, 与北京兰亭实用技术开发有限公司合作, 获得该地区玉米扬花期至储藏后期的相关气象信息, 包括温度、湿度和降水量等 (图 1)。

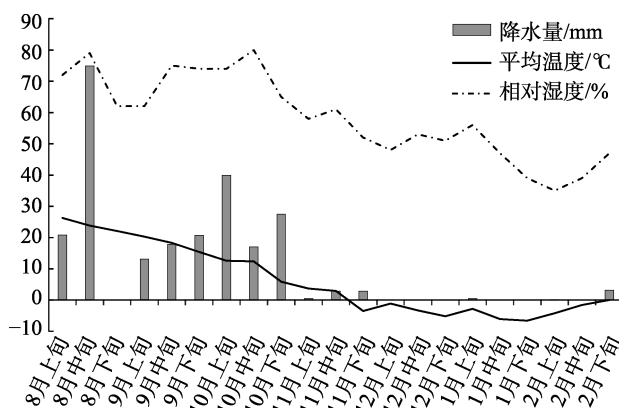


图 1 气象信息汇总

1.3.2 样品检测

按照相关标准要求对玉米样品进行水分、水活度、千粒重、生霉粒、带菌量和菌相检测。水分：GB/T 10362《粮油检验 玉米水分测定》；水分活度：GB/T 34790《粮油检验 粮食籽粒水分活度的测定仪器法》；千粒重：GB/T 5519《谷物与豆类 千粒重的测定》；生霉粒：按照 GB/T 5494《粮油检验 粮食、油料的杂质、不完善粒检验》及 GB 1353《玉米》等国家规定的规定进行，并结合其他相关文献资料进行判定；带菌量：GB 4789.15《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》；菌相：GB 4789.16《食品安全国家标准 食品微生物学检验 常见产毒霉菌的形态学鉴定》，其中不同种类样品的前处理按照以下方法操作：

土壤：将土壤样品充分混匀后取适量放入无菌研钵中，加入少量无菌水，研磨成泥状^[8]，用无菌生理盐水梯度稀释后，取适宜浓度的土壤稀释液涂布到高盐察氏培养基和 PDA 培养基上，每个浓度做 10 个平板，倒置于 28℃ 培养箱中培养 10~14 d；**花穗：**将玉米花穗样品剪成碎片，用无菌镊子将其种植到高盐察氏培养基和 PDA 培养基上，每个板接种 5 个点，每个样品做 10 个平板，倒置于 28℃ 培养箱中培养 10~14 d；**玉米：**将玉米粒置入有效氯为 3% 的次氯酸钠溶液中浸泡 3 min 后，用无菌水清洗样品三次，再用无菌纸将表面残留的水分吸干，无菌操作下将玉米颗粒种植到高盐察氏培养基和 PDA 培养基中，每个平板 10 粒，每个样品接种 10 个平板，倒置于 28℃ 培养箱中培养 10~14 d。

真菌毒素采用实验室建立的《全碳标记稳定同位素内标-超高效液相色谱-串联质谱法测定粮食中 16 种真菌毒素》方法进行检测^[9]。各种毒素的检出限及定量限请见表 1。粮食样品中真菌毒素污染水平和差异分析采用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 进行统计分析。

1.3.3 土壤和花穗样品真菌群落分析

为进一步准确分析玉米生长期间污染的霉菌来源及其影响因素，选取了其中 6 个有代表性的农户作为研究对象，提取土壤及花穗样品中携带的全部真菌基因组 DNA（试剂盒法），送至金唯智生物科技有限公司进行高通量 ITS 测序及生物信息学分析。

表 1 各种毒素的检出限和定量限

μg/kg

毒素名称	检出限	定量限	毒素名称	检出限	定量限
AFB ₁	0.3	1.0	NIV	60.0	200.0
AFB ₂	0.3	1.0	DON	45.0	150.0
AFG ₁	0.3	1.0	DON-3G	7.5	25.0
AFG ₂	0.3	1.0	3-AcDON	12.0	40.0
ZEN	6.0	20.0	15-AcDON	6.0	20.0
OTA	0.6	2.0	ST	0.3	1.0
HT-2	3.0	10.0	FB ₁	6.0	20.0
T-2	0.6	2.0	FB ₂	3.0	10.0

注：黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁)、黄曲霉毒素 B₂ (AFB₂)、黄曲霉毒素 G₁ (AFG₁)、黄曲霉毒素 G₂ (AFG₂)、玉米赤霉烯酮(ZEN)、赭曲霉毒素 A (OTA)、HT-2 毒素(HT-2)、T-2 毒素(T-2)、雪腐镰刀菌烯醇(NIV)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)、DON-3-葡萄糖苷(DON-3G)、3-乙酰基 DON (3-AcDON)、15-乙酰基 DON (15-AcDON)、杂色曲霉毒素(ST)、伏马毒素 B₁ (FB₁)、伏马毒素 B₂ (FB₂)。

2 结果与分析

2.1 水分、水活度、生霉粒和带菌量

该地区玉米收获期集中在十月上旬，此时期降水量较大，平均 39.9 mm，空气相对湿度也较高，平均为 74%（见图 1），且玉米收获后直接堆放在地面，不能及时晾干，这有利于霉菌的生长繁殖，加重霉菌污染的风险。如图 2 所示，从水分检测结果来看，10 个农户的玉米水分在储藏的前两个月一直处于“安全水分”（13%）之上。各农户玉米样品水活度在前三个样时期呈缓慢下降趋势，至储藏后期，仍然有三分之一的农户玉米水活度在 0.7 以上（一般粮食水活度在 0.7 以下时对应的水分值均能抑制各类微生物的生长^[10]）。

各农户玉米样品储藏前期的带菌量与收获期相比除农户 9 外均有增加，而生霉粒的检测结果显示，随着储藏时间的延长，各农户检出率总体呈上升趋势（生霉粒检测采用的是感官检验，主观因素影响很大，存在一定的系统误差）。

综合以上检测结果分析发现，该地区玉米在收获后的四个月内，一直存在着霉变风险，其中收获后一个月内的发霉风险最高。

2.2 菌相

通过菌相检测，获得了土壤样品中含有的优势

产毒真菌种类, 主要为交链孢霉属 (*Alternaria*) 和镰刀菌属 (*Fusarium*); 通过分离检测玉米外部花穗、内部花穗、外叶、中叶和内叶五个部分的菌相发现, 玉米花穗样品携带的产毒真菌同土壤样品相似, 且携带量由外往内逐渐减少, 证实产毒真菌是通过花穗外部逐渐往里侵染, 其来源为土壤的可能性较大。

从玉米样品菌相检测结果来看 (图 3), 各时期均以镰刀菌属为优势菌, 其中禾谷镰刀菌 (*Fusarium graminearum*)、轮枝镰刀菌 (*Fusarium moniliforme*)

和尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*) 占比较大, 它们是脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON)、玉米赤霉烯酮 (ZEN) 和伏马毒素的主要产生菌。其次含量较高的产毒真菌是曲霉属和青霉属, 其中农户 6 和 9 收获期的玉米样品中含有大量的黑曲霉, 从农艺信息上看, 这两个农户与其他农户的最大区别是种植方式为果树兼做种植, 说明兼做种植方式会对菌相产生一定的影响。综合研究各农户农艺信息与各检测数据的关系, 未得出其他相关性结论, 这是由于不同种植情况的样本数不足导致的。

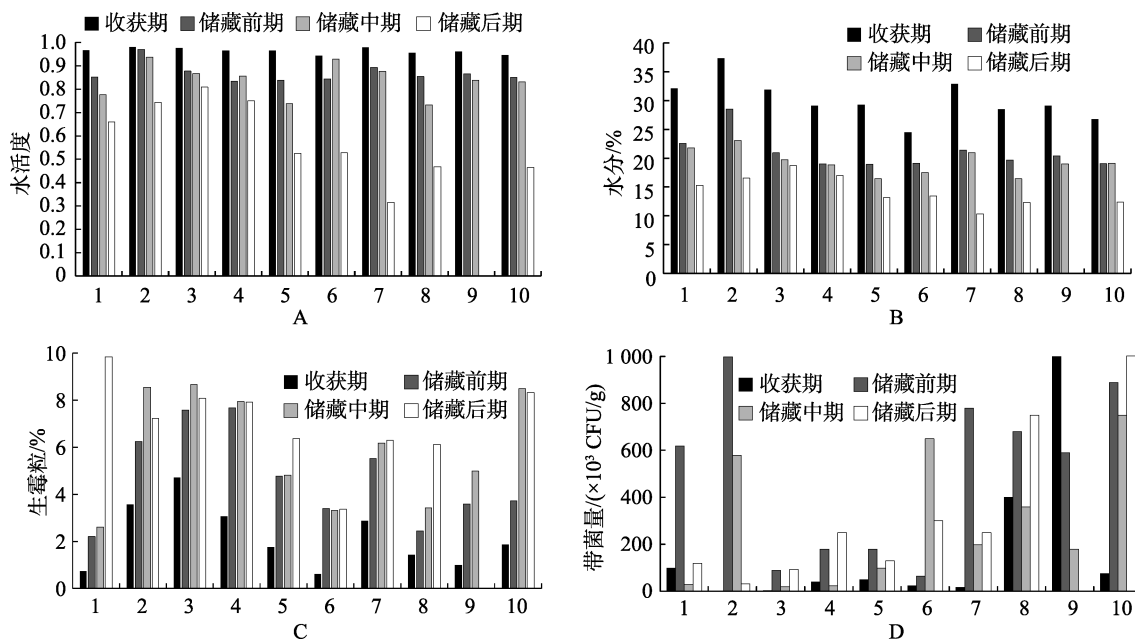


图 2 玉米水活度、水分、生霉粒和带菌量检测结果

注: 由于农户 9 在储藏后期样前已将全部玉米卖出, 所以没有该时期的检测数据。

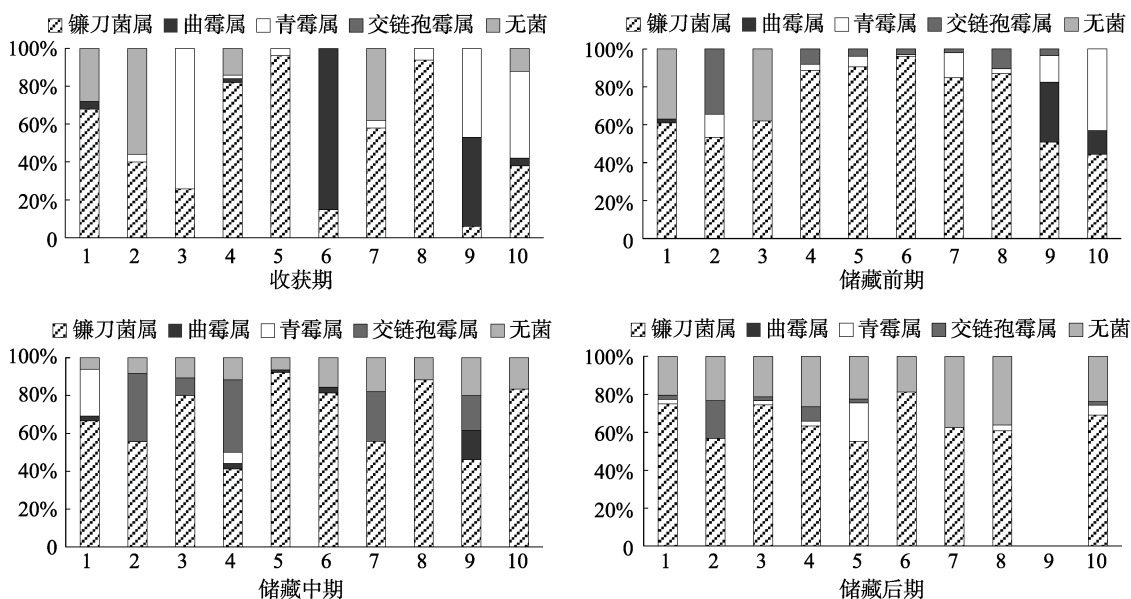


图 3 玉米菌相检测结果

2.3 真菌群落分析

表 2 显示的是 6 个代表农户的土壤和花穗样品属水平下常见产毒霉菌的存在情况。除农户 7 外, 其他均为交链孢霉属和镰刀菌属均占比较大, 这与

菌相的检测结果是-致的。对比农艺信息发现, 农户 7 的特殊之处在于种植期间用井水灌溉过, 而其他农户均未对农田进行灌溉, 这就导致土壤污染了大量的木霉属菌种。

表 2 属水平下主要物种百分比统计表

属名	T1	T3	T5	T7	T8	T9	S1	S3	S5	S7	S8	S9
<i>Alternaria</i> 交链孢霉属	5.92	1.99	3.05	1.47	1.35	8.15	4.19	9.9	9.74	17.1	12.6	6.22
<i>Fusarium</i> 镰刀菌属	2.18	6.32	1.67	2.32	1.11	4.72	6.93	6.36	2.14	1.05	0.96	2.52
<i>Gibberella</i> 赤霉菌属	0.33	0.15	0.04	0.73	0.07	0.18	23.9	1.7	2.02	1.75	1.3	2.55
<i>Trichoderma</i> 木霉属	1.66	0.37	0.09	7.79	0.66	0.09	0	0	0	0	0	0
<i>Penicillium</i> 青霉属	0.26	1.28	0.03	0.44	0.05	0.14	0	0	0	0	0	0
<i>Stachybotrys</i> 葡萄状穗霉属	0.08	0.09	0.37	0.02	0.03	0.3	0	0	0	0	0	0
<i>Aspergillus</i> 曲霉属	0.06	0.1	0.07	0.01	0.2	0.23	0	0	0	0	0	0
其它	89.5	89.7	94.6	87.2	96.5	86.1	64.9	82.0	86.1	80.0	85.1	88.7

注: T1、T3、T5、T7、T8、T9 分别代表土壤样品; S1、S3、S5、S7、S8、S9 分别代表花穗样品。所有的赤霉菌都是镰刀菌的有性阶段。

通过对原始数据进行去接头和低质量过滤处理, 然后去除嵌合体序列, 最终得到有效序列后进行聚类分析, 每一个聚类称为一个物种操作单元 (operational taxonomic units, OTU), 对 OTU 的代表序列作分类学分析, 得到各样本的物种分布信息。根据 OTU 聚类分析结果, 分析不同样本/分组共有和特有的 OTU, 绘制韦恩图 (Venn, 图 4), 可以看出, 各农户土壤样品含有的真菌种群数量明显多于

花穗样品, 且二者共有部分真菌种群。其中, 农户 1、3 和 8 的土壤真菌种群数量明显多于其他农户, 这三个农户的共同点是上季秸秆处理方式-为归田, 这与秸秆还田处理会扩大土壤微生物种类和数量的相关报道是相符的^[11]。

图 5 显示的是多样本比较分析 weighted unifracs 距离矩阵热图, 可以看到, 各农户花穗样品的相异系数大部分在 0~0.3 之间, 说明此地区玉米花穗携

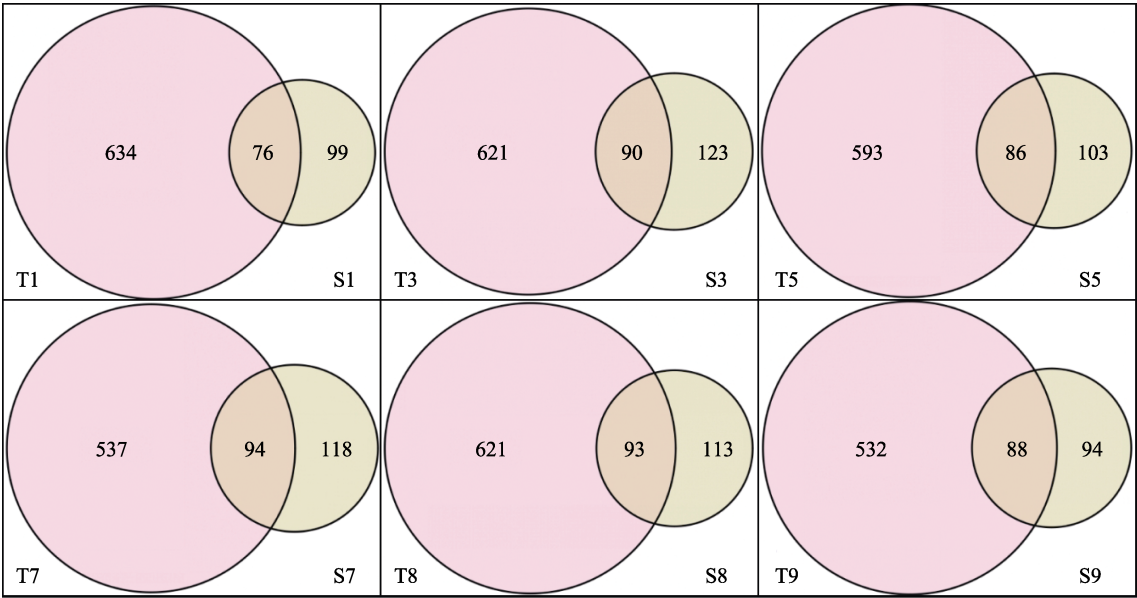


图 4 OTU 聚类分析 Venn 图

注: 韦恩图中不同颜色的圈表示不同的样本/分组, 图中的数字分别代表了每个样本/分组特有或共有的 OTU 数目。

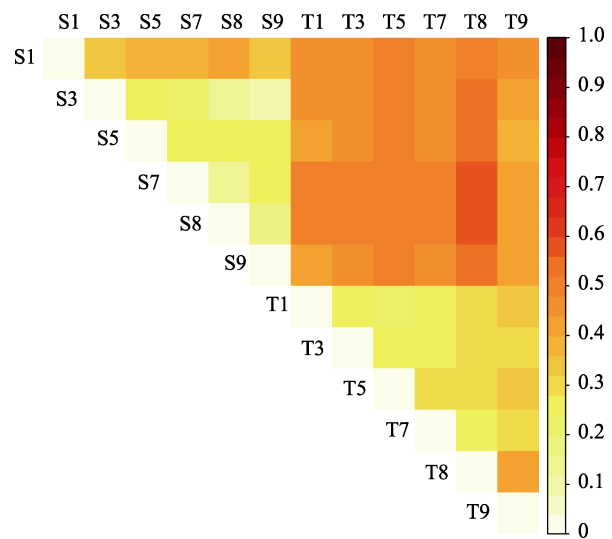


图 5 weighted unifrac 距离矩阵热图

注: weighted unifrac 距离矩阵热图, 热图中颜色深浅代表了样本两两之间的相异程度, 颜色越浅表示两个样本相异系数越小, 物种多样性的差异越小。

带的真菌群落差异不大, 只有农户 1 与其他农户的相异系数> 0.3, 这是因为农户 1 的地理位置最偏(在该地区的最东边, 与最近一个农户的距离为 21 公里), 而其他农户相对较集中, 直径范围大概为 28 公里, 说明在一定范围内的区域中, 空气、雨水、虫害等对玉米真菌群落的影响没有太大差异^[12]。而农户 9 的土壤真菌携带情况与其他农户差异较大,

分析其农艺信息发现, 农户 9 与其他农户存在多处不同, 包括人工播种、兼做果树种植、没有使用肥料, 说明这些农艺因素也会造成土壤的真菌群落差异。

2.4 真菌毒素含量

如表 3 所示, 该地区玉米污染的真菌毒素主要是呕吐毒素(DON 及其衍生物 DON-3G、3-Ac DON、15-Ac DON)、玉米赤霉烯酮(ZEN)和伏马毒素(FB₁、FB₂)。在收获期、储藏前期、储藏中期和储藏后期四个扦样时期内, DON 污染最为严重, 检出率为 100%, 超标率分别为 22%、44%、40%和 67%; ZEN 的检出率为 95%, 超标率分别为 0%、44%、40%、56%; 伏马毒素的检出率为 93% (没有限量), 毒素污染均总体呈上升趋势; 而其他毒素, 如 AFB_s、OTA、ST、T-2、HT-2 等均未检出。

由此可以判断, 霉菌在玉米产后储藏两个月的时期内一直处于非常活跃的状态, 繁殖代谢旺盛, 这应该是由于此时期内环境温度还在 0℃以上, 湿度也较大, 且玉米还具有后熟作用, 堆积在一起后会产生一定的水分及热量, 非常有利于霉菌的生长。而在储藏第三、四个月时, 环境温湿度均下降很大, 玉米自身水分也降低了许多, 因此其携带的真菌生长繁殖速度减慢甚至停止。

表 3 各时期玉米样品毒素含量检测结果

								μg/kg
扦样时期		DON	FB ₁	FB ₂	ZEN	DON-3G	3-AcDON	15-Ac DON AFB ₁ 、AFB ₂ 、OTA、ST、AFG ₁ 、 AFG ₂ 、T-2、HT-2、NIV
收获期	Max	1718	1189	196	58	422	9	478
	Min	158	1.48	1.2	2	0	0	26
	平均值	602	357	65	26	109	2	197
	超标率	22%	无限量	无限量	0%	无限量	无限量	无限量
储藏前期	Max	3128	2309	514	272	459	179	756
	Min	36	8	4	0	0	0	0
	平均值	1161	723	151	75	211	27	303
	超标率	44%	无限量	无限量	44%	无限量	无限量	无限量
储藏中期	Max	4808	1268	511	542	497	33	540
	Min	37	4	2	0	0	0	11
	平均值	1453	363	83	149	213	6	260
	超标率	40%	无限量	无限量	40%	无限量	无限量	无限量
储藏后期	Max	4447	2768	506	473	669	0	737
	Min	185	0	0	3	0	0	43
	平均值	1427	908	149	129	255	0	359
	超标率	67%	无限量	无限量	56%	无限量	无限量	无限量

注: 表中显示的各扦样时期毒素值为所有农户玉米样品毒素含量的总值。毒素限量参考 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》, 分别是: DON 1 000 μg/kg; AFB₁ 20 μg/kg; ZEN 60 μg/kg; OTA 5.0 μg/kg。

3 结论

粮食真菌和真菌毒素污染在种植、收获、储藏和运输等各个环节均有可能发生,一旦条件合适,有害真菌便会大量生长繁殖,产生真菌毒素,其中天气因素、农艺因素^[13]、收获后的处理方式、储藏方式等都会对真菌毒素的产生造成很大的影响。该地区玉米的收获模式以人工为主,收获期雨水较多,且在收获后直接堆放成囤,不利于玉米散热,却有利于霉菌的生长繁殖,加重了真菌毒素的污染风险。通过研究发现,镰刀菌属在玉米的整个自然晾晒储藏期间一直是优势菌种,其代谢产生的毒素主要为DON、ZEN和伏马菌素(FB₁、FB₂),检出率分别为100%、95%和93%,且DON和ZEN在储藏期的超标率均大于40%,这就明确了影响该地区玉米质量安全的主要风险因子。

建立粮食真菌和真菌毒素污染与影响因素之间的关系,分析粮食发霉和产生真菌毒素的原因,将有利于实现预测和防控粮食霉变和真菌毒素的污染。本研究首次尝试使用高通量测序技术分析真菌群落结构与农艺因素的关系,以确定玉米污染真菌的来源及其影响因素,结果证实该技术快速有效。将该技术与农艺信息相结合,能够筛选出影响土壤、花穗真菌群落种类的有效因素,如种植方式(清种/兼做)、灌溉情况、上季秸秆处理方式等,这些农艺因素同本地气象信息均可以做为预测玉米霉变和真菌毒素污染的输入因子。但是,只分析单一因素的影响结果很难得出结论,需要采集大量样本,对多种影响因素综合分析才能得出较全面的结论。

为了防控玉米霉变和真菌毒素污染带来的风险,应该加强对农民开展有关玉米种植监管方面的知识培训,强化农民的农产品质量安全意识^[14],从种植、收获及储藏等环节进行预防^[15]。适时播种;做好田间监管工作,采取合理的预防措施防治病虫害,例如,药剂拌种、土壤杀菌^[16]、扬花期杀菌等;确保及时收获并在收获后尽快晾晒减少水分;避免过密堆积储藏,影响通风等。这样可以有效的阻止或者减慢真菌的生命活动,从而降低真菌毒素污染

的风险,保障玉米质量安全。

参考文献:

- [1] ABDULLAH N, NAWAWI A, OTHMAN I. Fungal spoilage of starch-based foods in relation to its water activity (aw)[J]. Journal of Stored Products Research, 2000, 36(1): 47-54.
- [2] 王守经, 胡鹏, 汝医, 等. 谷物真菌毒素污染及其控制技术[J]. 中国食物与营养, 2012, 18(3): 13-16.
- [3] CAMPBELL-PLATT G. Fungi and Food Spoilage[J]. Food Control, 1999, 10(1): 59-60.
- [4] 刘晓庚. 储粮中真菌毒素及其防控[J]. 粮食与油脂, 2008, 148(8): 51-55.
- [5] 翁凌云. 我国玉米生产现状及发展对策分析[J]. 中国食物与营养, 2010(1): 22-25.
- [6] 赵久然, 刘月娥. 玉米及其制品质量安全风险及控制[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(4): 12-17.
- [7] 矫健. 中国粮食市场调控政策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [8] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 92-108.
- [9] 吴宇, 辛媛媛, 叶金, 等. 全碳标记稳定同位素内标-超高效液相色谱-串联质谱法测定粮食中16种真菌毒素[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 297-303.
- [10] 卞科. 水分活度与食品储藏稳定性的关系[J]. 郑州粮食学院学报, 1997, 18(4): 41-48.
- [11] 赵丽琨. 耕作方式对玉米田土壤真菌多样性的影响[D]. 沈阳农业大学, 2017.
- [12] 任旭. 我国玉米穗腐病主要致病镰孢菌多样性研究[D]. 中国农业科学院, 2011.
- [13] BERNHOFT A, TORP M, CLASEN P E, et al. Influence of agronomic and climatic factors on *Fusarium* infestation and mycotoxin contamination of cereals in Norway[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2012, 29(7): 1129-1140.
- [14] 王燕, 李增梅, 董燕婕, 等. 真菌毒素对玉米质量安全的影响研究[J]. 农产品质量与安全, 2015(3): 58-62.
- [15] 王燕, 董燕婕, 岳晖, 等. 山东省玉米真菌毒素污染状况调查及分析[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(3): 69-73.
- [16] 白艳凤. 玉米丝黑穗病的发生条件与防治措施[J]. 生物灾害科学, 2014(2): 185-187.

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。