

# 不同氮磷条件下玉米产量和灰斑病抗性的配合力分析

王庭照<sup>1</sup>, 蒋辅燕<sup>2</sup>, 张玉东<sup>2</sup>, 尹兴福<sup>2</sup>, 王一竹<sup>1</sup>, 冉枫云<sup>1</sup>, 番兴明<sup>2</sup>

(1. 云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201; 2. 云南省农业科学院粮食作物研究所, 昆明 650205)

**摘要:** 以3个测验系(T1~T3)和10个被测系(L4~L13)为亲本, 按照NCII遗传交配设计对低磷肥、低氮肥和正常氮磷肥3个施肥水平下玉米的产量及灰斑病评分的配合力和遗传参数进行评估。结果表明, 在低磷和低氮处理下, 30个杂交组合的灰斑病评分显著低于正常氮磷处理, 产量没有显著降低。测验种T3(D39)与被测系L7(YML524)和L10(YML545)在不同处理下的产量一般配合力为正值且相对较高; 低氮/低磷条件下灰斑病评分的GCA与正常氮磷下存在显著差异。不同处理条件下, 灰斑病评分均较低的自交系为T3、L7、L10, T1×L10灰斑病评分特殊配合力表现为显著负效应。相关性分析表明, 杂交组合亲本的一般配合力之和(GCAs)与F<sub>1</sub>产量及抗病性均呈极显著正相关( $P<0.01$ )。综上, T3(D39)、L7(YML524)、L10(YML545)在灰斑病抗性和产量方面的GCA效应较好, 综合表现最优。

**关键词:** 玉米; 低氮/低磷; 产量; 灰斑病; 配合力

**中图分类号:** S513.035

**文献标识码:** A

## Combining Ability Analysis of Yield and Resistance to Gray Leaf Spot of Maize under Different Nitrogen and Phosphorus Conditions

WANG Ting-zhao<sup>1</sup>, JIANG Fu-yan<sup>2</sup>, ZHANG Yu-dong<sup>2</sup>, YIN Xing-fu<sup>2</sup>,

WANG Yi-zhu<sup>1</sup>, RAN Feng-yun<sup>1</sup>, FAN Xing-ming<sup>2</sup>

(1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201;

2. Institute of Food Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

**Abstract:** This study used three test lines(T1-T3) and ten tested lines(L4-L13) as parents and made 10×3=30 crosses according to NCII genetic design. Combining ability and some genetic parameters have been evaluated on GY and GLS scores(GLSS) with three treatments of low phosphorus fertilizer, low nitrogen fertilizer and normal nitrogen and phosphorus fertilizer. The results showed that the GLSS for the 30 crosses with low phosphorus and low nitrogen treatments was significantly lower than that under normal nitrogen and phosphorus treatments, while no significant GY loss was observed. With all three treatments, the general combining ability(GCA) of GY was positive and relatively high for the test line of T3(D39) and the tested lines of L7(YML524) and L10(YML545). The GCA of GLSS with low nitrogen or low phosphorus treatments was significantly different from that with normal nitrogen and phosphorus treatment. The inbred lines with significantly low GLSS with different treatments were T3, L7, L10. The SCA of T1×L10 GLSS showed significant negative effect. Correlation analysis showed that the sum of GCA(GCAs) on GY and GLSS for the parent lines of the crosses was significantly positively correlated with the phenotypic value of F<sub>1</sub> ( $P<0.01$ ). In summary, T3(D39), L7(YML524), L10(YML545) and had better GCA effect on GLS resistance and GY, and the overall performance was the best.

**Key words:** Maize; Low nitrogen/phosphorus; Yield; Gray leaf spot; Combining ability

录用日期: 2023-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31961143014)、云南省重大科技专项项目(202102AE090023)、云南省种子种业联合实验室项目(202205AR070001)

作者简介: 王庭照(1999-), 云南普洱人, 硕士, 主要从事玉米遗传育种研究。E-mail: wangtzyr88@qq.com

番兴明为本文通信作者。E-mail: xingmingfan@163.com

各种叶部病害是限制玉米生产并造成严重产量损失的一个主要因素<sup>[1]</sup>,其中由真菌引起的灰斑病(Gray leaf spot, GLS)是包括中国在内的世界许多国家地区的主要玉米病害之一<sup>[2-3]</sup>。玉米灰斑病一般会使玉米产量损失达5%~30%,严重时玉米灰斑病会造成植株叶面全部枯死,致使植株不能正常授粉结实,最终导致的减产可达60%以上,甚至造成绝收<sup>[4-5]</sup>。在西南高海拔玉米种植区,灰斑病发生更为普遍,危害也更加严重,已成为该地区玉米生产的最重要病害<sup>[6]</sup>。研究表明,造成玉米灰斑病发生流行的主要原因有玉米品种抗性降低、病原菌在田间的积累、适宜的气候条件和不合理的田间管理等<sup>[7]</sup>。孙成涛<sup>[8]</sup>等研究表明,越冬的灰斑病菌会在玉米病残体上寄生,免耕会增加玉米灰斑病的发病几率和严重程度,并且热带地区比温带地区更为严重。

氮、磷是影响玉米生长发育和产量的关键矿质元素<sup>[9]</sup>,生产上施用氮、磷肥对玉米产量提升有显著效果,但过量施用不仅带来了农业环境污染问题<sup>[10-11]</sup>,同时对玉米灰斑病发生的严重程度也有很大的负面影响。艾薇等<sup>[12]</sup>研究表明,在发病前期,氮、磷肥使用量对玉米灰斑病发病程度的影响达到极显著水平。Caldwell等<sup>[13]</sup>研究表明,在未使用任何杀菌剂条件下,随着氮、磷施用量的增加,玉米灰斑病发病程度随之加重。Okori等<sup>[14]</sup>研究表明,氮肥是对病害影响最大的矿质元素,增施氮肥的玉米种植区灰斑病流行更为严重。一般来说,玉米灰斑病的发生使得植株光合面积减少,从而导致玉米产量损失。前人研究表明,生产上通过翻埋秸秆、施用杀菌剂和轮作等田间管理手段来控制玉米灰斑病流行的效果并不明显<sup>[15]</sup>,利用玉米品种的抗性才是控制灰斑病的最有效的手段。

前人对玉米品种抗病性的配合力及遗传模式已有许多卓有成效的研究,对玉米抗灰斑病的研究也取得了重要进展<sup>[17-18]</sup>。吴雯雯等<sup>[19]</sup>对国际小麦玉米中心的CML系列玉米自交系的灰斑病抗性配合力及遗传参数进行了分析估计,结果表明,自交系CML390组配出的杂交组合具有较优的灰斑病抗性,其杂交组合抗性的特殊配合力(Special combining ability, SCA)也较好。玉米对灰斑病的抗性遗传以加性效应为主,存在一定的非加性效应,玉米抗性性状的表现受环境影响较为明显。Bekeko Z等<sup>[16]</sup>研究表明,加性效应和非加性效应均对玉米的灰斑病抗性和子粒产量有正向影响,且加性效应比非加性效应更加重要。Li等<sup>[20]</sup>在2018年对玉米自交系产量和灰斑病评分进行了配合力分析,发现3个携带抗

性DNA片段RDNAS(resistance-carrying GZ204/IDP5 DNA segment)的重组自交系(RILs),不仅能显著降低灰斑病评分(Gray leaf spot scores, GLSS),对GLS的抗性也具有显著的一般配合力(General combining ability, GCA),而且这些重组自交系所配杂交组合的子粒产量保持稳定。周雪琴等<sup>[21]</sup>以26份玉米骨干自交系为材料,结合接种鉴定和分子标记检测研究了玉米抗灰斑病的基因位点,结果表明,有4份玉米材料表现为高抗,其抗灰斑病基因位点分别是qRgls2.04、qRgls1.06、qRgls2.07和qRgls3.02。Chen等<sup>[22]</sup>利用两组RILs群体进行了基因分型测序(GBS)分析,共检测到11个抗灰斑病的QTL,进一步的基因注释分析确定了4个与抗灰斑病相关的候选基因(*GRMZM2G032384*、*GRMZM2G041415*、*GRMZM2G041544*和*GRMZM2G035992*)。

综上所述,对玉米灰斑病的发病条件、控制途径及抗性基因定位的研究已取得了一定进展,但有关不同施肥条件下玉米自交系灰斑病抗性配合力和遗传参数分析的研究鲜有报道。为防止灰斑病暴发造成玉米产量的严重损失,育种家需要培育既抗灰斑病又高产的玉米杂交种<sup>[23]</sup>。本研究以3个灰斑病抗性表现出差异的自交系为测验种(父本)和10个新创制的自交系为被测系(母本)配制了30个杂交组合,比较在不同氮、磷处理条件下产量和灰斑病抗性的配合力和遗传参数,探究降低玉米氮、磷的供应是否具有即降低玉米灰斑病发病程度又减少玉米产量损失的作用,发掘既抗灰斑病又高产的玉米自交系和杂交种,为我国灰斑病高发玉米产区抗病品种的选育提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

本试验以来自3个不同杂种优势群体的优异玉米自交系郑58(Reid, T1)、YML1218(nonReid, T2)和D39(Suwan1, T3)为测验种,与10个被测系(L4~L13)杂交,产生30个杂交组合。其中,3个测验种D39、郑58和YML1218对灰斑病抗性的表现分别为高抗、高感和感病。10个被测系来源于导入了国际玉米小麦改良中心(International Maize and Wheat Improvement Center, CIMMYT)的热带玉米种质的改良温带玉米自交系。温带玉米自交系(LH123HT、PHG39、LH51和PB80)具有较好的产量一般配合力,但是抗病性较差,无法在西南地区育种上直接应用。来自于CIMMYT的热带玉米种质具有丰富的遗传多样性,被广泛应用于玉米抗病、抗逆性遗传改良

表1 供试材料名称及来源

Table 1 Names and sources of test materials

编号 No.	自交系 Inbred line	系谱 Pedigree	杂种类群 Heterotic group	抗性评价 Resistance evaluation
T1	郑58	Derived from Ye478	Reid	高感
T2	YML1218	HuangZhaoShi×WeiChun	nonReid	感病
T3	D39	Pio. 3003-3-2-b-3-1-4-bbbb	Suwan1	高抗
L4	YML502	((MAS[MSR/312]-117-2-2-1-B/LH123HT)/LH123HT)-2-6-1(Y)-1	-	抗病
L5	YML506	((MAS[MSR/312]-117-2-2-1-B/LH123HT/LH123HT)-4-1-2-1	-	抗病
L6	YML519	((CML442/PHG39)/PHG39)-1-3-1-1	-	抗病
L7	YML524	((DRB-F2-60-1-1-1-B/LH123HT)-B)-2-3-1-2	-	抗病
L8	YML526	((DRB-F2-60-1-1-1-B/LH123HT)-B)-2-3-1-4	-	抗病
L9	YML528	((MAS[MSR/312]-117-2-2-1-B/LH123HT)-B)-3-1-1-2	-	抗病
L10	YML545	((CML451/LH51)-B)-1-1-1-1	-	抗病
L11	YML575	((CL02450/PB80)-B)-4-1-1-1-B	-	抗病
L12	YML579	((CML442/PHG39)-B)-3-1-2-1-B	-	抗病
L13	YML580	((CML442/PHG39)-B)-3-1-2-2-B	-	抗病

和育种应用研究<sup>[24]</sup>。3个测验种和10个被测系的系谱来源见表1。

## 1.2 田间试验和数据采集

试验于2021年在云南省砚山县(海拔1 540 m, 104.33° E, 23.60° N)对30个杂交组合进行低磷肥处理,播种时施无磷复合肥(15-0-15)300 kg/hm<sup>2</sup>,在苗期施用100 kg/hm<sup>2</sup>氮肥,大喇叭口期施200 kg/hm<sup>2</sup>尿素;低氮肥处理,播种时施复合肥(15-15-15)300 kg/hm<sup>2</sup>,在苗期施用100 kg/hm<sup>2</sup>氮肥,后续不再施肥;正常氮、磷处理,播种时施复合肥(15-15-15)300 kg/hm<sup>2</sup>,苗期施100 kg/hm<sup>2</sup>氮肥,大喇叭口期施200 kg/hm<sup>2</sup>尿素,共3个施肥水平处理。为确保试验低磷条件,试验所用土地为连续5年未施用磷肥的地块。

试验采用完全随机区组设计,每个试验小区设置两行,行长3 m,行距为70 cm,每行14株,两次重复。植株密度约为60 000株/hm<sup>2</sup>。其他管理按照当地的标准进行。

砚山县被认为是灰斑病自然发生和筛选抗灰斑病玉米种质的理想地点<sup>[25-26]</sup>。在开花后30 d,采用如下1~9级病级分类标准记录各小区灰斑病评分(Gray leaf spot scores, GLSS):

1为高抗(叶片上无或少有灰斑/病斑面积<总叶面积的5%);

3为抗病(叶片上有少许灰斑/病斑面积=叶片总面积的6%~10%);

5为中抗(叶片中间灰斑数/病斑面积=叶片总面积的11%~30%);

7为感病(叶片上有大量灰斑/病斑面积=叶片总面积的31%~70%);

9为高感(叶片上病斑面积大/病斑面积=叶片总面积的71%~100%)<sup>[27]</sup>。

玉米成熟后从每行中间取样10株,收获后,将子粒风干至恒湿时测定子粒产量。

## 1.3 数据处理与分析

采用Excel 2016和SPSS Statistics 26整理数据并进行方差分析,使用ADG-R<sup>[28]</sup>软件计算配合力、基因型方差、广义遗传力和狭义遗传力。

## 2 结果与分析

### 2.1 在不同氮、磷条件下杂交组合的产量和灰斑病表现

对30个杂交组合在正常氮磷、低磷和低氮条件下的产量和灰斑病评分进行描述性统计分析结果见表2。各处理间在产量均值上没有统计上的显著性差异,灰斑病评分均值在低磷和低氮处理下显著低于正常氮磷处理(图1),结果表明,随着氮、磷肥的供应减少,玉米的产量没有显著减少,灰斑病抗性有显著提升。对氮磷肥料资源较为缺乏的地区的玉米生产具有实用指导性意义。

### 2.2 方差分析

对30个杂交组合在不同处理下的产量和灰斑病评分进行联合方差分析(表3)。结果表明,产量和灰斑病评分在处理、重复(处理)、组合、被测系、测验种、被测系×测验种达到极显著差异( $P<0.01$ )。重复(处理)间差异显著说明所用区组设置很好地控制了

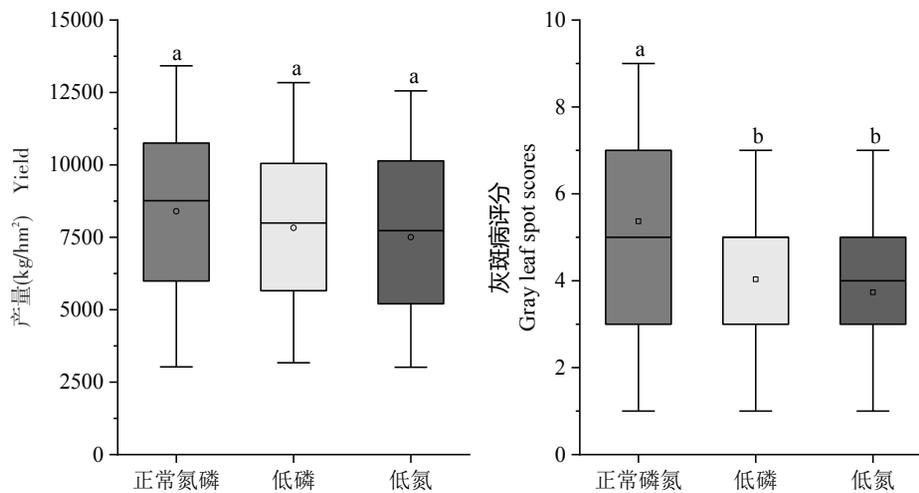
表2 不同氮磷条件下30个玉米杂交组合的产量和灰斑病评分的统计参数

Table 2 Yield and gray leaf spot scores measured in 30 crosses under different nitrogen and phosphorus conditions

描述统计 Descriptive statistic	正常氮磷 Normal N and P		低磷 Low P		低氮 Low N	
	产量(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	灰斑病评分 GLSS	产量(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	灰斑病评分 GLSS	产量(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	灰斑病评分 GLSS
最小值	3 028.40	1.00	3 169.50	1.00	3 015.00	1.00
最大值	13 417.90	9.00	12 840.00	7.00	12 555.00	7.00
均值	8 397.66	5.37	7 827.20	4.03	7 504.72	3.73
标准差	2 995.99	2.03	2 789.52	1.71	2 813.60	1.60
偏度	-0.16	0.22	-0.07	-0.22	-0.03	-0.36
峰度	-1.04	-0.75	-1.12	-0.54	-1.16	-0.71
相关性	-0.61**		-0.59**		-0.65**	

注：“\*\*”表示在0.01的概率水平上差异显著。下表同。

Note: \*\* indicates significant at the 0.01 level of probability. The same below.



注:不同字母表示在0.05水平上存在显著差异。

Note: Different letters indicate significant differences at the 0.05 level.

图1 30个杂交组合在不同氮磷处理条件下的产量和灰斑病评分均值

Fig.1 Means of yield and gray leaf spot scores of 30 hybrids under different nitrogen and phosphorus treatments

土地间的差异。为了确定这一判断,对不同处理条件下30个杂交组合的产量和灰斑病评分在重复间表现进行相关分析。结果表明(表4),不同区组间产量和灰斑病评分在不同重复间的相关性均达极显著水平,说明杂交组合在不同区组间表现相对稳定,试验区组的设置很好地控制了田间差异,有效降低了最终的试验误差。从处理×组合、处理×测验种、处理×测验种×被测系的交互作用方差来看,仅有产量存在极显著差异( $P<0.01$ ),灰斑病评分未达到显著差异( $P>0.05$ )。结果表明,组合、测验种和测验种×被测系在不同处理下的发病程度较为一致而产量在不同处理下差异较大。因此,在低氮低磷条件下选择比较高产玉米组合充分利用有利的互作效应,达到降低肥料成本、降低灰斑病发病率、保持较高玉米

产量的目标。

### 2.3 玉米产量和灰斑病评分的一般配合力(GCA)分析

对自交系的产量和灰斑病评分的一般配合力进行分析。结果表明(表5),不同性状在同一自交系之间的一般配合力存在很大差异,相同性状在不同自交系之间也有较大的差异。对于产量来说,在正常氮磷条件下,GCA为正效应的自交系有6个,其中,被测系L10、L7、L6和测验种T3的GCA效应值较大且极显著大于0;被测系L8、L13和测验种T1的GCA为极显著负效应;低磷和低磷条件下的产量GCA表现与正常氮磷条件几乎一致。对于玉米灰斑病抗性来说,因为灰斑病评分低的玉米表示其抗性较好,因此,灰斑病评分GCA为负效应的自交系是需要的品

表3 方差分析结果  
Table 3 ANOVA results

变异来源 Source of variation	自由度 DF	产量 Yield			灰斑病评分 GLSS		
		均方 MS	F值 F value	P值 P value	均方 MS	F值 F value	P值 P value
处理	2	12 267 530.43	411.17	0.000	45.36	63.37	0.000
重复(处理)	3	222 460.15	7.46	0.000	3.24	4.53	0.005
组合	29	49 921 045.16	1 673.22	0.000	15.71	21.95	0.000
被测系	9	12 930 212.84	433.39	0.000	14.03	19.61	0.000
测验种	2	537 477 442.06	18 014.81	0.000	137.76	192.47	0.000
被测系×测验种	18	14 243 528.34	477.41	0.000	2.99	4.18	0.000
组合×处理	58	82 373.10	2.76	0.000	0.69	0.96	0.557
被测系×处理	18	45 738.52	1.53	0.098	0.52	0.72	0.781
测验种×处理	4	314 739.59	10.55	0.000	0.72	1.01	0.407
处理×被测系×测验种	36	74 871.90	2.51	0.000	0.77	1.08	0.379
误差	87	29 835.30			0.72		

表4 不同处理条件下产量和灰斑病评分在重复间的相关性

Table 4 Correlation of yield and gray leaf spot scores between replications under different treatment conditions

性状 Trait	正常氮磷 Normal N and P	低磷 Low P	低氮 Low N
产量	0.993**	0.999**	0.999**
灰斑病评分	0.645**	0.812**	0.947**

表5 玉米自交系灰斑病评分和产量在不同氮磷条件下的GCA效应分析结果

Table 5 GCA effect for gray leaf spot scores and yield of maize inbred lines under different nitrogen and phosphorus treatments

编号 No.	自交系 Inbred line	正常氮磷 Normal N and P		低磷 Low P		低氮 Low N	
		产量 Yield	灰斑病评分 GLSS	产量 Yield	灰斑病评分 GLSS	产量 Yield	灰斑病评分 GLSS
T1	郑58	-3 428**	1.23**	-3 173**	0.87**	-3 192**	0.87**
T2	YML1218	742**	0.63	623**	0.87**	583**	0.77**
T3	D39	2 686**	-1.87**	2 550**	-1.73**	2 609**	-1.63**
L4	YML502	-253**	1.63**	-390**	1.97**	-122**	1.60**
L5	YML506	-381**	0.63	-322**	0.97**	-182**	0.60**
L6	YML519	937**	-0.03	780**	-0.70**	735**	-0.40**
L7	YML524	1 070**	-1.03*	1 038**	-1.03**	915**	-0.73**
L8	YML526	-1 036**	-0.37	-902**	0.30	-1 040**	0.60**
L9	YML528	-611**	0.63	-622**	0.30	-515**	0.60**
L10	YML545	1 497**	-0.70	1 440**	-0.37	1 398**	-0.73**
L11	YML575	-820**	0.63	-867**	0.30	-812**	0.60**
L12	YML579	289**	-0.70	408**	-1.03**	295**	-0.73**
L13	YML580	-693**	-0.70	-562**	-0.70**	-672**	-1.40**

注:“\*”和“\*\*”分别表示估计值在0.05和0.01水平上差异显著。下表同。

Note: \* and \*\* indicate the estimates being significantly different at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

系。在正常氮磷条件下,GCA为负效应的自交系有7个,其中被测系L7和测验系T3的灰斑病评分GCA效应值显著低于0;低磷和低氮条件下,测验种T3和被测系L6、L7、L12、L13表现出极显著的GCA负效应,说明在低磷和低氮条件下这些自交系对灰斑病均有较强抗性。这些在灰斑病抗性上表现为负GCA效应的株系有望成为玉米抗灰斑病基因的有效来源。

产量和抗病性是一直以来玉米杂交种选育最为关注的目标性状。从GCA分析结果来看,在不同氮磷处理水平下,自交系T3、L6、L7、L10和L12在产量和灰斑病抗性上均表现出较好的GCA。此外,自交系L13虽然在产量上GCA表现为负效应值,其灰斑

病评分GCA为负效应,尤其在低氮和低磷条件下显著低于0,可作为较好的抗病基因来源。

## 2.4 特殊配合力(SCA)效应分析

对30个杂交组合的产量和灰斑病评分进行特殊配合力效应分析可知,在不同氮磷水平下,同一自交系所配的杂交组合及同一杂交组合的不同性状间的特殊配合力效应都有较大差异,说明父本和母本基因共同控制玉米产量和灰斑病抗性,并且对两个性状的影响存在差异。由图2可知,杂交组合产量性状的SCA在不同氮磷处理之间差异不大,在不同处理之间T2×L4、T3×L11和T1×L13产量SCA均表现出极显著正效应,表明这3个杂交组合有较强的耐低氮和低磷能力,适宜种植在氮磷缺乏的地区。

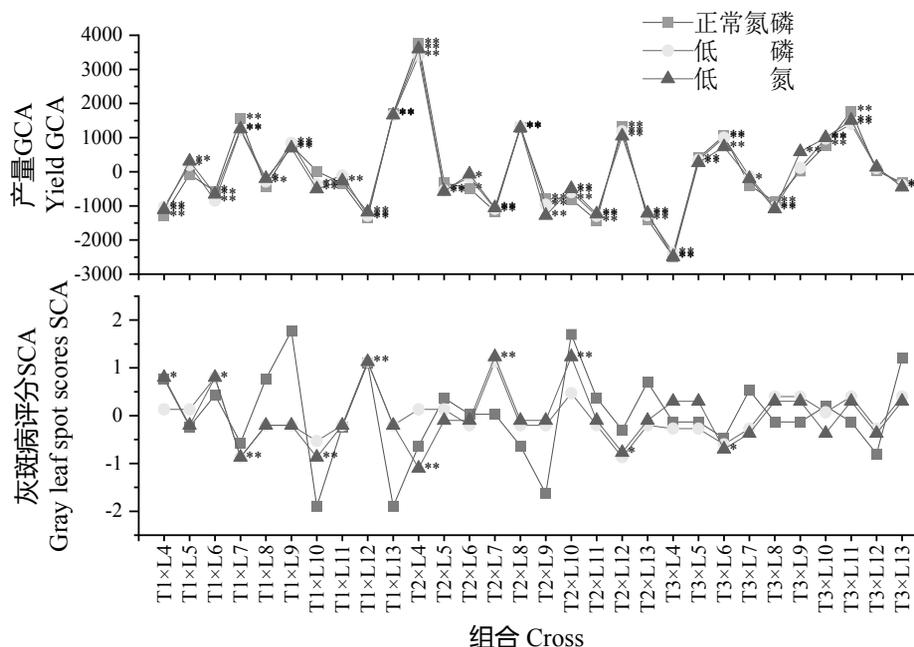


图2 30个玉米杂交组合灰斑病评分和产量在不同氮磷条件下的SCA效应值

Fig.2 SCA effect values of 30 maize hybrid crosses for gray leaf spot scores and yield traits under different nitrogen and phosphorus conditions

在正常氮磷条件下,杂交组合间灰斑病评分SCA效应差异较大(图2)。组合T1×L10、T1×L13和T2×L9的SCA表现出较大负效应值,但未达到统计上的显著水平。在低磷条件下,组合T1×L7、T1×L10、T2×L12和T3×L6的SCA表现出较大的负效应值,表明这3个组合在低磷条件下有较好的灰斑病抗性;在低氮条件下,组合T1×L7、T1×L10、T2×L4、T2×L12和T3×L6的SCA表现为显著或极显著负效应,表明这5个组合在低氮条件下表现出一定的灰斑病抗性。相较于T1、T2组配的杂交种,与T3测验种组配的杂交组合灰斑病评分SCA在不同处理条件下表现均较稳定。

## 2.5 性状配合力与F<sub>1</sub>表型值的相关分析

对30个杂交组合在不同处理条件下的产量和灰斑病评分配合力与F<sub>1</sub>表型值进行相关分析。结果表明(表6),产量SCA与F<sub>1</sub>表型值在正常氮磷( $R=0.42$ ,  $P<0.05$ )、低磷( $R=0.42$ ,  $P<0.05$ )和低氮( $R=0.43$ ,  $P<0.05$ )处理条件下呈显著正相关;灰斑病评分SCA与F<sub>1</sub>表型值在正常氮磷和低氮条件下呈显著相关性,说明性状的SCA能在一定程度上反映F<sub>1</sub>的表现。产量和灰斑病评分GCA<sub>s</sub>与F<sub>1</sub>表型值在3个处理条件下均达到极显著相关性。产量和灰斑病评分的SCA和GCA<sub>s</sub>之间在3个处理条件下均没有相关性。综合而言,在不同处理下产量和灰斑病的SCA

效应值与 $F_1$ 表型值存在相关性,GCA<sub>s</sub>与 $F_1$ 表型值之间的相关性更为显著。因此,杂交种的亲本一般配

合力之和(GCA<sub>s</sub>)更能准确预测产量和灰斑病评分的表型。

表6 灰斑病评分和产量性状的配合力与 $F_1$ 表型值的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between fitness and  $F_1$  phenotypic values for gray leaf spot scores and yield traits

相关性状 Correlated trait	产量 Yield			灰斑病评分 GLSS		
	正常氮磷	低磷	低氮	正常氮磷	低磷	低氮
	Normal N and P	Low P	Low N	Normal N and P	Low P	Low N
SCA- $F_1$	0.42*	0.42*	0.43*	0.49*	0.30	0.38*
SCA-TCA	0.42*	0.42*	0.43*	0.50**	0.30	0.38*
GCA <sub>s</sub> - $F_1$	0.91**	0.91**	0.91**	0.87**	0.95**	0.93**
SCA-GCA <sub>s</sub>	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.10

注:GCA<sub>s</sub>表示父母本GCA之和;TCA表示父母本GCA与杂交组合SCA之和; $F_1$ 表示杂交组合某性状的表型值。

Note: GCA<sub>s</sub> denote the sum of the two parental GCAs, TCA denotes the sum of the two parental GCAs and the hybrid combination SCA;

$F_1$  denotes the phenotypic value of a trait in the hybrid combination.

## 2.6 杂交组合遗传参数分析

对产量和灰斑病抗性在不同处理条件下的遗传参数进行分析。结果表明(表7),不同处理水平下,产量和灰斑病评分两个性状的加性方差大于显性方差,GCA方差贡献率均大于78%,说明这两个性状在不同处理条件下主要受基因的加性效应控制,因此,在育种时筛选亲本应注重这两个性状的GCA效应。低磷、低氮条件下环境方差显著低于正常氮磷条件,说明低磷、低氮条件下产量和灰斑病抗性受环境影响减小。在不同处理水平下,产量和灰斑病评

分的广义遗传力(>90%)和狭义遗传力(>60%)均较大,表明这两个性状的变异主要有遗传因素控制,在选育自交系时可在育种早期阶段进行。

## 3 结论与讨论

### 3.1 低氮低磷降低了玉米灰斑病的严重程度,从而弥补了低氮低磷对产量造成的损失

玉米灰斑病给我国玉米生产造成了严重经济损失,严重制约我国玉米生产的发展。前人研究发现,灰斑病的发生会造成玉米品种百粒重、行粒数和穗

表7 遗传参数分析结果

Table 7 Results of genetic parameter analysis

方差成分 Variance component		产量 Yield			灰斑病评分 GLSS		
		正常氮磷	低磷	低氮	正常氮磷	低磷	低氮
		Normal N and P	Low P	Low N	Normal N and P	Low P	Low N
基因型方差	$V_T$	9 494 980.00	8 255 815.00	8 434 887.00	2.57	2.21	1.94
	$V_L$	0.00	0.00	0.00	0.30	0.80	0.66
	$V_{LT}$	2 566 683.00	2 242 335.00	2 342 865.00	0.57	0.10	0.52
	$V_A$	15 994 667.00	13 978 920.00	14 072 500.00	5.06	5.60	4.83
	$V_D$	10 266 731.00	8 969 339.00	9 371 462.00	2.28	0.41	2.08
	$V_E$	36 517.00	4 308.00	3 928.00	0.72	0.28	0.07
方差贡献率(%)	GCA	79	79	78	83	97	83
	SCA	21	21	22	17	3	17
遗传力(%)	$H^2_B$	99	99	99	91	96	99
	$H^2_N$	61	61	60	63	89	69

注: $V_T$ 、 $V_L$ 、 $V_{LT}$ 分别表示测验种、被测系、测验种与被测系的互作方差, $V_A$ 、 $V_D$ 、 $V_E$ 分别表示加性、显性、环境方差。 $H^2_B$ 和 $H^2_N$ 分别表示广义遗传力和狭义遗传力。

Note:  $V_T$ ,  $V_L$ , and  $V_{LT}$  denote the variance of the test species, the tested line, and the interaction between the test species and the tested line, respectively, and  $V_A$ ,  $V_D$ , and  $V_E$  denote the additive, dominant, and environmental variance, respectively.  $H^2_B$  and  $H^2_N$  denote broad and narrow sense heritability, respectively.

长明显下降,最终导致产量降低。本研究发现,低磷和低氮条件与正常氮磷条件相比,产量均值没有显著性差异,灰斑病评分则显著降低( $P<0.05$ )。杂交组合的产量未显著降低主要归因于低磷和低氮条件下杂交组合灰斑病严重程度的降低从而弥补了低氮低磷对产量造成的损失

### 3.2 不同氮磷水平对玉米性状配合力的影响

在玉米育种实践中,对抗病配合力的了解对于提高产量的稳定性是必要的,也是衡量玉米自交系利用潜力的指标<sup>[29-30]</sup>。GCA是亲本基因型在几个杂交组合中的平均表现,与加性基因效应相关,是可以稳定遗传的<sup>[31]</sup>。陈阳等<sup>[32]</sup>以6个灰斑病抗性不同的玉米自交系为亲本,以Griffing II遗传交配设计对灰斑病进行配合力分析,结果表明,自交系间GCA差异较大。本研究表明,在不同处理条件下,自交系T3、L7、L10、L12和L13的灰斑病评分GCA表现为负效应值,同时T3、L6、L7、L10和L12产量的GCA为显著正效应值,综合这些材料的产量和灰斑病抗性来看,测验种T3和被测系L6、L7、L10和L12优于其他自交系,用这些自交系进行杂交种的组配不仅可以获得较高的产量组合,而且能在一定程度上提高玉米对灰斑病的抗性。SCA受非加性效应影响,无法稳定遗传给子代,可将其作为参考依据供杂交组合选配<sup>[33]</sup>。不同处理条件下,T2×L4、T3×L11和T1×L13产量SCA效应值表现较好,T1×L10、T1×L7、T2×L12和T3×L6灰斑病评分SCA均表现为较低负效应值。综合来看,正常氮磷、低磷和低氮条件下,产量和灰斑病评分SCA效应值均较优的组合分别为T1×L13、T1×L7和T2×L4,可作为优势组合有针对性地开展区域试验。

### 3.3 不同氮磷水平下产量和灰斑病抗性基因作用性质的估计

本研究相关性分析表明,不同处理条件下,相较于杂交组合的SCA,亲本的GCA<sub>s</sub>与F<sub>1</sub>表型值相关性达统计上的显著水平,表明亲本的GCA<sub>s</sub>对预测杂交组合的性状表现更有效。因此,在灰斑病抗性育种中,考虑双亲的GCA之和的同时综合考虑SCA效应才能较大概率选育出抗灰斑病的组合。

遗传力可用于判断某性状受环境影响的大小以及该性状的选择世代等<sup>[34-36]</sup>。前人研究表明,加性效应相对于非加性效应对玉米灰斑病的抗性更重要。本研究表明,在不同氮磷处理下,产量和灰斑病评分的GCA方差贡献率大于SCA方差贡献率,且加性方差大于显性方差,说明这两个性状主要受基因的加性效应影响。在不同处理条件下,产量和灰斑

病评分广义遗传力和狭义遗传力均较大,说明该性状主要受基因的遗传影响,在选育自交系时可在育种早期阶段进行选择,以减少育种所需时间。

本研究结合杂交组合的实际表现和配合力效应分析,表明在不同处理条件下,T3(D39)、L7(YML524)、L10(YML545)在灰斑病抗性和产量方面的GCA效应较好,可作为灰斑病遗传改良的亲本。在不同处理条件下,产量和灰斑病抗性的遗传主要受到加性效应的影响,且两个性状的广义遗传力和狭义遗传力均较大,因此,在育种的早期阶段就可以进行玉米灰斑病抗性自交系的选育。

#### 参考文献:

- [1] 郗小倩,李洪,王瑞军,等.基于主成分分析法的玉米品种的抗病性评价[J].湖北农业科学,2022,61(4):78-80,84.  
XI X Q, LI H, WANG R J, et al. Evaluation of disease resistance of maize varieties based on principal component analysis[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(4): 78-80, 84. (in Chinese)
- [2] DUAN C X, ZHAO L P, WANG J, et al. Dispersal routes of *Cercospora zeina* causing maize gray leaf spot in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(10): 2943-2956.
- [3] LÜ X, SONG M, CHENG Z, et al. qGLS1.02, a novel major locus for resistance to gray leaf spot in maize[J]. Molecular Breeding, 2020, 40(6): 59.
- [4] 谭静,罗吉,王文瑞,等.玉米尾孢菌灰斑病抗性种质鉴定及其抗性基因分析[J].江苏农业学报,2020,36(6):1373-1381.  
TAN J, LUO J, WANG W R, et al. Identification of resistant germplasm and analysis of resistance genes to *Cercospora zeae-maydis* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 36(6): 1373-1381. (in Chinese)
- [5] 卢宗志,李艳君,李海春,等.玉米灰斑病对玉米产量及产量特性的影响研究[J].玉米科学,2008,16(6):126-129.  
LU Z Z, LI Y J, LI H C, et al. Effects of maize gray leaf spot on maize yield and yield characteristics[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(6): 126-129. (in Chinese)
- [6] 谭静,罗吉,孙彩梅,等.玉米灰斑病抗性种质与基因位点的研究进展[J].种子,2019,38(8):57-60,64.  
TAN J, LUO J, SUN C M, et al. Research progress on resistant germplasm and gene loci of maize gray leaf spot[J]. Seeds, 38(8): 57-60, 64. (in Chinese)
- [7] 吕国忠,张益先,梁景颐,等.玉米灰斑病发生流行规律及品种抗病性[J].植物病理学报,2003(5):462-467.  
LÜ G Z, ZHANG Y X, LIANG J Y, et al. Occurrence regularity and variety resistance of maize gray leaf spot[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2003(5): 462-467. (in Chinese)
- [8] 孙成韬,张丽颖,王金君,等.玉米灰斑病的研究进展[J].玉米科学,2007(2):133-136.  
SUN C T, ZHANG L Y, WANG J J, et al. Research progress on maize gray leaf spot[J]. Journal of Maize Science, 2007(2): 133-136. (in Chinese)
- [9] 穆心愿,齐建双,丁勇,等.黄淮海南部夏玉米对氮、磷、钾亏缺的响应及基因型差异[J].玉米科学,2023,31(3):128-136.

- MU X Y, QI J S, DING Y, et al. Response of summer maize to nitrogen, phosphorus and potassium deficiency and genotypic differences in southern Huang-Huai-Hai region[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(3): 128-136. (in Chinese)
- [10] 李如海,潘义东,张丽颖,等.低氮环境下北方杂交粳稻亲本配合力分析[J].*辽宁农业科学*,2020(1):14-18.  
LI R H, PAN Y D, ZHANG L Y, et al. Analysis of combining ability of parents of northern hybrid japonica rice under low nitrogen environment[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2020(1): 14-18. (in Chinese)
- [11] 陈范骏,米国华,张福锁.低磷胁迫下玉米自交系配合力分析[J].*玉米科学*,2006(3):74-77.  
CHEN F J, MI G H, ZHANG F S. Analysis of combining ability of maize inbred lines under low phosphorus stress[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2006(3): 74-77. (in Chinese)
- [12] 艾薇,赵家升.不同水平的肥料对玉米灰斑病的影响[J].*保山师专学报*,2009,28(5):45-47.  
AI W, ZHAO J S. Effects of different levels of fertilizer on maize gray leaf spot[J]. *Journal of Baoshan Teachers College*, 2009, 28(5): 45-47. (in Chinese)
- [13] CALDWELL P M, WARD J M J, MALES N, et al. Assessment of the effects of fertilizer applications on gray leaf spot and yield in maize[J]. *Plant Disease*, 2002, 86(8): 859-866.
- [14] OKORI P, FAHLESON J, RUBAIHAYO P R, et al. Assessment of genetic variation among East African *Cercospora zeae-maydis* populations[J]. *African Crop Science Journal*, 2003, 11(2): 91-99.
- [15] SIBIYA J, TONGOONA P, DERERA J, et al. Genetic analysis and genotype×environment(G×E) for grey leaf spot disease resistance in elite African maize(*Zea mays* L.) germplasm[J]. *Euphytica*, 2012, 185(3): 349-362.
- [16] BEKEKO Z, FININSA C, WEGARY D, et al. Combining ability and nature of gene action in maize(*Zea mays* L.) inbred lines for resistance to gray leaf spot disease(*Cercospora zeae maydis*) in Ethiopia[J]. *Crop Protection*, 2018, 112: 39-48.
- [17] 张志方,张素娟,张守林,等.玉米自交系小斑病抗性鉴定及遗传参数分析[J].*河南农业科学*,2022,51(10):36-43.  
ZHANG Z F, ZHANG S J, ZHANG S L, et al. Resistance identification and genetic parameter analysis of maize inbred lines to southern leaf blight[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(10): 36-43. (in Chinese)
- [18] 刘鹏飞,蒲浩杰,刘君,等.甜玉米南方锈病抗性配合力及遗传特性分析[J].*热带作物学报*,2021,42(3):707-712.  
LIU P F, PU H J, LIU J, et al. Analysis of combining ability and genetic characteristics of southern rust resistance in sweet corn[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(3): 707-712. (in Chinese)
- [19] 吴雯雯,欧杨虹,张振良,等.玉米自交系灰斑病抗性配合力及遗传分析[J].*南方农业学报*,2016,47(8):1313-1317.  
WU W W, OU Y H, ZHANG Z L, et al. Combining ability and genetic analysis of resistance to gray leaf spot in maize inbred lines [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(8): 1313-1317. (in Chinese)
- [20] LI Z W, LIU L, ZHANG Y D, et al. Combining ability analysis of RILs developed from a YML32 × Q11 cross for grain yield and resistance to gray leaf spot[J]. *Crop Science*, 2018, 58(3): 1070-1081.
- [21] 周雪琴,袁艳丽,任洪,等.26份玉米材料灰斑病抗性鉴定及分子标记检测[J].*种子*,2022,41(3):12-17.  
ZHOU X Q, YUAN Y L, REN H, et al. Resistance identification and molecular marker detection of 26 maize materials to gray spot disease[J]. *Seeds*, 2022, 41(3): 12-17. (in Chinese)
- [22] CHEN L, LIU L, LI Z, et al. High-density mapping for gray leaf spot resistance using two related tropical maize recombinant inbred line populations[J]. *Molecular Biology Reports*, 2021, 48(4): 3379-3392.
- [23] JIANG F, LI Z W, YIN X, et al. Impact of donor QTL on grain yield and gray leaf spot of four recombinant inbred lines of maize[J]. *Crop Science*, 2020, 60(2): 841-851.
- [24] ELMYHUN M, LIYEW C, SHITA A, et al. Combining ability performance and heterotic grouping of maize(*Zea mays*) inbred lines in test cross formation in Western Amhara, North West Ethiopia[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2020, 6(1): 1727625.
- [25] 周天富,李应寰,范俊珺,等.文山州玉米灰斑病的发生与防治试验[J].*云南农业科技*,2012(1):51-53.  
ZHOU T F, LI Y H, FAN J J, et al. Occurrence and control of maize gray leaf spot in Wenshan[J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2012(1): 51-53. (in Chinese)
- [26] 杞国信,苏锦尧,李树穆,等.砚山县玉米灰斑病发生规律研究[J].*云南农业科技*,2020(4):25-27.  
QI G X, SU J Y, LI S S, et al. Study on the occurrence regularity of maize gray leaf spot in Yanshan County[J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2020(4): 25-27. (in Chinese)
- [27] LIU L, ZHANG Y D, LI H Y, et al. QTL Mapping for gray leaf spot resistance in a tropical maize population[J]. *Plant Disease*, 2016, 100(2): 304-312.
- [28] RODRÍGUEZ F, ALVARADO G, PACHECO A, et al. AGD-R (Analysis of Genetic Designs with R for Windows) Version 5.0. International maize and wheat improvement center(CIMMYT) [CP]. México, 2015. Available online: <https://data.cimmyt.org/dataset.xhtml?persistentId=hdl:11529/10202>.
- [29] 熊婷,周捷成,麦嘉琦,等.11份糯玉米自交系穗位高配合力及遗传参数分析[J].*中国种业*,2022(12):89-91.  
XIONG T, ZHOU J C, MAI J Q, et al. Analysis of ear height combining ability and genetic parameters of 11 waxy maize inbred lines [J]. *China Seed Industry*, 2022(12): 89-91. (in Chinese)
- [30] 邹成林,谭华,黄开健,等.24份热带玉米自交系主要农艺性状的遗传效应分析[J].*西南农业学报*,2022,35(7):1500-1508.  
ZOU C L, TAN H, HUANG K J, et al. Genetic effect analysis of main agronomic traits of 24 tropical maize inbred lines[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(7): 1500-1508. (in Chinese)
- [31] FAN X M, YIN X F, ZHANG Y D, et al. Combining ability estimation for grain yield of maize exotic germplasm using testers from three heterotic groups[J]. *Crop Science*, 2016, 56(5): 2527-2535.
- [32] 陈阳,吕香玲,李凤海,等.玉米自交系对灰斑病抗性配合力及遗传参数分析[J].*玉米科学*,2012,20(4):135-138.  
CHEN Y, LÜ X L, LI F H, et al. Analysis of combining ability and

- genetic parameters of resistance to gray leaf spot in maize inbred lines[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(4): 135-138. (in Chinese)
- [33] 宋旭东, 黄小兰, 张振良, 等. 10个糯玉米自交系穗部性状配合力及其遗传特性分析[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(10): 2447-2453.
- SONG X D, HUANG X L, ZHANG Z L, et al. Analysis of combining ability and genetic characteristics of ear traits of 10 waxy maize inbred lines[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(10): 2447-2453. (in Chinese)
- [34] 刘励蔚, 冯咏琪, 朴莲玉, 等. 10份甜糯双隐性玉米自交系的农艺及品质性状配合力分析[J]. *天津农业科学*, 2023, 29(5): 25-29.
- LIU L W, FENG Y Q, PIAO L Y, et al. Analysis of combining ability of agronomic and quality traits of 10 sweet-waxy double recessive maize inbred lines[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2023, 29(5): 25-29. (in Chinese)
- [35] 李 柏, 陈种凯, 宋丽艳, 等. 聚合螟虫和稻瘟病抗性基因杂交水稻亲本的9个农艺性状配合力分析[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(4): 1255-1264.
- LI B, CHEN Z K, SONG L Y, et al. Combining ability analysis of 9 agronomic traits of hybrid rice parents with resistance genes to rice borer and rice blast[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(4): 1255-1264. (in Chinese)
- [36] 胡 军, 魏开锋, 刘 万, 等. 玉米果穗相关性状的配合力及其遗传效应分析[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(33): 18.
- HU J, WEI K F, LIU W, et al. Analysis of combining ability and genetic effect of ear-related traits in maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(33): 18. (in Chinese)

(责任编辑: 栾天宇)