

马跃亭, 吴琴燕, 杨红福, 等. 小麦籽粒脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)含量影响因素相关性分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(8): 223–228.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.08.042

# 小麦籽粒脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)含量 影响因素相关性分析

马跃亭<sup>1</sup>, 吴琴燕<sup>2</sup>, 杨红福<sup>2</sup>, 陈宏州<sup>2</sup>, 庄义庆<sup>1,2</sup>

(1. 江苏科技大学生物技术学院, 江苏镇江 212000; 2. 江苏丘陵地区镇江农业科学研究所, 江苏句容 212400)

**摘要:**为探明小麦籽粒脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)含量与病情指数、病粒率、籽粒麦角甾醇含量的相关性, 对 52 个小麦品种(系)自然发病病情指数(以下简称病指)、病粒率、籽粒麦角甾醇含量和 DON 含量进行相关性分析以及聚类分析。结果表明, 籽粒 DON 含量与病粒率、麦角甾醇含量和病指均呈极显著的正相关关系, 相关系数分别为 0.858 ( $P < 0.01$ )、0.792 ( $P < 0.01$ )、0.512 ( $P < 0.01$ ); 基于病指、病粒率和籽粒 DON 含量, 可将 52 个小麦品种(系)大致聚类为 7 种不同抗感类型。可见, 依据田间病指, 尤其是病粒率, 可预测籽粒 DON 含量情况; 同时依据病指、病粒率和籽粒 DON 含量可初步判定不同品种(系)的抗感性类型, 在生产实践中具有一定的实用性。

**关键词:**小麦赤霉病; DON; 病情指数; 病粒率; 麦角甾醇

**中图分类号:** S435.121.4<sup>+</sup>5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)08-0223-06

由玉蜀黍赤霉菌[*Gibberella zeae* (Schwein.) Petch]引起的小麦赤霉病, 是危害较为严重的植物病原真菌之一, 在世界范围内可引起小麦和其他谷物的赤霉病<sup>[1-2]</sup>。小麦赤霉病不仅会引起小麦苗枯萎腐败、茎基腐烂、穗部枯萎, 甚至籽粒干枯皱缩等病症直接影响到小麦的产量<sup>[3-5]</sup>, 还因产生脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)等真菌毒素而严重威胁食品安全<sup>[6-8]</sup>。近年来, 在我国小麦赤霉病发病区域有不断扩大和北移的趋势, 华北冬麦区和东北三江平原春麦区在多雨年份也会出现暴发成灾的局面<sup>[9]</sup>。因此, 有效防控小麦赤霉病对粮食安全和食品安全非常重要。

利用抗赤霉病品种是控制小麦赤霉病最经济有效的措施。目前, 应用广泛的赤霉病抗源包括中国的苏麦 3 号、望水白、武汉 1 号及其衍生系, 以及巴西春小麦 Frontana、Maringa 和欧洲冬小麦 Funo 等<sup>[10]</sup>。有研究表明, 赤霉病抗性可分为 5 种类型: 抗初侵染类型(Type I)、抗扩展类型(Type II)、抗

毒素积累类型(Type III)、抗籽粒侵染类型(Type IV)和耐病类型(Type V), 其中 Type II、Type III 和 Type V 是主要的抗源类型<sup>[11-12]</sup>, 也是小麦抗赤霉病种质资源筛选的重要依据与来源。当前, 小麦抗赤霉病育种仍是一个世界性难题, 抗性品种选育进展缓慢, 全球范围仅有少数中抗品种在推广种植<sup>[13]</sup>。

在小麦赤霉病抗性鉴定及小麦赤霉病病情调查监测中, 通常以病穗率和病情指数(以下简称病指)等田间病情为判别指标, 不调查病粒率, 对籽粒麦角甾醇及 DON 含量以及 DON 含量影响因素相关性关注较少。本次研究通过调查 52 个小麦品种(系)自然发病病指, 并分别检测病粒率、籽粒麦角甾醇含量和 DON 含量后, 进行 DON 含量与病指、病粒率、麦角甾醇含量的相关性分析以及基于病指、病粒率和籽粒 DON 含量的品种(系)聚类分析, 以探明籽粒 DON 含量与病指、病粒率、籽粒麦角甾醇含量的相关性, 旨在为小麦的抗赤霉病育种、赤霉病防治和 DON 污染控制等提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试小麦品种(系)

淮南品种(系)35 个, 分别为宁麦 22、苏科麦 1 号、乐麦 608、宁麦 14、宁麦 23、苏麦 11 号、扬麦 16、镇麦 12、龙麦 169、扬麦 25、望水白、苏麦 188、华麦 8 号、扬麦 23、华麦 5 号、苏麦 8 号、农丰 88、扬麦 22、

收稿日期: 2019-04-10

基金项目: 镇江市农业科技支撑项目(编号: NY2018011); 句容市社会发展项目(编号: SF2018589878)。

作者简介: 马跃亭(1993—), 女, 四川都江堰人, 硕士研究生, 主要从事小麦赤霉病研究。E-mail: 442507087@qq.com。

通信作者: 庄义庆, 博士, 研究员, 主要从事植物保护研究。E-mail: yqzhuang@sina.com。

苏麦 3 号、镇麦 168、扬麦 13、扬辐麦 5 号、扬辐麦 4 号、扬麦 15、宁麦 26、华麦 6 号、宁资 126、华麦 1028、扬麦 27、扬辐麦 1025、隆麦 28、明麦 133、扬麦 158、扬麦 28、淮麦 30。淮北品种(系)17 个,分别为泛麦 803、俊达 104、徽研 22、连麦 7 号、伟隆 169、龙科 1109、丰德存麦 13 号、金丰 205、农麦 177、平安 11、孟麦 028、矮抗 58、东麦 17-61、江麦 178、徐麦 35、淮麦 20、烟农 19。

## 1.2 毒素标准品和化学试剂

DON 毒素的标准样品购自 ROMER 国际贸易(北京)有限公司,标准品质量浓度为 100 mg/mL。将标准样品用乙腈配制成 1.0 mg/mL 的混合标准溶液,密闭保存在 -20 ℃ 冰箱中备用。麦角甾醇标准品(质量分数为 100%)购自上海麦克林生化科技有限公司。异辛院、乙腈、甲醇和无水乙醇等化学试剂(色谱纯),均购自西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司。

## 1.3 田间试验设计及病情调查

试验于江苏丘陵地区镇江农业科学研究所农业科技创新中心及江苏省句容市白兔镇试验田内进行,试验田土壤为壤质土,pH 值为 7.2 左右,有机质含量中等,近年小麦赤霉病均发生较严重。试验采用完全随机区组设计,每个小区内播种 2 行供试小麦品种(系),每行长 1.0 m,行距为 0.25 m,每行播种 100 粒,重复 3 次<sup>[14]</sup>。田间管理照常规,使用除草剂和杀虫剂,但不使用杀菌剂。小麦赤霉病发生稳定后调查各小区病情,调查并记载病穗数和严重程度,并分别计算病情指数<sup>[15]</sup>。

## 1.4 病粒率检测

分别随机选取各供试小麦品种(系)籽粒 50 粒,用无菌水冲洗 2 次后置于直径为 15 cm 的培养皿中保湿培养,温度为 25 ℃,光照度为 3 000 lx,光暗比为 12 h:12 h,各品种(系)设 3 次重复。培养 4~8 d 后分别调查各供试小麦品种(系)籽粒的病粒数(以产出粉红色分生孢子堆等小麦赤霉病病菌形态特征为标准),计算病粒率。

## 1.5 麦粒麦角甾醇含量检测

采用超声波细胞破碎法提取小麦籽粒麦角甾醇<sup>[16-17]</sup>。小麦干燥磨粉后,称取 0.2 g 于 50 mL 离心管中,加入 0.67 g KOH,10 mL 无水乙醇,室温条件下用超声破碎机破碎 8 min(超声/间隙时间 1 s/1 s,超声功率比 3%)后,6 000 r/min 离心 5 min,取上清液于试管中,用 5 mL 无水乙醇洗涤沉淀,6 000 r/min 离心 5 min,合并上清液,用氮气吹

干。10 mL 水和 10 mL 石油醚振荡萃取 20 min,6 000 r/min 离心 5 min,吸取 5 mL 上层乙醚相,用氮气吹干。用 1 mL 无水乙醇复溶,经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后用液相色谱仪检测。色谱柱为 WondaSil® C<sub>18</sub>(4.6 mm×150 mm,5 μm),流动相:100% 甲醇,流速为 1 mL/min,进样量为 10 μL,柱温为 40 ℃,检测波长为 282 nm。

## 1.6 麦粒 DON 含量检测

采用液相色谱-质谱联用(LC-MS)方法检测各供试小麦品种(系)籽粒 DON 含量<sup>[18]</sup>,小麦干燥磨粉后,称取 5 g 于 50 mL 离心管中,加入 25 mL 84% 乙腈溶液(提取液),振荡萃取 30 min,2 500 r/min 离心 5 min。用石墨化碳柱过滤,将收集的溶液用氮气吹干,用 1 mL 10% 甲醇复溶。经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后用液相质谱仪检测。色谱柱为 ZORBAX Eclipse Plus C<sub>18</sub>(100 mm×2.1 mm,1.7 μm),柱温为 40 ℃,进样量为 5 μL,流速为 0.25 mL/min,检测波长为 265 nm。流动相:A 为 5 mmol/L 醋酸铵水,B 为 10% 甲醇;梯度洗脱:90% A-10% B(0~1 min),10% A-90% B(4~5 min),10% A-90% B(6 min),90% A-10% B(6~10 min)。

## 1.7 相关性分析

应用 IBM SPSS Statistics 21 软件,进行供试小麦品种(系)籽粒 DON 含量、病指、病粒率和麦角甾醇含量的相关性分析及聚类分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 供试小麦品种(系)病指、病粒率、籽粒麦角甾醇及 DON 含量

由表 1、表 2 可知,52 个供试小麦品种(系)的病指、病粒率、籽粒麦角甾醇及 DON 含量中,病指最低为 0.07(苏麦 3 号),最高为 45.02(烟农 19),平均值为 5.70,变异系数为 173.1%;病粒率最高为 30%(徐麦 35),最低为 0,平均值为 6.71%,变异系数为 108.8%;籽粒麦角甾醇含量最高为 4.971 7 μg/g(徐麦 35),最低为 0.239 2 μg/g(苏麦 3 号),平均值为 1.226 4 μg/g,变异系数为 72.4%;籽粒 DON 含量最高为 20.870 0 μg/g(徐麦 35),最低为 0.849 3 μg/g(乐麦 608),平均值为 5.248 8 μg/g,变异系数为 85.9%。这表明,52 个供试小麦品种(系)的病指、病粒率、籽粒麦角甾醇及 DON 含量的种间差异表现为病指>病粒率>DON

表 1 供试小麦品种(系)病指、病粒率、籽粒麦角甾醇及 DON 含量

小麦类型	品种名称	病指	病粒率 (%)	麦角甾醇 含量 (μg/g)	DON 含量 (μg/g)
淮南品种 (系)	苏麦 3 号	0.07	0	0.239 2	0.867 9
	望水白	0.10	0.67	0.542 0	1.774 0
	宁麦 22	0.17	2.00	0.279 3	5.447 5
	苏科麦 1 号	0.18	1.33	0.560 8	2.226 0
	乐麦 608	0.25	0	0.816 7	0.849 3
	宁麦 14	0.65	3.33	0.682 3	1.810 5
	宁麦 23	0.66	0	0.383 8	2.078 8
	苏麦 11 号	0.87	2.00	0.528 4	1.285 0
	扬麦 16	0.90	2.00	0.795 2	1.221 8
	镇麦 12	0.91	3.33	0.448 9	1.927 8
	龙麦 169	1.00	0.67	0.750 8	1.956 5
	扬麦 25 -5	1.08	4.67	0.936 4	3.190 0
	苏麦 188	1.12	2.00	0.657 1	1.855 8
	华麦 8 号	1.18	0.67	0.581 8	1.616 0
	扬麦 23	1.23	3.33	0.813 1	1.002 8
	华麦 5 号	1.42	0	0.546 8	1.361 5
	苏麦 8 号	1.49	1.33	0.692 3	2.165 3
	农丰 88	1.64	0.67	0.441 0	1.123 3
	扬麦 22	1.69	7.33	0.993 5	2.930 0
	镇麦 168	2.14	3.33	0.660 5	1.745 8
	扬麦 13	2.47	0.67	0.605 6	2.472 8
	扬辐麦 5 号	2.48	0	0.452 2	1.575 8
	扬辐麦 4 号	2.54	2.00	1.261 4	2.865 0
	淮麦 30	2.74	16.00	0.980 5	6.650 0
	宁资 126	3.16	2.00	2.405 1	3.040 0
	华麦 1028	5.02	2.67	1.147 9	3.752 5
	扬麦 27	5.68	10.00	2.348 6	7.520 0
	扬辐麦 1025	9.82	16.67	1.959 1	5.640 0
	隆麦 28	10.16	20.00	2.732 6	10.467 5
	明麦 133	10.66	6.67	3.219 8	6.785 0
	扬麦 158	14.30	2.00	0.543 8	2.760 0
	扬麦 28	3.69	6.00	1.040 6	3.520 0
	扬麦 15	2.75	0.67	0.916 5	1.864 0
	宁麦 26	2.95	2.67	1.046 4	3.022 5
	华麦 6 号	3.00	6.67	0.661 0	2.537 5
淮北品种 (系)	泛麦 803	2.10	4.67	0.856 0	6.555 0
	俊达 104	2.15	10.00	1.448 8	8.815 0
	徽研 22	2.18	6.67	1.510 4	7.512 5
	连麦 7 号	3.43	8.67	1.209 0	10.232 5
	伟隆 169	4.40	13.33	1.187 2	6.335 0
	龙科 1109	5.14	13.33	1.679 5	13.197 5
	丰德存麦 13 号	5.80	26.00	3.326 4	15.712 5
	金丰 205	6.14	8.00	1.571 7	8.490 0
	农麦 177	7.35	7.33	1.259 9	7.715 0
	平安 11	7.58	11.33	1.906 4	6.577 5
	孟麦 028	8.00	10.67	1.296 0	9.915 0
	矮抗 58	44.90	10.67	2.066 5	14.760 0

表 1(续)

小麦类型	品种名称	病指	病粒率 (%)	麦角甾醇 含量 (μg/g)	DON 含量 (μg/g)
淮北品种 (系)	东麦 17 -61	0.36	0.67	1.120 9	1.719 5
	江麦 178	2.44	10.00	1.442 8	11.295 0
	徐麦 35	10.48	30.00	4.971 7	20.870 0
	淮麦 20	38.70	20.00	1.651 4	10.571 0
	烟农 19	45.02	24.00	1.599 5	9.755 0

注:表中数据均为 3 次重复的平均值。

表 2 供试小麦品种(系)病指、病粒率、籽粒麦角甾醇及 DON 含量统计结果

项目	DON 含量 (μg/g)	病指	病粒率 (%)	麦角甾醇含量 (μg/g)
平均值	5.248 8	5.70	6.71	1.226 4
标准差	4.507 2	9.86	7.29	0.887 9
最小值	0.849 3	0.07	0	0.239 2
最大值	20.870 0	45.02	30.00	4.971 7
变异系数	85.9%	173.1%	108.8%	72.4%

含量> 麦角甾醇含量,籽粒麦角甾醇含量的种间差异最小。

2.2 供试小麦品种(系)籽粒 DON 含量与病指、病粒率及籽粒麦角甾醇含量的相关性分析

籽粒 DON 含量与麦角甾醇含量、病粒率及病指均呈极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),病粒率与 DON 含量的相关性最大,相关系数为 0.858;麦角甾醇含量与 DON 含量的相关系数为 0.792;病指与 DON 含量的相关性相对较小,相关系数为 0.512(图 1、表 3)。供试品种(系)中有田间病指较高但 DON 含量较低的品种,如扬麦 158 等,这些品种具备一定的抗毒素积累能力;还有田间病指较高但病粒率较低的品种,如扬辐麦 5 号等,这些品种具备一定的抗籽粒侵染能力。病粒率与籽粒麦角甾醇含量的相关系数达 0.766,而病指与麦角甾醇含量的相关系数仅为 0.356(图 1、表 3)。这表明,某些品种(系)田间病指较高,但病菌侵染到籽粒中的较少,如烟农 19 等,这些品种也具备一定的抗籽粒侵染能力。

2.3 基于病指、病粒率和籽粒 DON 含量的品种(系)聚类分析

因 52 个供试品种(系)籽粒麦角甾醇含量在种间变异不明显,变异系数为 72.4%(表 2),所以依据供试品种(系)的病指、病粒率和籽粒 DON 含量等 3 个指标进行品种(系)聚类分析;聚类分析采用欧式距离区间度量标准,转换值标准化:标准差为

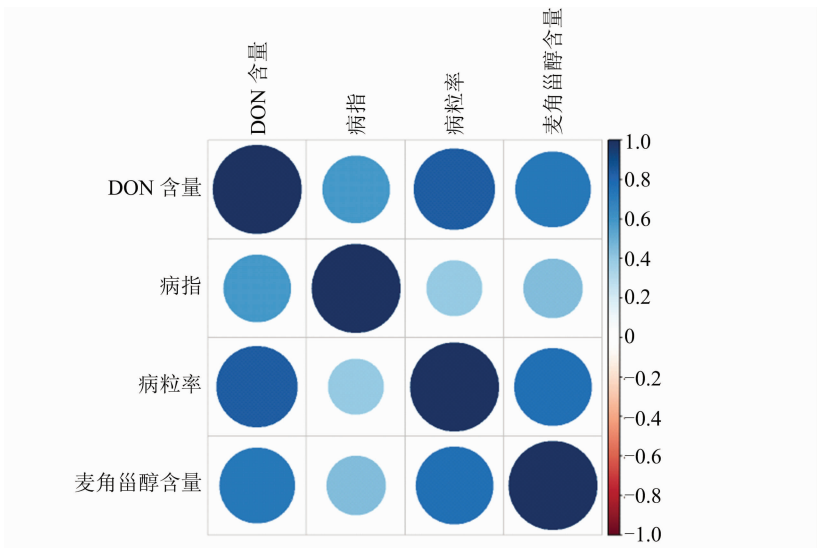


图1 供试小麦品种(系)籽粒 DON 含量、病指、病粒率及籽粒麦角甾醇含量间的相关性

表 3 供试小麦所测指标间相关性分析结果

项目	相关系数		
	DON 含量	病指	病粒率
病指	0.512 **		
病粒率	0.858 **	0.546 **	
麦角甾醇含量	0.792 **	0.356 **	0.766 **

注: \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

1,最后近似矩阵使用 Ward 法联接成树状图。基于病指、病粒率和籽粒 DON 含量的品种(系)聚类分析结果(图 2)表明,52 个供试品种(系)可大致分为以下 7 类:第Ⅰ类为籽粒 DON 含量较低(1.002 8 ~ 3.752 5  $\mu\text{g/g}$ ),病粒率略高,病指波动较大的品种(系),包括 15 个淮南品种(系),分别为苏麦 11 号、扬麦 16、宁麦 14、镇麦 12、镇麦 168、扬麦 23、扬辐麦 4 号、宁资 126、宁麦 26、华麦 1028、扬麦 22、华麦 6 号、扬麦 28、扬麦 25-5、扬麦 158;第Ⅱ类为籽粒 DON 含量(0.859 3 ~ 2.472 8  $\mu\text{g/g}$ )、病指和病粒率均较低品种,包括 15 个品种,分别为乐麦 608、苏麦 3 号、华麦 5 号、农丰 88、扬辐麦 5 号、扬麦 15、扬麦 13、望水白、东麦 17-61、龙麦 169、华麦 8 号、宁麦 23、苏麦 188、苏麦 8 号、苏科麦 1 号;第Ⅲ类为籽粒 DON 含量(5.640 0 ~ 10.467 5  $\mu\text{g/g}$ )及病指均为中等水平,而病粒率偏高的品种,包括 4 个品种,分别为淮麦 30、伟隆 169、扬辐麦 1025 和隆麦 28;第Ⅳ类为籽粒 DON 含量(8.815 0 ~ 13.197 5  $\mu\text{g/g}$ )和病粒率均较高,而病指较低品种,包括 5 个品种,分别为连麦 7 号、江麦 178、俊达 104、孟麦 028、龙科 1109;第Ⅴ类为籽粒 DON 含量(5.447 5 ~

8.490 0  $\mu\text{g/g}$ )、病指及病粒率均为中等水平,包括 8 个品种,分别为泛麦 803、徽研 22、宁麦 22、扬麦 27、平安 11、金丰 205、农麦 177、明麦 133;第Ⅵ类为籽粒 DON 含量(15.712 5 ~ 20.870 0  $\mu\text{g/g}$ )和病粒率都较高,病指中等的品种,包括 2 个品种,分别为丰德存麦 13 号和徐麦 35;第Ⅶ类为籽粒 DON 含量(9.755 0 ~ 14.760 0  $\mu\text{g/g}$ )、病指和病粒率均较高的品种,包括 3 个品种,分别是淮麦 20、烟农 19、矮抗 58。

3 讨论

小麦受玉蜀黍赤霉菌侵染,引起小穗不育或产生籽粒萎缩、畸形和变色的病粒,从而导致小麦产量损失<sup>[13,19]</sup>。目前,小麦病粒率检测大多采用肉眼鉴别病粒后统计病粒率的方法,常因人为的鉴别差异以及病菌已侵染籽粒但未显症的可能性而导致病粒率统计误差较大。在本研究中,将小麦籽粒用无菌水冲洗后置于培养箱中适温保湿培养,以是否产出粉红色分生孢子堆等小麦赤霉病菌形态特征为标准判别病粒后统计病粒率,操作简便并能较为准确地统计病粒率。

本研究结果表明,52 个供试小麦品种(系)在自然发病条件下,籽粒 DON 含量与病粒率、麦角甾醇含量和病指均呈极显著的正相关关系,籽粒 DON 含量与病粒率的相关性最高,这与前人研究结果<sup>[20-21]</sup>相同。这表明,依据田间病指,尤其是病粒率,可较好地预测籽粒 DON 含量情况,在生产实践中具有一定的实用性。

在许多发达国家测定小麦籽粒中毒素的相对

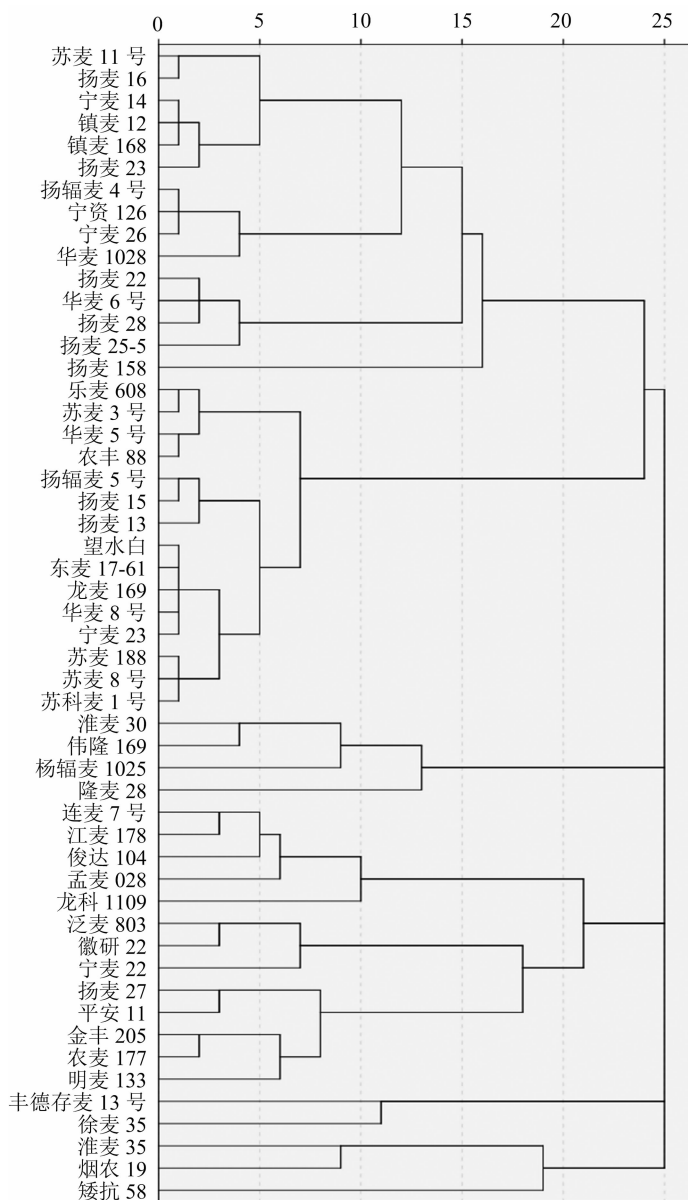


图2 基于病指、病粒率和籽粒 DON 含量的品种(系)聚类分析结果

含量已成为抗赤霉病育种的一种常规程序,而遗憾的是这种常规程序对于包括我国在内的发展中国家却关注较少,因此为了这些国家的粮食和饲料安全而把毒素检测列为抗赤霉病育种的常规程序,应该是刻不容缓的一件大事<sup>[22]</sup>。在本研究中,基于病指、病粒率和籽粒 DON 含量的品种(系)聚类分析结果表明,52 个供试品种(系)可大致分为 7 种类型,第Ⅰ类为籽粒 DON 含量较低,病粒率略高,病指波动较大的品种(系),即抗毒素积累能力较好;第Ⅱ类为籽粒 DON 含量、病指和病粒率均较低的品种,即抗初侵染、扩展和毒素积累均较好;第Ⅲ类为籽粒 DON 含量及病指均为中等水平,而病粒率偏高的品种,即籽粒易被侵染;第Ⅳ类为籽粒 DON 含量

和病粒率均较高,而病指较低的品种,即籽粒易被侵染和毒素积累类型,略抗扩展;第Ⅴ类为籽粒 DON 含量、病指及病粒率均为中等水平,即抗性均不突出;第Ⅵ类为籽粒 DON 含量和病粒率都较高,病指中等的品种,即籽粒易被侵染和毒素积累类型;第Ⅶ类为籽粒 DON 含量、病指和病粒率均较高的品种,即高感类型。第Ⅰ类和第Ⅱ类中,除东麦 17-61 外,均为淮南品种,这表明江苏省小麦品种(系)淮南小麦品种(系)的抗病性普遍优于淮北品种(系)。可见,依据病指、病粒率和籽粒 DON 含量可初步判定不同品种(系)的抗感性类型,在品种选育及生产实际中具有一定的指导意义。

本研究仅进行了 52 个供试小麦品种(系)在自

然发病条件下 1 年 1 地的田间及室内试验研究,小麦籽粒 DON 含量与病粒率、麦角甾醇含量和病指的相关系数,尤其是基于病指、病粒率和籽粒 DON 含量的品种(系)抗感类型聚类分析还有待进一步研究与优化。

#### 参考文献:

- [1] Bai G, Shaner G. Scab of wheat: prospects for control [J]. Plant Disease, 1994, 78: 760 – 766.
- [2] Dweba C C, Figlan S, Shimelis H A, et al. Fusarium head blight of wheat: pathogenesis and control strategies [J]. Crop Protection, 2017, 91: 114 – 122.
- [3] 康振生, 黄丽丽, 韩青梅, 等. 禾谷镰刀菌侵染引致小麦穗部组织细胞壁成分变化的细胞化学研究 [J]. 植物病理学报, 2007, 37 (6): 623 – 628.
- [4] Pritsch C, Muehlbauer G J, Bushnell W R, et al. Fungal development and induction of defence response genes during early infection of wheat spikes by *Fusarium graminearum* [J]. Molecular Plant – Microbe Interactions, 2000, 13: 159 – 169.
- [5] Kang Z S, Buchenauer H. Cytology and ultrastructure of the infection of wheat spikes by *Fusarium culmorum* [J]. Mycological Research, 2000, 104: 1083 – 1093.
- [6] Jiang C, Zhang C K, Wu C L, et al. TRI6 and TRI10 play different roles in the regulation of deoxynivalenol (DON) production by camp signaling in *Fusarium graminearum* [J]. Environmental Microbiology, 2016, 18 (11): 3689 – 3701.
- [7] Tralamazza S M, Bemvenuti R H, Zorzete P, et al. Fungal diversity and natural occurrence of deoxynivalenol and zearalenone in freshly harvested wheat grains from Brazil [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 445 – 450.
- [8] Zhang J B, Wang J H, Gong A D, et al. Natural occurrence of fusarium head blight, mycotoxins and mycotoxin – producing isolates of *Fusarium* in commercial fields of wheat in Hubei [J]. Plant Pathology, 2013, 62 (1): 92 – 102.
- [9] 陆维忠, 程顺和, 王裕中. 小麦赤霉病研究 [M]. 北京: 科学出版

社, 2001.

- [10] McCartney C A, Somers D J, Fedak G, et al. Haplotype diversity at fusarium head blight resistance QTLs in wheat [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2004, 109 (2): 261 – 271.
- [11] Schroeder H W, Christensen J J. Factors affecting resistance of wheat to scab caused by *Gibberella zeae* [J]. Phytopathology, 1963 (53): 831 – 838.
- [12] Miller J D, Young J C, Sampson D R. Deoxynivalenol and fusarium head blight resistance in spring cereals [J]. Phytopathol, 1985, 113: 354 – 367.
- [13] Wegulo S N, Baenziger P S, Nopsa J H, et al. Management of fusarium head blight of wheat and barley [J]. Crop Protection, 2015, 73: 100 – 107.
- [14] 朱展望, 杨立军, 佟汉文, 等. 湖北省小麦品种(系)的赤霉病抗性分析 [J]. 麦类作物学报, 2014, 34 (1): 137 – 142.
- [15] 江苏省植物保护站. 农作物主要病虫害预测预报与防治 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2006.
- [16] 谢 翎, 陈红梅, 陈安徽, 等. 超声波破碎法提取球孢白僵菌麦角甾醇的条件优化研究 [J]. 徐州工程学院学报(社会科学版), 2007, 22 (2): 10 – 13.
- [17] 王禄禄, 栗铭鸿, 李官浩, 等. 响应面法优化超声辅助提取元蘑麦角甾醇工艺 [J]. 食品工业, 2017 (11): 38 – 42.
- [18] 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, 2017.
- [19] Jin F, Bai G H, Zhang D D, et al. *Fusarium* – damaged kernels and deoxynivalenol in *Fusarium* – infected U. S. winter wheat [J]. Phytopathology, 2014, 104: 472 – 478.
- [20] 徐 飞, 杨共强, 宋玉立, 等. 不同小麦品种(系)对赤霉病的抗性和麦穗组织中 DON 毒素积累分析 [J]. 植物病理学报, 2014, 44 (6): 651 – 657.
- [21] 徐 飞, 宋玉立, 王俊美, 等. 不同侵染时期对小麦赤霉病发生和籽粒中 DON 积累的影响 [J]. 植物保护, 2018, 44 (6): 129 – 135.
- [22] 刘大钧. 小麦抗赤霉病育种——一个世界性难题 [C]//21 世纪小麦遗传育种展望——小麦遗传育种国际学术讨论会文集, 2001.

(上接第 119 页)

- [10] 李小杰. 水稻黄单胞菌 Hpa1 与 AvrBs2 蛋白调控植物生长与抗病性研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [11] 李群良. 野油菜黄单胞菌野油菜致病变种一个与胞外多糖产生相关的基因的鉴定 [D]. 南宁: 广西大学, 2002.
- [12] Nomura K, Melotto M, He S Y. Suppression of host defense in compatible plant – *Pseudomonas syringae* interactions [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2005, 8 (4): 361 – 368.
- [13] Voulhoux R, Ball G, Ize B, et al. Involvement of the twin – arginine translocation system in protein secretion via the type II pathway [J]. The EMBO Journal, 2001, 20 (23): 6735 – 6741.
- [14] 唐纪良. 野甘蓝黑腐病黄单胞菌胞外蛋白酶的致病作用 [J]. 广西农学院, 1992, 11 (1): 81 – 84.
- [15] 姜伯乐, 蒋国风, 黄佩芳, 等. 野油菜黄单胞菌 *hpa2* 基因的突变

及功能分析 [J]. 广西农业生物科学, 2008, 27 (3): 206 – 211.

- [16] Kim J F, Beer S V. HrpW of *Erwinia amylovora*, a new harpin that contains a domain homologous to pectate lyases of a distinct class [J]. Journal of Bacteriology, 1998, 180 (19): 5203 – 5210.
- [17] 陈功友, 王金生. 植物病原细菌致病性决定因子 [J]. 植物病理学报, 2002, 32 (1): 1 – 7.
- [18] Kim J G, Park B K, Yoo C H, et al. Characterization of the *Xanthomonas axonopodis* pv. *glycines* Hrp pathogenicity island [J]. Journal of Bacteriology, 2003, 185 (10): 3155 – 3166.
- [19] 姜 佳, 邹华松, 李玉蓉, 等. 水稻条斑病菌 *hrcC*、*hpa3* 和 *hrpE* 基因表达不依赖 *hrpG* 和 *hrpX* 基因调控 [J]. 微生物学报, 2009, 49 (8): 1018 – 1025.
- [20] 陈功友. 水稻黄单胞 (*Xanthomonas oryzae*) *hrp* 基因克隆与特性研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2000.