

玉米抗禾谷镰孢菌穗粒腐病种质资源鉴定

苏爱国, 王帅帅, 段赛茹, 张如养, 邢锦丰, 杨 扬, 宋 伟, 赵久然

(北京市农林科学院玉米研究中心 / 玉米 DNA 指纹及分子育种北京市重点实验室, 北京 100097)

摘要: 穗粒腐病是玉米主产区普遍发生的穗部真菌性病害, 发掘优异的抗性种质资源和选育优良抗病品种, 是防治玉米穗粒腐病最为经济有效的措施。本研究采用针刺果穗注射接种法, 在北京通州和小汤山两个试验点, 对国内外 324 份玉米自交系种质资源进行禾谷镰孢菌抗性鉴定。综合 2 个试验点的抗性评价结果, 鉴定到了 9 份禾谷镰孢菌穗粒腐病表现高抗的自交系, 分别为 OQ603、百黄混、PI 539921、Mo17、PI 406119、F321、X178、B09 和 PHG39。有 48 份自交系对禾谷镰孢菌的穗粒腐病抗性, 在 2 个试验点均为抗级以上 (包括高抗和抗)。从不同种质类群自交系的抗性分布情况来看, P 群种质整体上表现出较强的抗性, Iodent 群和 X 群次之, 而在其他类群中抗性分布趋势并不明显。这些自交系的鉴定, 丰富了我国玉米穗粒腐病抗性种质资源, 也为抗病育种和理论研究奠定了基础。

关键词: 玉米; 穗粒腐; 禾谷镰孢菌; 抗性鉴定; 类群

Identification for Ear Rot Resistance against *Fusarium graminearum* in Maize Germplasm

SU Ai-guo, WANG Shuai-shuai, DUAN Sai-ru, ZHANG Ru-yang,
XING Jin-feng, YANG Yang, SONG Wei, ZHAO Jiu-ran

(Maize Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Beijing Key Laboratory of
Maize DNA Fingerprinting and Molecular Breeding, Beijing 100097)

Abstract: Maize ear rot is a serious fungal disease that destabilizes maize production in the producing areas. Exploration of resistant-conferring germplasm resource and incorporation in maize varieties are the economical-friendly and effective measure to control this disease. In this study, 324 maize germplasm accessions were tested for ear rot resistance in Tongzhou and Xiaotangshan of Beijing by infiltrating *Fusarium graminearum* into the ear puncture. A positive correlation between resistance severities at the two environments was observed. Nine inbred lines (OQ603, Bai Huang-hun, PI 539921, Mo17, PI 406119, F321, X178, B09 and PHG39) showed highly resistant (HR), while 37 lines showed resistant (R). Based on the outcome of genetic classification, the maize lines from P group were observed showing overall higher resistance, followed by Iodent and X group. No obvious trend on the resistance distribution was detected in other populations. Collectively, this study identified additional germplasm resource that conferred ear rot resistance, and provided materials valuable for disease resistance breeding and theoretical research.

Key word: maize; ear rot; *Fusarium graminearum*; resistance identification; group

收稿日期: 2021-02-01 修回日期: 2021-03-15 网络出版日期: 2021-03-29

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20210201004>

第一作者研究方向为玉米遗传育种, E-mail: sx_201.su@163.com, 王帅帅为共同第一作者

通信作者: 赵久然, 研究方向为玉米遗传育种, E-mail: maizeshao@126.com

宋伟, 研究方向为玉米遗传育种, E-mail: songwei1007@126.com

基金项目: 北京市农林科学院创新能力建设专项 (KJCX20180413); 内蒙古自治区科技计划项目 (2020GG0098); 国家玉米良种重大科研联合攻关 (111721301354052341, 19190496)

Foundation Projects: Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences Innovation Capability Construction Special Project (KJCX20180413), Inner Mongolia Autonomous Science and Technology Plan Project (2020GG0098), Joint Research on Major National Maize Varieties (111721301354052341, 19190496)

玉米是我国主要的粮食、饲料作物和工业原料,在种植面积和总产量方面已经占据谷类作物首位。穗粒腐病是玉米主产区普遍发生的一种主要的穗部真菌性病害,不仅因籽粒腐烂导致减产降质,而且病原菌生长过程中产生的毒素等次生代谢物,会给食品与饲料安全带来重大隐患^[1]。穗粒腐病的主要病原菌为镰孢菌,不同国家和地区致病菌的种类和组成上存在差异,在我国禾谷镰孢复合种(FGSC, *Fusarium graminearum* species complex)是主要的优势菌之一^[2-3]。随着基因组研究的深入,禾谷镰孢复合种已被确认由至少 15 个形态相似、但分子亲缘关系区分明显,且具有明显地理分布特点的菌种组成^[4]。FGSC 中,我国报道的至少有 4 个种,其分布具有一定的地域特征。其中,禾谷镰孢菌(*F. graminearum*)是主要的病原菌,在南北方玉米主产区均有广泛分布^[5]。南方镰孢菌(*F. meridionale*)仅分布在高温高湿的西南区域,布氏镰孢菌(*F. boothii*)主要分布在北方地区,亚洲镰孢菌(*F. asiaticum*)在广西、四川、陕西等地均有报道^[6-7]。当前玉米生产上对穗粒腐病的防控主要采用化学手段,如喷施杀虫剂或杀菌剂^[8]。但由于致病菌类型复杂、侵染途径多样,在实际生产中难以达到理想的防治效果。

发掘优异的抗性种质资源和选育优良抗病品种,是防治玉米穗粒腐病最为经济有效的措施。基于不同的接种方法,国内外鉴定到了一些抗禾谷镰孢菌的种质。Reid 等^[9]利用花丝通道注射法进行接种鉴定,发现自交系 CO272、CO325 与杂交种 Pride K127 对禾谷镰孢菌表现出较强抗性。国内学者通过接种鉴定发现,自交系自 330 和 BT-1 对禾谷镰孢菌表现高抗^[10]。段灿星等^[11]从国家种质库保存的数千份玉米种质资源中,筛选出一批禾谷镰孢菌穗粒腐抗性材料。杨俊伟等^[12]采用双牙签接种法对 818 个玉米杂交种进行抗性鉴定,确定了 42 份高抗品种,同时发现高抗品种在年际间抗性的变化幅度较大。Du Toit 等^[13]利用牙签接种法对 52 个自交系进行穗粒腐病抗性鉴定,徐婧等^[14]利用双牙签对国外引进的 177 份玉米种质材料进行接种抗性鉴定,结果均未发现对禾谷镰孢菌表现高抗的材料。整体来看,虽然鉴定到一些抗穗粒腐病种质材料,但是对禾谷镰孢菌稳定表现高抗的玉米杂交种或自交系,数量极少,且大多含热带、亚热带种质血缘^[15],难以将其抗性直接应用于我国黄淮海及东华北等玉米主产区穗粒腐抗病育

种中。

玉米对穗粒腐病的抗性表现为数量性状,目前通过图位克隆和全基因组关联分析,已经报道了一些主效 QTL(QTL, quantitative trait locus)和相关候选基因^[16-17]。玉米穗粒腐病的发生主要受环境影响,因此不同环境下鉴定出的抗性位点往往存在不一致的现象^[18-20],这也预示了玉米穗粒腐病抗性遗传机理的复杂性。因此,鉴定出不同环境下均表现高抗的玉米种质,对穗粒腐病抗性改良和机理研究具有重要意义。试验采用禾谷镰孢菌,通过针刺果穗注射接种法,在两个试验点对国内外 324 份玉米自交系进行抗性鉴定与评价,期望为玉米穗粒腐病遗传机理的解析及抗病育种提供材料基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

收集和选用国内外玉米骨干自交系共计 324 份,种子由北京市农林科学院玉米研究中心提供。接种所用的禾谷镰孢菌,是由田间采集典型禾谷病样果穗,经单孢分离纯化、形态学观察和分子生物学鉴定获得的。

1.2 禾谷镰孢菌的培养与接种

1.2.1 菌种培养与接种体制备 将分离纯化的禾谷镰孢菌菌株接种至 PDA 培养基上,25℃ 恒温培养 6~7 d。将布满菌的 PDA 平板切成小块,转接至灭菌的诱导培养基中,25℃ 自然光条件下摇床振荡(120 r/min)培养 7 d。用双层纱布过滤掉菌丝和杂质,滤液在 4℃ 离心机中以 7500 g 的速度离心 15 min 后去除上清液,制成禾谷镰孢菌的分生孢子悬浮液。最后,用无菌水将孢子悬浮液的浓度调至 2×10^5 个/mL,储存于 4℃ 用于田间接种。

1.2.2 田间接种与调查 田间试验在北京通州国际种业园育种基地和小汤山精准农业育种基地(以下简称通州、小汤山)病害鉴定地块进行。接种小区行长 3 m、行距 0.6 m,株距 0.25 m。X178 作为抗病对照,B73 作为感病对照。每个供试材料种植 5 行,20 个材料为一组,并且在组间穿插种植抗病和感病对照材料。采用针刺果穗注射法,对每个小区中间 3 行材料进行人工接种,边缘 2 行作为空白对照。

根据材料的生育期,在吐丝后 15 d,分批进行禾谷镰孢菌的人工接种。用注射器将孢子悬浮液注入

果穗中上部籽粒处。每个果穗接种量为 2 mL, 接种后用喷水授粉袋套袋保湿, 并喷漆标识。通过对接种体系的探索, 角度同果穗呈 45° 角斜插注射效果最佳, 深度以不穿入穗轴为宜, 以防止孢子悬浮液流出和接种针堵塞。

1.3 禾谷镰孢菌抗性鉴定与评价

接种后 30 d, 对自交系的田间发病级别进行调查。每份自交系选取接种点清晰、无杂菌侵染, 且病级较高的 10 个果穗, 逐穗观察记录接种点周围的发病面积比例, 计算平均病情级别。自交系的病情级别划分和抗性评价标准, 参照农业行业标准 NY/T 1248.8-2016《玉米抗病虫害性鉴定技术规范》, 详见表 1。按照标准规定, 当设置的感病对照材料平均病情级别 ≥ 5.6 时, 则认为该批次穗粒腐病抗性鉴定结果有效。

表 1 玉米穗粒腐病病情级别划分与抗性评价标准
Table 1 Classification and evaluation standard of resistance to ear rot of maize

病情分级 Rating scale	发病面积比例 (%) Area ratio of diseased	平均病情级别 Mean rating scale	抗性评价 Resistant evaluation
1	0~1	≤ 1.5	高抗 HR
3	2~10	1.6~3.5	抗 R
5	11~25	3.6~5.5	中抗 MR
7	26~50	5.6~7.5	感 S
9	51~100	7.6~9.0	高感 HS

发病面积比例指果穗发病面积占总面积的比例
Disease area ratio refers to the proportion of ear rot to total area

1.4 种质资源的类群划分

利用我国玉米标准 DNA 指纹库构建使用的 40 对 SSR 核心引物^[21], 对 324 份玉米自交系进行遗传多样性分析, 引物信息和反应条件参照文献^[22-23]。SSR 数据分析采用 PowerMarker3.25 和 Mega7.0 软件, 将基因型数据转换为自交系间的遗传距离矩阵(Nei's1973 距离计算方法)。利用 UPGMA 方法构建系统发生树, 分析本试验所用的玉米种质资源的类群结构。

2 结果与分析

2.1 玉米种质对禾谷镰孢菌的抗性鉴定

在通州和小汤山基地, 依据标准对 324 份玉米自交系进行禾谷镰孢菌穗粒腐病抗性鉴定评价及结果统计(表 2)。整体来看, 对禾谷镰孢菌的

抗感数量和比例均呈正态分布趋势, 其中高抗和高感的自交系少, 中抗和感居多, 抗病次之。抗性评价为高抗(HR)的自交系, 在通州和小汤山分别有 25 份和 27 份, 占供试种质资源总数的 7.72% 和 8.33%。两点均为高抗的自交系有 9 份, 分别为 OQ603、百黄混、PI 539921、Mo17、PI 406119、F321、X178、B09 和 PHG39。通州和小汤山鉴定为抗病(R)的自交系分别有 53 份和 71 份, 占供试种质资源总数的 16.36% 和 21.91%。在两个试验点, 对禾谷镰孢菌抗性评价均达到抗以上的自交系共有 48 份(表 3)。抗性评价为 MR 和 S 级别的自交系最多, 两个试验点均在 28% 以上。而高感(HS)的自交系占种质资源总数的 12.35% 和 13.58%, 位于 HR 和 R 级别之间。感病对照 B73 在两个试验点的平均病情级别分别为 8.0 和 7.8, 抗病对照 X178 在两点的平均病情级别均为 1.5, 表明本批玉米种质资源的穗粒腐抗性鉴定和评价结果有效。

表 2 玉米种质禾谷镰孢菌穗粒腐病抗性鉴定结果
Table 2 Identification results of ear rot resistance against *F. graminearum* in maize germplasm

病情级别 Rating scale	抗性评价 Resistant	通州 Tongzhou		小汤山 Xiaotangshan	
		自交系 数量	占总数比 例(%)	自交系 数量	占总数比 例(%)
		Number of lines	Percentage of total	Number of lines	Percentage of total
1	高抗 HR	25	7.72	27	8.33
3	抗 R	53	16.36	71	21.91
5	中抗 MR	107	33.02	91	28.09
7	感 S	99	30.56	91	28.09
9	高感 HS	40	12.35	44	13.58

进一步分析发现, 在抗性评价为 HR、R、MR、S、HS 这 5 个级别的种质资源中, 两点病情级别相同的自交系占通州同级别数量的比例分别为 36.00%、30.19%、31.78%、32.32% 和 42.50%, 占小汤山同级别数量的比例分别为 33.33%、22.54%、37.36%、35.16% 和 38.64%。在通州鉴定为 HR 的 25 份自交系中, 在小汤山表现为 HR 有 9 份、R 有 10 份、MR 和 S 的共计 6 份。而在小汤山鉴定为 HR 的 27 份自交系中, 在通州表现为 HR 有 9 份、R 有 13 份、MR 有 5 份, 无感病自交系。表明玉米自交系对禾谷镰孢菌的抗性易受环境因素影响。

表 3 两个试验点禾谷镰孢菌抗性评价均在 R 级以上的自交系

Table 3 Evaluation of maize inbred lines for resistance to *F. graminearum* was above rated R level in both breeding sites

自交系 Inbred lines	通州 Tongzhou		小汤山 Xiaotangshan	
	平均病级	抗性评价	平均病级	抗性评价
	Mean scale	Resistant evaluation	Mean scale	Resistant evaluation
百黄混 Baihuanghun	1.00	高抗 HR	1.00	高抗 HR
冲 72 Chong72	1.00	高抗 HR	3.00	抗 R
PI 539921	1.22	高抗 HR	1.20	高抗 HR
PH4CV	1.25	高抗 HR	3.00	抗 R
Mo17	1.29	高抗 HR	1.29	高抗 HR
苏 80-1 Su80-1	1.29	高抗 HR	2.33	抗 R
齐 319 Qi319	1.29	高抗 HR	3.00	抗 R
F321	1.33	高抗 HR	1.00	高抗 HR
G476	1.33	高抗 HR	1.57	抗 R
LH1	1.40	高抗 HR	2.00	抗 R
抗病 F349 RF349	1.44	高抗 HR	2.60	抗 R
PHG39	1.50	高抗 HR	1.00	高抗 HR
PI 406119	1.50	高抗 HR	1.00	高抗 HR
OQ603	1.50	高抗 HR	1.20	高抗 HR
B09	1.50	高抗 HR	1.40	高抗 HR
X178	1.50	高抗 HR	1.50	高抗 HR
利维 9 Liwei9	1.50	高抗 HR	1.80	抗 R
掖 107 Ye107	1.50	高抗 HR	2.00	抗 R
CN1483	1.50	高抗 HR	2.33	抗 R
皖系 19 Wanxi19	1.57	抗 R	1.40	高抗 HR
沈农 92-67 Shennong92-67	1.67	抗 R	1.00	高抗 HR
吉 846 Ji846	1.67	抗 R	2.20	抗 R
LH149	1.75	抗 R	1.25	高抗 HR
MC0304	1.80	抗 R	2.40	抗 R
LH150	1.86	抗 R	1.00	高抗 HR
9010	2.00	抗 R	1.57	抗 R
PHT22	2.33	抗 R	1.00	高抗 HR
C103	2.43	抗 R	2.00	抗 R
LS02	2.50	抗 R	2.33	抗 R
PHZ51	2.56	抗 R	1.40	高抗 HR
多 25 Duo25	2.60	抗 R	1.33	高抗 HR
PHK74	2.60	抗 R	3.00	抗 R
YF121	2.67	抗 R	3.00	抗 R
垦自 167-1 Kenzi167-1	2.75	抗 R	2.00	抗 R
831	3.00	抗 R	1.00	高抗 HR
中 16 Zhong16	3.00	抗 R	1.00	高抗 HR
C8605	3.00	抗 R	1.25	高抗 HR
京 724 Jing724	3.00	抗 R	1.33	高抗 HR
中 5493 Zhong5493	3.00	抗 R	1.40	高抗 HR
NS501	3.00	抗 R	1.67	抗 R
LH93	3.00	抗 R	2.00	抗 R

表 3(续)

自交系 Inbred lines	通州 Tongzhou		小汤山 Xiaotangshan	
	平均病级	抗性评价	平均病级	抗性评价
	Mean scale	Resistant evaluation	Mean scale	Resistant evaluation
135	3.00	抗 R	3.00	抗 R
H8431	3.00	抗 R	3.00	抗 R
丰 5 Feng5	3.33	抗 R	1.00	高抗 HR
G80	3.33	抗 R	3.40	抗 R
D9B	3.50	抗 R	1.67	抗 R
PHN29	3.50	抗 R	3.00	抗 R
中 451 Zhong451	3.50	抗 R	3.33	抗 R

本表自交系按照通州鉴定的平均病级从低至高排序
The inbred lines in this table are arranged according to the mean scale identified in Tongzhou

2.2 不同类群种质的抗性分布

SSR 聚类分析结果图 1 显示, 40 对 SSR 核心引物可以将 324 份玉米自交系划分为 8 大类群, 分别为 P 群、X 群^[24]、Iodent 群、改良 Reid 群、旅大红

骨群、Reid 群、黄改群以及 Lancaster 群。聚类分析结果与系谱信息基本一致, 说明选取的自交系具有广泛的遗传多样性和代表性。

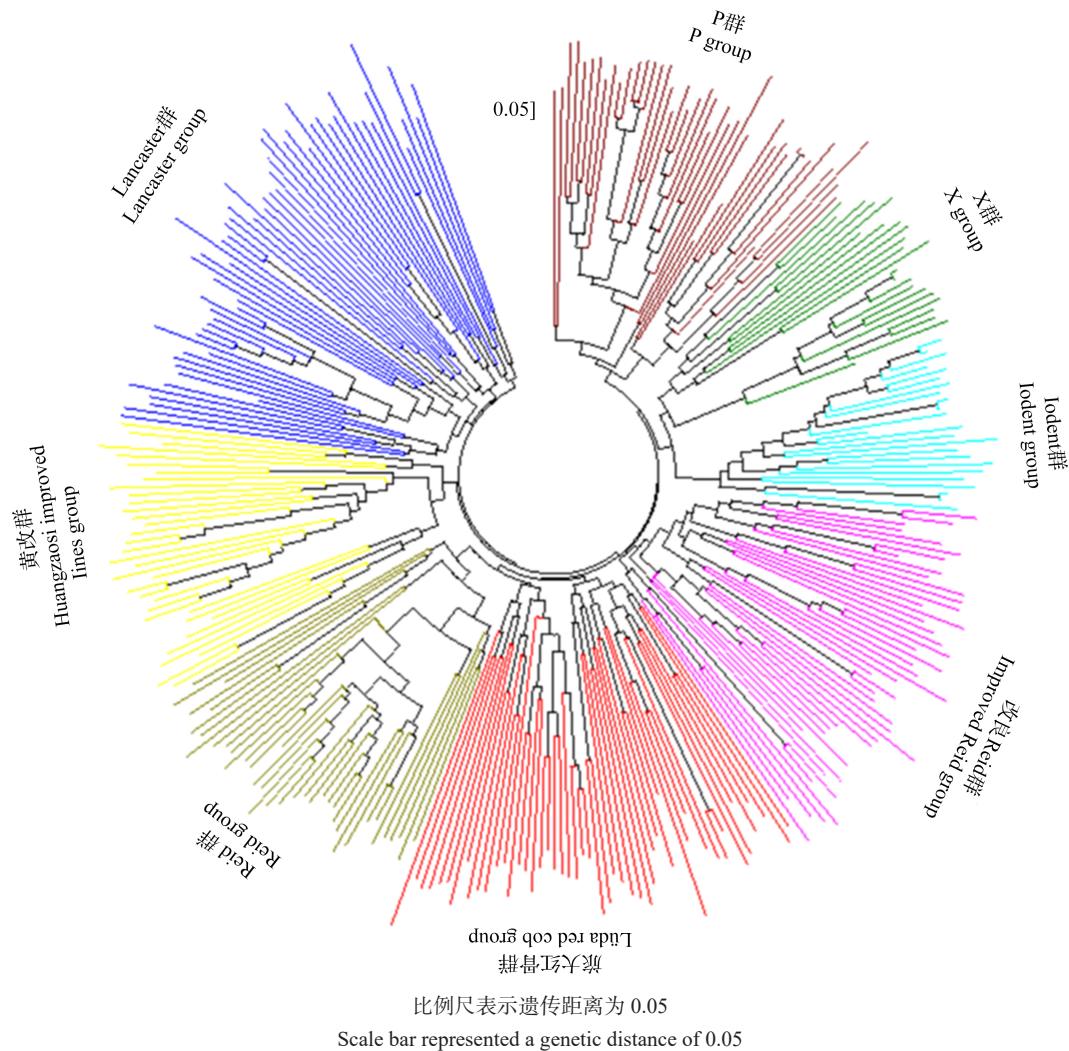


图 1 利用 40 个 SSR 位点构建玉米种质资源的进化树
Fig.1 Phylogenetic trees of maize germplasm base on 40 SSR sites

同一类群中,以两个试验点抗性评价为相同级别的自交系数之和,占该类群总自交系数数量的比例,对玉米种质在 8 大类群中的抗性分布趋势进行评估(图 2)。统计分析发现,P 群、X 群和 Lancaster 群 3 个类群中,抗性表现为 HR 的自交系所占比例达到 10% 及以上,分别为 15.56%、11.36% 和 10%,明显高于其他类群。而抗性为 HS 的自交系占比,在 P 群和 X 群仅有 6.67% 和 6.82%。Lancaster 群中虽然抗性为 HR 的自交系占比也较高,但 HS 的自交系占比同样高达 15.83%,仅低于 Reid 和黄改群。Iodent 群中,抗性为 HR 和 HS 自

交系的占比均为 6.25%,5 个抗性评价级别的自交系数数量呈正态分布。Reid 群、改良 Reid 群、黄改群和旅大红骨群中,抗性为 HR 自交系的占比分别为 7.89%、6.25%、5.71% 和 1.92%,HS 的自交系占比却分别高达 17.11%、15.63%、17.14% 和 12.50%。因此,从抗性评价为两个极端级别 HR 和 HS 的自交系数数量占比来衡量,P 群和 X 群种质对禾谷镰孢菌整体上表现出较强的抗性,Lancaster 群和 Iodent 群种质次之,而 Reid 群、改良 Reid 群、黄改群和旅大红骨群种质的抗性并不占优势。

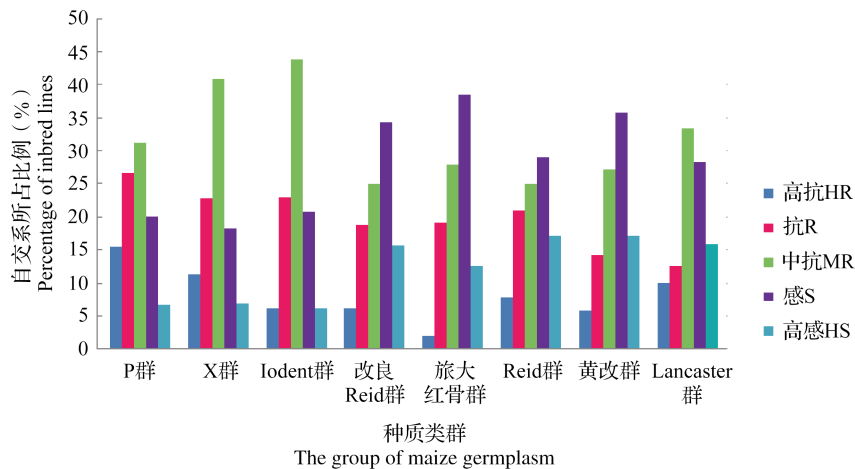


图 2 不同类群种质对禾谷镰孢菌的抗性分布

Fig.2 Distribution of resistance of different groups of maize germplasm to *F. graminearum*

实践经验表明,人工接种鉴定为 R 级以上、且其他性状优良的自交系,一定程度上是可作为重要的抗性资源应用于抗病育种。在此,用两个试验点鉴定为 HR 和 R 级自交系之和,占该类群中鉴定自交系总份数的比例,来衡量不同类群种质的抗性分布。8 大类群中,P 群种质 R 级以上的自交系占比达到 42.22%,明显高于其他类群。X 群和 Iodent 群种质次之,分别为 34.09% 和 29.17%,其他 5 个类群的占比在 20%~28.95% 之间。因此,综合两个衡量指标,可以看出 P 群种质中禾谷镰孢菌抗性材料分布最为广泛。

3 讨论

目前在玉米穗粒腐抗病资源鉴定,以及抗性基因挖掘方面都取得了一定进展,但仍落后于实际生产应用。玉米穗粒腐病是由多种病原菌引起,而田间发病一般都是以复合侵染为主,这无疑增加了抗性鉴定和表型获得的难度。同时,穗粒腐抗性表现为数量性状易受环境因素影响,如温暖潮湿的环境

更有利于禾谷镰孢菌的侵染和发生^[10,25]。这些因素,导致了当前生产中缺乏稳定的抗病种质。

本研究在北京市的两个玉米育种试验基地,对 324 份国内外玉米种质资源的禾谷镰孢菌抗性进行鉴定。由于是同一年份,且 2 个试验点位于同一生态区域,获得了一定数量抗禾谷镰孢菌穗粒腐病的种质材料。其中,9 份自交系在两个试验点均表现为高抗。主要集中到以下 4 个类群: F321 和 X178 属于 P 群;百黄混、Mo17、PI539921 和 PI406119 属于 Lancaster 群; B09 和 PHG39 属于 Reid 群; OQ603 属于 Iodent 群。Mo17 高抗镰孢菌引起的穗腐病已有报道^[11]。此外, Yuan 等^[17]利用 B73 × Mo17 的 298 个 DH 系,定位到 10 个抗禾谷镰孢菌穗粒腐病的 QTL,且在第 7 染色体上确定一个主效 QTL *qGRfg7*,能够解释 33.26% 的表型变异。PI406119、B09 和 PHG39 在玉米产业技术体系鉴定的穗粒腐抗性材料中也有提到。同时,鉴定到两点抗性评价均在 R 级以上的自交系 48 份,在 8 个类群均有分布。这些抗病材料的鉴定与筛选,丰

富了我国玉米抗穗粒腐病种质资源,也为抗病育种和理论研究提供了重要的材料基础。

从 8 大类群玉米种质的抗性分布情况来看, P 群自交系对禾谷镰孢菌导致的穗粒腐病表现出较强抗性,可能与该群种质大多带有热带、亚热带血缘有关。在其他类群中,通过人工接种也鉴定到了一些 HR 和 R 的自交系,可应用于不同类群感病材料的穗粒腐病抗性改良。两个试验点鉴定结果的相关性分析表明,自交系对禾谷镰孢菌的抗性除受自身遗传背景的控制外,还受生长条件、气候变化、病害侵染等诸多因素的影响。因此,抗病育种中选用的抗源,除了自身的抗性评价外,还需重点考虑组配的玉米品种在适种区域的抗性情况。

参考文献

- [1] Eller M S, Holland J B, Payne G A. Breeding for improved resistance to *Fumonisin* contamination in maize. *Toxin Reviews*, 2008, 27(3-4): 371-389
- [2] 李新风, 王建明, 张作刚, 高俊明, 郝晓娟, 贺运春. 山西省玉米穗腐病原镰孢菌的分离与鉴定. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2012, 32(3): 218-223
Li X F, Wang J M, Zhang Z G, Gao J M, Hao X J, He Y C. Isolation and identification of the pathogen *Fusarium* causing maize ear rot in Shanxi province. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2012, 32(3): 218-223
- [3] 张小飞, 邹成佳, 崔丽娜, 李晓, 杨晓蓉, 罗怀海. 西南地区玉米穗腐病原分离鉴定及接种方法研究. *西南农业学报*, 2012, 25(6): 2078-2082
Zhang X F, Zou C J, Cui L N, Li X, Yang X R, Luo H H. Identification of pathogen causing maize ear rot and inoculation technique in southwest China. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(6): 2078-2082
- [4] Sarver B A J, Ward T J, Gale L R, Broz K, Kistler H C, Aoki T, Nicholson P, Carter J, Donnell K O. Novel *Fusarium* head blight pathogens from Nepal and Louisiana revealed by multilocus genealogical concordance. *Fungal Genetics & Biology*, 2011, 48(12): 1096-1107
- [5] 秦子惠, 任旭, 江凯, 武小菲, 杨知还, 王晓鸣. 我国玉米穗腐病致病镰孢种群及禾谷镰孢复合种的鉴定. *植物保护学报*, 2014, 41(5): 589-596
Qin Z H, Ren X, Jiang K, Wu X F, Yang Z H, Wang X M. Identification of *Fusarium* species and *F.graminearum* species complex causing maize ear rot in China. *Journal of Plant Protection*, 2014, 41(5): 589-596
- [6] 孙华, 张海剑, 马红霞, 石洁, 郭宁, 陈丹, 李坡. 春玉米区穗腐病原菌组成、分布及禾谷镰孢复合种的鉴定. *植物病理学报*, 2018, 48(1): 8-15
Sun H, Zhang H J, Ma H X, Shi J, Guo N, Chen D, Li P. Composition and distribution of pathogens causing ear rot in spring maize region and identification of *Fusarium graminearum* species complex. *ACTA Phytopathology Sinica*, 2018, 48(1): 8-15
- [7] 王宝宝, 郭成, 孙素丽, 夏玉生, 朱振东, 段灿星. 玉米穗腐病致病禾谷镰孢复合种的遗传多样性、致病力与毒素化学型分析. *中国农业科学*, 2020, 23(53): 4777-4790
Wang B B, Guo C, Sun S L, Xia Y S, Zhu Z D, Duan C X. The genetic diversity, pathogenicity, and toxigenic chemotypes of *Fusarium graminearum* species complex causing maize ear rot. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 23(53): 4777-4790
- [8] 郭聪聪, 付萌, 庞民好, 刘颖超, 董金皋. 杀菌剂对玉米穗腐病菌的毒力及毒素产生的影响. *植物保护学报*, 2015, 42(6): 1036-1043
Guo C C, Fu M, Pang M H, Liu Y C, Dong J G. Effects of fungicides on growth and mycotoxins of *Fusarium* species causing maize ear rot. *Journal of Plant Protection*, 2015, 42(6): 1036-1043
- [9] Reid L M, Spaner D, Mather D E, Bolton A T, Hamilton R I. Resistance of maize hybrids and inbreds following silk inoculation with three isolates of *Fusarium graminearum*. *Plant Disease*, 1993, 77(12): 1248-1251
- [10] 刘素玲, 吴欣, 张百行, 陈威. 对两种病原菌引起的玉米穗粒腐病的抗性遗传及 QTL 定位研究可行性分析. *农业科技通讯*, 2017(4): 17-19
Liu S L, Wu X, Zhang B X, Chen W. Feasibility analysis of genetic resistance and QTL mapping of ear rot caused by two pathogens. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2017(4): 17-19
- [11] 段灿星, 王晓鸣, 宋凤景, 孙素丽, 周丹妮, 朱振东. 玉米抗穗腐病研究进展. *中国农业科学*, 2015, 48(11): 2152-2164
Duan C X, Wang X M, Song F J, Sun S L, Zhou D N, Zhu Z D. Advances in research on maize resistance to ear rot. *Scientia Agricultural Sinica*, 2015, 48(11): 2152-2164
- [12] 杨俊伟, 王建军, 赵变平, 李彦良, 贾鑫, 王富荣. 玉米新品种抗禾谷镰孢菌穗粒腐病鉴定与评价. *河北农业科学*, 2020, 24(4): 47-49
Yang J W, Wang J J, Zhao B P, Li Y L, Jia X, Wang F R. Identification and evaluation of resistance of maize hybrids to *Fusarium graminearum* ear rot. *Hebei Agricultural Sciences*, 2020, 24(4): 47-49
- [13] Du Toit L J, Pataky J K. Reactions of processing sweet corn hybrids to *Gibberella* ear rot. *Plant Disease*, 1999, 83(2): 176-180
- [14] 徐婧, 姜钰, 秦培文, 刘可杰, 胡兰, 孙会杰, 徐秀德. 外引玉米种质对两种穗腐病原镰孢菌抗性鉴定. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(1): 20-25
Xu J, Jiang Y, Qin P W, Liu K J, Hu L, Sun H J, Xu X D. Test for ear rot resistance against *Fusarium verticillioides* and *Fusarium graminearum* in imported maize germplasm. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(1): 20-25
- [15] 陈威, 吴建宇, 袁虹霞. 玉米穗粒腐病抗病资源鉴定. *玉米科学*, 2002, 10(4): 59-60, 101
Chen W, Wu J Y, Yuan H X. Identification of resistance on maize germplasm to maize ear rot. *Journal of Maize Sciences*, 2002, 10(4): 59-60, 101
- [16] Chen J, Shrestha R, Ding J, Zheng H, Mu C, Wu J, Mahuku G. Genome-wide association study and QTL mapping reveal genomic loci associated with *Fusarium* ear rot resistance in tropical maize germplasm. G3 (Bethesda), 2016, 6(12): 3803-3815
- [17] Yuan G, Chen B, Peng H, Zheng Q, Zhang Z. QTL mapping

- for resistance to ear rot caused by *Fusarium graminearum* using an IBM Syn10 DH population in maize. *Molecular Breeding*, 2020, 40(9): 91
- [18] Robertson L A, Kleinschmidt C E, White D G, Payne G A, Maragos C M, Holland J B. QTL mapping for *Fusarium* ear rot and *Fumonisin* contamination resistance in two maize populations. *Crop Science*, 2006, 46: 1734-1743
- [19] Ding J Q, Wang X M, Chander S, Yan J B, Li J S. QTL mapping of resistance to *Fusarium* ear rot using a RIL population in maize. *Molecular Breeding*, 2008, 22(3): 395-403
- [20] Pérez Brito D, Jeffers D P, González De León D, Khairallah M M. QTL mapping of *Fusarium moniliforme* ear rot resistance in highland maize. *Mexico Agrociencia*, 2001, 35: 181-196
- [21] 王凤格, 易红梅, 赵久然, 刘平, 张新明, 田红丽, 堵苑苑. 玉米品种鉴定技术规程 SSR 标记法: NY/T 1432-2014. 北京: 中国农业出版社, 2014
- Wang F G, Yi H M, Zhao J R, Liu P, Zhang X M, Tian H L, Du Y Y. Protocol for the identification of maize varieties-SSR marker method: NY/T1432-2014. Beijing: China Agriculture Press, 2014
- [22] Wang F G, Tian H L, Zhao J R, Song H M. Development and characterization of a core set of SSR markers for fingerprinting analysis of Chinese maize varieties. *Maydica*, 2011, 56(1): 7-17
- [23] 宋伟, 苏爱国, 邢锦丰, 吴金凤, 赵久然. 京 724 玉米自交系 S 型细胞质雄性不育系分子标记辅助选育研究. *玉米科学*, 2016, 24(1): 33-36
- Song W, Su A G, Xing J F, Wu J F, Zhao J R. Study on breeding of new S-type cytoplasmic male sterile material from maize inbred line Jing724 with molecular marker assisted selection. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(1): 33-36
- [24] 赵久然, 李春辉, 宋伟, 王元东, 张如养, 王继东, 王凤格, 田红丽, 王蕊. 基于 SNP 芯片揭示中国玉米育种种质的遗传多样性与群体遗传结构. *中国农业科学*, 2018, 4(51): 31-49
- Zhao J R, Li C H, Song W, Wang Y D, Zhang R Y, Wang J D, Wang F G, Tian H L, Wang R. Genetic diversity and population structure of important Chinese maize breeding germplasm revealed by SNP-Chips. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 4(51): 31-49
- [25] Alessandra L, Valentina M, Borrelli V M, Lorenzo S, Logrieco A F, Adriano M. Molecular basis of resistance to *Fusarium* ear rot in maize. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1774