文章编号: 1005-0906(2008)03-0064-06

玉米叶片水分利用效率及其相关性状的研究

于晓芳[1],高聚林[1],宋国栋[2],冯　勇[3],赵瑞霞[3],孙峰成[3],王志刚[1],李丽君[1]

(1.内蒙古农业大学,呼和浩特 010018; 2.内蒙古种子管理站,呼和浩特 010010;
3.内蒙古农牧科学院玉米研究中心,呼和浩特 010010)

摘　要: 在正常灌溉和中度水分胁迫处理条件下,测定23个玉米自交系其叶片水分利用效率,并将玉米叶片水分利用效率与生理生化、农艺学及产量形成因素等22个性状进行相关性分析。结果表明:玉米在中度水分胁迫条件下的WUE均高于正常灌溉条件下的WUE;玉米叶片水分利用效率与光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、穗位高、雄穗分枝数、开花至吐丝间隔、秃尖长、单穗粒重、穗粒数、穗行数等性状呈显著或极显著相关关系。

关键词: 玉米;水分利用效率(WUE);生理生化;农艺性状

中图分类号: S513.01　　**文献标识码:** A

The Study on Water Use Efficiency and Concerned Traits of Maize Inbred Lines Leaves

YU Xiao-fang[1], GAO Ju-lin[1], SONG Gou-dong[2], FENG Yong[3], et al.

(1. *Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot* 010018; 2. *Inner Mongolian Seed Management Station, Huhhot* 010010; 3. *Institute of Crop Science, Inner Mongolian Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Huhhot* 010010, China)

Abstract: Twenty three maize inbred lines were used in this research, measuring their leaves WUE on the normal irrigation condition and the moderate water stress condition, and carrying on relevant analysis between the maize WUE with the physiological biochemistry, the agronomy, the output and 22 traits. The research results showed that the maize leaf WUE under the moderate water stress condition are higher than others under the normal irrigation condition, among of 23 maize inbred lines, 444 WUE is the highest, but Mo17 WUE is the lowest; the maize leaf WUE is remarkable or extremely remarkable correlation dependence with Pn, Tr, Gs, Ci, EH, TEN, ASI, SSGW, BEL, SLN and SGND.

Key words: Maize; Water use efficiency (WUE); Physiological biochemistry; Agronomy traits

旱和水资源短缺已经成为农业和社会发展的制约因素，干旱造成的粮食减产直接威胁着我国乃至世界的粮食安全。Levitt、Turner 和 Hall 研究认为作物对干旱的适应包括高水分利用效率、御旱和耐旱3种机制[1]。张正斌提出提高水分利用效率是未来农业研究的关键[2]。

我国三分之二的玉米生产在干旱半干旱地区,每年因为干旱导致玉米减产260万t,受旱面积达458万 hm^2[3],干旱严重制约着我国玉米的生产。本试验通过对玉米自交系水分利用效率的测定,筛选水分利用效率差异大的自交系,为定位控制水分利用效率基因提供适宜的亲本。通过对玉米WUE与其它性状的测定及相关关系分析,初步筛选出与玉米WUE关系密切的性状,为选育高水分利用效率玉米品种提供科学的理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

以内蒙古农牧科学院玉米研究中心提供的

收稿日期: 2008-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(30660083)、内蒙古自然科学基金项目(200408020302)。

作者简介: 于晓芳(1974-),女,在读博士,主要从事玉米水分高效利用的研究。

E-mail:yuxiaofang815@126.com

高聚林为本文通讯作者。Tel:0471-4305414

E-mail:gaojulin@yahoo.com.cn

23 个玉米自交系(北 711、承 18、303 粘、卡♂、海 268、KL4、合 344、吉 8349-2、U7-1、5074、K10、444、Mo17、3081、1134、扎 927-1、M3401、M5168、C8605、黄 C、昌 7-2、冲 72、蒙 03S5853)为试验材料。

1.2　试验方法

试验于 2007 年在内蒙古农业大学试验基地防雨棚内进行。采取了不同灌溉处理:正常灌溉和中度水分胁迫(正常灌溉:土壤含水量为田间最大持水量的 75%～80%;中度水分胁迫:土壤含水量为田间最大持水量的 40%～55%),密度 60 000 株/hm²,其它田间管理同一般玉米田完全一致。小区面积 2 m×5 m,试验随机区组设计,重复 2 次。正常灌水条件下,在整个生育期内一出现旱象即灌水,共灌水 8 次,灌水方式为沟灌;中度胁迫条件下,播种前灌足底墒水,在生育期内大喇叭口期取样后灌水 1 次,灌水量 50 L/m³。在大喇叭口期、抽雄期、灌浆期测定各项指标。

1.2.1　生理指标测定方法

光合特性与叶片水分利用效率:使用 LI-6400 光合测定系统分别测定光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)和胞间 CO_2 浓度(Ci),并计算出叶片水分利用效率(WUE=Pn/Tr)。

叶片相对含水量(RWC):将叶片称鲜重(Wf)后,放入蒸馏水中浸泡 24h 后取出,吸干表面水分,称饱和鲜重(Wt)。置烘箱 105℃下杀青 30 min,后在 80℃下烘干至恒重,称干重(Wd)。相对含水量 RWC(%)=(Wf-Wd)/(Wt-Wd)×100%。

相对电导率(REC):电导仪法。

过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)和丙二醛含量(MAD):参照李合生主编的《植物生理生化实验原理和技术》[4]。

1.2.2　农艺性状及产量性状测定方法

采用常规田间观察法测定株高(PH)、穗位高(EH)、茎粗(SD)、秃尖长、雄穗分枝数(TBN)、绿叶数(GLN)、雄丝间隔(ASI)等;收获测产后,测定穗行数(ELN)、行粒数(LGN)、穗粒数(EGN)、百粒重(HGW)等指标,单穗粒重(SEGW)= 穗粒数×百粒重/100。

2　结果与分析

2.1　玉米不同自交系叶片水分利用效率的差异

表 1　玉米不同自交系叶片水分利用效率的差异

Table 1　Diversity of water use efficiency of 23 maize inbred lines leaf in different stages

自交系 Inbred lines	正常灌水条件 The normal irrigation condition			中度水分胁迫条件 The moderate water stress condition		
	大喇叭口期 Tuba mouth	抽雄期 Tasseling	灌浆期 Grain	大喇叭口期 Tuba mouth	抽雄期 Tasseling	灌浆期 Grain
北 711	1.93	3.88	5.22	2.32	4.30	5.67
承 18	1.83	3.73	5.18	2.21	4.13	5.85
303 粘	2.02	3.07	3.39	1.85	3.83	4.27
卡♂	1.97	3.30	4.49	2.18	3.48	4.84
海 268	2.30	4.25	7.52	2.86	4.62	7.06
KL4	1.76	3.75	4.87	2.01	3.98	5.67
合 344	1.86	3.13	4.28	1.85	3.37	4.68
吉 8349-2	1.68	3.41	4.21	2.04	3.52	4.83
U7-1	1.62	3.55	5.39	2.15	3.74	5.95
5074	2.26	4.10	4.26	2.54	4.40	4.89
K10	1.84	3.66	4.31	2.37	4.21	4.96
444	2.16	4.02	6.98	2.44	4.35	7.77
Mo17	1.69	3.31	3.15	1.85	3.01	3.26
3081	1.73	3.82	5.29	2.41	4.33	5.87
1134	1.59	3.16	4.97	1.83	3.74	5.55
扎 927-1	2.09	3.03	3.69	2.16	3.62	3.93
M3401	2.21	4.32	5.58	2.57	4.58	6.03
M5168	1.84	3.96	4.37	2.39	4.50	4.82
C8605	2.17	4.22	7.26	2.31	4.58	7.17

续表 1 Continued 1

自交系 Inbred lines	正常灌水条件 The normal irrigation condition			中度水分胁迫条件 The moderate water stress condition		
	大喇叭口期 Tuba mouth	抽雄期 Tasseling	灌浆期 Grain	大喇叭口期 Tuba mouth	抽雄期 Tasseling	灌浆期 Grain
黄 C	1.92	3.88	5.13	2.08	3.93	5.29
昌 7-2	1.87	3.81	6.18	2.04	3.86	6.27
冲 72	1.75	4.10	5.34	2.07	4.51	5.78
蒙 03S5853	1.84	3.98	4.26	1.92	4.12	4.31

由表 1 可知，在正常供水和中度水分胁迫条件下，23 个玉米自交系的 WUE 皆表现为灌浆期＞抽雄期＞大喇叭口期。不同自交系对水分胁迫的反应不同，在正常灌水条件下，3 个生育时期内 WUE 最高和次高的皆为海 268 和 C8605；中度水分胁迫下，灌浆期 444 的 WUE 高于海 268 和 C8605，说明 444 对水分匮缺或干旱的适应性比海 268 和 C8605 强。另外，玉米自交系在中度水分胁迫条件下的 WUE 均高于正常灌溉条件下的 WUE，说明玉米可以通过提高叶片 WUE 来适应干旱胁迫。

2.2 中度胁迫条件下玉米叶片水分利用效率与其它性状的关系

2.2.1 玉米叶片水分利用效率与叶片生理指标的关系

表 2 玉米叶片水分利用效率与叶片生理指标的相关分析

Table 2 Correlation analysis between Maize leaf WUE and other physiological indexes

项目 Item	WUE	Pn	Tr	Gs	Ci	RWC	REC	SOD	POD	MAD
WUE	1.000									
Pn	0.635**	1.000								
Tr	-0.704**	0.007	1.000							
Gs	-0.718**	0.319	0.675**	1.000						
Ci	-0.580**	-0.563**	0.285	0.595**	1.000					
RWC	0.239	0.108	-0.220	-0.232	-0.134	1.000				
REC	-0.071	-0.064	-0.121	-0.226	0.077	0.298	1.000			
SOD	-0.137	0.043	0.173	0.169	0.119	-0.346	0.120	1.000		
POD	-0.197	0.133	0.203	0.224	0.094	0.156	-0.025	0.232	1.000	
MAD	-0.184	0.024	0.047	0.085	0.084	0.331	0.224	0.063	0.181	1.000

注：试验分析结果是基于灌浆期中度胁迫条件下的各指标数据，“**”表示达 1%显著水平。“*”表示达 5%显著水平。下表同。

Notes: The results based on the grain stages data under the moderate water stress condition , “**”indicated the significant at the 0.01 level($p \leq 0.05$) , “*” indicated the significant at the 0.05 level($p \leq 0.01$). The same as the following tables.

相关分析表明（表 2），叶片水分利用效率（WUE）与叶片光合速率（Pn）呈极显著的正相关关系，与蒸腾速率（Tr）呈极显著负相关（图 1、图 2），说明叶片光合速率和蒸腾速率是影响水分利用效率的主要因素，但 WUE 与 Tr 的相关系数大于 WUE 与 Pn 的相关系数，分别为 0.635 和 -0.704。说明干旱胁迫对蒸腾的影响大于对光合的影响，作物在干旱胁迫时主要是通过降低其蒸腾速率来提高水分利用效率。

叶片气孔是 CO_2 和水汽交换的通道，因此气孔行为同时控制叶片的光合作用与蒸腾作用，从表 2 可见，玉米叶片水分利用效率与气孔导度呈极显著的负相关关系（图 3），而气孔导度与蒸腾速率呈极显著的正相关关系。说明玉米叶片在水分胁迫条件下产生了适应性反应，气孔导度降低，蒸腾速率减弱的程度比光合作用减弱的程度大，从而间接导致了叶片水分利用效率的升高，这与崔兴国的研究结果相一致[5]。

由表 2 可见，胞间二氧化碳浓度与叶片水分利用效率呈极显著负相关关系（图 4），与光合速率呈极显著负相关关系，这说明，在干旱胁迫条件下作物利用了大量的胞间二氧化碳进行光合作用，从而使水分利用效率提高，胞间二氧化碳浓度降低。

2.2.2　玉米叶片水分利用效率与农艺性状的相关关系

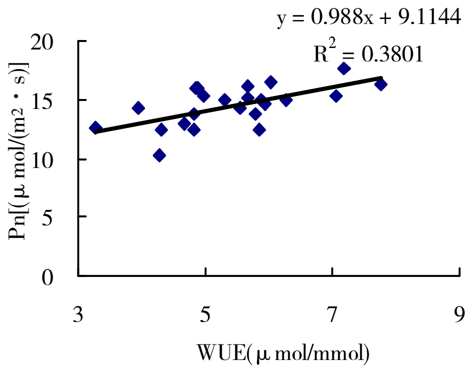

图 1　玉米自交系叶片 WUE 与 Pn 的关系

Fig.1　Relation of WUEand Pn of the maize leaf

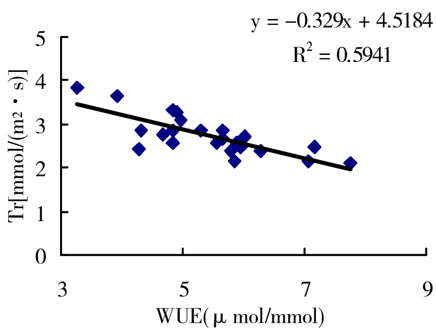

图 2　玉米自交系 WUE 与 Tr 的关系

Fig.2　Relation of WUE and Tr of the maize leaf

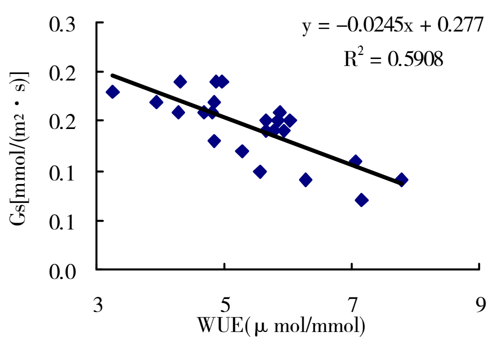

图 3　玉米自交系 WUE 与 Gs 的关系

Fig.3　Relation of WUE and Gs of the maize leaf

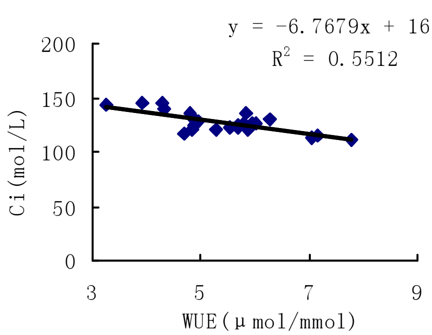

图 4　玉米自交系 WUE 与 Ci 的关系

Fig.4　Relation of WUE and Ci of the maize leaf

已有研究表明，如果在玉米开花前和开花期间发生干旱胁迫往往造成吐丝延迟，开花至吐丝间隔时间拉长[6]。本研究表明,玉米的水分利用效率与开花至吐丝间隔呈显著的负相关（图 5),说明在干旱胁迫条件下，水分利用效率高的作物更能充分利用有限的水资源来确保抽雄和吐丝正常进行，因此开花至吐丝间隔天数在玉米水分利用效率研究中是一个重要的指标。从表 3 可知,玉米叶片水分利用效率与穗位高、雄穗分枝数呈显著正相关(图 6,图 7),因此在选育高水分利用效率玉米品种可将穗位高和雄穗分枝数作为重要性状指标。

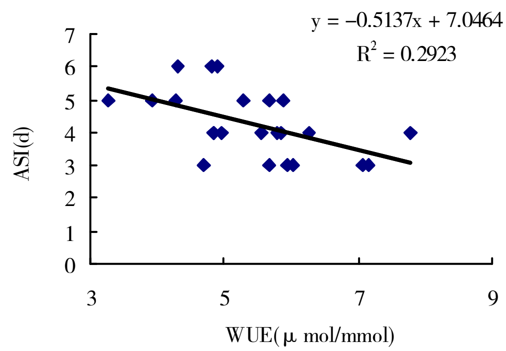

图 5　玉米自交系叶片 WUE 与 ASI 的关系

Fig.5　Relation of WUE and ASI of the maize leaf

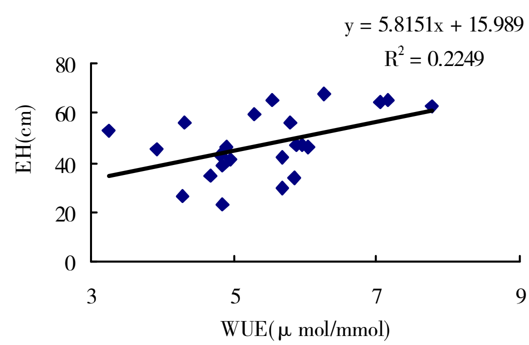

图 6　玉米自交系叶片 WUE 与 EH 的关系

Fig.6　Relation of WUE and EH of the maize leaf

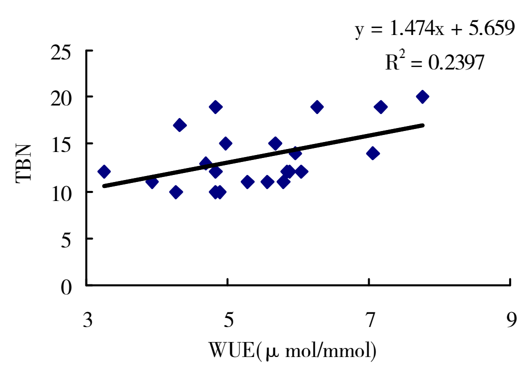

图 7　玉米自交系叶片 WUE 与 TBN 的关系

Fig.7　Relation of WUE and TBN of the maize leaf

表3 玉米叶片水分利用效率与农艺性状的相关分析

Table 3 Correlation analysis between maize leaf WUE and agricultural properties

项目 Item	WUE	株高 PH	绿叶数 GLN	茎粗 SD	穗位高 EH	雄穗分枝 TBN	开花至吐丝间隔 ASI
WUE	1.000						
株 高	0.071	1.000					
绿叶数	0.288	0.559**	1.000				
茎 粗	0.035	0.640**	0.792**	1.000			
穗位高	0.489*	0.671**	0.555**	0.500*	1.000		
雄穗分枝	0.429*	-0.114	0.004	-0.207	0.214	1.000	
开花~吐丝间隔	-0.569**	0.240	0.035	0.249	-0.046	-0.426*	1.000

表4 玉米叶片水分利用效率与产量构成因子相关分析

Table 4 Correlation analysis between maize leaf WUE and yield components

项目 Item	WUE	单穗粒重 SSGW	秃尖长 BSL	穗行数 SLN	行粒数 LGN	穗粒数 SGN	百粒重 HGW
WUE	1.000						
单穗粒重	0.466*	1.000					
秃尖长	-0.444*	-0.231	1.000				
穗行数	0.424*	0.356	0.129	1.000			
行粒数	0.349	0.368	-0.548	-0.149	1.000		
穗粒数	0.460*	0.430*	-0.292	0.390	0.262	1.000	
百粒重	0.257	0.575**	-0.318	0.151	0.498*	0.242	1.000

2.2.3 玉米叶片水分利用效率与产量形成因素的相关关系

对于旱地作物,获得好的产量,不但要求有一定的抗旱性,保证植株正常生长发育,同时还必须具有水分高效利用特性[7]。因此,在对玉米进行水分利用效率研究时,子粒产量和产量因子始终是最重要的研究性状。从表4可知,水分利用效率与单穗粒重、穗行数、穗粒数呈显著的正相关(图8、图9、图10),而与秃尖长呈显著的负相关(图11)。说明在水分胁迫条件下,作物水分利用效率的提高将减小果穗的秃尖长度,确保正常的穗行数和穗粒数,从而提高单穗粒重,达到稳产、高产目的。

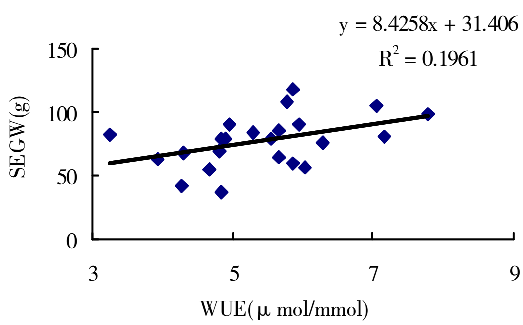

图8 玉米自交系叶片WUE与SSGW的关系

Fig.8 Relation of WUE and SSGW of the maize leaf

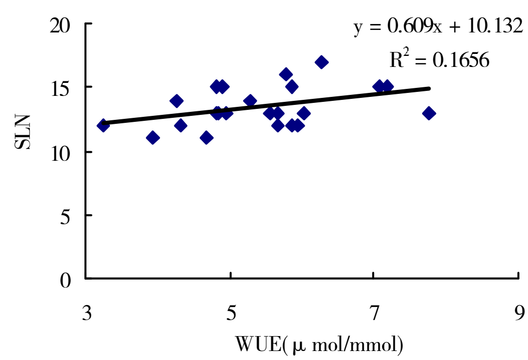

图9 玉米自交系叶片WUE与SLN的关系

Fig.9 Relation of the maize leaf WUE and SLN

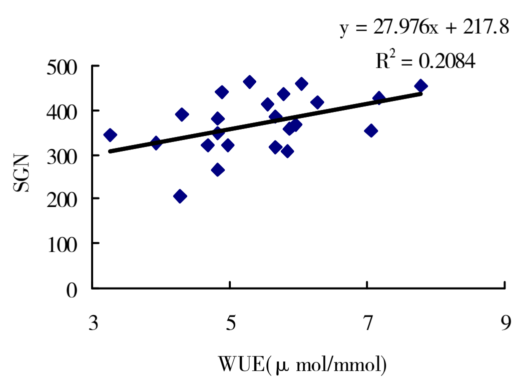

图10 玉米自交系叶片WUE与SGN的关系

Fig.10 Relation of the maize leaf WUE and SGN

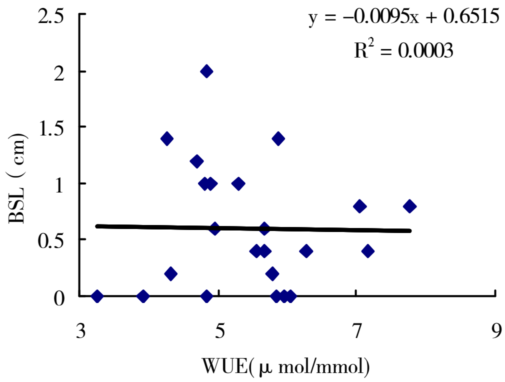

图 11　玉米自交系叶片 WUE 与 BSL 的关系

Fig.11　Relation ofthe maize leaf　WUE and BEL

3　讨　论

植物水分利用效率是一个十分复杂的问题，不仅受众多外界因素的影响，也与自身的遗传物质基础和一系列生理生化及形态指标密切相关，同时又受两者互作的影响[8]。研究表明，当某个因子对 WUE 的影响被其它因子的负作用所掩盖时，该因子对 WUE 直接作用虽大，但相关分析却不显著；当某个因子对 WUE 的影响通过其它因子综合作用时，该因子对 WUE 直接作用虽小，但相关分析却达到显著或极显著水平[9]。

在本试验中，玉米叶片 WUE 在中度水分胁迫条件下要高于在正常灌溉条件下，在中度胁迫条件下各自交系间 WUE 有极显著的差异。这说明在干旱胁迫条件下，作物通过提高叶片 WUE 来适应这种逆境；而各品种间叶片 WUE 存在差异，可能是因为作物的 WUE 是由多基因控制，途径也较多，不同作物品种 WUE 也是由多种机制共同起作用的。

在玉米叶片 WUE 与叶片生理指标的相关分析中，Pn 和 Tr 二者都是影响玉米叶片 WUE 的主要因素，但在干旱胁迫时，作物主要是通过降低其蒸腾速率来提高其水分利用效率；Gs 及 Ci 通过调控作物光合作用和蒸腾作用来间接的影响水分利用效率。RWC 与玉米叶片 WUE 呈正相关，但二者的相关性不显著，RWC 不是影响水分利用效率的主要因素，这与小麦上的研究相一致[10]。另外，叶片 WUE 与 REC 及 POD、SOD 和 MAD 含量呈负相关关系，但相关性不显著，表明 REC、POD、SOD 和 MAD 与水分利用效率的关系并不很密切，这可能是植物抗旱性与水分高效利用机理有所不同的原因之一。

玉米叶片 WUE 与农艺性状相关关系的研究表明：玉米叶片 WUE 与 EH、TEN 呈显著正相关关系，与 ASI 呈显著的负相关关系，与 PH 和 GLN 有一定的正相关关系，但不显著。叶片是植物体进行光合作用和蒸腾作用的主要器官，许多研究表明，株高和叶片的衰老与植物抗旱性有着密切的关系[11]，本试验中玉米叶片 WUE 与 PH 和 GLN 呈不显著正相关关系，其原因可能是在水分胁迫条件下，植物的光和速率降低，从而影响了植物的生长。

玉米叶片 WUE 与产量形成因素相关关系的研究表明，玉米叶片 WUE 与 SEGW、ELN 和 LGN 有显著的正相关关系，与 BEL 呈显著的负相关关系。这一结果充分说明了提高玉米水分利效率对在干旱条件下保证或提高玉米产量有着重要影响。

参考文献:

[1] 杨　涛，梁宗锁，薛吉全，等.土壤干旱不同玉米品种水分利用效率差异的生理学原因[J].干旱地区农业研究，2002，20(2):68-71.
[2] 张正斌，徐　萍，董宝娣，等.水分利用效率—未来农业研究的关键问题[J].世界科技研究与发展，2005(1):53-54.
[3] 程殿龙.旱情与抗旱对策的思考[J].中国水利,2000(7):20-24.
[4] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京：高等教育出版社，2004.
[5] 崔兴国.植物蒸腾作用与光合作用的关系[J].衡水师专学报，2002，4(3):55-56.
[6] 黎　裕，王天宇，石云素，等.玉米抗旱性的 QTL 分析研究进展和发展趋势[J].干旱地区农业研究,2004(1):12-13.
[7] 山　仑.植物水分利用效率和半干旱地区农业用水[J].植物生理学通讯,1994，30(1):61-66.
[8] 朱　林，许　兴，等.植物水分利用效率的影响因子研究综述[J].干旱地区农业研究,2005，23(6),204-208.
[9] 邵玺文，韩　梅，韩忠明，等.不同供水量处理黄芩 WUE 与生理生态因子的关系[J].灌溉排水学报,2007，26(3),49-51.
[10] 吴建伟，刘　成，石云素，等.不同水分条件下玉米株高和穗位高的 QTL 分析[J].植物遗传资源学报,2005,6(3):266-271.

（责任编辑：李万良）