

玉米自交系不同生育期的抗旱性 鉴定及生理响应机制研究

鲁晓民¹, 曹丽茹^{1,2}, 张前进¹, 魏 昕¹, 魏良明¹, 张 新¹, 王振华¹

(1. 河南省农业科学院粮食作物研究所, 郑州 450002; 2. 河南农业大学/河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450002)

摘 要: 以 17 份黄淮海常用骨干系及自选系为材料, 不同生育期进行干旱胁迫, 筛选抗旱性强的玉米种植资源, 并探讨其抗旱的生理机制。方差分析表明, 与正常水分相比, 胁迫后的抽雄至散粉间隔未达显著水平, 但 ASI 间隔达显著水平; 不同生育期自交系的叶绿素含量、Fv/Fm 和 Fv/Fo 均下降, SOD 和 POD 活性均提高, 但不同自交系下降或上升的幅度不同, 且不同自交系间、胁迫与对照间指标差异及两因素交互作用均达极显著水平。灰色关联度表明, POD 活性无论是拔节期还是抽雄期都与 ASI 关联度很高, 可作为筛选抗旱型材料的一个重要指标。模糊隶属函数法鉴定出超 4F、郑 36、CIMBL12、郑 63、HCL645、郑 6611 和 PH6WC 在两个生育期均属于抗旱型自交系, 其中, 超 4F、郑 36 和郑 63 拔节期和抽雄期干旱胁迫后, ASI 增大幅度较小, 叶绿素含量、叶绿素荧光参数 Fv/Fm 和 Fv/Fo 抗旱指数均较高, 说明这 3 个自交系遭受干旱胁迫时主要通过调节光合系统这种机制来提高抗旱性。

关键词: 玉米; 自交系; 拔节期; 抽雄期; ASI; 抗旱性; 种植资源

中图分类号: S513.037

文献标识码: A

Drought Resistance Identification and Physiological Response Mechanism of Maize Inbred Lines at Different Growth Stages

LU Xiao-min¹, CAO Li-ru^{1,2}, ZHANG Qian-jin¹, WEI Xin¹, WEI Liang-ming¹, ZHANG Xin¹, WANG Zhen-hua¹

(1. Institute of Food Crops, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002;

2. Henan Agricultural University / Henan Food Crops Collaborative Innovation Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Using 17 parts of Huanghuaihai commonly used backbone and self-selected lines as materials, and drought stress was carried out at different growth stages. A series of drought-tolerant maize planting resources were selected to explore the physiological mechanism of drought resistance. Analysis of variance showed that the male-dispersion interval after stress did not reach a significant level compared with normal water, but the ASI interval reached a significant level. The chlorophyll content, Fv/Fm and Fv/Fo of inbred lines in different growth stages decreased, SOD and POD activities increased, but the amplitudes of different inbred lines decreased or increased, and different inbred lines, stress and control in indicators and interactions between the two factors reached extremely significant levels. The grey correlation degree indicates that the POD activity is highly correlated with ASI in both jointing and tasseling stages, and can be used as an important indicator for screening drought-resistant materials. Fuzzy membership function method to identify Chao 4F, Zheng 36, CIMBL12, Zheng 63, HCL645, Zheng 6611, and PH6WC are drought-resistant inbred lines in both growth stages. Among them, the ASI increased slightly after the inbred lines of Chao 4F, Zheng 36 and Zheng 63 jointing and tasseling stress, and the chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters Fv/Fm and Fv/Fo drought indexes were higher, indicating that these three when the inbred lines are subjected to drought stress, the mechanism of photosynthetic system is mainly adjusted to improve drought resistance.

Key words: Maize; Inbred line; Jointing stage; Tasseling stage; ASI; Drought resistance; Planting resource

录用日期: 2020-03-19

基金项目: 国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-08)、国家重点研发计划项目(2016YFD0101205-4)

作者简介: 鲁晓民(1980-), 副研究员, 主要从事玉米遗传育种研究。

王振华和张 新为本文通讯作者。

玉米是世界上主要的粮饲作物之一,也是需水较多对水分敏感的作物^[1,2]。我国70%以上的玉米遭遇干旱影响,每年因此造成的玉米产量下降幅度超过 $1\,500\times 10^4\text{ t}$ ^[3]。玉米的抗旱性与其产量有着密切的关系,研究其抗旱指标及生理机制探究对玉米生产有着重要的作用。近年来,许多学者围绕玉米抗旱性研究开展了大量工作,取得了一定的研究进展^[4~7],提出了玉米抗旱性鉴定的形态和生理生化指标^[8]。叶绿素含量、叶绿素荧光参数、抗氧化酶活性等可作为玉米抗旱性鉴定评价指标^[9,10]。散粉吐丝间隔期(ASI)作为形态指标可进行玉米抗旱性鉴定,其与抗旱性密切相关^[11]。对454份玉米自交系连续两年的试验,发现干旱胁迫处理后玉米的产量与ASI呈显著的负相关,ASI可作为抗旱玉米种质筛选的主要指标之一^[12]。根据Jensen模型的敏感系数得出,抽雄至吐丝期>拔节期>灌浆至成熟期>苗期^[13]。通常用抗旱指数(抗旱指数=早胁迫测定值/对照测定值)进行评价抗旱能力,但由于抗旱鉴定的复杂性,单一的指标难以精确的鉴定材料的抗旱能力,结合所有性状的模糊隶属函数平均值进行抗旱性鉴定,可提高抗旱的准确性^[14,15]。

本研究以17份骨干自交系为材料,在拔节期和抽雄吐丝期两个关键生育阶段进行中度干旱胁迫,结合形态和生理生化指标的抗旱指数及模糊隶属函数平均值科学的对玉米抗旱性鉴定和抗旱性聚类分析,同时进行不同材料的生理响应机制探究。利用灰色关联度分析生理指标与ASI的关联度,间接筛选与产量关联较密切的生理指标,筛选抗旱性强的玉米种植资源,并探讨其抗旱的生理机制,为建立玉米抗旱性鉴定体系和抗旱品种抗旱能力评价提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用17份黄淮海常用骨干系及自选系郑H71、HCL645、郑9712、郑5721、郑6611、PH6WC、超4F、郑6541、郑754、郑7541、M54、WK798-1、CIMBL12、CIMBL17、CIMBL55、郑36和郑63作为供试材料。

1.2 试验设计

17份国内玉米骨干系及自选系于2018年在河南省农业科学院原阳基地人工可控移动抗旱棚内种植,设对照和干旱(拔节期和抽雄期)3个处理。每材料种植1行共16株,行长4 m,行距60 cm,株距25 cm。对照的土壤田间最大持水量一直保持在80%以上。拔节期和抽雄期胁迫时土壤田间最大持

水量保持在45%左右进行10 d的干旱胁迫,然后复水至自然成熟。胁迫和对照材料进行生理指标测定和取样,每材料3次生物学重复。

1.3 指标测定方法

使用SPAD502叶绿素仪测定倒数第一片全展叶的叶绿素含量(Chl);光化学还原法测定超氧化物歧化酶(SOD);愈创木酚法测定氧化物酶(POD);英国Hansatech Handy PEA Plus Version系统测定叶绿素荧光相关参数;田间记录小区50%以上植株达到的抽雄、散粉、吐丝日期,散粉吐丝间隔(ASI)=吐丝日期-散粉日期。

1.4 抗旱性评价指标

抗旱指数=早胁迫测定值/对照测定值。隶属函数值 $U(X)=(X-a_1)/(a_2-a_1)$,式中,X为某一指标的抗旱系数; a_1 、 a_2 为所有材料某一指标的最小和最大抗旱系数。根据抗旱隶属函数的平均值分为4级, $X\geq 0.7$ 属于1级强抗旱型, $0.5\leq X<0.7$ 属于2级抗旱型, $0.4\leq X<0.5$ 属于3级中抗旱型, $0\leq X<0.4$ 属于4级弱抗旱型。

1.5 数据处理及分析方法

数据采用Excel 2007进行处理分析,采用Duncan进行多重差异显著性分析,以DPS7.05进行灰色关联度分析,R语言热图及聚类分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对玉米自交系抽雄至散粉期和散粉至吐丝期时间(ASI)的影响

拔节期和抽雄期水分胁迫后,调查不同自交系的抽雄至散粉期和ASI。表1数据分析表明,与正常水分相比,干旱胁迫后两个时期不同自交系的抽雄至散粉期间隔时间变化较小,50%的自交系缩短了抽雄至散粉期间隔,且缩小幅度甚小。所有自交系的ASI间隔时间均延长,不同自交系延长幅度不同,其中,CIMBL12、CIMBL17和CIMBL55自交系属于热带种植资源,或许由于地域气候差异,导致胁迫前后抽雄至散粉期和散粉至吐丝期时间均延迟较长(表1)。方差分析抽雄至散粉期和散粉至吐丝期时间发现,与正常水分相比,胁迫后的抽雄至散粉期间隔未达显著水平,但ASI间隔达显著水平(表2)。

2.2 干旱胁迫对玉米自交系的叶绿素含量和叶绿素荧光参数的影响

植株遭遇旱胁迫时,叶绿体受到影响。由表3可发现,干旱胁迫时两个时期不同自交系的叶绿素含量抗旱指数均小于1,也就是旱胁迫后植株的叶绿素含量呈下降的趋势。每个自交系下降的幅度不

表1 不同玉米自交系的抽雄至散粉期和ASI时间

Table 1 Tasseling to pollinating period and ASI time of different maize inbred lines

材料名称 Material name	拔节期比对照延长天数 Jointing stage to extend the number of days than the control		抽雄期比对照延长天数 Tasseling stage to extend the number of days than the control	
	抽雄—散粉期 Tasseling period-pollinating period		抽雄—散粉期 Tasseling period-pollinating period	
		ASI		ASI
郑H71	1	4	2	5
HCL645	1	3	1	3
郑9712	-1	5	-1	5
郑5721	0	2	1	1
郑6611	-1	3	-2	3
PH6WC	0	5	3	5
超4F	-1	2	1	2
郑6541	1	3	1	3
郑754	-1	3	1	4
郑7541	1	4	1	4
M54	-1	2	-2	2
WK798-1	1	4	1	4
CIMBL12	>5	>5	>5	>5
CIMBL17	>5	>5	>5	>5
CIMBL55	>5	>5	>5	>5
郑36	1	2	0	3
郑63	1	2	0	3

表2 不同玉米自交系抽雄至散粉期和ASI时间的方差分析

Table 2 Variance analysis of different maize inbred lines from tasseling to flocking and ASI time

指 标 Index	差异源 Source of difference	SS	df	MS	F值 F-value	P值 P-value
抽雄-散粉期	组间	50.235	1	24.735	2.891 3	0.098
	组内	441.765	32	8.555		
	总计	298.500	33			
ASI	组间	82.617	1	82.618	5.244 3	0.029*
	组内	504.117	32	15.754		
	总计	586.735	33			

表3 不同玉米自交系叶绿素含量和叶绿素荧光参数的抗旱指数

Table 3 Drought resistance index of chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters of different maize inbred lines

材料名称 Material name	拔节期 Jointing stage			抽雄期 Tasseling stage		
	Chl	Fv/Fm	Fv/Fo	Chl	Fv/Fm	Fv/Fo
郑H71	0.810	0.899	0.664	0.809	0.936	0.739
HCL645	0.942	0.956	0.829	0.899	0.935	0.761
郑9712	0.852	0.929	0.738	0.794	0.928	0.716
郑5721	0.767	0.909	0.659	0.694	0.906	0.726
郑6611	0.892	0.948	0.787	0.891	0.905	0.704
PH6WC	0.945	0.925	0.723	0.848	0.946	0.796
超4F	0.921	0.957	0.816	0.956	0.988	0.950
郑6541	0.861	0.936	0.766	0.548	0.927	0.705

续表 3 Continued 3

材料名称 Material name	拔节期 Jointing stage			抽雄期 Tasseling stage		
	Chl	Fv/Fm	Fv/Fo	Chl	Fv/Fm	Fv/Fo
郑 754	0.931	0.924	0.736	0.833	0.913	0.691
郑 7541	0.932	0.931	0.746	0.800	0.921	0.691
M54	0.864	0.907	0.715	0.794	0.987	0.973
WK798-1	0.764	0.793	0.536	0.643	0.938	0.800
CIMBL12	0.852	0.864	0.786	0.856	0.933	0.783
CIMBL17	0.847	0.865	0.620	0.827	0.946	0.782
CIMBL55	0.807	0.906	0.743	0.817	0.837	0.550
郑 36	0.946	0.957	0.911	0.929	0.966	0.868
郑 63	0.909	0.967	0.858	0.914	0.946	0.777

表 4 不同玉米自交系叶绿素含量和叶绿素荧光参数的方差分析

Table 4 Analysis of variance of chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters in different maize inbred lines

胁迫时期 Period of stress	指 标 Index	差异源 Source of difference	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	均 方 Mean square	F 值 F-value	P 值 P-value
拔节期	Chl	品种间	4 171.140	16	260.696	94.745	5.45E-40
		处理间	1 026.002	1	1 026.002	372.879	2.62E-29
		品种×处理	181.609	16	11.351	4.125	1.90E-05
		内部误差	187.107	68	2.752		
		总 计	5 565.858	101			
	Fv/Fm	品种间	0.145	16	0.009	304.073	1.12E-56
		处理间	0.104	1	0.104	3 504.535	3.11E-60
		品种×处理	0.024	16	0.001	50.205	2.83E-31
		内部误差	0.002	68	0.000		
		总 计	0.275	101			
	Fv/Fo	品种间	21.709	16	1.357	363.450	2.86E-59
		处理间	18.816	1	18.816	5 040.343	1.62E-65
		品种×处理	1.941	16	0.121	32.505	1.36E-25
		内部误差	0.254	68	0.004		
		总 计	42.720	101			
抽雄期	Chl	品种间	3 410.969	16	213.186	100.083	9.29E-41
		处理间	2 035.907	1	2 035.907	955.781	9.05E-42
		品种×处理	622.425	16	38.902	18.263	1.32E-18
		内部误差	144.847	68	2.130		
		总 计	6 214.148	101			
	Fv/Fm	品种间	0.018	16	0.001	51.174	1.57E-31
		处理间	0.072	1	0.072	3 292.549	2.49E-59
		品种×处理	0.018	16	0.001	51.673	1.16E-31
		内部误差	0.001	68	0.000		
		总 计	0.110	101			
	Fv/Fo	品种间	5.150	16	0.322	24.685	3.64E-22
		处理间	20.163	1	20.163	1 546.307	1.69E-48
		品种×处理	3.403	16	0.213	16.311	2.47E-17
		内部误差	0.887	68	0.013		
		总 计	29.602	101			

同,拔节期自交系郑36、PH6WC、HCL645、郑754、郑7541、超4F、郑63和抽雄期HCL645、超4F、郑36、郑63的抗旱指数较大,说明HCL645、超4F、郑36、郑63在两个生育期均叶绿素含量受旱胁迫影响较小。同时发现,旱胁迫后自交系的Fv/Fm和Fv/Fo均下降,不同自交系间参数的变化存在差异。拔节期HCL645、郑6611、超4F、郑6541、郑36、郑63和抽雄期超4F、M54、CIMBL17、郑36、郑63的Fv/Fm和Fv/Fo指数均较高,说明这些自交系受旱胁迫影响时

光系统损坏较轻,不同自交系不同生育期抗旱生理机制不同。

拔节期和抽雄期方差分析均表明(表4),不同自交系间叶绿素含量、叶绿素荧光参数Fv/Fm和Fv/Fo指标差异、自交系与对照叶绿素含量、叶绿素荧光参数Fv/Fm和Fv/Fo指标差异均达极显著水平,两因素交互作用均为极显著($P<0.01$)。

2.3 干旱胁迫对玉米自交系的SOD和POD活性的影响

表5 不同玉米自交系SOD和POD活性的抗旱指数
Table5 Drought resistance index of SOD and POD activities in different maize inbred lines

材料名称 Material name	拔节期 Jointing stage		抽雄期 Tasseling stage		材料名称 Material name	拔节期 Jointing stage		抽雄期 Tasseling stage	
	SOD	POD	SOD	POD		SOD	POD	SOD	POD
郑H71	1.227	1.315	1.268	1.379	郑7541	1.407	1.127	1.305	1.309
HCL645	1.234	1.228	1.207	1.378	M54	1.450	1.128	1.442	1.242
郑9712	1.111	1.385	1.178	1.255	WK798-1	1.464	1.074	1.187	1.210
郑5721	1.637	1.232	1.573	1.465	CIMBL12	1.508	1.342	1.540	1.684
郑6611	1.519	1.254	1.384	1.403	CIMBL17	1.207	1.111	1.239	1.127
PH6WC	1.439	1.605	1.365	1.572	CIMBL55	1.376	0.954	1.335	1.105
超4F	1.721	1.116	1.598	1.298	郑36	1.234	1.250	1.207	1.319
郑6541	1.749	1.176	1.639	1.131	郑63	1.250	1.253	1.286	1.302
郑754	1.367	1.237	1.394	1.349					

表6 不同玉米自交系SOD和POD活性的方差分析
Table6 Analysis of variance of SOD and POD activities in different maize inbred lines

胁迫时期 Period of stress	指 标 Index	差异源 Source of difference	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F值 F-value	P值 P-value
拔节期	SOD	品种间	29 266.100	16	1 829.131	52.234	8.33E-32
		处理间	92 811.050	1	92 811.050	2 650.384	3.37E-56
		品种×处理	11 891.150	16	743.197	21.223	2.36E-20
		内部误差	2 381.222	68	35.018		
		总 计	136 349.500	101			
	POD	品种间	1 360 655.000	16	85 040.950	684.447	1.61E-68
		处理间	301 973.200	1	301 973.200	2 430.413	5.95E-55
		品种×处理	205 098.700	16	12 818.670	103.170	3.48E-41
		内部误差	8 448.842	68	124.248		
		总 计	1 876 176.000	101			
抽雄期	SOD	品种间	43 018.320	16	2 688.645	134.249	6.55E-45
		处理间	87 381.090	1	87 381.090	4 363.086	2.05E-63
		品种×处理	10 471.960	16	654.498	32.680	1.16E-25
		内部误差	1 361.861	68	20.027		
		总 计	142 233.200	101			
	POD	品种间	2 344 349.000	16	146 521.800	1 016.150	2.55E-74
		处理间	733 310.800	1	733 310.800	5 085.616	1.20E-65
		品种×处理	259 269.500	16	16 204.350	112.379	2.17E-42
		内部误差	9 805.133	68	144.193		
		总 计	3 346 735.000	101			

由表5可以看出,不同自交系不同生育期在遭遇旱胁迫后SOD和POD活性指数均大于1,干旱胁迫后自交系为了清除自身有害自由基,抗氧化酶活性提高。不同材料不同生育期存在一定的差异,拔节期自交系郑5721、郑6611、超4F、郑6541和抽雄期郑5721、超4F、郑6541、CIMBL12的SOD活性抗旱指数较高;拔节期自交系PH6WC、郑9712、郑H71、CIMBL12和抽雄期郑5721、郑6611、PH6WC、CIMBL12的POD活性抗旱指数较高,说明遭遇旱胁迫时这些自交系通过提高自身的抗氧化酶活性来抵抗旱压力,维持自身的生长发育。

拔节期和抽雄期方差分析均表明(表6),不同自交系SOD和POD活性指标差异、自交系与对照SOD和POD活性指标差异均达极显著水平,两因素交互作用均为极显著相关($P<0.01$)。

2.4 对玉米自交系生理指标与产量的灰色关联分析

对拔节期和抽雄期不同玉米自交系生理指标与ASI关联度分析发现(表7),拔节期与ASI关联度顺序为 $POD>叶绿素含量>Fv/Fm>SOD>Fv/Fo$,POD的关联度高达0.492;抽雄期与ASI关联度顺序为 $POD>SOD>Fv/Fm>Fv/Fo>叶绿素含量$,POD关联度高达0.485。分析各生理指标与ASI的关联序,发现POD活性无论是拔节期还是抽雄期都与ASI关联度很高,说明POD活性可作为筛选抗旱高产玉米的一个重要指标。由于生育期不同,SOD活性、叶绿素含量、Fv/Fm和Fv/Fo在两个时期与ASI的关联程度不同,叶绿素含量在拔节期与ASI关联度较高,但在抽雄期关联度很低,说明拔节期光合作用对玉米生长发育及产量影响较大。

表7 拔节期、抽雄期生理指标与ASI关联度及关联序
Table 7 Correlation and the relational order of physiological indexes with yield at elongation stage and tasseling stage

因子 Factor	拔节期 Jointing stage		抽雄期 Tasseling stage	
	关联度	关联序	关联度	关联序
	Correlation	Relational order	Correlation	Relational order
叶绿素含量	0.481	2	0.381	5
Fv/Fm	0.465	3	0.462	3
Fv/Fo	0.434	5	0.414	4
SOD	0.463	4	0.477	2
POD	0.492	1	0.485	1

2.5 旱胁迫下拔节期和抽雄期不同玉米自交系抗旱性综合评价

分析旱胁迫下不同玉米自交系拔节期和抽雄期抗旱性,超4F、郑36、CIMBL12、郑63、HCL645、郑6611和PH6WC,在两个生育期均显示较强的抗旱能力,属于1级或者2级(强抗旱或抗旱)自交系;CIMBL55、WK798-1、CIMBL17和郑H71在两个生育

期均显示较弱的抗旱能力,属于3级或者4级(中抗或敏感)型自交系;郑5721、郑9712、郑6541、郑754和郑7541在两个生育期抗旱能力不同,属于2级或者3级(抗旱或中抗)自交系。由于材料差异或胁迫时期的不同,同一自交系在不同生育期或者不同自交系在同一生育期均表现不同的抗旱能力(表8)。

表8 不同玉米自交系的抗旱性综合评价
Table 8 Comprehensive evaluation of drought resistance for different maize inbred lines

编号 No.	自交系名称 Inbred line	拔节期 Jointing stage		抽雄期 Tasseling stage	
		隶属函数平均值	抗旱等级	隶属函数平均值	抗旱等级
		Membership function constant	Drought resistance level	Membership function constant	Drought resistance level
1	郑H71	0.395	4	0.482	3
2	HCL645	0.674	2	0.510	2
3	郑9712	0.503	2	0.372	4
4	郑5721	0.460	3	0.542	2
5	郑6611	0.684	2	0.524	2
6	PH6WC	0.692	2	0.651	2

续表8 Continued 8

编 号 No.	自交系名称 Inbred line	拔节期 Jointing stage		抽雄期 Tasseling stage	
		隶属函数平均值	抗旱等级	隶属函数平均值	抗旱等级
		Membership function constant	Drought resistance level	Membership function constant	Drought resistance level
7	超4F	0.763	1	0.838	1
8	郑6541	0.672	2	0.402	3
9	郑754	0.618	2	0.486	3
10	郑7541	0.611	2	0.428	3
11	M54	0.505	2	0.682	2
12	WK798-1	0.148	4	0.339	4
13	CIMBL12	0.561	2	0.746	1
14	CIMBL17	0.302	4	0.426	3
15	CIMBL55	0.378	4	0.200	4
16	郑36	0.729	1	0.596	2
17	郑63	0.666	2	0.547	2

3 结论与讨论

刘树堂研究表明,玉米生育中后期的干旱胁迫会严重影响子粒产量,导致减产^[16]。白向历等认为,玉米在抽雄吐丝期遭遇干旱会加大散粉至吐丝期间隔(ASI),缩短了雄穗花期,延迟了雌穗吐丝,造成子粒败育^[17]。本研究中拔节期和抽雄期进行干旱胁迫,造成抽雄至散粉期推迟,且ASI大幅度延长,对玉米产量造成直接影响。本研究采用抗旱系数法和模糊隶属函数法对拔节期和抽雄期干旱胁迫下不同自交系进行抗旱性评价,发现M54、超4F、郑36、郑63、HCL645、郑6611和PH6WC的抗旱性较强,这些自交系无论在拔节期或抽雄期受到干旱胁迫时ASI间隔延长幅度较小。CIMBL12、CIMBL17和CIMBL55自交系属于热带种质,或许由于地域差别,其在旱胁迫前和胁迫后的ASI均较长,无法结实。自交系超4F、郑36和郑63拔节期和抽雄期旱胁迫后,ASI增大幅度较小,叶绿素含量、叶绿素荧光参数Fv/Fm和Fv/Fo指数均较高,说明这3个自交系遭受干旱胁迫时光系统损坏较轻,自身通过调节这种生理机制,提高抗旱性。郑5721、超4F、郑6541在两个时期的SOD和POD活性抗旱指数均较高,说明受干旱胁迫时,这3个自交系均可通过提高抗氧化酶活性这种生理机制来缓解干旱压力,维持自身正在生长发育。自交系郑754和郑7541拔节期的叶绿素含量较高,但抽雄期较低;郑6611的SOD活性和郑9712的POD活性在拔节期很高,但在抽雄期较低,以上结果说明不同生育期不同玉米自交系抗旱机制不同。

不同生理指标对不同玉米自交系抗旱能力的贡献程度不同,灰色关联分析可以反映各因子间互相影响的程度,也可以评价各因子对母因子的贡献程度^[18]。本研究以ASI为母因子,其他生理指标为子因子,探明不同生理指标对ASI影响的主次和依存关系,结果发现,拔节期时与ASI关联度顺序为POD>叶绿素含量>Fv/Fm>SOD>Fv/Fo,POD的关联度高达0.492;抽雄期时与ASI关联度顺序为POD>SOD>Fv/Fm>Fv/Fo>叶绿素含量,POD关联度高达0.485,POD活性无论是拔节期还是抽雄期都与ASI关联度很高,说明POD活性可作为筛选抗旱高产玉米的一个重要指标。

参考文献:

[1] Vamerali T, Saccomani M, Bona S, et al. A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids[J]. Plant & Soil, 2003, 255(11): 157-167.

[2] Farré I, Oijen M V, Leffelaar P A, et al. Analysis of maize growth for different irrigation strategies in northeastern Spain[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 12(3-4): 225-238.

[3] 董树亭,张吉旺. 建立玉米现代产业技术体系,加快玉米生产发展[J]. 玉米科学,2008,16(4):18-20.

Dong S T, Zhang J W. Establishing a modern industrial technology system for corn and accelerating the development of corn production [J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 18-20. (in Chinese)

[4] 霍仕平,晏庆九,宋光英,等. 玉米抗旱鉴定的形态和生理生化指标研究进展[J]. 干旱地区农业研究,1995,13(3):67-73.

Huo S P, Yan Q J, Song G Y, et al. Research progress on the morphology and physiological and biochemical indexes of maize drought resistance identification[J]. Agricultural Research in Arid Regions, 1995, 13(3): 67-73. (in Chinese)

[5] 刘友良. 植物水分逆境生理[M]. 北京:农业出版社,1992.

[6] 顾慰连,沈秀瑛,戴俊英,等. 玉米不同品种各生育时期对干旱的

- 生理反应[J]. 沈阳农业大学学报, 1990, 21(3): 186-190.
- Gu W L, Shen X Y, Dai J Y, et al. Physiological responses of different varieties of maize to drought in different growth stages[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1990, 21(3): 186-190. (in Chinese)
- [7] 胡荣海. 农作物抗旱鉴定方法和指标[J]. 作物品种资源, 1986(4): 36-39.
- Hu H R. Identification methods and indicators of crop drought resistance[J]. Crop Variety Resources, 1986(4): 36-39. (in Chinese)
- [8] 孙彩霞. 玉米抗旱性鉴定指标体系及抗旱鉴定指标遗传特性的研究[D]. 沈阳农业大学, 2001.
- [9] 宋凤斌, 徐世昌. 玉米抗旱性鉴定指标的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 132-134.
- Song F B, Xu S C. Study on identification index of drought resistance in maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(1): 132-134. (in Chinese)
- [10] 高玉华, 郎艳辉, 高丽辉, 等. 玉米抗旱品系的筛选及其种质资源的改良和创新的研究[J]. 玉米科学, 2003, 11(增刊): 20-21.
- Gao Y H, Lang Y H, Gao L H, et al. Screening of drought-tolerant lines of maize and improvement and innovation of germplasm resources[J]. Corn Science, 2003, 11(S): 20-21. (in Chinese)
- [11] 林秋萍, 贡冬花, 李普安, 等. 夏玉米的干旱适应性及其生理机制的研究[J]. 华北农学报, 1990, 5(4): 54-60.
- Lin Q P, Gong D H, Li P A, et al. Study on drought adaptability and physiological mechanism of summer maize[J]. Journal of North China Agricultural Sciences, 1990, 5(4): 54-60. (in Chinese)
- [12] 刘 成, 申海兵, 石云素, 等. 水分胁迫后玉米雌雄穗开花间隔时间(ASI)与产量和抗旱性的关系研究[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(4): 609-612.
- Liu C, Shen H B, Shi Y S, et al. Relationship between flowering interval(ASI) and yield and drought resistance of maize after water stress[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008, 45(4): 609-612. (in Chinese)
- [13] 龚雨田, 孙书洪, 闫宏伟. 微咸水灌溉对冬小麦产量及农艺性状的影响[J]. 节水灌溉, 2017(9): 33-42.
- Gong Y T, Sun S H, Yan H W, et al. Effects of brackish water irrigation on winter wheat yield and agronomic traits[J]. Water Saving Irrigation, 2017(9): 33-42. (in Chinese)
- [14] 鲁晓民, 曹丽茹, 张前进, 等. 不同基因型玉米自交系苗期干旱-复水的生理响应机制[J]. 玉米科学, 2018, 126(2): 71-80.
- Lu X M, Cao L R, Zhang Q J, et al. Physiological response mechanism of different genotype maize inbred lines in Drought-Rehydration at seedling stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 126(2): 71-80. (in Chinese)
- [15] 鲁晓民, 曹丽茹, 张 新, 等. PEG胁迫下玉米自交系苗期抗旱性鉴定及评价[J]. 河南农业科学, 2017, 46(5): 39-44.
- Lu X M, Cao L R, Zhang X, et al. Identification and evaluation of drought resistance of maize inbred lines at seedling stage under PEG stress[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(5): 39-44. (in Chinese)
- [16] 刘树堂, 东先旺, 孙朝辉, 等. 水分胁迫对夏玉米生长发育和产量形成的影响[J]. 莱阳农学院学报, 2003, 20(2): 98-100.
- Liu S T, Dong X W, Sun Z H, et al. Effects of water stress on growth and yield formation of summer maize[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 2003, 20(2): 98-100. (in Chinese)
- [17] 白向历, 孙世贤, 杨国航, 等. 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 60-63.
- Bai X L, Sun S X, Yang G H, et al. Effects of water stress on maize yield and growth in different growth stages[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(2): 60-63. (in Chinese)
- [18] Ghaderi N, Siosemardeh A. Response to drought stress of two strawberry cultivars(cv. Kurdistan and Selva)[J]. Hort. Environ. Biotechnol, 2011, 52: 6-12.

(责任编辑: 朴红梅)