

不同基因型玉米自交系苗期根系抗旱性 向水性及解剖结构研究

蒋奇峰, 员海燕

(西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 试验旨在研究早胁迫下不同基因型玉米自交系苗期根系形态、生理生化、解剖结构的差异变化, 为玉米自交系抗旱种质的筛选提供可借鉴的指标、方法, 为玉米自交系苗期根系抗旱遗传机理研究提供依据。试验选用了 14 份玉米自交系, 采用 PEG-6000 胁迫处理, 测定玉米自交系苗期 13 个与抗旱紧密相关的根系形态与生理生化指标, 并通过方差分析、关联分析及聚类分析, 对各自交系的抗旱性进行综合评价, 并对其中两个抗旱性差异明显的自交系, 通过石蜡切片-显微镜观察根系横切面结构的差异。结果表明: 干旱胁迫下, 不同玉米自交系苗期的单株根干质量、单株地上部干质量、根系长度、根直径、根伸长速率、根失水率、根系还原力均呈不同程度的下降趋势, 根系可溶性糖、脯氨酸均呈不同程度的上升趋势, 且不同自交系的变化幅度差异较大。随着诱导物倾斜角的增大, 不同自交系根系的向水性弯曲增强, 不同自交系间的差异较大, 高湿度梯度条件下, 自交系 Mo17 向水性弯曲较对照增加 134%, 增加幅度最大, WN897 向水性弯曲增加 20%, 增加幅度较小。利用不同抗旱指标的加权抗旱指数, 综合评价不同基因型玉米自交系的抗旱性, 并将 14 个玉米自交系种质聚类划分为强抗旱型、中抗旱型和早敏感型、高早敏感型 4 个抗旱级别。石蜡切片结果显示, 抗旱性差异明显的自交系根系解剖结构差异较大, 抗旱性自交系昌 7-2 皮层占根系直径比例较低, 不抗旱自交系 WN897 皮层占根系直径比例大于昌 7-2, 且 WN897 的导管直径较大。结论: 采用方差分析、关联分析及聚类分析等相结合的方法对不同玉米自交系苗期抗旱性进行评估, 可以较好地揭示根系性状与抗旱性的关系。根系还原力、根系可溶性糖、根系长度、根向水性对于干旱胁迫的反应较其他指标敏感, 可作为玉米苗期的抗旱能力和抗旱自交系选育时优先考虑的鉴定指标。早胁迫下, 抗旱性差异明显的玉米自交系根系解剖特征差异显著, 强抗旱型自交系苗期根系皮层厚度较小, 皮层占根系直径比例较低, 根系导管直径也较高早敏感型自交系小。

关键词: 玉米自交系; 根系; 苗期; 根向水性; 解剖结构; 抗旱性

中图分类号: S332.1 **文献标志码:** A

Study on drought resistance, hydrotropism and anatomic structure of root system of maize inbred lines with different genotypes

JIANG Qi-feng, YUN Hai-yan

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To study the different changes in root morphology, physiology and biochemistry, anatomic structure of maize inbred lines with different genotypes at the seedling stage under dry stress, to provide reference index and method for screening of drought resistant maize germplasms, and also to investigate the genetic mechanism of drought resistance for inbred lines at the seedling stage, this research was carried out. 14 maize inbred lines were employed by PEG-6000 stress treatment to determine 13 indexes which are closely related to morphological and physiological and biochemistry characteristics of drought resistance for root of maize inbred lines at the seedling stage. Through the analyses of variance, correlation and cluster, a comprehensive evaluation on the drought resistance of different maize genotypes was carried out, and two obvious differences inbred lines in drought resistance were selected for further observation on the differences in root structure by paraffin section and microscope. Under drought stress, root dry mass per plant, shoot dry mass per plant, root length, root diameter, number of lateral roots, root elongation rate, root dehydration rate, and root reducing capacity of different maize inbred lines at the seedling stage showed a trend of becoming declined at varying degrees. Sol-

收稿日期: 2015-05-29

基金项目: 陕西省攻关项目(2014K02-01-01)

作者简介: 蒋奇峰(1989—), 男, 硕士研究生, 从事玉米遗传育种研究。E-mail: jqf1827@163.com。

通信作者: 员海燕(1960—), 女, 教授, 主要从事玉米遗传育种研究。E-mail: haiyan60@126.com。

uble sugar content and proline content in roots showed a trend of being increased at varying degrees, and had obvious variations in different inbred lines. With the increase of the slope angle, root hydrotropism of different inbred lines was increased, and had obvious differences between different inbred lines. Under the condition of high humidity gradient, root hydrotropism of Mo17 was increased by 134%, which was the biggest among all, and that of WN897 was increased by 20%, which was increased less. Using weighted drought index, a comprehensive evaluation of drought resistance of different genotype maize inbred lines was given and 14 inbred lines were classified into four groups including strong drought resistant, moderate drought resistant and drought sensitive, and drought highly sensitive ones. According to the results of paraffin sections, cultivars showing significant variations in drought resistance had obvious different root system structures. The ratio of root cortex width to root diameter of the drought resistant inbred line Chang 7-2 was lower than that of the non-drought resistant inbred line WN897 that also had larger root vessel diameter. Through the combination of the methods including the analysis of variance, correlation analysis and cluster analysis, an evaluation on drought resistance of different maize inbred lines at seedling stage was given, which can better reveal the relationship between root traits and drought resistance. Root reducing capacity, soluble sugar content, root length, and root hydrotropism were sensitive to drought stress than other indexes, which can serve as the prior identification indexes for drought resistant ability and breeding selection for drought resistant inbred line. Under drought stress, the differences in root anatomy between maize inbred lines were significant. In the seedling stage, the root cortex width of the strong drought resistance was small, and the ratio of root cortex width to root diameter was lower, and the root vessel diameter was higher than the drought sensitive inbred lines.

Keywords: maize inbred line; root system; seedling stage; root hydrotropism; anatomic structure; drought resistance

玉米的根系是吸收水分、养分的主要器官,苗期是玉米根系生长的初始阶段,此时遭遇干旱胁迫,对玉米的产量影响较大。因此,研究玉米苗期根系变化对揭示玉米的抗旱机制,以及玉米的稳产高产具有重要的意义^[1-9]。水分胁迫下,玉米的根系通过改变自身的形态结构及干物质的积累量,从而应对干旱胁迫。因此,根系特征作为抗旱性鉴定的重要指标已得到广泛的认同^[7,9-13]。对于玉米苗期根系性状与抗旱性的关系,前人已做过大量研究^[14-15],然而很少有学者研究根系的向水性弯曲程度与抗旱性的关系,以及将 13 个根系指标结合起来,从形态上、生理生化上综合研究其抗旱性。本研究以 14 个玉米自交系为材料,测定了不同浓度 PEG-6000 处理下的苗期单株根干质量、单株地上部干质量、根冠比、单株总生物量、根系长度、根直径、侧根数、根伸长速率、根失水率、根系可溶性糖、脯氨酸、根系还原力和根向水性等 13 个根系形态、生理生化指标,计算各形态、生理指标的抗旱指数,并对 14 个玉米自交系进行关联度分析、聚类分析和抗旱性综合评价^[16],再根据评价结果选择各抗旱类别典型自交系,对其进行解剖学观察,通过形态学、解剖学不同层面观察研究水旱条件对不同玉米自交系根系发育的影响,以期揭示不同基因型玉米自交系根系对旱胁迫的响应和适应性,为研究玉米的抗旱机制及建

立抗旱性鉴定指标体系提供理论支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用的材料 PH4CV、PH6WC、WN44、WN75、Mo17、郑 58、昌 7-2、天 4、武 109、138、WN 104、WN 180、803、WN897 共 14 个自交系,材料均由西北农林科技大学农学院提供。

1.2 幼苗的培养

筛选大小一致的种子,并用酒精、蒸馏水清洗后用于培养幼苗,每个材料至少 30 粒种子。一部分进行根向水性试验,每个材料 10 个重复,取其平均值;一部分在长至三叶一心时用 15% PEG-6000 处理,蒸馏水作对照,处理后第 7 天选生长一致的 5 株测定单株根干质量、单株地上部干质量、根冠比、单株总生物量、根系长度、根直径、侧根数、根伸长速率、根失水率,根系可溶性糖、脯氨酸、根系还原力,取 5 株平均值。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 根系向水性的测定 根向水性弯曲测定参照胡田田^[12]等的方法。选取根系较直,且根长为 1.0 ± 0.2 cm 左右的发芽种子,将根系紧贴 40° 、 60° 的向水性诱导物表面,以饱和 K_2CO_3 溶液控制室内空气湿度,从而改变根尖周围的湿度梯度,在 $25^\circ C$

温度条件下培养 10 h,利用量角尺测定根系的向水性弯曲度。

1.3.2 苗期根系形态、生理指标的测定 采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系还原力^[17]。将冲洗干净的根和地上部分分开,在恒温箱中 105℃杀青 15 min,85℃烘干至恒重,取出后分别称量根和地上部分的质量,计算其质量比。用直尺测量根系长度,用游标卡尺测量根直径。测定 25℃,10 h 内根系的延伸生长长度,计算根系的平均生长速率,即根系伸长速率^[12]。失水速率 = $(FW1 - FW2)/(FW1 - DW)$,FW1:根系鲜样质量,FW2:根系鲜样 3 h 后的质量,DW:根干重^[18]。用蒽酮比色法测定根系可溶性糖含量^[17]。用磺基水杨酸法测定根系脯氨酸含量^[17]。

1.3.3 苗期根系解剖结构观察 采用常规石蜡切片,番红染色,中性树胶封片。在光学显微镜 40 倍光镜下观察根系横切面,观察照相并记录结果。并用显微图像处理软件 image pro plus 6.0 测量皮层厚度、皮层面积占根系面积比值、根系导管直径。

1.4 统计分析

利用 Excel 2007 和 SPSS 22.0 软件进行数据的统计分析、关联度分析和聚类分析,SigmaPlot12.3 进行作图分析。计算抗旱系数、抗旱指数、隶属函数值、抗旱性量度值,对抗旱性量度值进行聚类分析,划分抗旱级别^[19-22]。涉及的计算公式如下:

$$\text{各指标抗旱系数 } PI = X_s / X_c \quad (1)$$

$$\text{抗旱指数 } DI = (X_s / \bar{X}_s) \times PI \quad (2)$$

$$\text{隶属函数 } \mu(x) = \frac{PI - PI_{i\min}}{PI_{i\max} - PI_{i\min}} \quad (3)$$

抗旱性量度值

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(x) \times (|r_i| \div \sum_{i=1}^n |r_i|)] \quad (4)$$

$$X'_i(k) = [X_i(k) - \bar{X}_i] / S_i \quad (5)$$

关联系数 $\xi_i(k) =$

$$\frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (6)$$

$$\text{关联度 } r_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i(k) \quad (7)$$

式中, X_s 和 X_c 分别为干旱胁迫和对照下各材料各指标的测定值, \bar{X}_s 为该指标在干旱胁迫下的平均值; $PI_{i\min}$ 、 $PI_{i\max}$ 为各性状抗旱系数的最小值和最大值; r_i 为各性状与综合抗旱指数的相关系数。 $X'_i(k)$ 、 $X_i(k)$ 、 \bar{X}_i 和 S_i 分别为数据无量纲处理后的结果、各材料各指标的干旱胁迫下的测定值、同一指标的平均值和标准差, $X_0(k)$ 为参考数列。 ρ 为分辨系数,取值为 0.5。

2 结果与分析

2.1 各指标的方差分析

表 1 所示的方差分析结果表明,自交系间 13 个性状都达到了极显著水平,说明在正常或干旱胁迫条件下,各性状在自交系间变化较大。各性状在处理间的差异都达到了极显著水平,显示苗期玉米对干旱胁迫比较敏感。各性状在自交系与处理间的交互作用总体达极显著水平,说明不同自交系对干旱胁迫的敏感程度不同。

表 1 不同自交系苗期根系 13 个指标的方差分析

Table 1 Variance analysis of 13 indexes among different inbred lines and treatments

变异来源 Variance source	单株根干质量 Root dry mass per plant	单株地上部干质量 Shoot dry mass per plant	根冠比 Root to shoot ratio	单株总生物量 Total biomass per plant	根系长度 Root length	根直径 Root diameter	侧根数 Number of lateral roots	根伸长速率 Root elongation rate	根系失水率 Root dehydration rate	根系可溶性糖 Soluble sugar content of roots	根系还原力 Root reducing capacity	脯氨酸 Proline content of root	根向水性 Root hydrotropism bending
自交系 Inbred line	217.57**	38.38**	101.87**	34.45**	40.74**	148.05**	28.04**	74.63**	19.5**	430.72**	174.25**	2320.66**	18.75**
水旱处理 Treatment	976.42**	949.47**	287.25**	1097.41**	212.77**	211.94**	166.28**	466.8**	381.63**	22026.6**	631.67**	178418**	1981.26**
自交系 × 水旱处理 Inbred line × Treatment	64.52**	3.2**	14.9**	6.05**	4.09**	2.71*	9.98**	1.98*	8.57**	252.49**	10.85**	2197.13**	7.15**

注:“*”表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著,“**”表示在 $P < 0.01$ 水平下差异显著。

Note: “*” mean the difference was significant at the level of $P < 0.05$, and “**” mean the difference was significant at the level of $P < 0.01$.

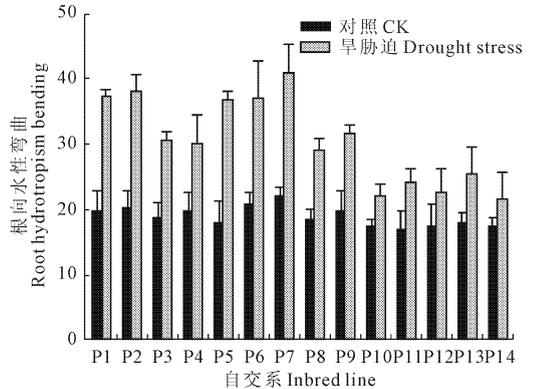
2.2 干旱胁迫对不同玉米自交系苗期根系形态的影响

由表 2 可知, 14 份玉米自交系的单株根干质量、单株地上部分干质量、根冠比、单株总生物量、根系长度、根直径、侧根数等根系形态指标的抗旱系数差异明显, 在干旱胁迫下, 14 份玉米自交系的单株根干质量、单株地上部分干质量、单株总生物量、根系长度、根直径总体不同程度降低, 根冠比、侧根数不同程度升高, 但因材料不同, 变化的幅度不同, PH4CV、PH6WC、昌 7-2、郑 58、WN75、WN44 根干质量变化幅度不大, 武 109 根干质量略有上升, 天 4、WN104、138、WN897 根干质量下降明显。WN897、WN180、武 109 单株地上部分干质量较其他自交系下降明显, 差异显著。武 109、PH6WC、郑 58、WN44、WN180 根冠比较其他自交系升高幅度大, 差异显著。单株总生物量总体降低, 其中 138、WN180、WN897 降幅较大。侧根数总体增加, 武 109 增加幅度最大, 差异明显, WN897、天 4、138 增加不明显, 且 WN180 侧根数较对照出现下降情况。根系长度总体降低, 其中 WN897、WN104、803 降幅较大。根直径总体变小, Mo17 的降幅最大, 差异显著。

2.3 干旱胁迫对不同玉米自交系苗期生理特性的影响

由图 1 可知, 在饱和 K_2CO_3 溶液形成的湿度梯

度条件下, 14 份玉米自交系的根向水性弯曲幅度较对照均不同程度增加。高湿度梯度条件下, 自交系 Mo17 向水性弯曲较对照增加 134%, 增加幅度最大, PH4CV、PH6WC、昌 7-2、郑 58 向水性弯曲增加 80% 左右, 增加幅度较大, WN44、武 109、天 4、WN75 增加 60% 左右, 138、WN104、803、WN180 的向水性弯曲增加在 40% 左右, WN897 向水性弯曲增加 20%, 增加幅度较小。



注: P1 ~ P14 依次是 PH4CV、PH6WC、WN44、WN75、Mo17、郑 58、昌 7-2、天 4、武 109、138、WN104、WN180、803、WN897。下同。

Note: P1 ~ P14 is PH4CV, PH6WC, WN44, WN75, Mo17, Zheng 58, Chang 7-2, Tian4, Wu109, 138, WN104, WN180, 803, WN897. The same below.

图 1 不同湿度梯度条件下根向水性弯曲程度变化情况

Fig. 1 Changes of root hydrotropism under different moisture gradients

表 2 不同自交系苗期根系形态指标抗旱系数

Table 2 Drought resistance coefficients of root morphological indexes of different inbred lines at the seedling stage

自交系 Inbred line	单株根干质量 Root dry mass per plant	单株地上部干质量 Shoot dry mass per plant	根冠比 Root to shoot ratio	单株总生物量 Total biomass per plant	根系长度 Root length	根直径 Root diameter	侧根数 Number of lateral roots
PH4CV	0.9459bA	0.7976aA	1.206bG	0.8197aA	0.8961cB	0.9398deCD	1.7631bB
PH6WC	0.9913abA	0.6875deCDE	1.4354bB	0.7581cC	0.8635fD	0.9832aA	1.3378eD
WN44	0.908cB	0.657efDEF	1.3762dD	0.7114dDE	0.8743deBC	0.8779fEF	1.4856dC
WN75	0.9143cB	0.6987bcBC	1.3108eE	0.7356cCD	0.9782aA	0.9424bcdBC	1.5432cC
Mo17	0.8974cB	0.7043bB	1.259gF	0.7483cC	0.9599bA	0.8398gG	1.2209fE
郑 58 Zheng 58	0.9822abA	0.6894cdBC	1.421cC	0.7649cC	0.9102cdB	0.9307cdBCD	1.1407fgEF
昌 7-2 Chang 7-2	0.9807abA	0.768aA	1.2912fEF	0.8038bB	0.8149gE	0.9498abAB	1.6676bB
天 4 Tian 4	0.7046eDE	0.6852cdCD	1.0288jI	0.6796efG	0.8751efCD	0.913deCDE	1.1247gEF
武 109 Wu 109	1.0161aA	0.6172gG	1.6521aA	0.6813eEF	0.958bA	0.9346bcdBC	1.9268aA
138	0.6198fF	0.6321fFG	0.973kJ	0.6285gH	0.7978ghEF	0.9297bcdBC	1.074gF
WN104	0.7054eE	0.6355fFG	1.0957iH	0.6493fgGH	0.776iF	0.9342bcBC	1.1298fgEF
WN180	0.7449dC	0.548hH	1.3688dD	0.5957hI	0.7962hiEF	0.9123deCDE	0.8698hG
803	0.7483dCD	0.6574fEF	1.1285iH	0.6666efFG	0.7397jG	0.8985efDEF	1.1405fgEF
WN897	0.529gG	0.5429hH	0.9943kJI	0.5389iJ	0.7769iF	0.8667fF	1.1222gEF

注: a~z 表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著, A~Z 表示在 $P < 0.01$ 水平下差异显著。

Note: a~z mean the difference was significant at the level of $P < 0.05$, and A~Z mean the difference was significant at the level of $P < 0.01$.

由图 2 可知在干旱胁迫下 803、WN104、WN180、WN897 根系伸长速率降低比较明显, PH4CV、昌 7-

2、郑 58、PH6WC、天 4 根系伸长速率降低较小。在根系失水速率方面 Mo17、PH4CV、昌 7-2、郑 58、

WN44、武 109 降幅较大, WN897、138、803 降幅较小。
 2.4 干旱胁迫对不同玉米自交系苗期根系生化特性的影响

由图 3 可知, 干旱条件下, 根系还原力不同程度下降, PH4CV、PH6WC、WN44、郑 58 下降不明显,

WN104、803、WN897 降幅较大。可溶性糖、脯氨酸含量显著升高, 且材料间有差异, 803、PH6WC、WN75 根系可溶性糖增幅较大, 武 109、Mo17、WN44 增幅较小。WN44、昌 7-2 脯氨酸含量增幅较大, 803、WN104、WN897 增幅较小。

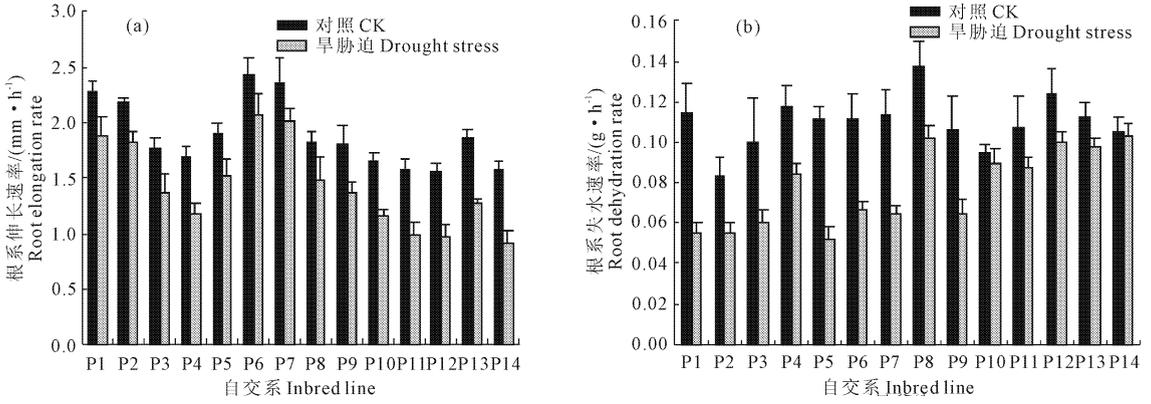


图 2 干旱胁迫下根系伸长速率和根系失水速率变化情况

Fig.2 Root elongation rates and root dehydration rates under drought stress

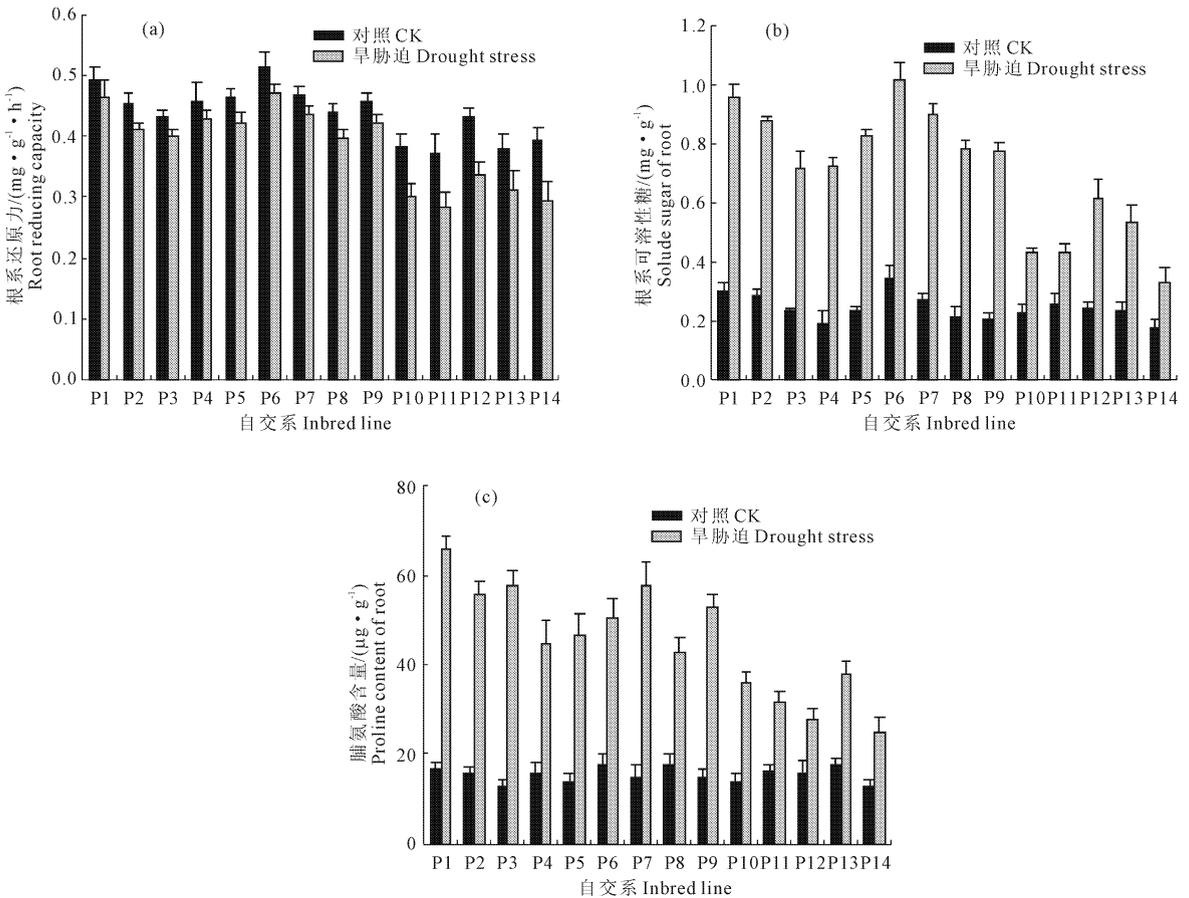


图 3 干旱胁迫下根系还原力、根系可溶性糖、根系脯氨酸含量变化情况

Fig.3 Changes of root reducing capacity, proline content of root, and soluble sugar content in roots under drought stress

2.5 关联度分析

将综合抗旱指数(抗旱指数的平均值)作为参考

数列,各指标原始数据经公式(5)标准化处理后的值为比较数列,建立灰色系统^[20]。各指标与其综合抗

旱指数的关联度计算结果如表 3。由表 3 可看出,在干旱胁迫条件下,13 个指标与综合抗旱指数的密切程度(关联序)从大到小的顺序为:根系还原力、根向水性、根伸长速率、单株根干质量、侧根数、根系长

度、根系可溶性糖、单株总生物量、单株地上部干质量、根直径、脯氨酸、根冠比、根系失水率。可见,在干旱胁迫下,总体表现出根系还原力、根向水性、根伸长速率受影响大。

表 3 各指标与综合抗旱指数关联度及关联序

Table 3 Correlation degrees and correlations between different parameters and comprehensive drought-resistance indexes (DI)

项目 Item	单株根干质量 Root dry mass per plant	单株地上部干质量 Shoot dry mass per plant	根冠比 Root to shoot ratio	单株总生物量 Total biomass per plant	根系长度 Root length	根直径 Root diameter	侧根数 Number of lateral roots	根伸长速率 Root elongation rate	根系失水率 Root dehydration rate	根系可溶性糖 Soluble sugar content of roots	根系还原力 Root reducing capacity	脯氨酸 Proline content of root	根向水性 Root hydrotropism bending
关联度 Correlation degree	0.8307	0.7856	0.7648	0.8256	0.7844	0.7797	0.8628	0.877	0.5379	0.7984	0.9590	0.7707	0.9527
关联序 Correlative order	4	9	12	8	6	10	5	3	13	7	1	11	2

2.6 苗期根系的抗旱性聚类分析

利用相关分析计算各性状与综合抗旱指数的相关系数,利用公式(3)计算出各材料的隶属函数值。再根据公式(4)计算抗旱性量度值 D , 然后根据 D 值大小对供试自交系进行抗旱性排序。由表 4 可知, D 值越大表示抗旱性越强,最后对 D 值进行聚类分析,划分抗旱级别(图 4)。

表 4 供试自交系抗旱性排序

Table 4 Order of drought resistance of tested inbred lines

自交系 Inbred line	D 值 D value	排序 Ranking	抗旱性等级 Drought-resistance grade
PH4CV	0.7096	3	强抗 Strongest
PH6WC	0.6421	5	强抗 Strongest
WN44	0.6024	7	中抗 Medium
WN75	0.6090	6	中抗 Medium
Mo17	0.6741	4	强抗 Strongest
郑 58 Zheng 58	0.7741	2	强抗 Strongest
昌 7-2 Chang 7-2	0.7852	1	强抗 Strongest
天 4 Tian 4	0.5296	9	中抗 Medium
武 109 Wu 109	0.5617	8	中抗 Medium
138	0.3077	11	早敏 Weaker
WN104	0.2839	13	早敏 Weaker
WN180	0.3035	12	早敏 Weaker
803	0.3597	10	早敏 Weaker
WN897	0.1014	14	高敏 Weakest

将 14 个材料聚为 I、II、III、IV 4 类,分别为强抗旱型、中抗旱型、早敏感型和高早敏感型。聚入 I 类的主要有昌 7-2、郑 58、PH4CV、Mo17、PH6WC,聚入 II 类的主要有 WN75、WN44、武 109 和天 4,聚入 III

类的主要有 803、138、WN180、WN104,聚入 IV 类的有 WN897。在计算所得的各指标和综合抗旱指数关联度的基础上,利用关联度计算各指标的权重。再用各指标的权重分别与各材料各指标的综合抗旱指数相乘,对各相乘结果求和,得到各材料的加权抗旱指数^[20]如表 5 示。加权抗旱指数越高抗旱性越强。

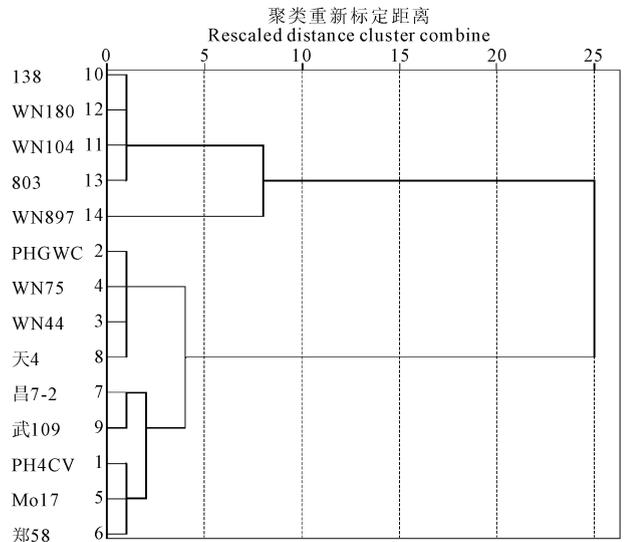


图 4 聚类图

Fig.4 Clustering dendrogram

2.7 干旱胁迫对不同抗旱型玉米苗期根系解剖结构的影响

通过聚类分析结果选择抗旱性差异大的两个自交系昌 7-2、WN897,对其根系水旱条件下解剖结构进行观察,由表 6 可知,干旱条件下玉米苗期根系皮层厚度减小;皮层占根系直径比例下降,根系导管直径下降,抗旱性自交系昌 7-2 皮层占根系直径比例

较低,不抗旱自交系 WN897 皮层占根系直径比例大于昌 7-2,且 WN897 的导管直径较大。王周锋^[23]研究表明根系皮层面积占根系面积的比例越小,根系水流导度就越大,在干旱条件下,根导管直径越小越有利于根的水流导度。由此可知,在干旱胁迫条件下,在解剖结构方面,昌 7-2 在根系吸水方面、根水流导度方面较 WN897 有优势,WN897 根系解剖结构不利于根系的吸水。

表 5 各自交系加权抗旱指数

Table 5 Weighted drought-tolerance indexes of tested inbred lines

自交系 Inbred line	加权抗旱指数 Weighted drought-tolerance index	位次 Rank
PH4CV	1.4286	3
PH6WC	1.3872	4
WN44	1.2936	6
WN75	1.1722	8
Mo17	1.3136	5
郑 58 Zheng 58	1.5789	1
昌 7-2 Chang 7-2	1.5745	2
天 4 Tian 4	1.1384	9
武 109 Wu 109	1.2560	7
138	0.7046	12
WN104	0.6708	13
WN180	0.7703	10
803	0.7582	11
WN897	0.5106	14

表 6 旱胁迫对玉米自交系苗期根系解剖结构的影响

Table 6 Effects of drought stress on microstructure of maize inbred lines at the seedling stage

自交系 Inbred line	皮层厚度/ μm Root cortex width		皮层占根系直径比例/% Ratio of root cortex width to root diameter		导管直径/ μm Root vessel diameter	
	正常 Control	胁迫 Stress	正常 Control	胁迫 Stress	正常 Control	胁迫 Stress
昌 7-2 Chang 7-2	183.5 \pm 20.222	144.7 \pm 10.637	0.609 \pm 0.035	0.342 \pm 0.009	57.2 \pm 0.512	42.7 \pm 0.719
WN897	262.5 \pm 11.089	206.4 \pm 11.199	0.528 \pm 0.058	0.537 \pm 0.046	46.7 \pm 0.773	48.9 \pm 1.261

因此,采用综合抗旱系数、抗旱指数、聚类分析、灰色关联度等相结合的方法对玉米苗期抗旱性进行评估,可以较好地揭示指标性状与抗旱性的关系,该方法也可用于其他作物的抗旱性评价。植物抗旱性是一个复杂的生理过程,采用多指标的综合鉴定评价,其结果更加真实有效。本研究分析了在干旱胁迫下各自交系苗期的单株根干质量、单株地上部干质量、根系长度、侧根数、根直径、根伸长速率、根系失水率,根系可溶性糖、脯氨酸、根系还原力、根向水性弯曲变化趋势和幅度。结果显示,14 份玉米自交系在高湿度梯度条件下根向水性弯曲幅度较对照均不同程度增加,这与胡田田^[12]的研究结果一致,且抗旱性强的玉米根向水性弯曲幅度较大。干旱胁迫

3 讨论

在育种实践中,干旱是一个复杂的生理生化过程,容易受包括干旱时期、持续时间、胁迫强度、土壤类型、肥力、光照、大气温度与湿度,试验基地间生态条件差别大等多因素影响^[24]。前人研究表明,用 PEG 作为渗透剂进行干旱模拟可代替土壤水分胁迫处理,获得比较可靠的结果^[25]。有关玉米苗期抗旱性指标的研究已有多篇报道,如叶片水势、叶片相对含水量、叶片膨压、离体叶片抗脱水能力、渗透调节能力、ABA 积累能力等^[26]。作物的抗旱性是复杂的数量性状,指标的合理选择是抗旱性鉴定的关键。本研究以玉米苗期根系相关性状,利用隶属函数法、相关分析法得到抗旱性度量值 D 。由于 D 值既考虑了各指标间的相互关系,又考虑到各指标的重要性,根据 D 值的大小可以较准确地评价玉米萌发到苗期的抗旱性,同时用聚类分析法将参试的自交系聚为不同的类别,每类代表不同的抗旱级别。该方法已在胡麻^[19]、小麦^[20]、油菜^[21]等作物上应用,取得了比较理想的结果。另外,本研究将综合抗旱指数和干旱胁迫下的 13 个指标视为一个整体,利用灰色关联度分析进行玉米苗期抗旱性评价,结果显示灰色关联分析和抗旱性度量值分析有较强的一致性。

下,14 份玉米自交系的单株根干质量、单株地上部分干质量、单株总生物量、根系长度、根直径、侧根数总体不同程度降低,根冠比不同程度升高,这与马旭凤^[7]研究结果一致,但各自交系的变化情况不同,抗旱性强的自交系地上部分干重受抑制强于根干质量,侧根数也较抗旱性弱的自交系增加幅度大。干旱胁迫下抗旱性强的自交系根系伸长速率降低幅度小,根系失水速率降低幅度大,根系还原力下降幅度小,可溶性糖、脯氨酸含量显著升高。这与刘胜群^[11]、谢小玉^[21]的研究结果一致,它们的变化幅度与抗旱性密切相关,表明在抵御干旱胁迫引起的伤害中脯氨酸、可溶性糖发挥了十分重要的作用。通过对抗旱性不同自交系的解剖结构观察发现干旱条

件下抗旱性玉米自交系苗期根系皮层厚度较小;皮层占根系直径比例较低,根系导管直径也较不抗旱自交系小,这与王周锋^[23]研究结果一致。

4 结 论

结合抗旱指数、关联度分析、聚类分析等方法,对 14 个玉米自交系苗期根系相关性状的抗旱性进行评估发现,根系还原力、根系可溶性糖、根系长度、根向水性对干旱胁迫的反应较其他指标敏感,可作为玉米苗期的抗旱能力和抗旱自交系选育时优先考虑指标。在对抗旱性不同自交系解剖结构观察发现强抗旱型自交系苗期根系皮层厚度较小,皮层占根系直径比例较低,根系导管直径也较高旱敏感型自交系小。这一结果可进一步从解剖结构上为苗期玉米根系抗旱提供理论基础。

参 考 文 献:

- [1] Sharp R E. Root growth maintenance during water deficits: Physiology to functional genomics[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004,55: 2343-2351.
- [2] 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 and Soil*, 2003,255:157-167.
- [3] 李 博,王刚卫,田晓莉,等.不同干旱方式和干旱程度对玉米苗期根系生长的影响[J].*干旱地区农业研究*,2008,26(5):148-152.
- [4] 杨国虎,李建生,罗湘宁,等.干旱条件下玉米叶面积变化及地上干物质积累与分配的研究[J].*西北农林科技大学学报*,2005,33(5):27-32.
- [5] 韩希英,宋凤斌.干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响[J].*水土保持学报*,2006,20(3):170-172.
- [6] Tuberosa R, Sanguineti M C, Landi P, et al. Identification of QTLs for root characteristics in maize grown in hydroponics and analysis of their overlap with QTLs for grain yield in the field at two regimes[J]. *Plant Molecular Biology*, 2002,48:697-712.
- [7] 马旭凤,于 涛,汪李宏,等.苗期水分亏缺对玉米根系发育及解剖结构的影响[J].*应用生态学报*,2010,21(7):1731-1736.
- [8] 王晓磊,于海秋,夏 乐,等.干旱胁迫下不同耐旱性玉米自交系根形态特性差异[J].*现代农业科学*,2008,15(12):17-19.
- [9] 韩希英,宋凤斌.干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响[J].*水土保持学报*,2006,20(3):170-172.
- [10] 高世斌,冯质雷,李晚忱,等.干旱胁迫下玉米根系性状和产量的 QTLs 分析[J].*作物学报*,2005,31(6):718-722.
- [11] 刘胜群,宋凤斌.不同耐旱基因型玉米根系生理性状研究[J].*浙江大学学报(农业与生命科学版)*,2007,33(4):407-412.
- [12] 胡田田,牛晓丽,漆栋良,等.玉米初生根向水性诱导优化试验研究[J].*生态学报*,2015,35(6):1-11.
- [13] Krasensky J, Jonak C. Drought, salt, and temperature stress-induced metabolic rearrangements and regulatory networks[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012,63(4):1593-1608.
- [14] Bruce W B, Edmeades G O, Barker T C. Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002,53:13-25.
- [15] 降云峰,马宏斌,刘永忠,等.玉米抗旱性鉴定指标研究现状与进展[J].*山西农业科学*,2012,40(7):800-803.
- [16] 赵小强,彭云玲,李健英,等.16 份玉米自交系的耐盐性评价[J].*干旱地区农业研究*,2014,32(5):40-45.
- [17] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [18] 刘胜群,宋凤斌,周 璇.玉米植株叶片和根系的抗旱性差异分析[J].*干旱地区农业研究*,2010,28(4):54-58.
- [19] 祁旭升,王兴荣,许 军,等.胡麻种质资源成株期抗旱性评价[J].*中国农业科学*,2010,43(15):3076-3087.
- [20] 王士强,胡银岗,余奎军,等.小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析[J].*中国农业科学*,2007,40(11):2452-2459.
- [21] 谢小玉,张 霞,张 兵.油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析[J].*中国农业科学*,2013,46(3):476-485.
- [22] 史向远,李永平,周 静,等.旱地玉米种植密度与产量及农艺性状的相关和灰色关联度分析[J].*玉米科学*,2012,20(6):94-97.
- [23] 王周锋,张岁岐,刘小芳.玉米根系水流导度差异及其与解剖结构的关系[J].*应用生态学报*,2005,16(12):2349-2352.
- [24] 韩登旭,杨 杰,邵红雨,等.中国骨干玉米自交系抗旱性分析与评价[J].*西北植物学报*,2012,32(8):1648-1653.
- [25] 张 磊,耿立格,王丽娜,等.不同玉米自交系萌芽期的抗旱性研究[J].*玉米科学*,2010,18(4):77-81.
- [26] 武 斌,李新海,肖木辑,等.53 份玉米自交系的苗期耐旱性分析[J].*中国农业科学*,2007,40(4):665-676.