

W16 转济麦 19 小麦株系抽穗期抗旱性研究

王 刚¹, 刘曙东^{1*}, 阎东红¹, 王竹林¹, 杨兴圣¹, 李 华¹,
徐兆师², 陈 明², 李连城², 马有志²

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源和基因改良重大科学工程/

农业部作物遗传改良与育种重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要:以两个转 W16 基因小麦株系及相应的受体对照品种为材料, 在大田控水的条件下研究了水分胁迫对转基因小麦抽穗期相关生理特性的影响, 利用方差分析方法对转基因株系的抗旱性进行了综合评价。结果表明: 转基因株系和对照及受体有着较大的差异, 随着水分胁迫的加剧, 参试品种的相对含水量、气孔导度、光合速率、叶绿素含量呈下降趋势, 转基因小麦的下降幅度较小; 丙二醛含量、胞间 CO₂ 浓度、质膜相对透性呈上升趋势。受体对照品种的上升幅度大于转基因小麦; 转基因小麦的脯氨酸含量显著高于对照品种。方差分析表明, 转基因小麦株系 G19-X51、G19-X61 具有较好的抗旱性。

关键词:小麦; W16 基因; 水分胁迫; 抗旱性

中图分类号: S512.1; S332.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)06-0001-06

干旱是影响小麦生产的一个重要的非生物因素, 在我国西北地区大部分作物常年面临干旱的威胁。因此, 改善环境胁迫的耐受性以及培育抗旱抗逆节水小麦品种对提高作物产量具有重要的现实意义^[1]。由于采用常规育种技术改良作物的胁迫耐性、耗时费力。近年来, 随着分子生物学的迅速发展, 利用转基因的技术来提高粮食作物的抗逆性已经成为缓解低温、干旱、盐碱等因素胁迫的一个重要途径^[2,3]。目前, 我国在抗逆转基因小麦方面取得一些进展, 获得了一批抗逆性明显提高的转基因小麦株系^[4,5]。中国农业科学院作物科学研究所马有志课题组在转基因研究方面获得了 TaEBP 等一系列转基因小麦^[6]。

从小麦中克隆的 DREB3 转录因子属于 AP2/EREBP 转录因子家族^[7-8]。该转录因子定位在细胞核上, 主要在非生物胁迫条件下诱导表达。W16 基因编码一个转录因子(DREB)。DREB 特异地与 DRE 顺式作用元件相结合, 可以调节下游的多个抗逆基因, 在调节干旱和高盐碱等胁迫反应时具有重要作用^[9]。马有志课题组利用噬菌体原位杂交技术并结合 RACE 的方法, 从小麦农家品种小白麦中分离克隆了 W16 基因, 利用基因枪法将 W16 基因导入了济麦 19 品种中。经过一系列处理, 获得了能够稳定遗传和表达的转基因株系 G 济麦 19 系列品种, 经

过抗逆性鉴定结果表明, W16 基因在济麦 19 中的表达能显著地提高转基因小麦的抗旱节水性^[10]。

本研究是以转 W16 基因株系及受体品种济麦 19 为材料, 在大田不同水分处理下对其抽穗期生理生化指标进行分析, 并采用隶属函数法对抗旱特性进行综合评价, 为转基因小麦的新品种的选育提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参试材料为转 W16 基因株系 G19-X60、G19-X61 及受体济麦 19 和晋麦 47 为对照。

1.2 田间试验

2010 年 10 月将上述材料种植在杨凌现代农业企业孵化园小麦转基因隔离试验区, 10 行区, 行长 2.5 m, 每行均匀点播 80 粒, 行距 0.25 m, 随机区组设计, 3 次重复。试验地土壤类型黄褐土, 有机质含量为 18.2 g/kg、全氮含量为 1.65 g/kg、速效磷含量为 24.321 mg/kg、速效钾含量为 88.43 mg/kg。用大田铺膜控水, 将其分设为旱地试验和水地试验。水地试验设有 2 个水分处理, 即越冬前灌溉 1 次(MD), 冬后分蘖灌溉 1 次, 共两次(SD); 旱地试验全生育期不灌水, 完全自然降水(CK)。杨凌地区 2010 年和 2011 年降水量分别约为 300 mm、270 mm, 小麦

收稿日期: 2012-06-10

基金项目: 转基因生物新品种培育科技重大专项(2009ZX08002-008B)

作者简介: 王 刚(1986—), 男, 陕西西安人, 在读硕士, 主要从事作物生物技术与育种研究。E-mail: yushengpiaohuo@126.com。

* 通信作者: 刘曙东(1958—), 男, 教授, 主要从事小麦遗传育种、小麦分子生物学和小麦转基因研究。E-mail: liushd325@163.com。

全生育期的降水量为 145 mm,降雨量已经达到干旱胁迫的要求。灌水期间,每次灌水 70 m³,两次总计 150 m³。处理结束后对抽穗期相关的生理生化指标进行测定。

1.3 测定指标及方法

于晴天上午 9:00~11:00 选择有代表性的活体样品的旗叶采用光合仪(Li-6400,美国 LI-COR 公司生产)测定光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、呼吸速率。重复测定 3 次,取平均值^[11]。叶绿素含量采用丙酮抽提法^[12]。丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸方法^[12]。脯氨酸含量的测定采用磺基水杨酸法^[12]。相对含水量的测定采用烘干法。相对电导率的测定采用电导仪(DDS-370A)测定^[12]。测定时间为 2011 年 5 月 12 日。测定对象为新鲜叶片。

1.4 数据处理与抗旱性评价

采用 Excel 2003 和 DPSv7.05 软件对测定到的数据进行统计分析。抗旱性评价采用隶属函数法^[13]。对各个指标进行转换后求出各抗旱测定指标在各品种中的具体隶属值:

$$X_{ij} = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$\text{或} \quad X_{ij} = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中, X 为各品种的某一指标测定值; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为所有品种中此指标的最大值和最小值。若所用指标与抗旱性呈正相关,用(1)式;反之用(2)式。分别求出中度水分胁迫下各指标性状的隶属函数值 $X_{ij\text{中}}$ 和重度水分胁迫下的隶属函数值 $X_{ij\text{重}}$,以 $(X_{ij\text{中}} + X_{ij\text{重}})/2$ 表示 i 品种 j 性状中度干旱和重度干旱条件隶属函数的平均值,将各指标抗旱隶属值进行累加求得平均数 U_i ,隶属值越大,抗旱性越强。

2 结果分析

2.1 水分胁迫对转基因小麦气孔导度和胞间 CO₂ 的影响

气孔导度表示的是气孔张开的程度,气孔是植物叶片与外界进行气体交换的主要通道。从表 1 可以看出,随着水分胁迫程度加剧,对照品种和转基因小麦的叶片与外界气体交换的能力均不同程度减弱,气孔导度呈下降趋势,受体品种济麦 19 及晋麦 47 下降幅度较大,但是转基因株系的下降幅度较小。在正常供水条件下,4 个材料气孔导度没有明显差异;在中度水分胁迫下转基因株系显著高于受体品种济麦 19 和晋麦 47;在重度水分胁迫条件下晋麦 47 和济麦 19 的气孔导度分别只有正常供水的 66.7% 和 58.5%,而两个转基因株系(G19-X61)和

(G19-X60)在重度胁迫下的气孔导度仍为正常供水的 76.1% 和 74.2%,转基因小麦比对照品种有较大的气孔导度,且差异显著($P < 0.05$)。晋麦 47 是我国著名的旱地小麦品种,目前仍然在旱地大面积种植。由表 1 可见,虽然在重度干旱胁迫下晋麦 47 的气孔导度显著低于两个转基因株系,但在正常供水条件下与转基因株系却没有显著差异,间接说明气孔导度可能与小麦的抗旱性有关。

表 1 水分胁迫下转基因小麦气孔导度的变化

Table 1 The changes of G_s in transgenic wheat under water stress

品系 Variety (Line)	气孔导度 $G_s / (\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$		
	正常供水 CK Normal water supply	中度胁迫 MD Moderate stress	重度胁迫 SD Heavy stress
G19-X61	0.592 ± 0.067a*	0.537 ± 0.053a	0.451 ± 0.066a
G19-X60	0.579 ± 0.029a	0.513 ± 0.052a	0.430 ± 0.046a
晋麦 47 Jinmai 47	0.551 ± 0.068a	0.403 ± 0.072b	0.368 ± 0.170ab
济麦 19 Jimai 19	0.524 ± 0.075a	0.445 ± 0.007ab	0.307 ± 0.124b

注:表中数值为 3 个重复的平均值 ± 标准差;同列数据标有不同字母的表示差异具有显著性(LSD 检验, $P = 0.05$)。* 表示显著差异水平。下表相同。

Note: The data represent the mean ± SD; Values with different letters in the same column indicate significant difference at $P = 0.05$ according to LSD test. * Means difference is at significant level. They are the same in the following tables.

从表 2 可以看出,随着水分胁迫的加剧,对照品种和转基因小麦叶片胞间 CO₂ 浓度都呈不同程度的上升趋势,受体品种济麦 19 及晋麦 47 上升幅度较大,但是转基因株系的上升幅度较小。在正常供水条件下,4 个材料胞间 CO₂ 浓度没有明显差异;在中度水分胁迫下转基因株系显著低于受体品种济麦 19 和晋麦 47;在重度水分胁迫条件下晋麦 47 和济麦 19 的胞间 CO₂ 浓度分别增加了 11.4% 和 8.5%,而两个转基因株系(G19-X61)和(G19-X60)在重度胁迫下的胞间 CO₂ 浓度增加了 4.6% 和 5.1%,转基因小麦有较高的 C_i ,差异显著($P < 0.05$)。

表 2 水分胁迫下转基因小麦胞间 CO₂ 浓度的变化

Table 2 The changes of C_i in transgenic wheat under water stress

品系 Variety (Line)	胞间 CO ₂ 浓度 $C_i / (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$		
	正常供水 CK Normal water supply	中度胁迫 MD Moderate stress	重度胁迫 SD Heavy stress
G19-X61	284.3 ± 3.8a	293 ± 4.5b	297.6 ± 3b
G19-X60	283.6 ± 2.5a	286 ± 3.6b	298.3 ± 4.7b
晋麦 47 Jinmai 47	282 ± 6.9a	305 ± 4.3a	314.3 ± 12.8a
济麦 19 Jimai 19	282.3 ± 6.5a	306 ± 8.8a	305.6 ± 7.0ab

2.2 水分胁迫对光合特性的影响

2.2.1 水分胁迫对转基因小麦光合速率的影响

从表3可以看出,随着水分胁迫的加剧,对照品种和转基因小麦的参试材料叶片的光合速率(P_n)不同程度下降。受体品种济麦19及晋麦47下降幅度较大,但是转基因株系的下降幅度较小。在正常供水下,4个材料光合速率没有明显差异;在中度水分胁迫下转基因株系显著高于受体品种济麦19和晋麦47;在重度水分胁迫条件下晋麦47和济麦19的光合速率分别只有正常供水下的61.6%和57.2%,而两个转基因株系(G19-X61)和(G19-X60)在重度胁迫下的光合速率仍为正常供水下的76.9%和75.3%,转基因小麦仍能够维持较高的光合速率,转基因小麦比对照品种能保持更高光合速率,差异显著($P < 0.05$)。

2.2.2 水分胁迫对转基因小麦蒸腾速率的影响

干旱胁迫下植物通过降低蒸腾速率来维持体内水分收支平衡,减少蒸腾是植物在干旱胁迫下缓解体内胁迫程度的一个有效途径。从表4可以看出,随着水分胁迫的加剧,对照品种和转基因小麦的参试材料叶片的蒸腾速率不同程度下降,受体品种济麦19及晋麦47下降幅度较小,但是转基因株系的下降幅度较大。在正常供水下,4个材料蒸腾速率没有明显差异;在中度水分胁迫下转基因株系显著低于受体品种济麦19和晋麦47;在重度水分胁迫条件下晋麦47和济麦19的蒸腾速率分别下降了3.2%和5.3%,而两个转基因株系(G19-X61)和(G19-X60)在重度胁迫下下降了11.2%和13.1%,对照品种比转基因小麦具有较高的 T_r ,差异显著($P < 0.05$)。

表3 水分胁迫下转基因小麦光合速率的变化

Table 3 The changes of P_n in transgenic wheat under water stress

品系 Variety (Line)	光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		
	正常供水 CK Normal water supply	中度胁迫 MD Moderate stress	重度胁迫 SD Heavy stress
G19-X61	19.9 ± 0.35a	18.7 ± 0.65ab	15.3 ± 2.45a
G19-X60	20.1 ± 1.10a	19.1 ± 0.60a	15.1 ± 0.7a
晋麦47 Jinmai 47	20.5 ± 0.25a	17.9 ± 0.36bc	12.6 ± 0.41ab
济麦19 Jimai 19	19.7 ± 1.58a	17.1 ± 0.60c	11.31 ± 3.11b

2.2.3 水分胁迫对转基因小麦叶绿素含量的影响

从图1可以看出,随着水分胁迫的加剧,对照品种和转基因小麦的参试材料叶片的叶绿素含量(鲜重)均呈下降趋势,受体品种济麦19及晋麦47下降幅度较大。但是转基因株系的下降幅度较小。在正常

供水下,4个材料叶绿素含量没有明显差异;在中度水分胁迫下转基因株系显著高于受体品种济麦19和晋麦47;在重度水分胁迫条件下晋麦47和济麦19的叶绿素含量分别下降了53.2%和74.7%,而两个转基因株系(G19-X61)和(G19-X60)在重度胁迫下下降了35.8%和28.5%,转基因小麦与相应的对照品种差异显著($P < 0.05$)。

表4 水分胁迫下转基因小麦蒸腾速率的变化

Table 4 The changes of T_r in transgenic wheat under water stress

品系 Variety (Line)	蒸腾速率 Transpiration rate/ $(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		
	正常供水 CK Normal water supply	中度胁迫 MD Moderate stress	重度胁迫 SD Heavy stress
G19-X61	5.96 ± 0.145a	5.44 ± 0.108b	4.57 ± 0.306b
G19-X60	5.97 ± 0.285a	5.34 ± 0.119b	4.80 ± 0.067ab
晋麦47 Jinmai 47	5.98 ± 0.177a	5.81 ± 0.157a	5.44 ± 0.685a
济麦19 Jimai 19	5.92 ± 0.074a	5.65 ± 0.182ab	5.083 ± 0.191ab

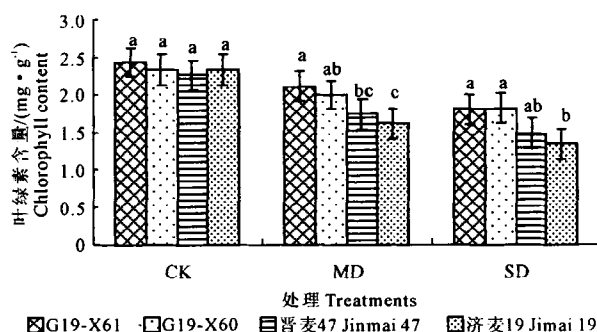


图1 水分胁迫下转基因小麦叶绿素含量的变化

Fig.1 The changes of chlorophyll content in transgenic wheat under water stress

2.3 水分胁迫对转基因小麦质膜相对透性的影响

植物组织在受到干旱胁迫时细胞膜首先受到伤害,膜透性增大,细胞内含物渗漏,相对电导率可反应出质膜受伤害的程度^[1]。从图2可以看出,随着水分胁迫的加剧,对照品种和转基因小麦的参试材料叶片的质膜相对透性均呈上升趋势,受体品种济麦19及晋麦47上升幅度较大,但是转基因株系的上升幅度较小。在正常供水条件下,4个材料质膜相对透性没有明显差异;在中度水分胁迫下转基因株系显著低于受体品种济麦19和晋麦47;在重度水分胁迫条件下晋麦47和济麦19的质膜相对透性分别是正常供水下的1.44和1.42倍,而两个转基因株系(G19-X61)和(G19-X60)在重度胁迫下的质膜相对透性只是正常供水下的1.30倍和1.25倍。对照品种比转基因小麦有更高的质膜相对透性,差异显著($P < 0.05$)。

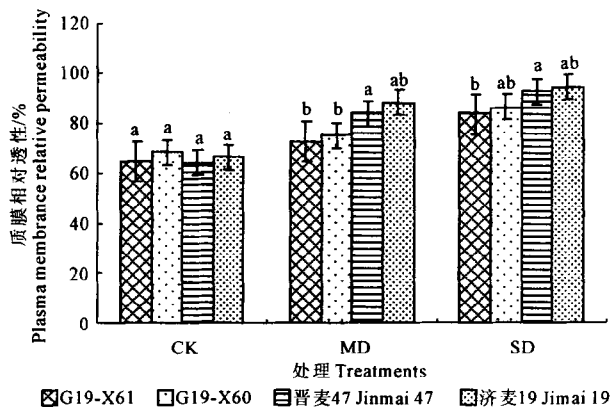


图 2 水分胁迫下转基因小麦质膜相对透性的变化

Fig.2 The changes of plasma membrane relative permeability in transgenic wheat under water stress

2.4 水分胁迫对转基因小麦相对含水量的影响

叶片相对含水量(RWC)反映水分供应与蒸腾之间的平衡关系,研究表明:RWC 高的小麦品种抗旱性强^[15]。从图 3 可以看出,随着水分胁迫的加剧,对照品种和转基因小麦的参试材料叶片的 RWC 都出现不同程度的下降趋势,其中受体品种济麦 19 及晋麦 47 下降幅度较大,但是转基因株系的下降幅度较小。在正常供水条件下,4 个材料 RWC 没有明显差异;在中度水分胁迫下转基因株系显著高于受体品种济麦 19 和晋麦 47;在重度水分胁迫条件下晋麦 47 和济麦 19 的 RWC 分别下降了 19.4% 和 16.5%,而两个转基因株系(G19-X61)和(G19-X60)在重度胁迫下下降了 10.1% 和 6.3%。结果表明,在水分胁迫条件下转基因小麦比对照品种保持更高的相对含水量,转基因小麦叶片具有较强的持水能力。转基因小麦与对照品种的相对含水量差异显著($P < 0.05$)。

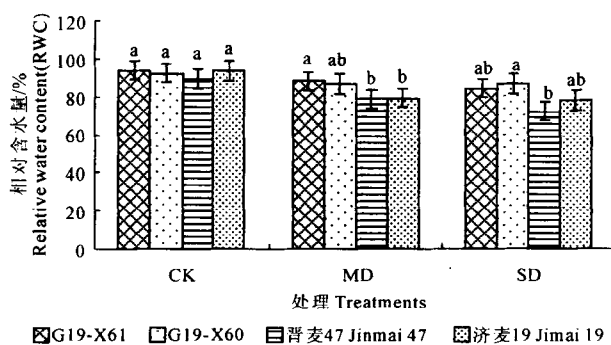


图 3 水分胁迫下转基因小麦相对含水量的变化

Fig.3 The changes of RWC in transgenic wheat under water stress

2.5 水分胁迫对转基因小麦丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)含量与细胞膜质过氧化程度呈正相关,可以反映植物遭受逆境伤害的程度^[16]。从图

4 可以看出,随着水分胁迫的加剧,对照品种和转基因小麦的参试材料叶片 MDA 含量均呈上升趋势,其中受体品种济麦 19 及晋麦 47 上升幅度较大。但是转基因株系的上升幅度较小。在正常供水条件下,4 个材料 MDA 含量没有明显差异;在中度水分胁迫下转基因株系显著低于受体品种济麦 19 和晋麦 47;在重度水分胁迫条件下晋麦 47 和济麦 19 的 MDA 含量分别是正常供水下的 2.38 和 2.76 倍,而两个转基因株系(G19-X61)和(G19-X60)在重度胁迫下的 MDA 含量只是正常供水下的 1.72 和 1.75 倍,对照品种比转基因小麦 MDA 含量更高,转基因小麦具有较强的渗透调节能力。差异显著($P < 0.05$)。

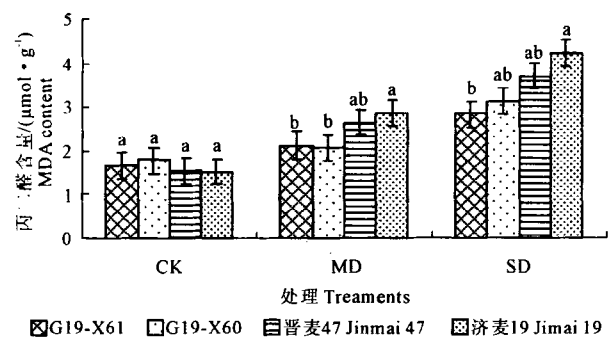


图 4 水分胁迫下转基因小麦丙二醛含量的变化

Fig.4 The changes of MDA content in transgenic wheat under water stress

2.6 水分胁迫对转基因小麦脯氨酸含量的影响

脯氨酸作为主要的渗透调节物质,一定程度上能够反映植物对不良逆境条件的响应与忍耐能力^[17]。从图 5 可以看出,随着水分胁迫的加剧,对照品种和转基因小麦的参试材料叶片的脯氨酸含量均呈上升趋势,其中受体品种济麦 19 及晋麦 47 上升幅度较小,而转基因株系的上升幅度较大。在正常供水下,4 个材料脯氨酸含量没有明显差异;在中

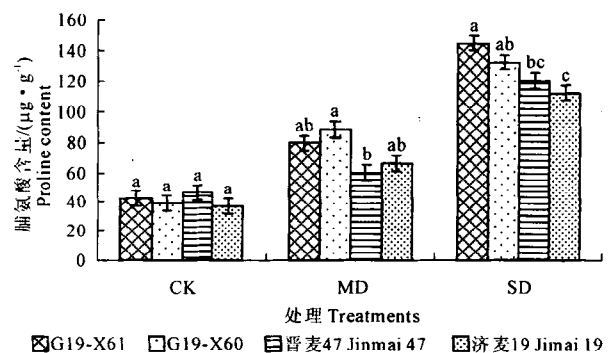


图 5 水分胁迫下转基因小麦脯氨酸含量的变化

Fig.5 The changes of proline content in transgenic wheat under water stress

度水分胁迫下转基因株系显著高于受体品种济麦 19 和晋麦 47;在重度水分胁迫条件下晋麦 47 和济麦 19 的丙二醛含量分别只有正常供水条件下的 2.60 倍和 3.05 倍,而两个转基因株系(G19-X61)和(G19-X60)在重度胁迫下的脯氨酸含量仍为正常供水条件下 3.46 倍和 3.35 倍。转基因小麦比对照品种能够积累更多的脯氨酸,具有更强耐旱能力。

差异显著($P < 0.05$)。

2.7 转基因小麦抗旱性的综合评价

本试验通过隶属函数法对以上测定的指标进行抗旱性综合评价,结果表明:转基因小麦 G19-X61 和 G19-X60 平均隶属函数值(0.61、0.60),明显大于相应对照品种晋麦 47 和济麦 19(0.28、0.26)。说明在抽穗期转基因小麦具有较强的抗旱能力。

表 5 不同品种(系)的抗旱指标隶属值及抗旱性综合评价

Table 5 Subordinate function values of drought resistance and comprehensive evaluation of different varieties

品种(系) Variety (Line)	相对含水量 RWC	叶绿素 Chl	质膜透性 MRP	丙二醛 MDA	光合速率 P_n	蒸腾速率 T_r	气孔导度 G_s	胞间 CO_2 C_i	脯氨酸 Pro	平均隶属值 U_i
G19-X61	0.56	0.58	0.53	0.64	0.61	0.68	0.65	0.58	0.69	0.61
G19-X60	0.57	0.55	0.53	0.60	0.62	0.64	0.57	0.68	0.67	0.60
晋麦(Jinmai) 47	0.05	0.34	0.2	0.38	0.42	0.24	0.27	0.14	0.49	0.28
济麦(Jimai) 19	0.13	0.17	0.14	0.24	0.31	0.43	0.24	0.26	0.48	0.26

3 讨 论

本研究表明,水分胁迫下各品种的 MDA 含量及质膜相对透性都有所增加,受体品种济麦 19 及晋麦 47 增加的度更高,说明干旱胁迫对受体品种济麦 19 及晋麦 47 的伤害更大,导致其细胞膜氧化的程度更高,受体品种济麦 19 及晋麦 47 的抗旱能力弱。黄承玲^[18]研究高山杜鹃也证明了这一点;在水分胁迫条件下,小麦的光合器官的生长和发育会受到影响,导致其光合能力下降。通过研究表明:随着水分胁迫加剧,各参试材料的叶绿素含量、光合速率、蒸腾速率、气孔导度都出现不同程度的下降趋势,胞间 CO_2 浓度呈上升趋势,但转基因株系 G19-X61 和 G19-X60 胞间 CO_2 浓度升幅小于受体品种济麦 19 及晋麦 47,蒸腾速率下降的幅度大于受体品种济麦 19 及晋麦 47。其叶绿素含量、光合速率、气孔导度保持在较高的水平,说明转基因小麦 G19-X61 和 G19-X60 具有较好的应对干旱胁迫的能力;干旱胁迫导致质膜透性发生变化的研究结果显示,水分胁迫条件下转基因小麦 G19-X61 和 G19-X60 比受体品种济麦 19 及晋麦 47 保持更高的相对含水量。说明干旱胁迫条件下转基因小麦叶片具有较强的持水能力来应对干旱,这与贾俊香等^[19]研究结果一致。在干旱胁迫下,转基因小麦能够积累更多的脯氨酸来应对干旱。说明转基因小麦 G19-X61 和 G19-X60 具有较强的渗透调解能力。

通过隶属函数对转基因株系和对照品系的小麦

在水分胁迫条件下进行抗旱性的综合评价,由于隶属函数分析法能消除方差分析单个指标的片面性,可以较准确地评价各材料的抗旱性。结果显示,转基因小麦 G19-X61 和 G19-X60 表现较强的抗旱性,与对照的抗旱性的差异主要是因为水分胁迫诱导了转基因小麦中的 W16 的基因表达,从而增强了其抗旱的能力。

小麦是中国干旱半干旱地区的主要粮食作物,在其生育期中经常受到水分亏缺的影响,导致减产。其中拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期是小麦生长发育的水分临界期。而小麦的抽穗期是需要大量水分和营养物质,使得抽穗期水分亏缺对产量有很大的影响^[20]。在灌水限制的条件下转基因株系表现出来的抗旱性最佳。虽然本试验只对 W16 转基因小麦抽穗期水分胁迫下与抗旱相关的生理生化指标进行了研究,但对评价转基因小麦在抽穗期的抗旱性具有一定的参考价值。

参 考 文 献:

- [1] Yamaguchi-Shinozaki K, Kasuga M, Liu Q, et al. Biological mechanisms of drought stress response[J]. Journal of Triticeae Crops, 2002, 28(3):1-8.
- [2] 刘 强,赵南明, Yamaguchi-Shinozaki K, 等. DREB 转录因子在提高植物抗逆性中的作用[J]. 科学通报, 2000, 45(1):10-16.
- [3] Xu Zhaoshi, Ni Zhiyong, Liu Li, et al. Characterization of the TaAIDF a gene encoding a CRT/DRE-binding factor responsive to drought, high-salt, and cold stress in wheat[J]. Mol Genet Genomics, 2008, 280(6):497-508.

- [4] Xu Zhaooshi, Ni Zhiyong, Li Zhiyong, et al. Isolation and functional characterization of HvDREB1 – a gene encoding a dehydration responsive element binding protein in *Hordeum vulgare* [J]. *J Plant Res*, 2009, 122(1): 121-130.
- [5] Wang Junwei, Yang Fengping, Chen Xuqing, et al. Induced expression of DREB transcriptional factor and study on its physiological effects of drought tolerance in transgenic wheat [J]. *Acta Genetica Sinica*, 2006, 33(5): 468-476.
- [6] 南炳东, 闵东红, 陈耀峰, 等. 不同水分胁迫下转 TaEBP 基因小麦株系拔节期抗旱性研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 23-28.
- [7] Sakuma Y, Ju Q, Duboum J G, et al. DNA – binding specificity of the DRF/AP2 domain of Arabidopsis DREB transcription factors involved in dehydration and cold inducible gene expression [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2002, 290: 998-1009.
- [8] Klucher K M, Chow H, Reiser L, et al. The aintegumenta gene of Arabidopsis required for ovule and female gametophyte development is related to the floral nomenclature gene APETALA2 [J]. *The Plant Cell*, 1996, 8(2): 137-153.
- [9] 李 杰, 朱延明, 吴 迪, 等. DREB2A 基因的克隆、序列分析及其植物表达载体的构建 [J]. *东北农业大学学报*, 2005, 36(1): 36-40.
- [10] Xu Zhaooshi, Xia Lanqin, Chen Ming, et al. Isolation and molecular characterization of the *Triticum aestivum* L. ethylene-responsive factor1 (TaERF1) that increases multiple stress tolerance [J]. *Plant Mol Biol*, 2007, 65(6): 719-732.
- [11] 邹 琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 83-89.
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 142-151.
- [13] 郝再彬, 苍 晶. 植物生理实验 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业出版社, 2004: 101-110.
- [14] 王启明, 徐心诚, 马原松, 等. 干旱胁迫下大豆开花期的生理生化变化与抗旱性的关系 [J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(4): 95-102.
- [15] Schonfeld M A, Johnson R C, Carver B F, et al. Water relations in winter wheat as drought resistance indicators [J]. *Crop Science*, 1998, 28(3): 526-531.
- [16] 贾根良, 代惠萍, 冯佰利, 等. PEG 模拟干旱胁迫对糜子幼苗生理特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2008, 28(10): 2073-2079.
- [17] 万里强, 李向林, 石永红, 等. PEG 胁迫下 4 个黑麦草品种生理生化指标响应与比较研究 [J]. *草业学报*, 2010, 19(1): 83-88.
- [18] 黄承玲, 陈 训, 高贵龙, 等. 3 种高山杜鹃对持续干旱的生理响应及抗旱性评价 [J]. *林业科学*, 2011, 47(6): 48-55.
- [19] 贾俊香, 洪坚平, 谢英荷, 等. 转基因玉米苗期抗旱性生理生化指标与复水过程的研究 [J]. *贵州农业科学*, 2005, 33(3): 21-23.
- [20] 陈晓远, 高志红, 罗远培, 等. 水分胁迫效应对冬小麦生长发育的影响研究 [J]. *华北农学报*, 2004, 19(3): 43-46.

Drought resistance of transgenic wheat with W16 gene during heading stage

WANG Gang¹, LIU Shu-dong^{1*}, MIN Dong-hong¹, WANG Zhu-lin¹, YANG Xing-sheng¹,
LI Hua¹, XU Zhao-shi², CHEN Ming², LI Lian-cheng², MA You-zhi²

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences / National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement / Key Laboratory of Crop Genetics and Breeding, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Using two transgenic wheat strains with W16 gene and corresponding recurrent parent as materials. Field experiments were conducted under different water stress to compare drought-resistance of different varieties by studying the effect of physiological and biochemical indexes on drought resistance of transgenic wheat during heading stage, and combined with the method of analysis of variance of genetically modified strain drought-resistance of the comprehensive evaluation. The results showed that: genetically modified strain and control and receptor has obvious difference, with the increase of water stress, the relative water content, stomatal conductance, light and rate, chlorophyll content showed down-trend, and the transgenic wheat declined more slowly; MDA content, the intercellular CO₂, plasma membrane permeability showed up-trend, but the corresponding contrast rose more steeply. The proline content of transgenic wheat was significantly higher than contrast varieties. The analysis of variance showed that transgenic wheat strains G19 – X51, G19 – X61 had strong drought resistance.

Keywords: wheat; W16 gene; water stress; drought-resistance