

孕穗期甜高粱耐盐性综合评价

袁 闯¹,陆安桥¹,朱 林^{2,3},许 兴^{1,2}

(1.宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,宁夏 银川 750021;
3.宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地,宁夏 银川 750021)

摘 要:选取 22 个甜高粱品种为试验材料,设轻度盐碱地(土壤全盐含量为 0.589 g · kg⁻¹,pH 8.42)和重度盐碱地(土壤全盐含量为 5.448 g · kg⁻¹,pH 9.23)2 个处理,测定孕穗期株高(PH)、茎粗(CD)、叶面积(LA)、相对叶绿素含量(SPAD)、净光合速率(Pn)及产量(Y)等 15 项指标。以各项指标的耐盐系数为依据,采用相关性分析、主成分分析、隶属函数和聚类分析等方法,对孕穗期不同甜高粱品种耐盐性进行了综合评价和分类。结果表明,与轻度盐碱胁迫相比,重度盐碱胁迫下各品种 PH、CD、LA 和 SPAD 等指标极显著降低;相关性分析表明,PH 与 Tr 达到显著负相关,与 Pn、Gs 达到显著正相关;CD 与 Pn 达到显著正相关;LA 与 F_v/F_m、F_v/F₀、F_m达到极显著正相关;PWC 与 F_v/F_m达到显著正相关;Pn 与 Tr 达到显著负相关,与 Gs 达到极显著正相关;F_v/F_m与 F_v/F₀、F_m达到极显著正相关;F_v/F₀与 F_m达到极显著正相关,与 Y 达到显著正相关。聚类分析将 22 个甜高粱品种分为 5 类:第Ⅰ类为 2 个高度耐盐型品种;第Ⅱ类为 5 个中度耐盐型品种;第Ⅲ类为 5 个耐盐型品种;第Ⅳ类为 7 个敏感型品种;第Ⅴ类为 3 个高度敏感性品种。筛选出高度耐盐型品种为 F6059 和 F6043,高度敏感型品种为 F6372、F6229 和 F6271。

关键字:甜高粱;孕穗期;耐盐性;综合评价
中图分类号:S514;S503.4 **文献标志码:**A

Comprehensive evaluation of salt tolerance of
sweet sorghum at booting stage

YUAN Chuang¹, LU Anqiao¹, ZHU Lin^{2,3}, XU Xing^{1,2}

(1. College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
2. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest, Ministry of Education China
of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
3. State Key Laboratory Breeding Base of Land Degradation and Ecological Restoration of Northwest China,
Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Twenty two of sweet sorghum varieties were selected as test materials, and two soils, mild saline-alkali soil (0.589 g · kg⁻¹ salt content, pH 8.42) and heavy saline-alkali soil (5.448 g · kg⁻¹ salt content, pH 9.23), were used in this experiment. Fifteen indicators including plant height (PH), stem diameter (SD), leaf area (LA), relative chlorophyll content (SPAD), net photosynthetic rate (Pn) and yield (Y) were determined at booting stage. Based on the salt tolerance coefficient of each index, correlation analysis, principal component analysis, membership function and cluster analysis were used to comprehensively evaluate and classify the salt tolerance of different sweet sorghum varieties at booting stage. The results showed that compared with mild saline-alkali stress, the indexes of PH, CD, LA and SPAD were significantly decreased under severe saline-alkali stress. Correlation analysis indicated that PH was significantly and negatively correlated with Tr but positively correlated with Pn and Gs, respectively. There were significant positive correlations between CD and Pn, PWC and F_v/F_m, and F_v/F₀ and Y. The LA had extremely significant positive correlation with F_v/F_m, F_v/F₀ and F_m. The F_v/F_m had extremely

significant positive correlation with F_v/F_0 and F_m . There were extremely significant positive correlations between Pn and G_s , and F_v/F_0 and F_m . There was significant negative correlation between Pn and Tr . Cluster analysis categorized 22 sweet sorghum varieties into 5 categories: Class I (2 highly salt-tolerant varieties), Class II (5 moderate salt-tolerant varieties), Class III (5 salt-tolerant varieties), Class IV (7 sensitive varieties), and Class V (3 highly sensitive varieties). The study selected two highly salt-tolerant varieties including F6059 and F6043, and selected three highly sensitive varieties including F6372, F6229 and F6271.

Keywords: sweet sorghum; booting stage; salt tolerance; comprehensive evaluation

全球有大量盐碱地,土地盐碱化程度日益加剧,据有关数据统计,我国盐渍化土壤大约 1.15×10^8 hm^2 ,占可用土地面积的 4.88%^[1-2]。土壤盐碱化严重抑制着农作物的发展,并造成了巨大的经济损失^[3]。盐碱地的利用主要集中在两方面,一方面是物理或者化学方法改良盐碱地,另一方面是利用生物改良盐碱地,后者成为近几年研究的热点^[4]。甜高粱(sweet sorghum)是一种重要的能源作物,具有高能、高生物产量和含糖量高等特点,同时还具有耐旱、耐盐、耐碱、耐涝和耐贫瘠等优良特性,享有沙漠中“骆驼”的美称^[5]。在宁夏银北平原存在大量的盐碱地,充分利用甜高粱生物改良银北平原盐碱地,具有重要的经济和生态价值^[6-7]。

目前,作物耐盐性研究多通过多项指标综合评价^[8]。张华文等^[9]研究指出,随着盐浓度的增加,高粱种子发芽率呈现下降趋势。朱元刚等^[10]研究指出,在不同盐胁迫条件下,高粱的农艺性状受到抑制,并且是浓度越高抑制现象越明显。孙璐等^[11]研究指出,在盐胁迫下,高粱的过氧化物和丙二醛含量会增加,在一定范围内随 NaCl 浓度增加而增加。孙璐等^[12]研究还指出,低浓度 NaCl 胁迫下,高粱幼苗叶绿素含量会增加,高浓度 NaCl 胁迫下,叶绿素含量会降低,净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、最大荧光、初始荧光等也会降低。因此,净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、最大荧光、初始荧光等是研究高粱耐盐性具有代表性的指标。对于植物耐盐性分析评价主要通过相关性分析、成分分析、模糊隶属函数和聚类分析等方法。

不同作物耐盐性不同,同一作物不同品种耐盐性也有差异,同一品种的作物不同生育期耐盐性也不一样。针对甜高粱而言,孕穗期是甜高粱生长旺盛和对外界不良环境敏感的时期,也是甜高粱耐盐性鉴定的主要时期。各生育期耐盐材料的筛选对甜高粱种植具有重要的意义^[13]。目前,有关孕穗期甜高粱田间耐盐性鉴定研究较少,主要集中在芽期、苗期盆栽和苗期水培等方面,并且室内试验条件与田间环境相差较大。植物耐盐鉴定是一个复

杂的过程,盐胁迫对于植物的影响持续整个生育期。刘妍妍等^[14]研究指出,盐胁迫对于作物生长发育的影响是一个极其复杂的过程,包含了一系列的生理生化反应,利用单一指标不能客观地反映作物的耐盐性,所以作物耐盐性方法的确定应该是多方面的。本试验对孕穗期不同甜高粱品种的耐盐性进行了综合评价和分类,旨在为甜高粱的大田耐盐性研究奠定基础 and 提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以 22 种不同基因型甜高粱为试验材料,材料由中科院遗传发育研究所提供,具体试验材料如表 1。

1.2 试验地概况

试验于 2018 年 4 月在银川市石嘴山平罗县高庄乡(东经 $106^{\circ}30'9''$,北纬 $38^{\circ}52'33''$)进行,试验田位于银川北部平原,海拔大约为 1 100 m,属于黄河冲积平原,气候属于中温带半干旱荒漠性气候。土壤盐碱化比较严重。春季播种时 0~40 cm 具体土壤理化性质如表 2 所示。

1.3 试验设计

试验采取单因素随机区组设计,选轻度盐碱地(土壤全盐含量为 $0.589\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 8.42)和重度盐碱地(土壤全盐含量为 $5.448\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 9.23)2 个试验处理。采用条播的播种方式,每个小区面积为 22 m^2 ($5\text{ m}\times 4.4\text{ m}$),宽窄行种植 8 行(宽行 70 cm,窄行 40 cm),平均行距为 55 cm,株距为 20 cm,小区间隔留 1 m 空行,采用 4~5 粒穴播,播种深度约为

表 1 供试材料品种
Table 1 Cultivars of test materials

编号 Number	品种 Cultivar	编号 Number	品种 Cultivar
1	F6172	12	F6059
2	F6043	13	F6080
3	F6229	14	F6141
4	F6271	15	F6018
5	F6180	16	F6056
6	F6372	17	F6138
7	F6096	18	F6199
8	F6386	19	F6017
9	F6099	20	F6027
10	F6106	21	F6306
11	F6036	22	F6137

表 2 样地土壤理化性质(0~40 cm)
Table 2 Soil physicochemical properties of plots

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen /(g · kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(g · kg ⁻¹)	全钾 Total potassium /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkli-hydrolyzable nitrogen /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 Rapidly available phosphorus (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Rapidly available potassium /(mg · kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)	pH
轻度盐碱地 Mild saline land	0.86	0.93	34.21	45.97	34.53	23.56	5.61	8.42
重度盐碱地 Severe saline land	0.93	0.53	36.51	48.49	45.34	26.07	6.71	9.43

3 cm;每个品种 3 个重复小区,2 块独立的试验田四周分别种植 2 m 保护行。播种前需要备种、整种、施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=20:15:15)270 kg·hm⁻²,整地耙平,播种时精选子粒饱满、大小基本一致的种子。在生育期内定期进行人工除草、灌水和施肥等管理。

1.4 测定指标及方法

于甜高粱孕穗期(7 月 27 日)各小区挑选 4 株长势基本一致植株测量以下指标:用卷尺测得从根基部到最高叶尖的长度为株高(PH);用游标卡尺测量地上茎基部的直径为茎粗(CD);用卷尺测量全株叶片长和宽,长为叶基部至叶尖部的距离,宽为叶片最宽部位,测量角度垂直于主叶脉,叶面积(LA)=长×宽×0.75^[14];采用 SPAD-plus 手持叶绿素计在田间测定顶部叶片叶绿素相对含量(SPAD),每个叶片分为前中后 3 个部分避开主叶脉进行测定;使用 LI-6400IT(LI-COR.USA)便携式光合仪,选择晴天,在上午 9:00—11:30 测量各小区叶片光合,测量选择植株最上部的刚刚完全展开叶片,记录净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、胞间二氧化碳浓度(Ci)、气孔导度(Gs)和大气二氧化碳浓度(Ca)等数据;采用 Pocket PEA 便携式植物荧光仪进行荧光参数测定,记录荧光参数初始荧光(F₀)、最大荧光(F_m)、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和 PS II 潜在光化学效率(F_v/F₀);植株含水量(PWC)及细胞膜透性(CMP)的测定按参考文献方法施行^[15],测量小区单位面积鲜株产量(kg·m⁻²)。

1.5 统计数据与分析

采用 Excel 2010 和 Spss 17.0 进行数据统计分析,计算平均数、标准差,并进行相关性分析、主成分分析、聚类分析等分析。利用隶属函数值对试验材料耐盐性进行综合评价,主要公式如下:

(1)各个指标耐盐系数(Salt Tolerance Coefficient, STC)

STC = 重度盐胁迫测量值/轻度盐胁迫测量值

(2)隶属函数值

$U(X_j) = ((X_j - X_{\min})) / ((X_{\max} - X_{\min}))$

式中,X_j表示第j个因子的得分值,X_{min}表示第j个因子最小得分值,X_{max}表示第j个因子最大得分值。

(3) 权重

$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$

式中,W_j表示第j个因子在所有公因子中的重要程度,P_j为品种第j个因子贡献率。

(4) 综合评价

$D_i = \sum_{j=1}^n [U(X_j)] \times W_j \quad (j = 1, 2, \dots, k)$

式中,D_i为试验材料孕穗期甜高粱耐盐性综合评价值,k为样品个数。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫下孕穗期甜高粱农艺性状的变化

由表 3 和表 4 可知,与轻度盐胁迫相比,重度盐胁迫对供试材料的农艺性状均产生显著影响。轻度盐碱胁迫下,F6199 的 PH 最低,F6229 的 PH 最高;F6096 的 CD 最小,F6106 的 CD 最大;F6229 的 LA 最小,F6306 的 LA 最大;F6106 的 SPAD 最小,F6372 的 SPAD 最大;F6372 单位面积鲜株产量(Y)最低,F6043 的 Y 最高。重度盐碱胁迫下,F6271 的 PH 最低,F6229 和 F6180 的 PH 最大;F6229 的 CD 最小,F6059 的 CD 最大;F6372 的 LA 最小,F6306 的 LA 最大;F6180 的 SPAD 最低,F6056 的 SPAD 最高;F6372 的 Y 最低,F6043 的 Y 最高。材料间和处理间差异均达显著水平。PH、CD、LA 和 Y 的变异系数在 0.067~0.449 之间,说明本试验选的材料具有较好的代表性,株高、茎粗、叶面积和产量对盐胁迫的反应敏感。另外,PH、CD、LA 和 Y 在轻度和重度盐胁迫下测量值的相关系数在 0.546~0.977 之间,说明 PH、CD、LA 和 Y 对盐胁迫敏感程度存在差异。

2.2 盐胁迫下孕穗期甜高粱生理性状及光合性能的变化

由表 3 和表 4 可知,与轻度盐胁迫相比,重度盐胁迫对供试材料的生理性状及光合性能产生了显著

表 3 轻度盐胁迫和重度盐胁迫条件下供试甜高粱材料各指标测定值

Table 3 Determination of various indexes of sweet sorghum materials tested under mild and severe salt stress conditions																															
品种 Cultivar	PH/cm		CD/mm		LA/cm ²		SPAD		细胞膜透 性 CMP/%		植株含水 量 PWC/%		Pn /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		Gs /(mol·m ⁻² ·s ⁻¹)		Tr /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		Ci/Ca				F _v /F _m				F ₀				产量 Y /(kg·m ⁻²)
	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	
F6172	203.33	185.33	316.4	23.06	14138.00	12707.75	5100	31.20	25.00	29.00	84.00	73.00	35.78	33.81	0.40	0.30	5.57	3.81	0.42	0.32	0.80	0.78	4.02	3.57	23537.67	21685.67	4762.00	5112.00	14.52	11.25	
F6043	185.00	180.33	250.9	20.99	14355.00	13119.00	5013	30.77	19.00	21.00	83.00	74.00	30.65	27.78	0.25	0.20	5.19	3.63	0.41	0.20	0.81	0.78	4.13	3.61	23775.67	22327.00	5278.00	6980.33	22.26	19.55	
F6229	263.67	206.67	206.5	15.74	12058.00	11462.25	5483	29.43	18.00	35.00	81.00	67.00	27.01	12.09	0.17	0.06	3.88	2.75	0.27	0.14	0.80	0.76	3.88	3.23	20231.00	20005.00	4423.33	4779.33	4.90	3.10	
F6271	170.33	112.33	307.1	18.14	14380.75	12423.50	4920	31.20	17.00	19.00	86.00	74.00	27.25	18.08	0.16	0.11	3.76	2.38	0.22	0.19	0.78	0.75	3.63	3.09	24460.00	21874.00	5042.67	5161.00	10.80	6.10	
F6180	278.00	206.67	209.3	18.34	12168.25	8446.75	5270	29.00	14.00	19.00	84.00	70.00	30.79	26.16	0.23	0.17	4.76	3.47	0.37	0.27	0.79	0.75	3.69	3.01	20633.00	15016.67	4721.00	5343.00	5.90	4.60	
F6372	234.33	180.00	218.1	19.05	13065.50	6622.75	5557	31.47	27.00	34.00	82.00	70.00	24.75	20.12	0.21	0.16	3.64	2.88	0.29	0.23	0.79	0.54	3.84	1.02	1952.67	14050.00	4943.33	4974.67	3.80	1.90	
F6096	209.00	172.67	207.1	18.59	13154.75	10870.75	4487	30.91	17.00	21.00	85.00	77.00	24.32	19.12	0.22	0.13	3.02	2.01	0.28	0.27	0.79	0.74	3.74	2.86	22249.33	19570.00	5583.33	6285.67	9.11	7.10	
F6386	222.33	166.00	227.8	19.04	12441.25	10304.25	4900	31.07	26.00	40.00	80.00	71.00	29.03	20.54	0.24	0.18	4.08	3.66	0.26	0.15	0.79	0.77	3.78	3.45	24991.33	22845.00	5831.33	6228.33	6.98	3.95	
F6099	173.33	163.67	295.3	21.77	14810.75	13337.00	4673	30.57	13.00	21.00	83.00	73.00	27.05	23.74	0.20	0.17	3.97	2.72	0.28	0.21	0.81	0.78	4.20	3.65	24446.00	22648.00	5088.67	6884.33	18.65	14.15	
F6106	178.67	170.33	326.9	18.78	13041.50	10743.75	4253	29.57	21.00	22.00	85.00	73.00	27.89	20.89	0.23	0.18	4.21	3.17	0.31	0.21	0.80	0.76	3.77	3.16	22007	18865.33	4457.33	5964.33	15.23	10.85	
F6036	175.67	162.33	307.3	19.17	12761.5	10471.00	5153	30.90	21.00	24.00	85.00	75.00	32.13	22.89	0.31	0.20	4.83	2.75	0.27	0.18	0.80	0.79	3.90	3.68	24392.67	22844.00	4543.33	5438.67	18.95	15.95	
F6059	162.00	157.67	294.5	28.14	14873.00	12804.00	4313	30.03	18.00	20.00	87.00	78.00	35.90	34.34	0.28	0.22	6.35	3.34	0.39	0.16	0.80	0.78	4.13	3.49	24631.00	21983.67	5089.67	5775.67	19.30	14.30	
F6080	164.67	150.67	315.3	24.56	14691.25	12080.50	4843	32.50	12.00	22.00	81.00	78.00	36.33	32.21	0.25	0.21	6.06	3.46	0.31	0.29	0.80	0.76	4.08	3.28	24387.00	21060.33	4599.67	5086.00	15.23	10.00	
F6141	170.00	140.67	305.0	27.99	13885.50	10936.50	4577	30.93	23.00	28.00	79.00	76.00	29.69	25.80	0.25	0.21	5.98	3.70	0.37	0.31	0.80	0.79	4.12	3.88	26011.00	23365.00	5046.33	5207.33	16.58	13.59	
F6018	216.00	162.00	284.8	25.24	13296.00	13003.00	4950	30.43	11.00	17.00	85.00	78.00	25.12	20.67	0.26	0.11	3.17	2.73	0.27	0.17	0.81	0.78	4.58	3.60	22687.67	22158.00	4409.00	4764.33	17.56	13.84	
F6056	191.67	157.00	303.8	22.48	14267.75	12153.50	4667	37.93	15.00	22.00	86.00	76.00	32.81	21.89	0.25	0.12	3.60	2.95	0.20	0.17	0.81	0.76	4.22	3.30	23530.67	21161.33	4636.67	5088.33	13.60	11.90	
F6138	171.00	139.67	293.7	21.77	13135.25	10702.25	4960	31.22	17.00	21.00	83.00	71.00	32.01	29.63	0.23	0.20	5.25	3.43	0.24	0.21	0.78	0.70	4.63	3.93	24334.67	22927.00	4933.67	6513.33	18.35	14.61	
F6199	141.67	129.00	271.1	22.83	13410.75	12936.50	4347	29.80	13.00	23.00	86.00	66.00	32.77	32.46	0.25	0.21	6.13	3.41	0.38	0.26	0.79	0.67	3.76	3.71	22656.33	21889.33	4711.00	4950.67	14.26	11.00	
F6017	178.67	153.67	270.7	21.66	12847.00	11579.25	4407	31.77	12.00	21.00	85.00	72.00	34.72	31.09	0.22	0.21	5.50	3.63	0.32	0.30	0.80	0.74	3.95	3.21	21472.67	20423.67	4661.33	6283.33	19.15	13.70	
F6027	142.67	139.00	280.6	21.93	13436.50	10784.00	4343	32.57	14.00	22.00	85.00	75.00	29.48	26.07	0.19	0.14	4.89	3.08	0.28	0.05	0.80	0.75	3.96	3.12	22427.00	19020.00	4784.67	4962.67	14.26	10.20	
F6306	151.33	138.67	326.4	20.89	15306.75	13885.75	4710	31.57	13.00	18.00	83.00	78.00	34.13	22.64	0.25	0.21	4.09	3.12	0.30	0.28	0.81	0.79	4.31	3.75	25133.67	23457.67	5655.67	6047.67	9.30	5.95	
F6137	181.00	163.33	204.8	17.23	13328.25	9699.50	4927	31.87	15.00	23.00	85.00	75.00	38.60	33.41	0.30	0.28	6.99	4.14	0.45	0.30	0.80	0.74	3.91	2.89	22318.00	17371.00	4899.33	5076.33	11.29	9.15	

注: PH:株高(cm);CD:茎粗(mm);LA:叶面积(cm²);SPAD:叶绿素相对含量;CMP:细胞膜透性;PWC:植株含水量;Pn:净光合(mol·m⁻²·s⁻¹);Gs:气孔导度(mol·m⁻²·s⁻¹);Tr:蒸腾速率(mmol·m⁻²·s⁻¹);Ci/Ca:初始荧光;F_p/F_o:PSII在化学效率;F_v/F_m:PSII最大化学效率;Y:单位面积鲜样产量(kg·m⁻²);CK:轻度盐胁迫;T:重度盐胁迫。下同。

Note: PH: Plant height(cm); CD: Culm diameter(mm); LA: Leaf area(cm²); SPAD: Relative content of chlorophyll; CMP: Cell membrane permeability; PWC: Plant water content; Pn: Net photosynthesis(mol·m⁻²·s⁻¹); Tr: Transpiration rate(mol·m⁻²·s⁻¹); Gs: Stomatal conductance(mol·m⁻²·s⁻¹); Ci/Ca: Potential chemical efficiency of PSII; Y: Fresh plant yield per unit area(kg·m⁻²); CK: Stands for mild salt stress; T: Stands for severe salt stress. The same below.

表 4 轻度盐胁迫和重度盐胁迫条件下供试甜高粱材料均值及差异性分析

Table 4 Analysis of mean value and difference of sweet sorghum materials for test under mild and severe salt stress																															
品种 Cultivar	PH/cm		CD/cm		LA/cm ²		SPAD		细胞膜透 性 CMP/%		植株含水 量 PWC/%		Pn /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		Gs /(mol·m ⁻² ·s ⁻¹)		Tr /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		Ci/Ca		F _p /F _m		F _v /F _o		F _m		F ₀		产量 Y /(kg·m ⁻²)		
	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK	T	CK
平均数 Average	189.515	160.804	27.350	21.245	13584.190	11412.430	48.115	31.214	17.318	23.727	83.773	73.636	30.828	25.249	0.243	0.181	4.769	3.192	0.3130221	0.7980748	4.010	3.295	23284.820	20752.170	4911.880	5586.700	13.635	10.306			
变异系数 CV	0.188	0.144	0.158	0.152	0.067	0.150	0.077	0.056	0.275	0.249	0.025	0.047	0.132	0.238	0.208	0.306	0.233	0.160	0.2160309	0.0120073	0.0660181	0.065	0.124	0.081	0.124	0.383	0.449				
标准误差 SE	4.983		0.735		263.375		1.360		0.936		0.883		0.875		0.009		0.176		0.012		0.007		0.088		369.326		98.759		0.778		
t	6.345		7.686		7.943		18.419		7.546		12.651		7.114		7.945		9.562		6.446		4.537		6.299		6.703		5.489		12.826		
P	0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		
相关系数 R	0.822		0.546		0.657		0.122		0.740		0.158		0.802		0.762		0.791		0.516		0.471		0.446		0.739		0.559		0.977		

注: **表示显著差异(P<0.01); t表示两样本之间的差异性。Note: ** indicates a very significant difference(P<0.01); t indicates the difference between the two samples.

影响,材料间和处理间差异均达显著水平。轻度盐碱胁迫下,F6018 的 CMP 最低,F6386 的 CMP 最高;F6096 P_n 和蒸腾速率 Tr 最低,F6137 的 P_n 和 Tr 最高;F6271 的 G_s 最小,F6172 的 G_s 最高;F6271 的 F_v/F_0 最小,F6138 的 F_v/F_0 最大;F6229 的 F_m 最小,F6141 的 F_m 最大;F6018 的 F_0 最小,F6386 的 F_0 最大。重度盐碱胁迫下,F6018 的 CMP 最低,F6386 的 CMP 最高;F6229 的 P_n 最低,F6059 的 P_n 最高;F6096 的 Tr 最低,F6137 的 Tr 最高;F6229 的 G_s 最小,F6172 的 G_s 最高;F6372 的 F_v/F_0 最小,F6138 的 F_v/F_0 最大;F6372 的 F_m 最小,F6306 的 F_m 最大;F6018 的 F_0 最小,F6043 的 F_0 最大。 F_v/F_m 和 PWC 不同处理间无显著差异。 P_n 、 G_s 、 F_m 、 F_v/F_0 和 Tr 等指标变异系数在 0.0120~0.4490 之间,说明生理性状对盐胁迫反应较敏感。此外,在轻度和重度盐胁迫处理下, P_n 、 G_s 、 F_m 、 F_v/F_0 和 Tr 等指标相关系数在 0.1220~0.9770 之间,表明 P_n 、 G_s 、 F_m 、 F_v/F_0 和 Tr 等指标对盐胁迫的反应敏感程度存在差异。

2.3 各单项指标的耐盐系数及相关性分析

采用耐盐系数可以消除不同品种之间固有差异,能够比较准确地体现甜高粱抗旱能力大小。由表 4 可知,与轻度盐胁迫相比,重度盐胁迫下各项指标均存在明显差异,同一指标的不同供试材料耐盐系数变化明显,变异系数在 0.05~0.265 范围之内。22 个不同品种甜高粱在重度盐胁迫下,PH、LA、SPAD、PWC、 P_n 、 Tr 、 G_s 、 F_m 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 与轻度盐胁迫相比均有所下降($STC<1$),CMP、 F_0 与轻度盐胁迫相比均有所上升($STC>1$),说明甜高粱不同指标对盐胁迫的敏感程度不同。由表 6 可知,指标之间存在不同程度相关性,其中 PH 与 Tr 达到显著负相关,与 P_n 、 G_s 达到显著正相关;CD 与 P_n 达到显著正相关;LA 与 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 F_m 达到极显著正相关;PWC 与 F_v/F_m 达到显著正相关; P_n 与 Tr 达到显著负相关,与 G_s 达到极显著正相关; F_v/F_m 与 F_v/F_0 、 F_m 达到极显著正相关; F_v/F_0 与 F_m 达到极显著正相关,与 Y 达到显著正相关。

表 5 盐胁迫条件下孕穗期甜高粱各指标的耐盐系数

Table 5 Salt tolerance coefficient of various indicators of sweet sorghum at booting stage under salt stress																
品种 Cultivar	pH	CD	LA	SPAD	CMP	PWC	P_n	G_s	Tr	Ci/C_a	F_v/F_m	Fv/F_0	F_m	F_0	Y	
F6172	0.91	0.73	0.90	0.61	1.17	0.88	0.95	0.74	0.68	0.77	0.98	0.89	0.92	1.07	0.77	
F6043	0.97	0.84	0.91	0.61	1.08	0.88	0.91	0.80	0.70	0.50	0.97	0.87	0.94	1.32	0.88	
F6229	0.78	0.76	0.95	0.54	1.90	0.83	0.45	0.37	0.71	0.52	0.96	0.83	0.99	1.08	0.63	
F6271	0.66	0.59	0.86	0.63	1.14	0.86	0.66	0.68	0.63	0.87	0.96	0.85	0.89	1.02	0.56	
F6180	0.74	0.88	0.69	0.55	1.40	0.84	0.85	0.74	0.73	0.74	0.95	0.82	0.73	1.13	0.78	
F6372	0.77	0.87	0.51	0.57	1.25	0.85	0.81	0.74	0.79	0.93	0.68	0.27	0.64	1.01	0.50	
F6096	0.83	0.93	0.83	0.69	1.24	0.91	0.79	0.58	0.67	0.83	0.94	0.76	0.88	1.13	0.78	
F6386	0.75	0.84	0.83	0.63	1.54	0.89	0.71	0.75	0.90	0.60	0.98	0.91	0.91	1.07	0.57	
F6099	0.94	0.74	0.90	0.65	1.62	0.88	0.88	0.82	0.69	0.75	0.97	0.87	0.93	1.35	0.76	
F6106	0.95	0.57	0.82	0.70	1.03	0.86	0.75	0.78	0.75	0.70	0.96	0.84	0.86	1.34	0.71	
F6036	0.92	0.62	0.82	0.60	1.12	0.89	0.71	0.65	0.57	0.67	0.99	0.94	0.94	1.20	0.84	
F6059	0.97	0.96	0.86	0.70	1.08	0.90	0.96	0.78	0.53	0.42	0.96	0.84	0.89	1.13	0.74	
F6080	0.91	0.78	0.82	0.67	1.83	0.96	0.89	0.82	0.57	0.93	0.95	0.80	0.86	1.12	0.66	
F6141	0.80	0.92	0.79	0.68	1.20	0.96	0.87	0.84	0.62	0.83	0.99	0.94	0.90	1.03	0.82	
F6018	0.75	0.89	0.98	0.61	1.54	0.91	0.82	0.41	0.86	0.61	0.97	0.78	0.98	1.08	0.79	
F6056	0.82	0.74	0.85	0.81	1.42	0.88	0.67	0.50	0.82	0.85	0.94	0.78	0.90	1.10	0.88	
F6138	0.82	0.74	0.81	0.63	1.25	0.86	0.93	0.86	0.65	0.90	0.89	0.85	0.94	1.32	0.80	
F6199	0.91	0.84	0.96	0.69	1.81	0.77	0.99	0.82	0.56	0.69	0.85	0.99	0.97	1.05	0.77	
F6017	0.86	0.80	0.90	0.72	1.66	0.85	0.90	0.95	0.66	0.92	0.93	0.81	0.95	1.35	0.72	
F6027	0.97	0.78	0.80	0.75	1.64	0.88	0.88	0.74	0.63	0.19	0.94	0.79	0.85	1.04	0.72	
F6306	0.92	0.64	0.91	0.67	1.38	0.94	0.66	0.86	0.76	0.93	0.97	0.87	0.93	1.07	0.64	
F6137	0.90	0.84	0.73	0.65	1.60	0.88	0.87	0.93	0.59	0.67	0.93	0.74	0.78	1.04	0.81	
平均值 Average	0.86	0.79	0.84	0.65	1.41	0.88	0.81	0.74	0.68	0.72	0.94	0.82	0.89	1.14	0.73	
变异系数 CV	0.106	0.137	0.122	0.099	0.191	0.050	0.158	0.206	0.145	0.265	0.071	0.169	0.093	0.104	0.139	

2.4 主成分分析

由表 7 可知,F1-F5 因子的特征值贡献分别为 32.288、22.523、11.810、9.595、6.029,累计贡献率为 82.246%,其他因子的贡献率可以忽略。于是可以将 15 项指标转化成 5 项新的互相独立综合指标,并代替所有原始指标的绝大部分抗旱信息。F1 在 F_v/F_m 和 F_v/F_0 上表现出较高载荷量;F2 在 P_n 和 G_s 表现出较高载荷量;F3 在 CMP 和 PWC 上表现出较高载荷量;F4 在 Ci/C_a 上表现出较高载荷量,F5 在 CMP 和 F_v 上表现出较高载荷量。

2.5 耐盐性综合评价及等级划分

由表 8 可知 D 值的大小,并根据 D 值的大小对孕穗期甜高粱的耐盐性强弱进行排序。F6059 的 D 值最大,表明其耐盐性最强;F6271 的 D 值最小,表明其耐盐性最弱。对 D 值采用最大距离的聚类分析方法(图 1),将 22 个甜高粱品种分为 5 类:第 I 类为高度耐盐型种质,包括 F6059 和 F6043,占总数 9.1%;第 II 类为耐盐型种质 F6141、F6080、F6027、F6017 和 F6099,占总数 22.27%;第 III 类为中度耐盐型种质,包括 F6137、F6199、F6096、F6138、F6172,占总数 22.27%;第 IV 类为耐盐敏感型种质,包括

F6180、F6056、F6106、F6036、F6306、F6386 和 F6018,占总数 31.82%;第 V 类为耐盐高度敏感型,包括 F6372、F6229 和 F6271,占总数 13.64%。

3 讨 论

3.1 重度盐胁迫对孕穗期甜高粱农艺性状的影响

本研究发现,重度盐碱胁迫条件下,不同品种甜高粱的农艺性状表现存在差异,同一品种在不同盐胁迫下的耐盐性表现不同,表明不同甜高粱品种的耐盐性存在差异。郑世英等^[16]研究指出,Na⁺造成土壤导水性能下降,改变了土壤的渗透势,造成植物吸水困难,明显降低植物的叶面积、株高、干物质量和根长。李德锋等^[17]研究发现产量与株高、叶面积、叶长和茎粗成正相关。张会丽等^[18]研究指出,与轻度盐胁迫相比,重度盐胁迫使玉米的株高和茎粗明显降低,茎粗是衡量作物生长的最重要指标。刘玉兰等^[19]研究指出,SPAD 值随着盐胁迫程度的增加先升高后降低,细胞膜透性随着盐胁迫的增加呈现升高趋势。这与本研究的结果基本一致。本研究发现,与轻度盐胁迫相比,重度盐胁迫下甜高

表 6 盐胁迫条件下孕穗期甜高粱各项耐盐系数的相关系数矩阵

Table 6 Correlation coefficient matrix of various indicators of sweet sorghum at booting stage under salt stress																
指标 Index	pH	CD	LA	SPAD	CMP	PWC	P_n	G_s	Tr	Ci/C_a	F_v/F_m	F_v/F_0	F_m	F_0	Y	
pH	1.00															
CD	-0.09	1.00														
LA	0.21	-0.18	1.00													
SPAD	0.38	-0.04	0.19	1.00												
CMP	-0.04	0.15	0.25	0.04	1.00											
PWC	0.12	0.09	-0.02	0.19	-0.2	1.00										
P_n	0.43 *	0.44 *	-0.08	0.20	-0.09	-0.01	1.00									
G_s	0.42 *	-0.01	-0.24	0.19	-0.09	0.06	0.61 **	1.00								
Tr	-0.44 *	-0.03	-0.04	-0.14	0.01	0.02	-0.43 *	-0.40	1.00							
Ci/C_a	-0.36	-0.21	-0.21	-0.03	-0.09	0.14	-0.05	0.22	0.10	1.00						
F_v/F_m	0.16	-0.21	0.61 **	0.12	-0.07	0.43 *	-0.17	-0.12	-0.06	-0.26	1.00					
F_v/F_0	0.23	-0.22	0.72 **	0.17	0.04	0.05	0.06	0.10	-0.28	-0.20	0.79 **	1.00				
F_m	0.16	-0.21	0.94 **	0.16	0.17	0.02	-0.12	-0.22	-0.06	-0.15	0.58 **	0.74 **	1.00			
F_v	0.39	-0.25	0.22	0.08	-0.18	-0.11	0.21	0.29	-0.04	0.08	0.19	0.22	0.29	1.00		
Y	0.39	0.17	0.29	0.28	-0.17	0.08	0.38	0.00	-0.24	-0.16	0.39	0.44 *	0.31	0.35	1.00	

表 7 各项综合指标的系数及贡献率

Table 7 Coefficient comprehensive index [F_x] and proportion

因子 载荷 Factor loading	PH	CD	LA	SPAD	CMP	PWC	P_n	G_s	Tr	Ci/C_a	F_v/F_m	F_v/F_0	F_m	F_v	Y	特征值 Charac- teristic root	贡献率 Contri- bution rate/%	累计贡 献率 Cumulative contribution /%	因子 权重 Factor weight
F1	0.280	-0.057	0.354	0.219	-0.058	0.183	0.112	0.050	-0.181	-0.222	0.397	0.389	0.357	0.250	0.335	4.843	32.288	32.288	0.393
F2	0.254	0.122-0.282	0.294	-0.277	0.236	0.435	0.418	-0.217	0.211-0.154	-0.122	-0.286	0.096	0.103	3.379	22.523	54.812	54.812	0.274	
F3	-0.278	0.454	0.089	0.163	0.579	0.540	0.117	-0.111	-0.037	0.162	0.101	0.054	0.110	-0.483	-0.012	1.771	11.810	66.621	0.144
F4	0.146	0.390	0.007	-0.220	-0.006	-0.117	0.271	-0.144	0.300	-0.482	-0.138	-0.184	-0.044	0.109	0.294	1.439	9.595	76.216	0.117
F5	0.312	-0.040	0.097	0.143	0.700	0.159	0.023	0.103	0.251	0.116	-0.128	-0.173	0.048	0.403	-0.240	0.904	6.029	82.246	0.073

Table 8 The value of each cultivar's $U(X_j)$, value D and comprehensive valuation

品种 Cultivar	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$	D 值 D value	排序 Rank
F6172	0.866	0.748	0.354	0.587	0.215	0.680	12
F6043	1.000	0.797	0.192	1.000	0.367	0.782	2
F6229	0.701	0.000	0.371	0.593	0.582	0.440	21
F6271	0.628	0.498	0.348	0.000	0.000	0.433	22
F6180	0.563	0.733	0.331	0.847	0.150	0.579	19
F6372	0.000	1.000	0.277	0.834	0.530	0.450	20
F6096	0.755	0.766	0.532	0.715	0.312	0.689	10
F6386	0.679	0.460	0.495	0.633	0.579	0.580	18
F6099	0.926	0.747	0.246	0.606	0.934	0.742	6
F6106	0.848	0.787	0.000	0.389	0.549	0.634	15
F6036	0.938	0.645	0.190	0.400	0.113	0.627	17
F6059	0.936	0.957	0.427	0.912	0.193	0.811	1
F6080	0.778	0.898	0.590	0.330	0.946	0.744	4
F6141	0.860	0.916	0.679	0.545	0.088	0.756	3
F6018	0.799	0.353	0.616	0.962	0.459	0.645	13
F6056	0.792	0.615	0.453	0.513	0.500	0.641	14
F6138	0.799	0.863	0.213	0.556	0.472	0.680	11
F6199	0.851	0.693	0.343	0.708	0.582	0.698	9
F6017	0.852	0.846	0.296	0.490	1.000	0.739	7
F6027	0.849	0.782	0.378	0.833	0.603	0.743	5
F6306	0.813	0.682	0.423	0.135	0.705	0.634	16
F6137	0.699	0.952	0.412	0.700	0.453	0.709	8

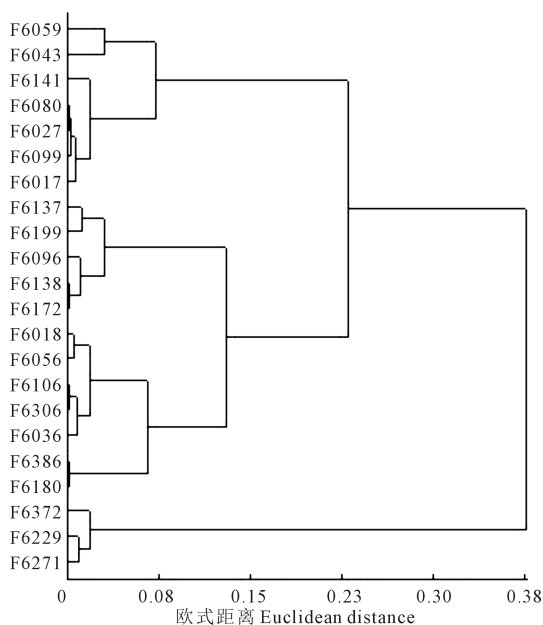


Fig.1 The dendrogram of cluster for 22 cultivars
of sweet sorghum

- [1] 文虎.绿洲农田盐碱斑土壤表层盐分和pH值的光谱特征研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
- [2] 张士超,袁芳,郭建荣,等.利用隶属函数值法对甜高粱苗期耐盐性的综合评价[J].植物生理学报,2015,51(6):893-902.
- [3] 吕晓,徐慧,李丽,等.盐碱地农业可持续利用及其评价[J].土壤,2012,44(2):203-207.
- [4] 高雪,朱林,苏莹.基于隶属函数法的甜高粱孕穗期耐盐性综合评价[J].南方农业学报,2018,49(9):1736-1744.
- [5] 张福耀,赵威军,平俊爱.高能作物——甜高粱[J].中国农业科技导报,2006,8(1):14-17.
- [6] 王秀玲,程序,谢光辉,等.NaCl胁迫对甜高粱发芽期生理生化特性的影响[J].生态环境学报,2010,19(10):2285-2290.
- [7] 刘吉利,吴娜.龟裂碱土对不同基因型甜高粱幼苗生长和生理特性的影响[J].草业学报,2014,23(5):208-213.
- [8] Munns R,Tester M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. Annual Review of Plant Biology,2008, 59(6):651-681.
- [9] 张华文,秦岭,王海莲,等.不同甜高粱品种(系)萌发期耐盐性研究

[J].山东农业科学,2011,34(9):24-26.

[10] 朱元刚,王乐政,高凤菊,等. 盐胁迫对不同高粱品种农艺性状和产量的影响[J].作物杂志,2013,15(4):104-108.

[11] 孙璐,黄瑞冬. 高粱幼苗保护酶系统对盐胁迫的初期响应[J].沈阳农业大学学报,2014,45(2):134-137.

[12] 孙璐,周宇飞,李丰先,等. 盐胁迫对高粱幼苗光合作用和荧光特性的影响[J].中国农业科学,2012,45(16):3265-3272.

[13] 籍贵苏,杜瑞恒,刘国庆,等.高粱耐盐性评价方法研究及耐盐碱资源的筛选[J].植物遗传资源学报,2013,14(1):25-30.

[14] 刘妍妍,吴纪中,许璋阳,等. 人工海水胁迫下小麦芽期和苗期的耐盐性鉴定方法[J].植物生理学报,2014,50(2):214-22.

[15] 王云生.植物生理学学习指导[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014:115-116.

[16] 郑世英,高学芳,王丽燕,等.盐胁迫对不同基因型玉米生理特性和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(2):109-112.

[17] 李德锋,姜义宝,付楠,等.青贮玉米品种比较试验[J].草地学报,2013,21(3):612-617.

[18] 张会丽,袁闯,许兴,等.不同基因型玉米杂交种大喇叭口期的耐盐性[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):140-147.

[19] 刘玉兰,陈殿元,元明浩,等.盐胁迫对小粒大豆幼苗生长发育及光合特性的影响[J].大豆科学,2017,36(6):913-920.

[20] 张会丽,袁闯,朱林,等.利用隶属函数值法对玉米成熟期耐盐性的综合评价[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(2):47-55.

[21] 冯国郡,再吐尼古丽·库尔班,朱敏.盐碱地甜高粱光合特性及农艺性状变化研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):166-172.

[22] 刘建新,王金成,王瑞娟,等.盐、碱胁迫对燕麦幼苗光合作用的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):155-160.

[23] 邢庆振,郁松林,牛雅萍,等.盐胁迫对葡萄幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):96-100.

[24] 周丹丹,刘德玺,李存华,等.盐胁迫对朴树和速生白榆幼苗光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J].西北植物学报,2016,36(5):1004-1011.

[25] 沈宗根,陈翠琴,王岚岚,等.3种石斛光合作用和叶绿素荧光特性的比较研究[J].西北植物学报,2010,30(10):2067-2073.

[26] Brugnoli E, Björkman O. Growth of cotton under continuous salinity stress: influence on allocation pattern, stomatal and non-stomatal components of photosynthesis and dissipation of excess light energy [J]. Planta, 1992, 187(3):335-347.

[27] Foyer C H, Noctor G. Tansley review: Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signaling [J]. New Phytologist, 2000, 146(3):359-388.

[28] 张婷婷,于崧,于立河,等.松嫩平原春小麦耐盐碱性鉴定及品种(系)筛选[J].麦类作物学报,2016,36(8):1008-1019.

[29] 戴海芳,武辉,阿曼古丽·买买提阿力,等.不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选[J].中国农业科学,2014,47(7):1290-1300.

[30] 李琳,于崧,蒋永超,等.芸豆苗期耐盐碱性鉴定及品种筛选研究[J].植物生理学报,2016,52(1):62-72.

(上接第 48 页)

参 考 文 献:

[1] 齐学斌,黄仲冬,乔冬梅,等.灌区水资源合理配置研究进展[J].水科学进展,2015,26(2):287-295.

[2] 李荣.基于不确定性分析的农业水土资源多尺度优化配置方法与模型研究[D].北京:中国农业大学,2017.

[3] 张伟强,许波,冯晓曦,等.黄淮海玉米育种面临挑战及对策探讨——以驻马店市为例[J].作物杂志,2013,(1):26-31.

[4] 赵森,刘战东,刘祖贵,等.水分对夏玉米生物量 and 水分积累量动态变化的影响[J].节水灌溉,2016,(11):11-14.

[5] Seeve C M, Cho I J, Hearme L B, et al. Water-deficit-induced changes in transcription factor expression in maize seedlings [J].Plant Cell Environ, 2017, 40(5):686-701.

[6] 陈金平,王和洲,刘安能,等.不同灌水策略对夏玉米水分利用效率和产量构成要素的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(7):7-13.

[7] Lu H D, Xue J Q, Guo D W. Efficacy of planting date adjustment as a cultivation strategy to cope with drought stress and increase rainfed maize yield and water-use efficiency [J]. Agricultural Water Management, 2017, 179:227-235.

[8] 李迎,刘小飞,段爱旺,等.覆盖对夏玉米产量及水分利用效率的影响[J].中国农学通报,2011,27(15):189-193.

[9] 周龄.不同耕作与灌溉施肥方式对夏玉米水分利用效率的影响[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):252-257.

[10] 吴立峰,杨秀霞,燕辉.水分亏缺对苗期玉米生理特性的影响[J].排灌机械工程学报,2017,35(12):62-67.

[11] 程铭慧,范军亮,张富仓,等.分根区交替灌溉下水分亏缺对夏玉米生长和水分利用效率的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(9):819-823.

[12] 卫晓轶,张明才,李召虎,等.不同基因型玉米对乙烯利调控反应敏感性的差异[J].作物学报,2011,37(10):1819-1827.

[13] 张倩,周繁,赵威,等.新型膦酸盐类化合物(DHEAP)对春玉米植株性状及产量的影响[J].农药学报,2014,16(3):287-292.

[14] Yu H Y, Zhang Y S, Xie Y, et al. Ethephon improved drought tolerance in maize seedlings by modulating cuticular wax biosynthesis and membrane stability [J]. Journal of Plant Physiology, 2017, 214:123-133.

[15] Shekoofa A E, Emam Y. Plant growth regulator (ethephon) alters maize (*Zea mays* L.) growth, water use and grain yield under water stress [J]. Journal of Agronomy, 2008, 7(1):41-48.

[16] Zhang W Q, Yu C X, Zhang K, et al. Plant growth regulator and its interactions with environment and genotype affect maize optimal plant density and yield [J]. European Journal of Agronomy, 2017, 91:34-43.

[17] Remison S, Akinleye D. Relationship between lodging, morphological characters and yield of varieties of maize (*Zea mays* L.) [J]. The Journal of Agricultural Science,1978, 91(3):633-638.

[18] 叶德练,王玉斌,周琳,等.乙烯利和氮肥对夏玉米氮素吸收与利用及产量的调控效应[J].作物学报,2015,41(11):1701-1710.

[19] 何钟佩.农作物化学控制实验指导[M].北京:北京农业大学出版社,1993:36-39.

[20] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2^{-ΔΔCT} method [J]. Methods, 2001, 25(4):402-408.