

干旱胁迫下高粱叶温与叶片水分状况的关系

王艺陶, 周宇飞, 李丰先, 苏仲, 韩熠, 高铭悦, 张壮, 许文娟, 黄瑞冬*

(沈阳农业大学农学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 根据叶片温度可以反映植物体内水分状况及气孔运动等一系列生理变化的特征, 研究干旱胁迫下高粱叶片温度与水分状况变化间的关系, 分析高粱抗旱反应机制。采用4个不同抗旱性高粱品种, 在盆栽条件下, 分别在拔节期、开花期和灌浆期进行干旱胁迫, 以正常灌水为对照, 胁迫7 d后测定高粱叶片自由水含量、离体叶片失水速率、相对含水量等水分状况, 利用远红外热成像仪测定叶片温度变化。结果表明, 干旱胁迫下, 高粱叶片自由水含量、束缚水含量、相对含水量和离体叶片失水速率等水分状况在不同生育时期均呈下降趋势, 吉杂305(高度抗旱品种)的下降幅度显著小于吉杂127(高度干旱敏感品种)($P < 0.05$), 锦杂106(中等抗旱品种)和锦杂103(干旱敏感品种)介于二者之间。叶温差与自由水含量和相对含水量显著相关($P < 0.05$), 与束缚水含量极显著相关($P < 0.01$)。叶片温度变化可以反映高粱叶片的水分状况, 叶温差可以作为高粱抗旱性筛选的一个重要指标, 应用远红外热成像技术在高粱抗旱性的鉴定上具有可行性。

关键词: 高粱; 干旱胁迫; 叶片温度; 叶温差; 水分状况

中图分类号: S513.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)06-0146-06

Relationship between leaf temperature and water status in sorghum under drought stress

WANG Yi-tao, ZHOU Yu-fei, LI Feng-xian, SU Zhong, HAN Yi, GAO Ming-yue,
ZHANG Zhuang, XU Wen-juan, HUANG Rui-dong*

(College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China)

Abstract: Based on the theory that leaf temperature could reflect the physiological characteristics such as water status and stomata movement in plants under drought stress, the relationship between leaf temperature and moisture condition in sorghum was studied for analyzing its response mechanism to drought resistance. With 4 sorghum varieties with different drought-resistance as the test materials under pot cultivation, drought stress treatments were conducted at jointing stage, flowering stage and filling stage, respectively, with normal irrigation as control. Leaf free water content, water loss rate of cutting leaves and leaf relative water content were measured, and leaf temperature changes were recorded by infrared thermal imager after 7 days of drought stress. The results indicated that, under drought stress, the leaf water parameters such as free water content, bound water content, relative water content and water loss rate of cutting leaves showed a declining trend at different growth stages of sorghum. The above parameters of Jiza305 (highly drought-resistant variety) decreased significantly less than those of Jiza127 (highly drought-sensitive variety), while Jinza106 (medium drought-resistant variety) and Jinza103 (drought-sensitive variety) performed in-between. Leaf temperature difference was positively related with free water content and relative water content ($P < 0.05$) and negatively with bound water content ($P < 0.01$). Leaf temperature changes can reflect leaf water status, and leaf temperature difference can serve as an important indicator for screening of drought resistance in sorghum. Therefore, it is feasible to apply infrared thermal imager technology for screening of drought resistance in sorghum.

Keywords: sorghum; drought stress; leaf temperature; leaf temperature difference; water status

高粱具有适应性广、耐旱耐瘠薄、抗逆性强的特点, 在干旱、半干旱地区农业生产中具有十分重要的

地位, 是抗旱性研究中的模式作物^[1-2]。当土壤水分不足时, 会引起作物自由水含量和相对含水量等

收稿日期: 2013-06-08

基金项目: 农业部现代农业产业技术体系建设专项资金(CAR-06-02-02)

作者简介: 王艺陶(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为作物生理。E-mail: wangyitao-happy@163.com。

* 通信作者: 黄瑞冬(1960—), 男, 教授, 博士, 从事作物栽培生理研究。E-mail: r_huang@126.com。

一系列水分状况的变化,作物通过水分的散失,降低体温,避免因干旱引起的体温升高而影响正常的生理活动。因此,叶片温度的变化可以作为在干旱胁迫下衡量作物生长发育状况的一个重要指标^[3-5]。近年来,随着远红外热成像技术的发展,通过精确测定叶片温度变化来评判作物的抗旱性已成为可能,利用该技术测定正常与干旱胁迫条件下的不同基因型作物叶片的温度差值,可以有效地判定作物的抗旱能力^[6-10]。本研究利用远红外热成像技术研究干旱条件下高粱叶片温度变化,同时结合叶片水分状况探讨叶温变化和水分状况之间的关系,为高粱抗旱性研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用本课题组试验筛选的4个具有不同抗旱能力、生育期相近的高粱杂交种作为供试材料,分别为高抗旱品种吉杂305,中等抗旱品种锦杂106,干旱敏感品种锦杂103和高度干旱敏感品种吉杂127。

1.2 试验设计

试验于2012年在沈阳农业大学农学院试验基地进行。采用室外盆栽种植,盆钵直径33 cm,高28 cm,每盆填装壤土20 kg。土壤取自沈阳农业大学试验田耕层,含全氮 $1.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $12.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $1.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质 $30.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $104.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $78.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和速效钾 $88.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 6.96,田间最大持水量为25.79%。播种时每盆施磷酸二铵3.00 g作种肥,拔节期追施尿素3.33 g。盆钵摆放方式为大垄双行排列,垄行距为0.66 m,双行行距为0.33 m,密度 $60\ 000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,5月17日播种,9月25日收获。

试验设3个干旱胁迫处理:拔节期干旱胁迫、开花期干旱胁迫和灌浆期干旱胁迫,以全生育期正常灌水为对照,保持对照土壤含水量为田间最大持水量的70%~80%。胁迫程度控制在中度水平,土壤含水量不低于田间最大持水量的45%。处理期间,每天17:00,用ML2X(DELTA-T, Britain)土壤水分仪测量当日土壤含水量,并用量筒定量补充水分以控制土壤水分含量。每个时期胁迫7 d,7 d后测定各项指标。干旱胁迫期间,盆钵可置于移动防雨棚内。胁迫解除后恢复正常供水至成熟。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶片温度的测定 采用Ti125(FLUKE, American)远红外热成像仪和SmartView3.2进行叶片温度数据的采集和分析。在干旱处理7 d后,每处

理选取长势一致的高粱3株,于上午9:00~10:00采集植株红外图像。植株与热成像仪距离为3.0 m,全辐射测量格式(is.2)自动对焦测量。拔节期叶片温度采集区域为高粱最上部完全展开叶中部,开花期和灌浆期为倒2叶中部区域。

1.3.2 叶片水分状况的测定 获取红外热成像图之后,取下所测叶片,放入冰盒,迅速带入实验室,进行水分状况的测定。参照张宪政的方法用阿贝折射仪测定自由水和束缚水含量,用称重法测定相对含水量和水分饱和亏缺^[11],采用马瑞昆^[12]提供的称重法测定离体叶片失水速率,自然失水时间设为6 h。

1.3.3 数据处理与分析 本试验采用干旱与对照间的叶片温度差,即叶温差进行数据分析^[6]。通过Excel 2003进行数据整理,SPSS 20.0进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对自由水和束缚水含量的影响

自由水和束缚水是植物组织中水分的两种不同存在形式,自由水与束缚水的比值可以反映两者的相对含量。植物自由水含量多,代谢活动强;束缚水含量多,则抗逆性强^[13]。由表1可知,干旱胁迫下4个高粱品种自由水含量和束缚水含量显著减少($P < 0.05$),但减少幅度不同。在拔节期,锦杂106的自由水含量和吉杂305的束缚水含量降低幅度最小,分别为21.71%和8.51%,而吉杂127的自由水含量和束缚水含量降低幅度皆为最大,分别为32.58%和22.53%。吉杂305的自由水/束缚水降幅为16.89%,而吉杂127的降幅13.08%,锦杂106和锦杂103的降幅分别为13.79%和12.67%,吉杂305体内束缚水比例最高,抗旱性强。干旱胁迫下,吉杂305的水分平衡能力要优于吉杂127。在开花期,吉杂305的自由水含量和束缚水含量最小,分别为24.93%和6.58%,锦杂103的自由水含量和吉杂127的束缚水含量降幅最大,分别为28.36%和18.92%。吉杂305的自由水/束缚水降幅为19.86%,显著小于吉杂127的39.72%($P < 0.05$)。在灌浆期,吉杂305的自由水含量和锦杂106的束缚水含量降低幅度最小,分别为21.30%和10.51%,而锦杂103的自由水含量和吉杂127的束缚水含量降低幅度最大,分别为31.98%和14.20%。吉杂305的自由水/束缚水降幅为11.85%,吉杂127的降幅为9.09%。上述结果说明,干旱胁迫下,吉杂305和锦杂106对干旱胁迫不敏感,自由水和束缚水含量的降幅较小,而锦杂103和吉杂127受干旱胁迫影响较大,自由水和束缚水含量的降幅较大。

表 1 干旱胁迫对叶片自由水含量和束缚水含量的影响

Table 1 Effect of drought stress on free water content and bound water content in leaves of sorghum cultivars

生育时期 Growth stage	品种 Cultivar	处理 Treatment	自由水/% Free water content	束缚水/% Bound water content	自由水/束缚水 Free water/bound water
拔节期 Jointing stage	吉杂 305 Jiza305	CK	48.61a	32.78a	1.48a
		DS	36.96d	29.99c	1.23b
	锦杂 106 Jinza106	CK	48.05ab	33.22a	1.45a
		DS	37.62d	30.01c	1.25b
	锦杂 103 Jinza103	CK	46.98b	32.99a	1.42a
		DS	33.56e	27.13d	1.24b
开花期 Flowering stage	吉杂 127 Jiza127	CK	45.36c	35.02a	1.30b
		DS	30.58f	27.13d	1.13c
	吉杂 305 Jiza305	CK	47.65a	32.66b	1.46a
		DS	35.77c	30.51c	1.17c
	锦杂 106 Jinza106	CK	47.25ab	32.33b	1.46a
		DS	34.79cd	30.03cd	1.16c
锦杂 103 Jinza103	CK	46.01ab	32.61b	1.41a	
	DS	32.96de	28.96de	1.14c	
灌浆期 Filling stage	吉杂 127 Jiza127	CK	44.97b	35.26a	1.28b
		DS	32.22e	28.59e	1.13c
	吉杂 305 Jiza305	CK	45.45ab	33.56a	1.35ab
		DS	35.77d	30.02d	1.19c
	锦杂 106 Jinza106	CK	46.25a	33.78a	1.37ab
		DS	34.62e	30.23cd	1.15cd
锦杂 103 Jinza103	CK	44.44b	31.61b	1.41a	
	DS	30.23g	27.52e	1.10d	
吉杂 127 Jiza127	CK	41.24c	31.27bc	1.32b	
	DS	32.22f	26.83e	1.20c	

注:CK,对照;DS,干旱胁迫。同一列中相同字母表示 0.05 水平差异不显著。下同。

Note: CK: control; DS: drought stress. The same letters within same columns indicate no significance at 0.05 level. The same as below.

2.2 干旱胁迫对离体叶片失水速率的影响

离体叶片失水速率反映作物叶片的抗脱水能力,离体叶片失水率越小说明叶片持水力越大,作物抗旱性越强^[14-15]。从表 2 中可以看出,干旱胁迫下,4 个高粱品种离体叶片失水速率均呈现升高趋势。拔节期,吉杂 305 的离体叶片失水速率升幅最小,为 3.94%,锦杂 106 的升幅为 4.33%,吉杂 305 和锦杂 106 的升幅均无显著性差异($P < 0.05$),表现出较强的抗旱能力。开花期,吉杂 127 的离体叶片失水速率升高幅度最大,比对照增加了 8.68%,抗脱水能力较差。灌浆期,吉杂 305 的离体叶片失水速率升幅最小,只比对照升高了 8.53%,吉杂 127 升幅最大,为 9.61%。吉杂 305 在三个时期均表现出较好的抗脱水能力,而吉杂 127 的抗脱水能力均较差。

2.3 干旱胁迫对相对含水量及水分饱和和亏缺的影响

相对含水量和水分饱和和亏缺是反映植物保水能力的重要指标,可以间接地反映作物的抗旱能力^[16-17]。由表 3 可知,干旱胁迫下 4 个高粱品种相

表 2 干旱胁迫对高粱离体叶片失水速率的影响

Table 2 Effect of drought stress on water loss rate of cutting leaves in sorghum cultivars

品种 Cultivar	处理 Treatment	生育时期 Growth stage		
		拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage
吉杂 305 Jiza305	CK	5.24d	5.44f	7.03e
	DS	5.45cd	5.66e	7.63d
锦杂 106 Jinza106	CK	5.36d	5.70e	6.93e
	DS	5.59c	5.95d	7.55d
锦杂 103 Jinza103	CK	5.66c	6.04d	7.88c
	DS	5.94b	6.52b	8.60b
吉杂 127 Jiza127	CK	5.88b	6.24c	8.06c
	DS	6.19a	6.78a	8.84a

对含水量呈下降趋势,而水分饱和和亏缺呈升高趋势,说明干旱胁迫下,叶片保水能力有所下降。拔节期,吉杂 305 的相对含水量降幅最低,为 3.39%,锦杂 106 的水分饱和和亏缺增幅最小,为 63.96%。吉杂 305 和锦杂 106 的相对含水量和水分饱和和亏缺差异

不明显,说明二者在拔节期均表现出较好的抗旱性。开花期,吉杂 305 表现出相对较好的抗旱能力,相对含水量的降幅最低,为 3.19%,水分饱和和亏缺的增幅最小,为 68.52%。灌浆期,吉杂 127 的相对含水量降幅最大,为 6.57%,锦杂 103 的水分饱和和亏缺增幅最小,为 52.48%,说明在灌浆期,干旱胁迫对锦杂 103 和吉杂 127 的保水能力影响较大。

表 3 干旱胁迫对相对含水量和水分饱和和亏缺的影响

Table 3 Effect of drought stress on relative water content and water saturation deficit in sorghum cultivars

生育时期 Growth stage	品种 Cultivar	处理 Treatment	相对含 水量/% Relative water content	水分饱和 和 亏缺/% Water saturation deficit
拔节期 Jointing stage	吉杂 305 Jiza305	CK	95.93a	4.07d
		DS	92.68c	7.32b
	锦杂 106 Jinza106	CK	94.91ab	5.09cd
		DS	91.66c	8.34b
	锦杂 103 Jinza103	CK	94.16b	5.84c
		DS	89.41d	10.59a
开花期 Flowering stage	吉杂 127 Jiza127	CK	94.38b	5.62c
		DS	89.69d	10.31a
	吉杂 305 Jiza305	CK	95.55a	4.45d
		DS	92.51c	7.49b
	锦杂 106 Jinza106	CK	95.88a	4.12d
		DS	91.76c	8.24b
灌浆期 Filling stage	锦杂 103 Jinza103	CK	93.85b	6.15c
		DS	88.99d	11.01a
	吉杂 127 Jiza127	CK	94.56ab	5.44cd
		DS	89.07d	10.93a
	吉杂 305 Jiza305	CK	95.45a	4.55e
		DS	91.29b	8.71d
锦杂 106 Jinza106	CK	95.43a	4.57e	
	DS	90.92b	9.08d	
锦杂 103 Jinza103	CK	90.27bc	9.73cd	
	DS	85.16d	14.84b	
吉杂 127 Jiza127	CK	89.50c	10.50c	
	DS	83.62e	16.38a	

2.4 干旱胁迫对高粱叶片温度的影响

图 1 为远红外热成像仪 Ti125 拍摄的吉杂 305 灌浆期热成像图,标尺中不同颜色分别代表不同的温度值,A 和 B 分别为正常灌水和干旱胁迫处理吉杂 305 的热成像图,叶片温度在不同处理间差异明显。干旱胁迫时,高粱叶片温度升高,叶温差增大,三个时期叶温的变化范围为 0.83℃ ~ 1.62℃,但不同品种的叶温升高幅度不同(图 2)。拔节期吉杂 127 的叶温差最小,为 0.90℃,吉杂 305 的叶温差最大,为 1.46℃,两者之间差异显著($P < 0.05$)。说明干旱胁迫下,吉杂 305 植株体内相应的水分状况要

显著好于吉杂 127($P < 0.05$),显示出较强的抗旱性。开花期吉杂 305 的叶温差最大,为 1.62℃,吉杂 127 的叶温差最小,比吉杂 305 降低 0.83℃(48.56%),差异显著($P < 0.05$)。灌浆期,吉杂 127 叶温差最小,吉杂 305 叶温差最大,分别为 1.05℃和 1.58℃。吉杂 127 在三个生育时期的叶温差变化范围为 0.90℃ ~ 1.05℃,吉杂 305 为 1.46℃ ~ 1.62℃,锦杂 106 和锦杂 103 的变化范围介于吉杂 305 和吉杂 127 之间。

2.5 叶片水分状况与叶温差的相关性分析

应用各水分状况干旱胁迫测定值和对照之间的比值同叶温差进行双变量 Pearson 简单系数法相关性分析^[6,18](表 4)。结果表明,多数性状间的相关性达到了显著或极显著水平。自由水和相对含水量相关系数最大,为 0.825^{**}。叶温差与自由水含量和相对含水量显著相关($P < 0.05$),相关系数分别为 0.666^{*}和 0.664^{*},与束缚水含量呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数为 0.750^{**}。离体叶片失水速率和自由水含量显著负相关($P < 0.05$),相关系数为 -0.631^{*},与相对含水量极显著负相关($P < 0.01$),相关系数为 -0.869^{**}。上述结果表明,叶温差越大,则自由水含量、束缚水含量和相对含水量越大,而离体叶片失水速率越小,叶片保水能力越好。因此,在干旱胁迫下叶温变化较大的高粱抗旱性强。

3 讨论与结论

3.1 干旱胁迫对高粱叶片水分状况的影响

自由水含量、束缚水含量和相对含水量等水分状况与植物生长及抗性有着十分密切的关系。本试验结果表明,干旱胁迫下的高粱叶片自由水含量,束缚水含量和相对含水量等水分状况明显低于正常灌水处理,而离体叶片失水速率和水分饱和和亏缺高于正常灌水处理。水分状况中自由水含量影响代谢强度,含量越高,代谢越旺盛;而束缚水含量则与植物的抗性密切相关,含量越多,抗性越强^[19]。高抗旱品种吉杂 305 的自由水含量和束缚水含量对干旱胁迫均不敏感,降幅较小,而高度敏感品种吉杂 127 对干旱胁迫较敏感,降幅较大,中等抗旱品种锦杂 106 和干旱敏感品种锦杂 103 介于二者之间,符合植物代谢与抗旱表现特征。吉杂 305 在干旱胁迫下仍具有较高的代谢强度,具有较好的维持正常生命活动的的能力(将另文发表)。前人研究结果表明,不同抗旱性作物离体叶片失水速率和相对含水量对干旱胁迫的响应是不同的,抗旱性强的品种离体叶片失水速率和相对含水量变化幅度均较小,并且能维持水

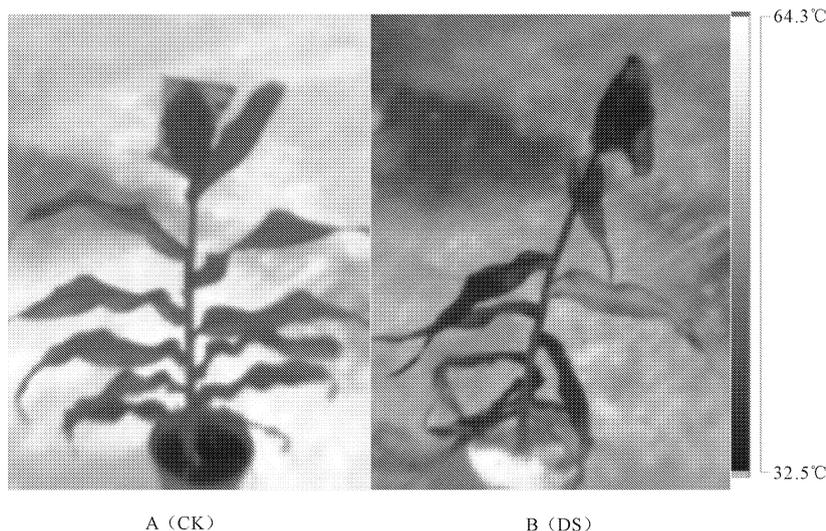


图 1 远红外热成像仪 Ti125 拍摄的吉杂 305 灌浆期热成像图

Fig.1 Thermal images of Jiza305 at filling stage taken by Ti125

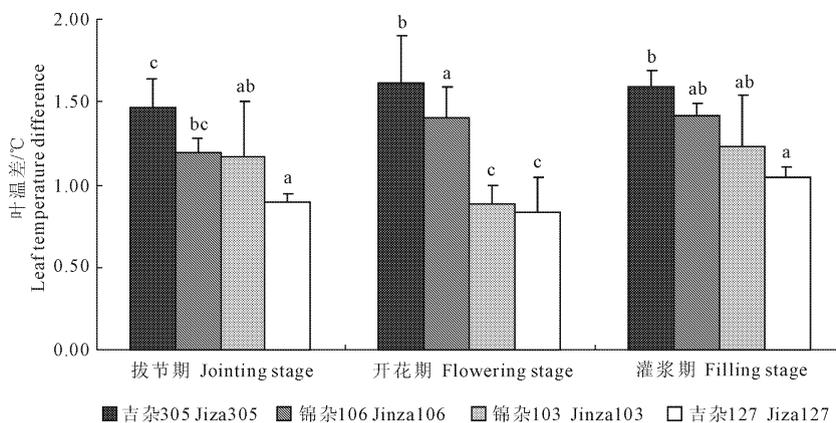


图 2 干旱胁迫对高粱叶温差的影响

Fig.2 Effect of drought stress on leaf temperature difference of sorghum cultivars

表 4 干旱胁迫下高粱各测定指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among measured parameters of sorghum cultivars under drought stress

项目 Items	叶温差 LTD	自由水 FWC	束缚水 BWC	自由水/ 束缚水 F/B	离体叶片 失水速率 RWL	相对 含水量 RWC	水分饱和和 亏缺 WSD
LTD	1.000						
FWC	0.666 *	1.000					
BWC	0.750 **	0.651 *	1.000				
F/B	-0.057	0.465	-0.368	1.000			
RWL	-0.397	-0.631 *	-0.334	-0.403	1.000		
RWC	0.664 *	0.825 **	0.618 *	0.300	-0.869 **	1.000	
WSD	0.041	0.283	-0.077	0.458	-0.272	0.111	1.000

注:LTD,叶温差;FWC,自由水含量;BWC,束缚水含量;F/B,自由水/束缚水;RWL,离体叶片失水速率;RWC,相对含水量;WSD,水分饱和和亏缺。*和**分别表示在0.05和0.01的显著水平。

Note: LTD: leaf temperature difference; FWC: free water content; BWC: bound water content; F/B: free water content / bound water content; RWL: water loss rate of cutting leaves; RWC: relative water content; WSD: water saturation deficit. * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 probability level, respectively.

分在较高的水平,具有较强的保水能力^[20-22]。高抗旱品种吉杂 305 的离体叶片失水速率在三个时期

升幅均小于其它 3 个品种,并且相对含水量的降幅均显著小于高度干旱敏感品种吉杂 127($P < 0.05$),

说明吉杂 305 具有较好的保水能力和水分调节能力,干旱胁迫下也能维持体内较优的生理状态。

3.2 叶温差与高粱的抗旱性

远红外热成像仪能反映出高粱叶片温度的微小变化,有利于简便、快速和无损伤地检测试验材料,是作物叶片温度变化和逆境胁迫研究的一项重要手段^[9-10]。本试验通过远红外热成像仪分析干旱胁迫下高粱叶片温度的变化,进一步证明了不同抗旱性高粱在干旱胁迫下叶片温度变化存在差异。干旱胁迫下高粱叶片温度与正常灌水处理相比均呈升高趋势,但不同抗旱性品种升高幅度不同,干旱敏感品种(吉杂 127 和锦杂 103)叶片温度变化幅度较小,而抗旱性品种叶片温度升幅较大,这可能是由于干旱条件下敏感品种水分散失较多,大量水分的散失会带走更多的热量,进而表现为叶片温度的升幅较小^[23-24]。叶片温度的变化还可以在一定程度上反映出作物受旱程度和叶片水分性状的变化^[7],本试验结果表明,叶温差与自由水含量、束缚水含量和相对含水量显著相关($P < 0.05$),进一步表明了束缚水含量和相对含水量等水分状况与作物抗旱能力密切相关^[19-20]。另外,有研究表明,与充足灌溉相比,干旱胁迫下叶温可升高 $3^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ ^[25],而由于研究作物不同、胁迫处理方法的差异,以及试验场所环境等因素的影响,本试验中叶片温度最大仅升高 1.62°C ,但表现出相同变化趋势。

植物体内水分主要是通过气孔散失到空气中^[6],叶片温度变化是否可以反映光合生理以及物质积累等一系列生理生化的变化,还有待于进一步研究。此外,在远红外热成像仪的实际应用方面,作物叶片的完整性、有无病虫害侵蚀等情况会影响到叶片热成像结果的准确性^[26],测量时应注意植株叶片的选择,避免选择受损叶片。

3.3 结论

叶片温度可以间接反映干旱胁迫下高粱植株的水分状况,能够体现出高粱抗旱性的强弱。叶温差可以作为抗旱性初步筛选的一个重要指标,该方法简洁、快速,可用于高粱抗旱性的鉴定。

参考文献:

[1] 山 仑,徐炳成.论高粱的抗旱性及在旱区农业中的地位[J]. 中国农业科学,2009,42(7):2342-2348.
 [2] 裴 冬,张喜英,王 峻.高粱、谷子根系发育及其抗旱性研究[J].中国生态农业学报,2002,10(4):28-30.
 [3] Toshiyuki T, Masahiro Y, Toshio Y. Canopy temperature on clear and cloudy days can be used to estimate varietal differences in stomatal conductance in rice[J]. Field Crops Research, 2010, 115(2):165-170.
 [4] Ghulama A, Li Zh L, Qin Q M, et al. Estimating crop water stress

with ETM+ NIR and SWIR data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008,148(11):1679-1695.
 [5] Romano G, Zia S, Spreer W, et al. Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011,79(1):67-74.
 [6] 刘 亚,丁俊强,苏巴钱德,等.基于远红外热成像的叶温变化与玉米苗期耐旱性的研究[J].中国农业科学,2009,42(6):2192-2201.
 [7] 赵晓彤,韩亚东,高继平,等.水稻穗分化期不同土壤水势叶温及生理性状变化[J].湖北农业科学,2011,50(1):33-36.
 [8] Blum A, Mayer J, Gozlan G. Infrared thermal sensing of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat[J]. Field Crops Research, 1982,5:137-146.
 [9] 刘 亚,丁俊强,Subhash C,等.两个玉米自交系苗期叶温的干旱响应研究[J].作物杂志,2008,(6):62-65.
 [10] 王 冰,崔日鲜,王月福.基于远红外成像技术的花生苗期抗旱性鉴定[J].中国油料作物学报,2011,33(6):632-636.
 [11] 张宪政.作物生理研究法[M].北京:农业出版社,1992:117-123.
 [12] 马瑞昆,刘淑贞,贾秀领,等.高产节水小麦基因型生理特性及综合评价[J].中国农业科学,1995,28(6):32-39.
 [13] 张国芳,孟 林,毛培春.偃麦草和中间偃麦草种质材料苗期抗旱性鉴定研究[J].华北农学报,2007,22(3):54-59.
 [14] 张明生,彭忠华,谢 波,等.甘薯离体叶片失水速率及渗透调节物质与品种抗旱性的关系[J].中国农业科学,2004,37(1):152-156.
 [15] 贺亚川,俎伟华,王琴,等.6种多浆植物耐旱性初步比较[J].西北农业学报,2010,19(3):127-130.
 [16] 李彦瑾,赵 忠,孙德祥,等.干旱胁迫下柠条锦鸡儿的水分生理特征[J].西北林学院学报,2008,23(3):1-4.
 [17] 马秀芳,沈秀瑛,杨德光,等.不同耐旱性玉米品种对干旱的生理生化反应[J].沈阳农业大学学报,2002,33(3):167-170.
 [18] 高福元,赵成章,卓玛兰草.高寒山地甘肃旱草斑块特征与土壤水分的关系[J].应用与环境生物学报,2012,18(4):571-574.
 [19] 孙存华,李 扬,贺鸿雁,等.藜对干旱胁迫的生理生化反应[J].生态学报,2005,25(10):2556-2561.
 [20] 张明生,彭忠华,谢 波,等.甘薯离体叶片失水速率及渗透调节物质与品种抗旱性的关系[J].中国农业科学,2004,37(1):152-156.
 [21] 张 娜,赵宝平,郭若龙,等.水分胁迫对不同抗旱性燕麦品种生理特性的影响[J].麦类作物学报,2012,3(1):150-156.
 [22] 张卫星,赵 致,柏光晓,等.不同玉米杂交种对水分和氮胁迫的响应及其抗性[J].中国农业科学,2007,40(7):1361-1370.
 [23] 贾正茂,崔远来,刘方平,等.不同水分条件下棉花径流、叶温及茎粗变化规律[J].中国农村水利水电,2012,(6):73-77.
 [24] 杨 梅.水稻叶温与气象条件、水分状况及产量结构关系的研究[C]//中国气象学会.中国气象学会 2007 年年会:生态气象业务建设与农业气象灾害预警分会论文集.广州:中国气象学会,2007:364-371.
 [25] 韩亚东,张文忠,杨 梅,等.孕穗期水稻叶温与水分状况关系的研究[J].中国农学通报,2006,22(2):214-216.
 [26] Mian M A R, Bailey M A, Ashley D A, et al. Molecular markers associated with water use efficiency and leaf ash in soybean[J]. Crop Science, 1996,36(5):1252-1257.