阴湿环境对玉米杂交种生长发育特性的影响*

晏庆九 霍仕平** 张芳魁 张兴端 张 健 向振凡 余志江 冯云超
(重庆三峡农业科学院, 重庆 404155)

摘 要 比较了在人工遮光增湿环境和自然环境下18个玉米杂交种生长发育特性的差异,研究了阴湿环境对玉米杂交种生长发育特性的影响.结果表明:遮光增湿环境使空气湿度比自然环境增加15.0% ~16.4%,土壤湿度增加27.0% ~78.4%,光照强度降低72.9% ~77.9%,光量子减少72.8% ~79.6%,差异均达显著或极显著水平,但不影响环境温度.阴湿环境导致玉米植株第7叶宽、有效功能叶数、成株叶片数、雄穗分枝数、茎粗、株高、穗位高、穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重和单株粒重13个性状表现为负向变异(表型值变小),其中单株粒重降幅达72.3%,株高降幅7.1%,其余性状降幅介于14.8% ~53.8%之间;第7叶长、第7叶长宽比、散粉至抽丝间隔天数(ASI)、小斑病指数和纹枯病指数等5个性状表现为正向变异(表型值增大),分别增大39.8%、80.5%、114.3%、73.0%和54.8%.用ASI、雄穗分枝数、成株叶片数、株高、单株粒重、小斑病指数和纹枯病指数7个性状计算出的综合耐阴湿系数作为玉米杂交种耐阴湿鉴定的指标,具有一定的可靠性,且简便易行.运用该指标可将18个杂交种划分为耐阴湿性强、耐阴湿性中等和耐阴湿性弱3类.

关键词 玉米 杂交种 阴湿 指标

文章编号 1001-9332(2013)12-3479-08 **中图分类号** S513 **文献标识码** A

Effects of shade-humid environment on the growth characteristics of different maize (*Zea mays*) hybrids. YAN Qing-jiu, HUO Shi-ping, ZHANG Fang-kui, ZHANG Xing-duan, ZHANG Jian, XIANG Zhen-fan, YU Zhi-jiang, FENG Yun-chao (*Chongqing Three Gorges Academy of Agricultural Science*, *Chongqing* 404155, *China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, **24**(12): 3479-3486.

Abstract: The growth traits of 18 maize hybrids were studied in natural and artificial simulation shade-humid environments. Significant differences were observed between the natural and shade-humid environments, and the air relative humidity in the shade-humid environment increased 15.0%-16.4%, the soil moisture increased 27.0%-78.4%, the illumination intensity decreased 72.9%-77.9%, and the quantum decreased 72.8%-79.6%. Shade did not affect the ambient temperature. The 7th leaf width, effective functional leaves, plant total leaves, tassel branch number, stem diameter, plant height, ear height, ear length, ear diameter, rows per ear, kernels per row, 100-grain mass and grain yield per plant under the shade-humid environment showed negative variations (reduction in phenotypic values), with the grain yield per plant and plant height being reduced by 72.3% and 7.1% respectively, and the declining changes of the remaining traits ranging from 14.8%-53.8%. However, the 7th leaf length, 7th leaf length-width ratio, anthesis to silking (ASI) duration, southern leaf blight (SLB) index and sheath blight index showed positive variations (increase in phenotypic values), with increases by 39.8%, 80.5%, 114.3%, 73.0% and 54.8%, respectively. The comprehensive shade-humid-tolerant coefficient calculated from the seven traits of ASI, tassel branches, plant total leaves, plant height, individual grain yield, southern leaf blight and sheath blight index could be easily and reliably used to evaluate the shade-humid-tolerant ability of the maize hybrids. According to this coefficient, the 18 hybrids could be classified into three categories, strongly-resistant, moderately-resistant and weakly-resistant to the shade-humid environment.

Key words: maize, hybrid, shade-humid environment, index.

* 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC,2011BA1029)、重庆市科技攻关项目(CSTC,2011AC1138)和重庆市农作物良种创新工程项目(CSTC,2012ggC80004,2012ggC80006,2012ggC80003)资助.
** 通讯作者. E-mail: huosp4936@sina.com
2013-03-15 收稿,2013-09-29 接受.

我国西南地区日照少、湿度大的气候特点是该区玉米生产的重要限制因素[1]，是影响玉米生长发育，导致玉米产量低、品质和商品性差的主要原因[1-2]. 玉米育种和生产实践表明，在商品生产条件下，培育和种植中矮秆紧凑密植型品种是进一步提高玉米产量的发展方向，也是增产玉米的最佳技术路线[3-5]. 然而，提高玉米种植密度带来的负面效应是田间阴蔽严重、光照不足、田间湿度增大、病虫害加重，从而影响玉米生长发育，降低产量和品质. 因此，开展玉米耐阴湿性研究，筛选耐阴湿玉米杂交品种，是缓解此类灾害气候损失的有效途径. 目前，关于玉米对弱光照胁迫响应的研究已有一些报道，研究结果表明，弱光胁迫导致玉米叶片生长受抑制[6-8]，叶绿素含量下降[2,9-10]，茎粗变细、株高降低[2,7,11]，雌雄间隔期延长[6,12]，干物质积累下降[2,13-14]，果穗缩短变细[7,11]，籽粒产量降低[2,10-11,15-16]；且不同基因型玉米对遮阴的反应有较大差异[2,6]. 这些研究主要以单独对玉米进行弱光照处理为主，而弱光照处理的同时再增加环境湿度处理的研究鲜有报道. 但影响西南地区玉米生长发育的环境因素不仅是寡日照问题，往往是寡日照和田间高湿环境相伴发生，二者难以截然分开，因此玉米生长发育既受日照不足的限制，也有空气和土壤湿害的影响. 本研究通过人工模拟遮光增湿环境，以自然环境条件为对照，比较了在阴湿环境与自然环境条件下玉米杂交种生长发育特性的差异，对杂交种进行了耐阴湿性评价，以期为耐阴湿玉米新品种的鉴定提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用渝单8号、三峡玉1号、先玉508、东单80、长单46、三峡玉3号、三峡玉5号、三峡玉9号、三峡玉1388、科恩8号、露新23、渝开3号、川单828、帮豪58、金123、高瑞171、源育16和绿原9号共18个已通过国家(西南区)或重庆市品种审定的玉米杂交种为试验材料. 这些玉米品种参加过西南地区或重庆市两年多个生态区的区域试验和一年多点生产试验，相对于其他没能通过区域试验、生产试验和审定的品种，对该区域温湿度和光照具有更好的生态适应性.

1.2 试验设计

试验于2011和2012年在重庆三峡农业科学院梁平试验基地的自然环境和阴湿环境下进行，两种环境的地块相距50 m左右. 在自然环境的地块，温度、光照、降雨、通风等完全处于自然状态，且四周50 m以内无任何遮挡. 阴湿环境的同一地块上树立长方形钢架塑料大棚，大棚顶部和侧面塑料外用电动黑色遮阳网控制透光率. 阴天或雨天打开遮阳网增加透光率，晴天关闭遮阳网遮光和降温，大棚两端距离地面50 cm处向上设置纱网，高度2 m，并安装电动排风扇，根据需要进行通风换气. 在大棚内设置增压旋转式喷淋系统，根据需要均匀喷洒水分，以增加土壤和空气湿度. 通过这些装置，使阴湿环境和自然环境始终保持较大的光照和湿度差，并尽可能保证两种环境的温度不出现较大差异.

分别在自然环境和阴湿环境各放置3排盆钵(与长度方向垂直)作为3次重复，重复间钵间距1 m，重复内钵间距0.8 m. 将盆钵平行放于平整好的试验地土表，钵长2 m、宽0.4 m、高0.4 m. 每钵(即1个小区)种植玉米杂交种12株，株距16 cm，折算密度为60000株·hm^{-2}，重复内杂交种随机排列. 在当地最适播种期播种，以大田施肥量为标准折算成每钵施肥量，按苗肥20%、拔节肥30%、穗肥50%的比例施肥，分别于5叶、10叶和15叶期均匀穴施于钵内每株旁表土下10 cm处，只除草不进行病虫害防治. 由于重复间间距大于小区间间距，为消除边际效应的影响，性状调查时去掉小区边上的2株后，向内顺序取6株.

两种环境中，各安装一套THY-7型农业环境监测仪(浙江托普仪器有限公司)，分别记录各自的空气温度、空气湿度、土壤温度、土壤湿度、光量子和光照强度等环境要素.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 环境要素 用农业环境监测仪自动记录自然环境和阴湿环境的空气温度(℃)、空气湿度(RH,%)、土壤温度(℃)、土壤湿度(含水量,%)、光量子(μmol·m^{-2}·s^{-1})和光照强度(μmol·m^{-2}·s^{-1}). 其中测定光照强度和光量子的传感器放置位置略高于玉米雄穗顶部，四周无遮挡；将土壤温度传感器插入盆钵表土下约15 cm，土壤湿度传感器插入盆钵表土下约30 cm；空气温度和空气湿度传感器置于百叶箱内. 传感器记录数据的时间间隔为1 h，通过多通道集线器接入监测仪主机. 环境要素数据的采集从玉米杂交种出苗开始至成熟收获时结束.

1.3.2 性状记载 为消除小区内或小区间随植株个体增大所造成的株间叶片相互隐蔽对试验测定结果

造成的影响，选择在第 7 叶全展时（可见叶 12 片，正处于拔节期）分别测量两种环境下各杂交种第 7 全展叶的叶长（叶环至叶尖的长度，cm）和叶宽（叶片中部最大宽度，cm），计算长宽比（叶长/叶宽），用 spad-502 型叶绿素仪（柯尼卡美能达公司）测定叶片中部位置叶绿素含量（SPAD 值）；从第 5 叶开始每 5 片叶标记一次叶龄，至抽雄结束后计数全株总叶片数；开花期记录参试杂交种的抽雄期（60% 以上植株雄穗露出顶叶 5 cm 的日期）、散粉期（60% 以上植株雄穗主轴中部开始散粉的日期）和抽丝期（60% 以上植株花丝露出苞叶 3 cm 的日期），并计算 ASI 值（散粉至抽丝间隔天数）. 抽丝期测量株高（植株基部至雄穗顶端的高度，cm）、穗位高（植株基部至雌穗节的高度，cm）、茎粗（用游标卡尺测量地上部第三节节间中部粗度，cm）. 散粉 15 d 后（乳熟期）调查有效功能叶数（绿色面积不少于全片叶面积的 60%）；散粉结束后计数雄穗分枝数.

成熟后及时收获，测量穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重和单株粒重. 在乳熟末期，参照相关标准[17] 调查各杂交种的大斑病、小斑病和纹枯病的发病级数及感病株数，计算病情指数：病情指数 = 100×［∑（发病级数×同级发病株数）/（调查总株数×发病最高级数）］.

1.4　数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件处理试验数据. 用 Excel 2003 计算不同环境的气象要素平均值和不同环境各杂交种的性状均值、标准差和变异系数，方差分析所用各杂交种的性状数据为小区平均值. 用 SPSS 18.0 的成对均值比较组件进行不同环境间环境要素和杂交种性状差异显著性比较；用其一般线性模型多变量分析组件进行两个年度两种环境的联合方差分析；用其相关分析组件计算品种产量性状与环境要素间的相关系数. 参照袁刘正等[2] 的方法，用 Excel 2003 计算各杂交种的综合耐阴湿系数（D）：

$$D=\sum_{i=1}^{n}\left[1-(|\text{阴湿环境}-\text{自然环境}|)/\text{自然环境}\right]$$

式中：n 为调查的性状数. 根据 D 值大小对各参试品种的耐阴湿性进行比较和评价.

2　结果与分析

2.1　环境要素比较

将环境监测仪采集的各环境要素基础数据定期导出，分别计算每天空气温度、空气湿度、土壤温度和土壤湿度的平均值，光照强度和光量子两要素计算每天有光照记录时段的平均值，得到两种环境下的空气温度、空气湿度、土壤温度、土壤湿度、光照强度和光量子平均值（2011 年各 115 对，2012 年各 118 对）. 分年度进行成对比较结果（表 1）表明，与自然环境相比，阴湿环境的空气温度和土壤温度略有升高，但差异不显著；空气湿度 2011 年平均为 79.9%，比自然环境增加 15.0%，差异达显著水平，2012 年平均为 86.8%，比自然环境增加 16.4%，差异达极显著水平；土壤湿度 2011 年平均为 35.8%，比自然环境增加 27.0%，差异达显著水平，2012 年平均为 68.7%，比自然环境增加 78.4%，差异达极显著水平；光照强度 2011 年比自然环境平均降低 72.9%，2012 年平均降低 77.9%，差异均达极显著水平；光量子 2011 年平均减少 72.8%，2012 年平均

表 1　两种环境间环境要素的比较

Table 1　Comparison of environmental factors between two environments

环境要素 Environmental factor	年度 Year	数据对 Number of paired factor	阴湿环境 Shade-humid environment	自然环境 Natural environment	t 值 t value
空气温度	2011	115	25.5	24.3	0.6
Air temperature (℃)	2012	118	24.7	23.5	0.5
空气湿度	2011	115	79.9	69.5	2.3*
Air relative humidity (%)	2012	118	86.8	74.6	3.0**
土壤温度	2011	115	23.7	22.1	0.9
Soil temperature (℃)	2012	118	23.0	22.6	0.2
土壤湿度	2011	115	35.8	28.2	2.4*
Soil moisture (%)	2012	118	68.7	38.5	6.0**
光照强度	2011	115	100.8	371.5	-9.5**
Illumination intensity (μmol·m^{-2}·s^{-1})	2012	118	79.6	360.4	-20.4**
光量子	2011	115	66.1	242.7	-10.8**
Photon (μmol·m^{-2}·s^{-1})	2012	118	42.3	207.5	-25.0**

* $P<0.05$；** $P<0.01$. 下同 The same below.

减少 79.6%,差异均达极显著水平.说明本试验设置的阴湿环境显著或极显著增加了空气湿度和土壤湿度,极显著降低了光照强度和光量子,但对空气温度和土壤温度没有产生明显影响,年度间变化趋势完全一致.由此可以认为,本试验设计各环境要素是有效的.

2.2 年度、环境及品种间方差分析

联合方差分析结果(表 2)表明,所有性状的年度间方差均不显著,区组间除第 7 叶长外,其余性状方差均不显著,说明本试验因环境控制不严或人为因素对试验结果的影响较小.20 个性状中除第 7 叶叶绿素含量外,其余 19 个性状环境间方差均达极显著水平,说明本试验模拟的阴湿环境对杂交种这些性状已产生明显影响;这 19 个性状基因型间方差亦达极显著水平,表明在本试验条件下品种间这些性状的表现存在极显著差异.第 7 叶叶绿素含量品种间和环境间方差均不显著,说明本研究模拟的阴湿环境对该性状无影响.因此,在以后的分析中将此性状予以剔除.

对联合方差分析中环境间方差显著的 19 个性状,按自然环境和阴湿环境分别进行方差分析,结果(表 3)表明,除大斑病指数外,其余 18 个性状无论在自然环境还是在阴湿环境下,品种间差异均达显著或极显著水平,说明本试验所用的 18 个品种这些性状的表现存在真实遗传差异,且这种差异在自然环境和阴湿环境下都能充分表现出来.在阴湿环境下,大斑病发病较轻,在 18 个品种间的表现无差异,说明利用此性状在阴湿环境下无法有效区分品种间大斑病的抗性强弱,在后面的分析中将该性状予以剔除.

2.3 不同环境间各性状的变异趋势比较

对表 3 中两种环境下品种间方差均达显著或极显著的 18 个性状,分环境、品种将两个年度各 3 次重复的数据分别进行合并,计算出两种环境下各品种 18 个性状的平均值、标准差和变异系数(CV,%).结果(表 4)表明,在阴湿环境下,第 7 叶宽、有效功能叶数、成株叶片数、雄穗分枝数、茎粗、株高、穗位高、穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重和单株粒重等 13 个性状表现为负向变异(表型值变小),其中单株粒重降幅达 72.3%,株高降幅 7.1%,其余性状降幅介于 14.8% ~53.8% 之间;第 7 叶长、第 7 叶长宽比、ASI、小斑病指数和纹枯病指数等 5 个性状表现为正向变异(表型值增大),分别增大 39.8%、80.5%、114.3%、73.0%和54.8%.除第7

表 2 20 个性状的联合方差分析
Table 2 United variance analysis of twenty traits

性状 Trait	区组 Block	年度 Year	环境 Environment	品种 Variety	误差 Error
第 7 叶长 7th leaf length	65.18*	0.15	29140.02**	319.80**	15.80
第 7 叶宽 7th leaf width	0.19	0.02	100.25**	1.88**	1.44
第 7 叶长宽比 7th length to width ratio	0.62	0.15	3183.69**	20.812**	1.05
第 7 叶叶绿素 7th leaf chlorophyll	710.50	256.77	751.79	715.45	689.24
ASI	2.39	3.64	490.66**	43.37**	1.61
成株叶片数 Plant total leaves	0.14	0.87	424.63**	8.29**	0.35
有效功能叶数 Effective functional leaves	0.04	1.03	169.48**	5.65**	0.55
雄穗分枝数 Tassel branches	12.09	1.26	1037.97**	78.55**	8.62
茎粗 Stem-diameter	0.02	0.03	23.05**	0.10**	0.02
株高 Plant height	442.82	76.15	17968.04**	2058.62**	333.31
穗位高 Ear height	0.09	282.30	13299.99**	1523.01**	125.86
穗长 Ear length	1.82	0.17	4589.16**	21.18**	1.90
穗粗 Ear diameter	0.09	0.04	54.85**	0.62**	0.05
穗行数 Rows per ear	8.07	10.14	1218.38**	14.97**	2.96
行粒数 Kernels per row	19.63	2.39	20079.74**	55.41**	13.38
百粒重 100-grain mass	17.36	24.00	1661.67**	73.22**	8.24
单株粒重 Grain mass per plant	241.58	0.29	1101158.03**	1605.19**	218.02
大斑病指数 NCLB index	15.15	3.69	605.68**	30.60**	9.47
小斑病指数 SLB index	198.53	0.06	8143.37**	718.12**	82.85
纹枯病指数 Sheath blight index	263.73	353.98	3418.30**	299.09**	108.13
自由度 df	2	1	1	17	194

ASI:散粉至抽丝间隔天数 Interval days from anthesis to silking; SLB:小斑病 Southern leaf blight; NCLB:大斑病 Northern corn leaf blight. 下同 The same below.

表 3　不同环境下 19 个性状的品种间方差分析

Table 3　Genotype variance analysis of nineteen traits under different environments

性状 Trait	自然环境 Natural environment		阴湿环境 Shade-humid environment	
	品种 Variety	误差 Error	品种 Variety	误差 Error
第 7 叶长 7th leaf length	169.06**	10.9	197.81**	15.72
第 7 叶宽 7th leaf width	1.36**	0.13	1.14**	0.07
第 7 叶长宽比 7th length to width ratio	4.97**	0.15	20.10**	1.32
ASI	14.85**	1.03	35.43**	1.24
成株叶片数 Plant total leaves	5.16**	0.23	4.69**	0.24
有效功能叶数 Effective functional leaves	4.09**	0.41	3.54**	0.41
雄穗分枝数 Tassel branches	87.77**	5.21	37.37**	4.84
茎粗 Stem-diameter	0.111**	0.023	0.033*	0.016
株高 Plant height	1640.07**	108.69	1606.16**	416.14
穗位高 Ear height	630.11**	92.23	1056.88**	151.22
穗长 Ear length	18.80**	0.47	8.75**	2.58
穗粗 Ear diameter	0.40**	0.03	0.32**	0.07
穗行数 Rows per ear	12.71**	0.84	10.24**	4.31
行粒数 Kernels per row	35.69**	9.48	48.94**	14.32
百粒重 100-grain mass	42.29**	4.54	66.02**	7.25
单株粒重 Grain mass per plant	2178.25**	115.78	615.85**	146.07
大斑病指数 NCLB index	61.21**	15.01	0	0
小斑病指数 SLB index	114.25**	23.78	1130.80**	59.69
纹枯病指数 Sheath blight index	121.89**	50.62	263.97**	80.17
自由度 *df*	17	90	17	90

表 4　两种环境下各性状均值、标准差和变异系数

Table 4　Means, standard difference and variance coefficient of different traits under two environments

性状 Trait	阴湿环境 Shade-humid environment			自然环境 Natural environment			*t* 检验 *t* test	
	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 *CV* (%)	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 *CV* (%)	*D* 值 *D* value	*t* 值 *t* value
第 7 叶长 7th leaf length	81.64	6.68	8.2	58.41	6.00	10.3	23.23	24.88**
第 7 叶宽 7th leaf width	4.78	0.49	10.2	6.15	0.57	9.3	-1.36	-12.84**
第 7 叶长宽比 7th length to width ratio	17.22	2.08	12.1	9.54	0.96	10.0	7.68	27.35**
ASI	5.65	2.58	45.7	2.64	1.80	68.1	3.01	8.42**
有效功能叶数 Effective functional leaves	8.89	3.16	35.6	13.28	4.28	32.2	-4.38	-4.72**
成株叶片数 Plant total leaves	10.21	0.95	9.3	11.98	1.00	8.3	-1.77	-9.24**
雄穗分枝数 Tassel branches	16.19	0.97	6.0	19.00	1.01	5.3	-2.80	-16.48**
茎粗 Stem diameter	1.32	0.14	10.6	1.97	0.19	9.8	-0.65	-22.18**
株高 Plant height	238.34	24.60	10.3	256.58	18.76	7.3	-18.24	-3.89**
穗位高 Ear height	86.18	17.18	19.9	101.87	13.33	13.1	-15.69	-9.01**
穗长 Ear length	13.21	1.89	14.3	22.43	1.84	8.2	-9.22	-26.85**
穗粗 Ear diameter	4.43	0.34	7.6	5.44	0.30	5.6	-1.01	-23.29**
穗行数 Rows per ear	12.06	2.29	19.0	16.81	1.65	9.8	-4.75	-12.36**
行粒数 Kernels per row	16.56	4.45	26.9	35.84	3.69	10.3	-19.28	-26.22**
百粒重 100-grain mass	28.61	4.07	14.2	34.16	3.25	9.5	-5.55	-6.88**
单株粒重 Grain mass per plant	54.71	14.86	27.2	197.51	21.06	10.7	-142.80	-30.43**
小斑病指数 SLB index	29.11	15.16	52.1	16.83	6.18	36.7	12.28	3.93**
纹枯病指数 Sheath blight index	22.48	10.46	46.5	14.52	7.87	54.2	7.96	6.28**

叶长、ASI 和纹枯病指数外，其余 15 个性状的变异系数为阴湿环境大于自然环境，说明玉米杂交种多数性状对阴湿环境反应敏感.

两种环境下 18 个性状均值成对数据差异显著性比较结果表明，在阴湿环境下，无论性状表现为负向变异还是正向变异，与自然环境相比，其差异均达极显著水平. 说明本研究设置的阴湿环境导致杂交种这些性状发生了显著改变.

2.4 环境要素与玉米杂交种产量性状的相关性

为了探寻不同环境要素变化与玉米品种产量性状变化之间的关联性,将两个年度每年两种环境(自然环境和阴湿环境)视为引起玉米品种产量性状变化的 4 种环境,分析了穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重和单株粒重等产量性状与空气湿度、土壤湿度、光照强度和光量子 4 个环境要素(因不同环境间的温度差异不显著,故不考虑温度要素)间的相关性,计算了品种性状与其生育季节内各环境要素平均值间的单相关系数,并进行双侧显著性检验.结果(表 5)表明,玉米杂交种的穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重和单株粒重等性状与空气湿度和土壤湿度均呈负相关,与光量子和光照强度均呈正相关.尽管只有穗行数与空气湿度、光量子和光照强度的相关系数达显著水平,但其余性状与各环境因子之间的相关系数绝对值也较大,未达显著水平可能与自由度偏小有关,进一步说明了环境湿度增大、光照强度减弱、光量子减少是引起玉米产量构成性状发育不良,最终导致产量降低的重要原因.

2.5 玉米杂交种耐阴湿性评价

采用 3 种计算综合耐阴湿系数的方式对 18 个参试品种的耐阴湿性进行评价.首先,以表 4 所列 18 个性状在两种环境下的均值为依据,参照袁刘正等[2]的方法,计算各品种的综合耐阴湿系数(D_{I}),18 个品种 D_{I} 的平均值、标准差及变异系数分别为 0.527、0.172 和 32.6%,采用 t 检验($t_{0.05}=0.085$,$t_{0.01}=0.117$,$v=17$)将综合耐阴湿系数显著高于平均值的品种评定为耐阴湿性强,显著低于平均值的品种评定为耐阴湿性弱,其余评定为耐阴湿性中等.结果(表 6)表明,渝单 8 号、三峡玉 3 号、三峡玉 5 号、科恩 8 号和金 123 耐阴湿性强,其中渝单 8 号和三峡玉 3 号均为国家审定(西南区)品种,这 2 个品种被证明是对西南地区阴湿环境具有较广泛适应性的品种;露新 23、三峡玉 1388、帮豪 58、渝开 3 号、高瑞 171、三峡玉 9 号、绿原 9 号、川单 828、东单 80 和长单 46 耐阴湿性中等,其中三峡玉 9 号为国家审定(西南区)品种,露新 23 为通过西南地区 5 个省(市)审(认)定品种,这 2 个品种也被证明是对西南

表 5 环境要素与产量性状间的相关性
Table 5 Correlation between environmental factors and yield traits

环境要素 Environmental factor	df	穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	穗行数 Rows per ear	行粒数 Kernels per row	百粒重 100-grain mass	单株产量 Grain yield per plant
空气湿度 Air relative humidity	4	-0.914	-0.894	-0.966*	-0.850	-0.817	-0.867
土壤湿度 Soil moisture	4	-0.733	-0.658	-0.810	-0.613	-0.725	-0.653
光量子 Photon	4	0.870	0.893	0.979*	0.842	0.695	0.842
光照强度 Illumination intensity	4	0.804	0.837	0.974*	0.778	0.601	0.774

表 6 18 个玉米杂交种的综合耐阴湿系数(D)
Table 6 Comprehensive shade-humid-tolerant coefficient (D) of 18 maize hybrids

品种名称 Name	方法 1 Method 1		方法 2 Method 2		方法 3 Method 3	
	综合耐阴湿系数Ⅰ D_{I}	t 检验 t test	综合耐阴湿系数Ⅱ D_{II}	t 检验 t test	综合耐阴湿系数Ⅲ D_{III}	t 检验 t test
渝单 8 号 Yudan 8	0.699	0.172**	0.667	0.050**	0.726	0.366**
三峡玉 1 号 Sanxiayu 1	0.371	-0.156**	0.644	0.027**	-0.058	-0.419**
先玉 508 Xianyu 508	-0.075	-0.602**	0.570	-0.047**	-1.110	-1.471**
东单 80 Dongdan 80	0.510	-0.017	0.617	0.001	0.295	-0.065
长单 46 Changdan 46	0.502	-0.025	0.591	-0.026**	0.318	-0.042
三峡玉 3 号 Sanxiayu 3	0.630	0.103*	0.596	-0.021**	0.648	0.288*
三峡玉 5 号 Sanxiayu 5	0.635	0.108*	0.612	-0.005	0.689	0.329**
三峡玉 9 号 Sanxiayu 9	0.539	0.012	0.616	-0.001	0.386	0.026
三峡玉 1388 Sanxiayu 1388	0.607	0.080	0.613	-0.004	0.554	0.194
科恩 8 号 Keen 8	0.632	0.105*	0.619	0.002	0.648	0.288*
露新 23 Luxin 23	0.604	0.077	0.640	0.023**	0.545	0.185
渝开 3 号 Yukai 3	0.588	0.061	0.640	0.023**	0.499	0.139
川单 828 Chuandan 828	0.526	-0.001	0.569	-0.048**	0.382	0.022
帮豪 58 Banghao 58	0.588	0.061	0.583	-0.034**	0.539	0.179
金 123 Jin 123	0.626	0.099*	0.630	0.013	0.574	0.213
高瑞 171 Gaorui 171	0.582	0.055	0.610	-0.007	0.551	0.191
源育 16 Yuanyu 16	0.393	-0.134**	0.681	0.064**	-0.089	-0.450**
绿原 9 号 Lüyuan 9	0.536	0.009	0.609	-0.008	0.392	0.032

地区阴湿环境具有较好适应性的品种；源育 16、三峡玉 1 号和先玉 508 耐阴湿性弱.

第二，从表 4 所列 18 个性状中选取穗长、穗粗、穗行数、行粒数、百粒重、单株粒重等 6 个产量性状，按同样的方法计算出各品种的综合耐阴湿系数（D_{II}），18 个品种 D_{II} 的平均值、标准差及变异系数分别为 0.617、0.030 和 4.9%，采用 t 检验（$t_{0.05}=0.015$，$t_{0.01}=0.021$，$v=17$）将 18 个品种评定为耐阴湿性强、耐阴湿性中等和耐阴湿性弱 3 种类型. 结果（表 6）表明，渝单 8 号、三峡玉 1 号、露新 23、渝开 3 号和源育 16 为耐阴湿性强的品种；东单 80、三峡玉 5 号、三峡玉 9 号、三峡玉 1388、科恩 8 号、金 123、高瑞 171 和绿源 9 号为耐阴湿性中等的品种；先玉 508、长单 46、三峡玉 3 号、川单 828 和帮豪 58 为耐阴湿性弱的品种. 该分类及排序结果与用 D_{I} 作为划分依据的结果相差较大，且品种间的 D_{II} 值变化幅度较小（0.569 ~ 0.681），变异系数太小（4.9%），难于从中筛选出耐阴湿性强的品种.

第三，从易于观察记载的形态性状出发，从表 4 所列 18 个性状中选取 ASI、雄穗分枝数、成株叶片数、株高、单株粒重、小斑病指数和纹枯病指数等 7 个性状，按同样的方法计算出各品种的综合耐阴湿系数（D_{III}），18 个品种 D_{III} 的平均值、标准差及变异系数分别为 0.361、0.431 和 119.6%，采用 t 检验（$t_{0.05}=0.214$，$t_{0.01}=0.294$，$v=17$）将 18 个品种评定为耐阴湿性强、耐阴湿性中等和耐阴湿性弱 3 种类型. 结果（表 6）表明，渝单 8 号、三峡玉 3 号、三峡玉 5 号和科恩 8 号为耐阴湿性强的品种；金 123、露新 23、三峡玉 1388、帮豪 58、渝开 3 号、高瑞 171、三峡玉 9 号、绿原 9 号、川单 828、东单 80 和长单 46 为耐阴湿性中等的品种；源育 16、三峡玉 1 号和先玉 508 为耐阴湿性弱的品种，分类及排序结果与用 D_{I} 作为划分依据的结果基本一致. 预示着用 ASI、雄穗分枝数、成株叶片数、株高、单株粒重、小斑病指数和纹枯病指数等 7 个性状作为玉米杂交种耐阴湿性的评价指标，进行耐阴湿性品种筛选可能更简便，更易于操作.

3　讨　　论

玉米是喜光作物，光照不足对玉米的生长发育影响较大. 关于弱光胁迫对玉米生长发育的影响已有较多研究. 张亚勤等[6]和付景等[11]的研究结果表明，弱光胁迫使玉米 ASI 延长[6,8,11]，茎秆变细，株高降低，叶片叶绿素含量下降[2,10]；多数研究结论认为，光照不足引起玉米叶片叶绿素含量下降，光合速率降低，干物质积累减少，是导致玉米生长发育不良的重要原因[2,9,13,15]. 本研究通过两年人工全程（全生育期）模拟遮光增湿环境胁迫，比较了 18 个玉米杂交种 20 个性状在自然环境与阴湿环境下的差异，发现遮光增湿引起玉米多个植株及穗粒性状显著变劣，与前人采用单一弱光胁迫处理获得的研究结果[2,6,8-11,13,15]相同或相近，且小斑病指数和纹枯病指数显著升高，说明本研究设置的遮光增湿环境不仅达到了导致玉米生长发育受阻的效果，而且为玉米病害发生提供了条件，与单一弱光胁迫处理相比，本研究设置的生长环境更加恶劣，这也可能是本研究中阴湿环境下玉米杂交种多数性状表现为显著负向变异的重要原因.

绿色叶片是植物进行光合作用制造光合产物的有效器官，单位时间内制造光合产物的多少与其光合面积密切相关，较大的光合面积和充足的光照是绿色植物进行光合作用、制造和积累更多光合产物的必备条件. 有研究表明，遮阴导致玉米叶面积变小[2,6-7,10]，叶面积指数显著减少[10]；贾士芳等[18]认为，遮光使玉米穗位叶可溶性蛋白含量减少，RuBP 羧化酶和 PEP 羧化酶活性显著降低，导致穗位叶净光合速率迅速下降；栾丽敏[8]研究发现，遮光影响了玉米杂交种 N、P、K 在灌浆期向籽粒中的运输和分配. 在本研究中，阴湿环境下玉米品种的成株叶片数和有效功能叶数较自然环境下极显著减少（表 4），大大降低了光合叶面积，加上阴湿环境下光照强度和光量子极显著减少，引起光合速率和净光合效率下降，单位时间内制造和积累的光合产物必然减少，籽粒灌浆期间向果穗输送的光合产物大幅度下降，与本研究中玉米杂交种营养生长和生殖生长受抑制，行粒数和百粒重显著降低有必然联系，这也是我国阴湿寡照地区玉米产量低而不稳现象始终难于被突破的重要原因.

关于植物耐阴性鉴定、评价方法已有一些研究，认为用单个指标或某些指标的绝对值来比较植物耐阴性必然影响判断的准确性，应用综合指标来评价植物的耐阴性已为广大研究者所接受[19-20]. 袁刘正等[2]采用人工遮光的方法研究了玉米自交系的耐阴性，并用综合耐阴系数法将 27 个自交系评价为耐阴性强、耐阴性中等和耐阴性弱 3 个等级；周广生等[21]采用人工遮光和综合评价值将 12 个小麦品种划分为耐阴性强、耐阴性中等和耐阴性弱 3 个等级；付景等[11]从与产量减少百分率的相关性角度出发，

认为选用玉米雌雄间隔期(ASI)、净光合速率、比叶重、行粒数、地上部干物质量作为评价玉米耐阴性的指标较为可靠且简单易行.然而,关于玉米耐阴湿性鉴定方法目前还很不成熟,鉴定指标尚不明确.本研究采用人工模拟遮光增湿环境,参照袁刘正等[2]的方法,计算了包括形态性状、抗逆性状和产量性状在内的综合耐阴湿系数(D_{I})、只包括产量性状的综合耐阴湿系数(D_{II})和包括形态性状和抗逆性状在内的综合耐阴湿系数(D_{III}),分别用3个系数对18个杂交种的耐阴湿性强弱进行了评价和分类,并比较了3种评价方法和分类结果的一致性,发现用方法Ⅰ和方法Ⅲ进行的评价和分类具有较好的一致性,预示着用方法Ⅲ的7个易于观察记载的形态和抗病性状,即ASI、雄穗分枝数、成株叶片数、株高、单株粒重、小斑病指数和纹枯病指数的综合耐阴湿系数值作为玉米杂交种耐阴湿性筛选的评价指标,具有一定的可靠性,且简便易行.但采用人工遮光增湿模拟阴湿环境能否作为开展玉米杂交种耐阴湿性鉴定和评价品种耐阴湿性强弱的方法,以及阴环境和湿环境对玉米生长发育的胁迫效应哪个更大,尚需进一步研究.

参考文献

[1] Rong T-Z (荣廷昭), Li W-C (李晚忱), Yang K-C (杨克诚), *et al*. Maize Breeding in Southwest Ecological Zones. Beijing: China Agriculture Press, 2003 (in Chinese)
[2] Yuan L-Z (袁刘正), Li C-H (李潮海), Wang X-P (王秀萍), *et al*. Comparison of shade-tolerance among different maize (*Zea Mays* L.) inbred lines. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2008, **16**(6): 19-23 (in Chinese)
[3] Duvick DN, Cassman KG. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the north-central United States. *Crop Science*, 1999, **39**: 1622-1630
[4] Liu W (刘 伟), Zhang J-W (张吉旺), Lü P (吕鹏), *et al*. Effect of plant density on grain yield, dry matter accumulation and partitioning in summer maize cultivar Denghai 661. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2011, **37**(7): 1301-1307 (in Chinese)
[5] Zhang S-H (张世煌), Xu W-P (徐伟平), Li M-S (李明顺), *et al*. Challenge and opportunity in maize breeding program. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2008, **16**(6): 1-5 (in Chinese)
[6] Zhang Y-Q (张亚勤), Yang H (杨 华), Qi Z-Y (祁志云), *et al*. Effect of light stress on the plants characters of maize inbred lines. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2011, **27**(33): 40-43 (in Chinese)
[7] Wang X-P (王秀萍), Liu T-X (刘天学), Li C-H (李潮海), *et al*. Effects of shading on agronomic traits and ear development of maize cultivars (*Zea mays* L.) with different plant types. *Acta Agriculturae Jiangxi* (江西农业学报), 2010, **22**(1): 5-7 (in Chinese)
[8] Luan L-M (栾丽敏). Effects of shading on the growth and photosynthesis in different genotype maize (*Zea mays* L.). Master Thesis. Xinxiang: Henan Agricultural University, 2003: 1-2 (in Chinese)
[9] Li C-H (李潮海), Luan L-M (栾丽敏), Wang Q (王群), *et al*. Effect of seedling shading and light intensity transfer on photosynthetic efficiency of different maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2005, **31**(3): 381-385 (in Chinese)
[10] Zhang J-W (张吉旺), Dong S-T (董树亭), Wang K-J (王空军), *et al*. Effects of shading in field on photosynthetic characteristics in summer corn. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(2): 216-222 (in Chinese)
[11] Fu J (付 景), Li C-H (李潮海), Zhao J-R (赵久然), *et al*. Shade tolerance indices of maize: Selection and evaluation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(11): 2705-2709 (in Chinese)
[12] Zhong X-M (钟雪梅), Shi Z-S (史振声). Research progress on corn shading stress. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2012, **20**(1): 138-141 (in Chinese)
[13] Liu S-Y (刘淑云), Dong S-T (董树亭), Hu C-H (胡昌浩), *et al*. Relationship between ecological environment and maize yield and quality. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2005, **31**(5): 571-576 (in Chinese)
[14] Wang Y (王 洋), Qi X-N (齐晓宁), Shao J-F (邵金峰), *et al*. Effects of light intensity at full growing stage on the growth and yield of different maize varieties. *Journal of Jilin Agricultural University* (吉林农业大学学报), 2008, **30**(6): 769-773 (in Chinese)
[15] Jia S-F (贾士芳), Dong S-T (董树亭), Wang K-J (王空军), *et al*. Effect of shading on grain quality at different stages from flowering to maturity in maize. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(12): 1960-1967 (in Chinese)
[16] Jia S-F (贾士芳), Li C-F (李从锋), Dong S-T (董树亭), *et al*. Effects of shading at different stages after anthesis on maize grain weight and quality at cytology level. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(5): 911-921 (in Chinese)
[17] Wang X-M (王晓鸣), Shi J (石 洁), Jin Q-M (晋齐鸣), *et al*. Manual of Maize Diseases and Pests Identification in the Field. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006 (in Chinese)
[18] Jia S-F (贾士芳), Li C-F (李从锋), Dong S-T (董树亭), *et al*. Physiological mechanism of shading stress on photosynthetic efficiency in summer maize (*Zea mays* L.). *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(12): 1439-1447 (in Chinese)
[19] Zhou G-S (周广生), Mei F-Z (梅方竹), Zhou Z-Q (周竹青), *et al*. Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2003, **36**(11): 1378-1382 (in Chinese)
[20] Ding A-P (丁爱萍), Wang R (王 瑞), Zhang Z-W (张卓文). Selection of shade-tolerance identification indices for 12 garden plant species. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 2009, **45**(1): 55-59 (in Chinese)
[21] Zhou G-S (周广生), Mei F-Z (梅方竹), Zhou Z-Q (周竹青), *et al*. Comprehensive evaluation on waterlogging resistance of different wheat varieties. *Journal of Biomathematics* (生物数学学报), 2003, **18**(1): 98-104 (in Chinese)

作者简介 晏庆九,男,1969年生,研究员.主要从事玉米遗传育种与生理生态研究. E-mail: yanqj98@163.com

责任编辑 张凤丽