

于惠琳,史振声,丛玲,等. 干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱光合及生理响应比较[J]. 江苏农业科学,2014,42(2):72-75.

# 干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱光合及生理响应比较

于惠琳<sup>1</sup>,史振声<sup>1</sup>,丛玲<sup>2</sup>,朱振兴<sup>2</sup>

(1. 沈阳农业大学,辽宁沈阳 110161; 2. 辽宁省农业科学院创新中心,辽宁沈阳 110161)

**摘要:**为探明干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱的光合、生理生化特性及甜高粱的光合、生理生化优势,本试验选取较有代表性的甜高粱品系 Rio 和粒用高粱品系 BTx623 为试材,采用盆栽方式,分析不同干旱胁迫处理对甜高粱和粒用高粱叶片持绿性、光合参数、水分利用率、SOD 活性、POD 活性和 MDA 含量等的影响。结果表明:干旱胁迫对叶片的持绿性影响较大,甜高粱品系 Rio 在叶片持绿性上优于粒用高粱 BTx623;2 个品系叶片叶绿素 b 的含量随胁迫增强下降明显,轻度和中度干旱胁迫对叶片持绿性和持绿时期影响相对较小,而在重度胁迫下会加快粒用高粱叶绿素 b 的分解,使其持绿性大幅度下降;CO<sub>2</sub> 浓度在干旱胁迫下会对光合速率造成较大影响,Rio 和 BTx623 在 CO<sub>2</sub> 浓度分别为 200 ~ 1 400 μmol/mol 和 200 ~ 1 600 μmol/mol 的区间对光合速率影响较大;2 个品系叶片的 SOD、POD 活性以及 MDA 含量随着胁迫的加重呈上升趋势,甜高粱品系 Rio 叶片中 POD 活性和 MDA 含量增加幅度大于粒用高粱品系 BTx623,而 SOD 活性增加幅度 Rio 略低于 BTx623,重度胁迫下 SOD、POD 活性和 MDA 含量随着胁迫的加重有所下降,BTx623 下降幅度更大。

**关键词:**干旱胁迫;甜高粱;粒用高粱;光合;生理生化

**中图分类号:**S514.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2014)02-0072-04

高粱作为我国重要的粮食和饲料作物在我国粮食生产上具有重要地位<sup>[1]</sup>。高粱具有抗旱、耐涝、耐盐碱、耐瘠薄等特性,是干旱、半干旱地区重点选择种植的作物之一。干旱是严重影响我国农作物生产的重要环境胁迫因子之一<sup>[2-4]</sup>。干旱能降低植物体内的水分含量,最终使植物缺水而遭受伤害<sup>[5]</sup>。高粱在叶片光合作用、细胞膜透性、渗透调节和保护性酶活性等方面有较好的自身生理调节作用,以此来适应干旱胁迫<sup>[6-7]</sup>。我国东北的部分地区及西北干旱、半干旱地区,受到干旱气候的制约,降水量少,蒸发量大,水资源相对缺乏,土壤贫瘠,制约了该地区农作物生产<sup>[8-9]</sup>。大量生产实践表明,甜高粱品系和粒用高粱品系在不同干旱胁迫下对干旱的响应有所不同,甜高粱品系的抗旱性明显优于粒用高粱品系,甜高粱与粒用高粱杂交,从后代中选择抗旱性个体,对培育粮秆兼用型的甜高粱品种及其优良的亲本材料、丰富遗传基础是十分有益的。因此本研究通过对典型甜高粱品系 Rio 与典型粒用高粱品系 BTx623 在干旱胁迫下叶片光合参数变化及生理生化等方面进行比较,旨在探明甜高粱和粒用高粱的光合和生理特点,以及干旱胁迫下甜高粱的光合及生理生化特性与优势,以期对高粱抗旱栽培及其在育种中的应用提供理论依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 试验设计

收稿日期:2013-10-17

基金项目:现代农业产业技术体系建设项目(编号:CARs-06-01-06)。

作者简介:于惠琳(1983—),女,辽宁鞍山人,博士研究生,从事高粱分子育种与栽培研究。E-mail:yuhuilin19831222@163.com。

通信作者:朱振兴,博士,助理研究员,主要从事高粱分子育种研究。Tel:(024)31021082;E-mail:swauzxx@126.com。

试验于 2013 年在辽宁省农业科学院试验基地的防雨棚中进行。2 个品系分别为甜高粱品系 Rio 和粒用高粱品系 BTx623。采用盆栽方式,盆钵直径 28 cm,高 31 cm。盆土取自旱田耕层,土壤养分状况为:全氮 0.113%,全磷 0.170%,全钾 2.229%,水解性氮 74 mg/kg,有效磷 16.04 mg/kg,有效钾 143 mg/kg,pH 值 6.2。5 月 5 日播种,播种时每盆施优质农家肥 200 g,磷酸二铵 150 g 作种肥,拔节期追施尿素 3.0 g,9 月 25 日收获。

试验随机区组设计,设 3 个处理和 1 个对照,每品系开花后 20 d 进行水分胁迫,每个时期连续胁迫 10 d。轻度胁迫(mild water stress,以下简称 Mi-S)处理盆土壤绝对含水量为 13%~14%(试验前进行精细预试验,结果显示,每天 16:00 对胁迫植株灌水 300~350 mL,可保证第 2 天 14:00 土壤绝对含水量为 13%~14%);中度胁迫(moderate water stress,以下简称 Mo-S)处理盆土壤绝对含水量为 9%~10%(每天 16:00 对胁迫植株灌水 200~250 mL);重度胁迫(heavy,以下简称 Se-S)处理盆土壤绝对含水量为 6%~7%(每天 16:00 对胁迫植株灌水 100~150 mL);无胁迫(对照 CK)处理盆土壤绝对含水量为 17%~18%(每天 16:00 灌水 400~450 mL)。胁迫 10 d 后进行相关指标的测定,然后解除胁迫恢复正常供水至成熟。水分胁迫期间,将盆钵置于防雨棚内,夜间及阴雨天盖膜防雨。测定重复 3 次。

### 1.2 测定项目及方法

1.2.1 叶面积及叶片持绿性的测定 于灌浆期(开花后 20 d),每小区选取有代表性的植株 5 株,用激光叶面积仪(WDY-500A)测定绿叶面积;调查绿叶面积大于 50%的叶片数量,测定绝对绿叶面积持续期(AGLAD)。AGLAD 指抽穗开花期至灌浆期(开花后 20 d 内)高粱叶面积的和,即每日的叶面积的累加,由 AGLAD 除以开花期时绿叶面积求得相对叶面积持续期(RGLAD)。

1.2.2 净光合速率及相关参数的测定 在甜高粱灌浆期,采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合作用测定系统测定,采用红蓝光光源,设定光合有效辐射为  $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  作为测定光强,在各试验小区选取生长健康、长势一致、光照均匀的植株 5 株测定其净光合速率,测定时间为 09:30—11:00。测定各品种的旗叶,记录 3 次值求其平均数。气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率等参数由光合仪同步探测记录。

1.2.3 叶片内源保护酶 SOD、POD 活性和 MDA 含量的分析测定 分别于开花期、灌浆初期取高粱倒 2、倒 3 叶,采用张宪政的方法<sup>[10]</sup>测定叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量,每处理重复 3 次。

### 1.3 数据处理与分析

试验数据均采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 6.50 软件

进行处理与分析。

## 2 结果与分

### 2.1 干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱叶面积及叶片持绿性的比较

由表 1 可见,2 个品系在不同干旱胁迫下叶片持绿性相关性状存在差异。在不同干旱胁迫下,2 个品系的单株绿叶面积、绝对绿叶面积持续期和相对绿叶面积持续期均在轻度胁迫(Mi-S)和轻度胁迫(Mo-S)下比对照下降幅度较小,而达到重度胁迫(Se-S)时,各参数下降幅度明显增大。甜高粱品系 Rio 和粒用高粱品系 BTx623 绝对绿叶面积持续期在各处理下差异较小,但由于单株绿叶面积 Rio 高于 BTx623,所以表现为相对绿叶面积持续期 Rio 高于 BTx623,从而表现为甜高粱品系在叶面积和其持绿性上优于普通高粱。

表 1 干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱叶面积及叶片持绿性的比较

品系	处理	持绿叶片(张)	绿叶面积( $\text{cm}^2/\text{株}$ )	绝对绿叶面积持续期( $\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )	相对绿叶面积持续期(d)	叶绿素 a 含量( $\text{mg}/\text{g}$ )	叶绿素 b 含量( $\text{mg}/\text{g}$ )
Rio	CK	18aA	7 619.24aA	19.94aA	26.17aC	0.85aA	1.35aA
	Mi-S	15bB	6997.85bB	17.69bB	25.28abD	0.84aA	1.33aA
	Mo-S	13cC	6 507.38cC	15.49cD	23.80bE	0.84aA	1.29aAB
	Se-S	11dD	4 465.82dF	9.25dG	20.71cF	0.83aA	1.14b
	$\Delta X_{\text{Mi-S}}(\%)$	-16.67	-8.16	-11.28	-3.40	-1.18	-1.48
	$\Delta X_{\text{Mo-S}}(\%)$	-27.78	-14.59	-22.32	-9.04	-1.18	-4.44
	$\Delta X_{\text{Se-S}}(\%)$	-38.89	-41.39	-53.61	-20.85	-2.35	-15.56
BTx623	CK	15aB	5 423.69aD	16.23aC	29.92aA	0.83aA	1.29aAB
	Mi-S	13bcC	4 949.13bE	14.56bE	29.42aA	0.83aA	1.24aB
	Mo-S	12cCD	4 185.36cF	12.37cF	29.56aA	0.83aA	1.21aB
	Se-S	9dE	2 967.65dG	8.11dH	27.33bB	0.82aA	1.08bC
	$\Delta X_{\text{Mi-S}}(\%)$	-13.33	-8.75	-10.29	-1.67	0	-3.88
	$\Delta X_{\text{Mo-S}}(\%)$	-20.00	-22.83	-23.78	-1.22	0	-6.20
	$\Delta X_{\text{Se-S}}(\%)$	-40.00	-45.28	-50.03	-8.66	-1.20	-16.28

注:小写字母多重比较结果为同一品系 4 个干旱胁迫处理间比较;大写字母多重比较结果为 2 个品系不同干旱胁迫处理(共  $4 \times 2 = 8$  个处理)间比较。

2 个品系叶绿素含量随着胁迫的增强呈下降的趋势,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均在轻度胁迫(Mi-S)和轻度胁迫(Mo-S)下较对照下降幅度较小,无显著差异;而随着胁迫的加重下降度明显增大,与叶片持绿面积及绿叶持续期的变化趋势基本一致,同时发现叶绿素 b 下降幅度明显高于叶绿素 a,下降幅度 BTx623 高于 Rio(表 1)。表明干旱能促进叶绿素 b 的分解,尤其在重度胁迫下,对粒用高粱影响更大。

### 2.2 干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱光合参数及水分利用率的比较

由表 2 可以看出,不同干旱胁迫下 2 个品系的光合效率存在差异。随着胁迫的加重,净光合速率呈下降的趋势,在轻度胁迫和轻度胁迫时与对照差异相对较小,而当达到重度胁迫时下降幅度明显增大,Rio 和 BTx623 净光合速率分别较对照降低 29.05% 和 35.31%;气孔导度和蒸腾速率的变化趋势与净光合速率基本一致。同时,Rio 的净光合速率在各处理下均高于粒用高粱品系 BTx623,且在不同处理下与对照相比的下降幅度均表现为 Rio 低于 BTx623,说明甜高粱品系无论在自身合成养分还是在对于干旱胁迫的耐性上均较粒用高粱具有优势,也进一步解释了表 1 中较好的叶片持绿性对植株物质积累的重要性。叶片水分利用率在不同干旱胁迫处理间差异不

大,但品种间存在差异,尤其在轻度胁迫时,Rio 在水分利用率上更具优势。

### 2.3 干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱叶片 $\text{CO}_2$ 响应曲线的比较

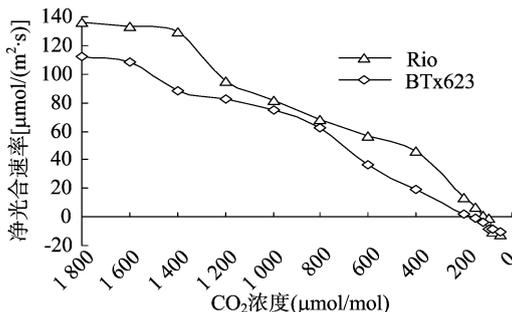
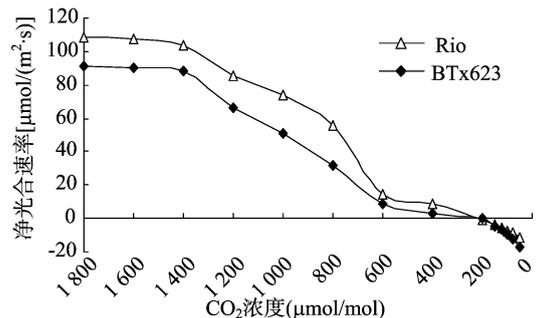
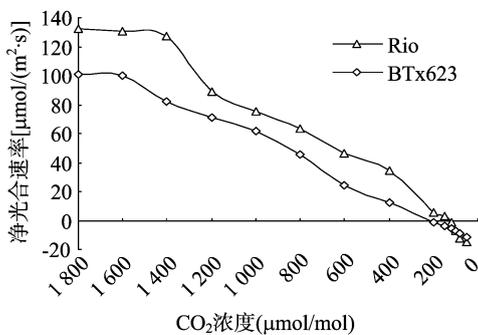
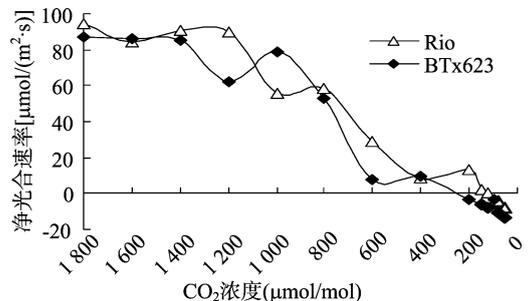
为进一步研究不同干旱处理下 2 个品系叶片光合性能存在差异的原因,对不同干旱胁迫分别进行了  $\text{CO}_2$  浓度曲线的测定。由图 1 至图 4 可以看出,在不同干旱胁迫下 2 个品种的  $\text{CO}_2$  饱和点与  $\text{CO}_2$  补偿点在不同干旱胁迫处理下存在较大差异。在未胁迫处理(CK)下,随着  $\text{CO}_2$  浓度的下降,2 个品系光合速率均呈下降的趋势,在下降幅度上有 2 个明显的拐点,即 Rio 在  $1 400 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 、BTx623 在  $1 600 \mu\text{mol}/\text{mol}$  时是第 1 个拐点;2 个品种均在  $200 \mu\text{mol}/\text{mol}$  时是第 2 个拐点(图 1)。说明 Rio 在  $1 400 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 、BTx623 在  $1 600 \mu\text{mol}/\text{mol}$  时达到各自的  $\text{CO}_2$  饱和点,均在  $200 \mu\text{mol}/\text{mol}$  时达到各自的  $\text{CO}_2$  补偿点,即在  $200 \sim 1 400 \mu\text{mol}/\text{mol}$  和  $200 \sim 1 600 \mu\text{mol}/\text{mol}$  这 2 个区间  $\text{CO}_2$  浓度分别对 Rio 和 BTx623 光合速率会造成较大影响。

在轻度干旱(Mi-S)下,2 个品系的  $\text{CO}_2$  饱和点和  $\text{CO}_2$  补偿点(图 2)与未胁迫处理(CK)相一致。在轻度胁迫(Mo-S)下, $\text{CO}_2$  饱和点较未胁迫处理(CK)时 Rio 保持不

表2 干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱光合参数及水分利用率的比较

品系	处理	净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度 [ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$ ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	蒸腾速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	水分利用率 ( $\text{g}/\text{kg}$ )
Rio	CK	29.88aA	0.189 4aA	39.65dG	4.93aA	6.06aA
	Mi-S	29.49aA	0.173 4bcB	45.17cF	4.76aAB	6.20aA
	Mo-S	27.12bB	0.160 7cC	63.28bDE	4.64aAB	5.84abB
	Se-S	21.20cE	0.132 2dE	72.57aC	3.69bC	5.75bB
	$\Delta X_{\text{Mi-S}}(\%)$	-1.31	-8.45	13.92	-3.45	2.23
	$\Delta X_{\text{Mo-S}}(\%)$	-9.24	-15.15	59.60	-5.88	-3.55
	$\Delta X_{\text{Se-S}}(\%)$	-29.05AB	-30.20	83.03	-25.15	-5.19
BTx623	CK	27.87aB	0.1781aB	69.99cD	5.10aA	5.46aB
	Mi-S	26.92bC	0.173 6aB	66.85cDE	4.59bAB	5.86aB
	Mo-S	24.20cD	0.157 7bD	79.57bB	4.29cB	5.64aB
	Se-S	18.03dF	0.12 24cF	93.89aA	3.30dD	5.46aB
	$\Delta X_{\text{Mi-S}}(\%)$	-3.41	-2.53	-4.49	-10.00	7.42
	$\Delta X_{\text{Mo-S}}(\%)$	-13.17	-11.45	13.69	-21.76	3.32
	$\Delta X_{\text{Se-S}}(\%)$	-35.31	-31.27	34.15	-35.29	0.07

注同表1。

图1 未胁迫下(CK)  $\text{CO}_2$  响应曲线图3 中度胁迫下  $\text{CO}_2$  响应曲线图2 低度胁迫下  $\text{CO}_2$  响应曲线图4 重度胁迫下  $\text{CO}_2$  响应曲线

变, BTx623 有所下降, 而  $\text{CO}_2$  补偿点 2 个品系均有所提高, 均在  $600 \mu\text{mol}/\text{mol}$  时达到各自的  $\text{CO}_2$  补偿点(图 3), 因此在中度胁迫 (Mo-S) 下  $\text{CO}_2$  饱和点和  $\text{CO}_2$  补偿点的间距较对照有所降低。表明随着胁迫的增强, 高粱品系净光合速率受  $\text{CO}_2$  变化影响的间距减小, 进而影响其光合效果。而达到重度胁迫 (Se-S) 时  $\text{CO}_2$  饱和点和  $\text{CO}_2$  补偿点的间距急剧减小, 同时不同  $\text{CO}_2$  浓度下净光合速率出现了明显不规则波动, BTx623 幅度更明显(图 4)。说明重度胁迫 (Se-S) 对高粱叶片的机能造成了一定的破坏, 影响了其对将  $\text{CO}_2$  转化为净光合效率的效果, 相对于甜高粱对粒用高粱品系影响更大。

2.4 干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱叶片 SOD、POD 活性和 MDA 含量的比较

在不同干旱胁迫处理下, 开花期和灌浆期 SOD、POD 活性和 MDA 含量在轻度胁迫和重度胁迫下均随着胁迫的加重呈上升的趋势。说明在一定干旱胁迫环境下, 2 个品系均会通过提高自身 SOD、POD 活性和 MDA 含量来调节其生长, 维持体内平衡, 抵御干旱。而在重度胁迫下, 高粱植株体内因严重缺水而对植物体造成了严重损伤, 以致对 SOD、POD 活性和 MDA 含量的提高造成了影响。同时, 甜高粱品系 Rio 的 POD 活性和 MDA 含量增加幅度大于粒用高粱品系 BTx623, 而 SOD 活性 Rio 略低于 BTx623, 重度胁迫 (Se-S) 下 SOD、POD 活性和 MDA 含量随着胁迫的加重有所下降, BTx623 下降幅度更大。可以看出甜高粱品系 Rio 在抗旱水平上明显优于普通高粱品系 BTx623, 可以通过植株体内 SOD、POD 活性和 MDA 含量的变化来提高抵御干旱的能力, 也进一步验证了其在叶片持绿、光合参数等方面具有优势的原因。

表3 干旱胁迫下甜高粱和粒用高粱叶片 SOD、POD 活性和 MDA 含量的比较

品系	处理	开花期			灌浆期		
		SOD 活性 (U/g)	POD 活性 [ $D_{470\text{ nm}}/(g \cdot \text{min})$ ]	MDA 含量 (nmol/g)	SOD 活性 (U/g)	POD 活性 [ $D_{470\text{ nm}}/(g \cdot \text{min})$ ]	MDA 含量 (nmol/g)
Rio	CK	128.69cD	5.56dF	41.23cCD	122.35cC	6.85dF	46.36cE
	Mi-S	155.29bB	15.68bB	49.65bB	146.14bB	23.69bB	55.17bC
	Mo-S	168.37aA	18.56aA	53.58abAB	163.53aA	27.84aA	60.45aB
	Se-S	124.21cD	12.35cC	55.27aA	95.47dE	11.26cE	62.87aB
	$\Delta X_{\text{Mi-S}}(\%)$	20.67	182.01	20.42	19.44	245.84	19.00
	$\Delta X_{\text{Mo-S}}(\%)$	30.83	233.81	29.95	33.66	306.42	30.39
	$\Delta X_{\text{Se-S}}(\%)$	-3.48	122.12	34.05	-21.97	64.38	35.61
BTx623	CK	104.29dE	4.85dF	37.92dD	113.47cD	6.47dF	42.28cF
	Mi-S	135.21bC	9.96cE	40.28cCD	123.66bC	13.58cE	50.15bD
	Mo-S	156.58aB	11.26aD	43.17bC	149.37aB	20.14aC	67.54aAB
	Se-S	111.29cE	10.53bE	45.15aC	105.45dD	18.25bD	70.28aA
	$\Delta X_{\text{Mi-S}}(\%)$	29.65	105.36	6.22	8.98	109.89	18.61
	$\Delta X_{\text{Mo-S}}(\%)$	50.14	132.16	13.84	31.64	211.28	59.74
	$\Delta X_{\text{Se-S}}(\%)$	6.71	117.11	19.07	-7.07	182.07	66.23

注同表1。

### 3 结论与讨论

干旱胁迫下容易造成植物叶片褪绿,影响其正常的光合作用和体内保护性酶活性的变化。本研究表明:甜高粱品系 Rio 在叶面积和其持绿性上优于粒用通高粱品系 BTx623,在不同干旱胁迫下,叶绿素 b 下降幅度明显高于叶绿素 a,下降幅度 BTx623 高于 Rio。干旱促进叶绿素 b 的分解,尤其在重度胁迫下会对粒用高粱的持绿性造成较大影响,进而影响其光合物质积累。这与王艳秋等对 A3 型细胞质光合物质积累的研究结果<sup>[11]</sup>基本一致,而与葛江丽等轻度盐胁迫对甜高粱物质积累分配的研究结果<sup>[12]</sup>略有差异,可能是因为本试验品系不同和测定时期不同造成的。叶片水分利用率在不同干旱胁迫处理间差异不大,净光合速率在重度胁迫下,植物体会因叶片过度缺水而导致叶片持绿性和持绿时期大幅度下降,对光合参数及 CO<sub>2</sub> 饱和点和补偿点造成破坏性影响,影响幅度 BTx623 大于 Rio。SOD 和 POD 可以分解一些由于水分胁迫产生的过氧化物,从而起到对植物体的保护作用。甜高粱品系在干旱胁迫下自身合成保护酶上较粒用高粱具有优势,在轻度胁迫 (Mi-S) 和 中 度 胁 迫 (Mo-S) 下 2 个 品 系 均 随 胁 迫 增 强 而 增 加,而 重 度 胁 迫 (Se-S) 则 较 中 度 胁 迫 (Mo-S) 有 所 下 降。这 与 黄 瑞 冬 等 研 究 的 结 果<sup>[13]</sup> 基 本 一 致;但 荣 少 英 等 研 究 认 为 在 干 旱 胁 迫 下 甜 高 粱 幼 苗 随 着 干 旱 胁 迫 的 增 强 保 护 酶 活 性 一 直 增 加<sup>[14]</sup>,与 本 研 究 的 结 果 略 有 差 异,可 能 是 因 为 高 粱 处 于 不 同 生 育 时 期 及 不 同 干 旱 处 理。

干旱在世界一些地区日趋严重,干旱问题和作物抗旱性改良受到各国政府及研究机构的重视。本研究通过对典型甜高粱品系 Rio 与典型粒用高粱品系 BTx623 在干旱胁迫下叶片光合参数变化及生理生化等方面进行比较,分析了在干旱时甜高粱的光合、生理优势,但如何通过这些特点进行抗旱性的遗传育种与栽培,将其抗旱潜力充分发挥还有待进一步

研究。

#### 参考文献:

- [1] 李文晓,张岁岐,山 仑. 水分胁迫下紫花苜蓿和高粱种子萌发特性及幼苗耐旱性[J]. 生态学报,2009,29(6):3066-3074.
- [2] 王晓磊,于海秋,刘 宁,等. 耐低钾玉米自交系延缓叶片衰老的生理特性[J]. 作物学报,2012,38(9):1672-1679.
- [3] 李 耕,高辉远,赵 斌,等. 灌浆期干旱胁迫对玉米叶片光系统活性的影响[J]. 作物学报,2009,35(10):1916-1922.
- [4] 赵丽英,邓西平,山 仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报,2004,15(3):523-526.
- [5] 冯晓敏,张永清. 水分胁迫对糜子植株苗期生长和光合特性的影响[J]. 作物学报,2012,38(8):1513-1521.
- [6] 史雨刚,吴治国,马金虎. 不同浓度 NaCl 胁迫对高粱幼苗 SOD、POD 酶活性的影响[J]. 山西农业科学,2007,35(12):71-73.
- [7] 王德权,周宇飞,陆璋镗,等. 水分胁迫下持绿型高粱根系形态及其活力研究[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(2):73-76.
- [8] 于志青,于卫卫,谭秀山,等. 水分胁迫对夏玉米干物质积累与分配的影响[J]. 华北农学报,2009,24(S2):149-154.
- [9] 张子山,李 耕,高辉远,等. 玉米持绿与早衰品种叶片衰老过程中光化学活性的变化[J]. 作物学报,2013,39(1):93-100.
- [10] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京:农业出版社,1992.
- [11] 王艳秋,邹剑秋,张志鹏,等. 能源甜高粱茎秆节间硬度变化规律研究[J]. 中国农业大学学报,2010,15(5):6-11.
- [12] 葛江丽,姜闯道,石 雷,等. 轻度盐胁迫对甜高粱光合作用激发能分配的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(3):366-369.
- [13] 黄瑞冬,孙 璐,肖木辑,等. 持绿型高粱 B35 灌浆期对干旱的生理生化响应[J]. 作物学报,2009,35(3):560-565.
- [14] 荣少英,郭蜀光,张 彤. 干旱胁迫对甜高粱幼苗渗透调节物质的影响[J]. 河南农业科学,2011,40(4):56-59.