



干旱胁迫对不同彩粒小麦苗期生长发育的影响

张健龙¹, 易科¹, 张一岚¹, 赵一迪¹, 晁漫宁^{1,2},

谈宏斌³, 孙凤丽^{1,2}, 奚亚军^{1,2}, 张超^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 农学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部西北地区小麦生物学与遗传育种重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 陕西省种业集团有限责任公司, 西安 710016)

摘 要 为了筛选具有优良抗旱性的小麦特异材料, 通过表型分析与生理生化指标测定相结合的方法, 分析干旱胁迫对不同彩粒小麦苗期生长发育的影响。结果表明, 不同小麦材料在重度干旱胁迫下植株表型、复水后成活率、叶片相对含水量、叶绿素质量分数、脯氨酸质量分数及叶绿素荧光参数均存在显著差异, 其中多个指标均显示 2 份彩粒小麦材料抗旱性较好, 即‘ZHW’/‘小偃 22’杂交后代和‘0705-39’/‘INDB’杂交后代材料。对各指标进行相关性分析发现, 植株复水后成活率与叶片相对含水量、脯氨酸质量分数、叶绿素质量分数之间存在极显著的相关, 叶片相对含水量与 F_v/F_m 、 ETR 、 q_p 存在显著相关。抗旱表型分析与生理生化指标测定结果显示干旱胁迫显著影响不同彩粒小麦的苗期生长发育, 且不同彩粒小麦抗旱性存在显著差异, 筛选的 2 份抗旱性较好的彩粒小麦材料可用于进一步的抗旱分子机制解析和旱地小麦育种。

关键词 彩粒小麦; 种质资源; 干旱胁迫; 叶绿素荧光; 抗旱鉴定

中图分类号 S512.1; S311

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2020)06-0842-09

小麦是中国三大粮食作物之一, 其生产对保障国家粮食安全具有重要意义^[1]。同时, 中国是一个水资源短缺、干旱频发的国家^[2], 干旱严重影响小麦主产区的小麦产量和质量, 提高小麦抗旱能力和水分利用效率是解决北方麦区产量低而不稳的关键, 而选育抗旱品种是解决小麦干旱胁迫最经济有效的措施之一^[3]。因此, 抗旱育种成为小麦育种的主要方向之一, 其中优异种质资源的发掘利用是抗旱育种的关键基础。

彩粒小麦是指籽粒种皮或糊粉层颜色与生产上常用小麦不同的小麦, 报道的有紫粒、黑粒、蓝粒等。研究表明, 彩粒小麦富含蛋白质和对人体有益的微量元素或矿物质, 具有较高的营养价值和良好的保健作用^[4]。彩粒小麦富含花青素, 有利于去除逆境下产生的活性氧。但目前对于彩粒小麦品质研究较多, 对抗旱性研究罕见报道。抗旱表型鉴定与生理生化指标测定相结合对小麦优异种质资源进行苗期抗旱性鉴定具有快速和相对准确的特点^[5]。植株生理生化指标主要包含叶片

相对含水量(leaf relative water content, RWC)、光合系统相关参数(叶绿素荧光参数测定等)、脯氨酸质量分数、叶绿素质量分数等^[6-9]。本试验将以旱地小麦区试对照品种‘晋麦 47’为对照, 选取 9 份彩粒小麦及其与主栽品种的杂交后代纯合株系为材料, 利用抗旱表型鉴定与植株生理生化指标测定相结合的方法研究干旱胁迫对不同彩粒小麦生长发育的影响, 以期小麦抗旱育种和抗旱分子机理解析提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料及种植条件

供试小麦材料为彩粒小麦及其与主栽品种杂交后代纯系材料, 对照为旱地小麦区试对照品种‘晋麦 47’, 具体信息参见表 1, 本试验为便于表述分别以 1~10 号作为标识。

试验于 2018—2019 年在西北农林科技大学南校区温室进行。选取饱满一致种子在 25 ℃催芽 24 h, 发芽种子移入塑料盆中进行盆栽。试验

收稿日期: 2019-08-23 修回日期: 2019-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300202); 陕西省杨凌高新农业示范区产学研用协同创新重大项目(2018CXY-06)。

第一作者: 张健龙, 男, 在读本科生, 农学专业。E-mail: 1272945425@qq.com

通信作者: 张超, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向是植物抗旱分子机制解析。E-mail: ahzc2009@163.com

采用规格为 7 cm × 7 cm × 7 cm 且底部带孔的塑料盆,盆栽用土为蛭石与基质 2 : 1 混合,每盆装土 90 g,定苗 4 株。试验设 3 个生物学重复,每个重复含 4 盆,共 16 株苗。试验分对照组和处理

组,每 12 盆放于一个塑料盘中,塑料盘贴对应标签。温室光照为自然光,每天 17:00—22:00 进行补光处理,以 1/3 Hoagland 溶液浇灌补充水分。

表 1 供试材料编号和遗传背景
Table 1 Number and genetic background of tested materials

编号 Number	材料类型 Material type	名称及遗传背景 Material and genetic background
1	对照 Control	晋麦 47 Jinmai 47
2	彩粒小麦(蓝色) Colored wheat (blue)	INDB
3	杂交后代纯系(紫色)Hybrid progeny pure line (purple)	ZHW/西农 979 杂交后代 ZHW/Xinong 979 hybrid progeny
4	杂交后代纯系(紫色)Hybrid progeny pure line (purple)	ZHW/小偃 22 杂交后代 ZHW/Xiaoyan 22 hybrid progeny
5	杂交后代纯系(蓝色)Hybrid progeny pure line (blue)	0705-39/INDB 杂交后代 0705-39/INDB hybrid progeny
6	杂交后代纯系(蓝色)Hybrid progeny pure line (blue)	Lango/INDB 杂交后代 Lango/INDB hybrid progeny
7	杂交后代纯系(蓝色)Hybrid progeny pure line (blue)	西农 109/INDB 杂交后代 Xinong 109/INDB hybrid progeny
8	杂交后代纯系(紫色)Hybrid progeny pure line (purple)	西农 109/ZHW 杂交后代 Xinong 109/ZHW hybrid progeny
9	彩粒小麦(紫色)Colored wheat (purple)	PUR
10	杂交后代纯系(紫色)Hybrid progeny pure line (purple)	ZHW/N1206

1.2 试验处理和样品制备

移栽后 10 d 浇灌至土壤饱和含水量,开始对处理组进行自然干旱胁迫。干旱胁迫过程中,对照组正常管理,处理组每天停止浇灌同时盘内盘间位置无规则变动,干旱处理结束后进行拍照和叶绿素荧光测定。

干旱处理采用不浇水方式进行,10 d 后 1 号小麦(对照:‘晋麦 47’)叶片萎蔫,土壤相对含水量降至 10% 以下,此时测定土壤和叶片相对含水量、叶片光合作用等相关指标。取样后继续干旱处理,在约 50% 苗处在濒死状态时以 1/3 Hoagland 营养液进行复水,4 d 后统计成活率。

土壤相对含水量和叶片相对含水量均采用烘干法称重法测量。测定土壤相对含水量时,每种样品的不同处理共取 3 个重复,每个重复取盆中部距表层 1~3 cm 土壤约 5~15 g。随机选取 4 盆浇灌至饱和含水量后取样测量饱和含水量。测定叶片相对含水量时,每种样品的不同处理共取 3 个重复,每个重复取不同盆中的 2~4 片旗叶,剩余旗叶放于-80 ℃冰箱中保存备用。

土壤相对含水量=(初始湿质量-干质量)/(饱和湿质量-干质量)×100%

叶片相对含水量=(初始鲜质量-干质量)/(饱和鲜质量-干质量)×100%

1.3 光合作用相关参数测定

选取同一处理不同盆中长势相同植株,在旗

叶的相同位置使用 Dual-PAM-100(德国 WALZ)测量叶绿素荧光参数,每处理 6 次生物学重复。

1.4 叶绿素和游离脯氨酸质量分数测定

采用 80% 丙酮比色法测定叶绿素质量分数^[10],采用酸性茚三酮法测定游离脯氨酸质量分数^[11]。

1.5 数据处理与分析

每个试验均设 3 个以上生物学重复,试验结果以“平均值±标准误”的形式表示,采用 Microsoft Excel 2016 软件处理数据和绘图,SPSS 25.0 统计分析软件检测差异显著性和多重比较(LSD 法)。

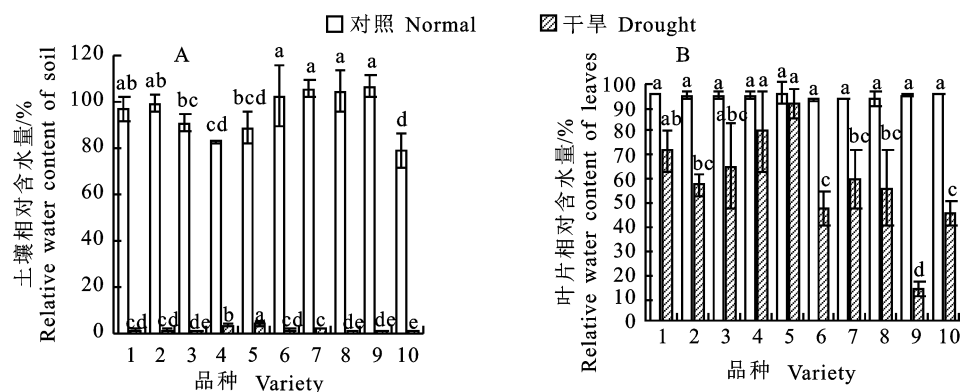
2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同彩粒小麦材料表型和成活率的影响

在持续干旱 10 d 后,1 号小麦(对照:‘晋麦 47’)出现萎蔫现象,此时测定土壤相对含水量已降至 5% 以下(图 1-A),属于极端重度干旱胁迫^[12]。与正常浇水的对照组相比,干旱胁迫导致小麦植株生长缓慢,但严重干旱胁迫时不同小麦植株萎蔫程度存在显著差异:6、9、10 号小麦萎蔫最严重;1、3、8 号小麦萎蔫较轻,叶卷曲较为明显,与 3、8 号小麦相比,1 号小麦植株较挺拔;2、7 号小麦叶部平展,萎蔫程度与 1 号小麦相似;4、5 号小麦与其他小麦相比没有明显的叶卷曲现象,

并且植株较为挺拔,其中5号小麦叶色与其他小麦相比较浅(图2-A)。继续进行干旱胁迫,待50%植株处于濒死状态时进行复水处理,4 d后统计成活率发现,2、4、5、7号小麦复水后的成活率与1号小麦无显著差异,3、6、8、9、10号小麦

水后成活率小于1号小麦,其中9号小麦复水后成活率最低(图2-B)。综合干旱胁迫下的表型观察和成活率数据分析结果可知,2、4、5、7号小麦抗旱性较好,其中4和5号小麦表现最为突出。



误差线上不同字母表示同一处理不同材料间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Different letters above error bars indicate significant difference among varieties at $P < 0.05$, the same below

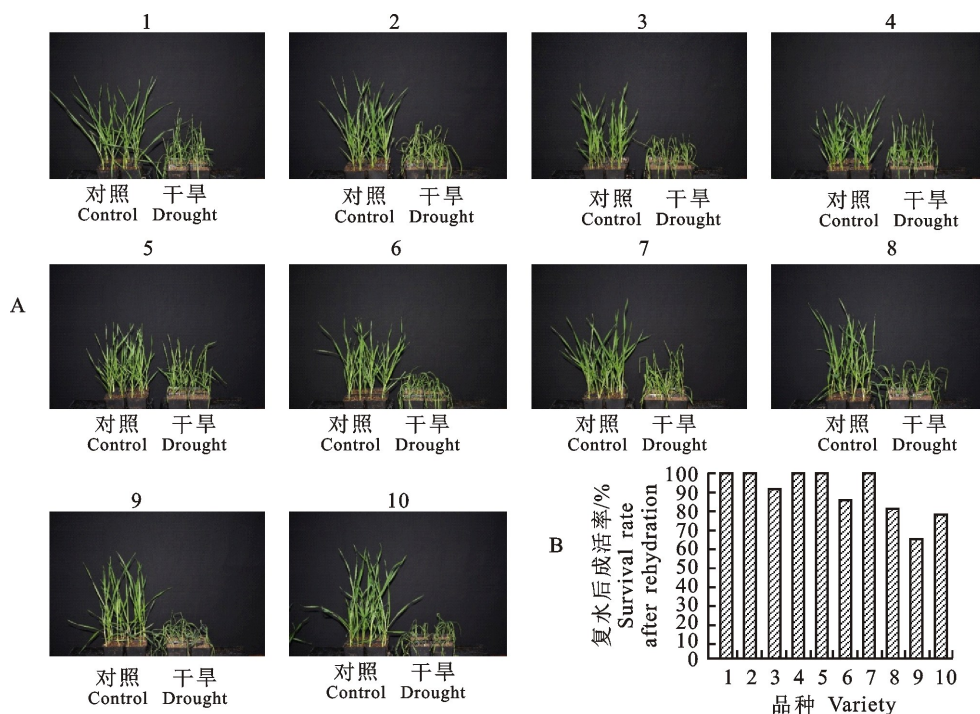
图1 不同小麦材料叶片相对含水量和土壤相对含水量比较

Fig. 1 Comparison of relative water content in leaves and soil of different wheat materials

2.2 干旱胁迫对不同彩粒小麦材料旗叶相对含水量的影响

叶片相对含水量是植株重要的水分状况指标,密切反映水分供给与蒸腾之间的关系。干旱

胁迫条件下,作物叶片相对含水量可作为品种抗旱性鉴定的重要指标,并且叶片相对含水量和作物产量呈现显著的正相关^[13-15]。在干旱胁迫进行到10 d时,对照品种‘晋麦47’发生萎焉,土壤处



A. 植株表型; B. 复水后成活率

A. Plant phenotype; B. Survival rate after rehydration

图2 不同小麦材料表型和成活率比较

Fig. 2 Phenotype and survival rate of different wheat materials

于极端重度干旱胁迫条件。此时,对不同类型小麦旗叶相对含水量进行了测定。测定结果发现,2、6、9、10号小麦叶片相对含水量与对照组相比显著下降,1、3、4、5、7、8号小麦叶片相对含水量下降不显著(图 1-B)。在干旱处理组中,6、9、10号小麦叶片相对含水量显著低于1号对照品种,其他小麦与1号小麦差异不显著(图 1-B)。结合表型分析结果,可以发现叶片相对含水量变化趋势与土壤相对含水量呈现一定相关,但不同材料间差异显著,揭示了不同小麦材料抗旱性存在差异。

2.3 干旱胁迫对不同彩粒小麦材料光合作用相关参数的影响

光合作用是植物生长发育的基础,且在干旱条件下变化较为显著,是小麦抗旱性生理鉴定的重要组成部分^[16-17]。经过暗适应的旗叶在测定荧光诱导动力学参数中,可变荧光(F_v)与最大荧光

(F_m)的比值(F_v/F_m)代表光系统 II 的最大光合效率。测定结果发现,干旱胁迫均导致旗叶 F_v/F_m 有所下降,不同小麦间的下降幅度存在显著差异,其中5号小麦变化不显著。9、10号小麦下降幅度分别为3.0%和4.8%,显著大于1号小麦,2、4、6、7号小麦下降幅度小于1号小麦,其中4号小麦下降幅度最小为1.1%(图 3-A,B)。表明干旱胁迫对4、5号小麦的光系统 II 的损伤较小,而对9、10号小麦损伤较大。

叶绿素荧光产量下降(淬灭)可以由光合作用的增加引起,也可以由热耗散的增加引起。由光合作用引起的荧光淬灭称之为光化学淬灭(q^P),由热耗散引起的荧光淬灭称之为非光化学淬灭(q^N)。 q^P 反映光系统 II 天线色素吸收的光能用于光化学反应的份额, q^N 反映光系统 II 反应中心通过热耗散掉的光能大小^[18]。测定结果显

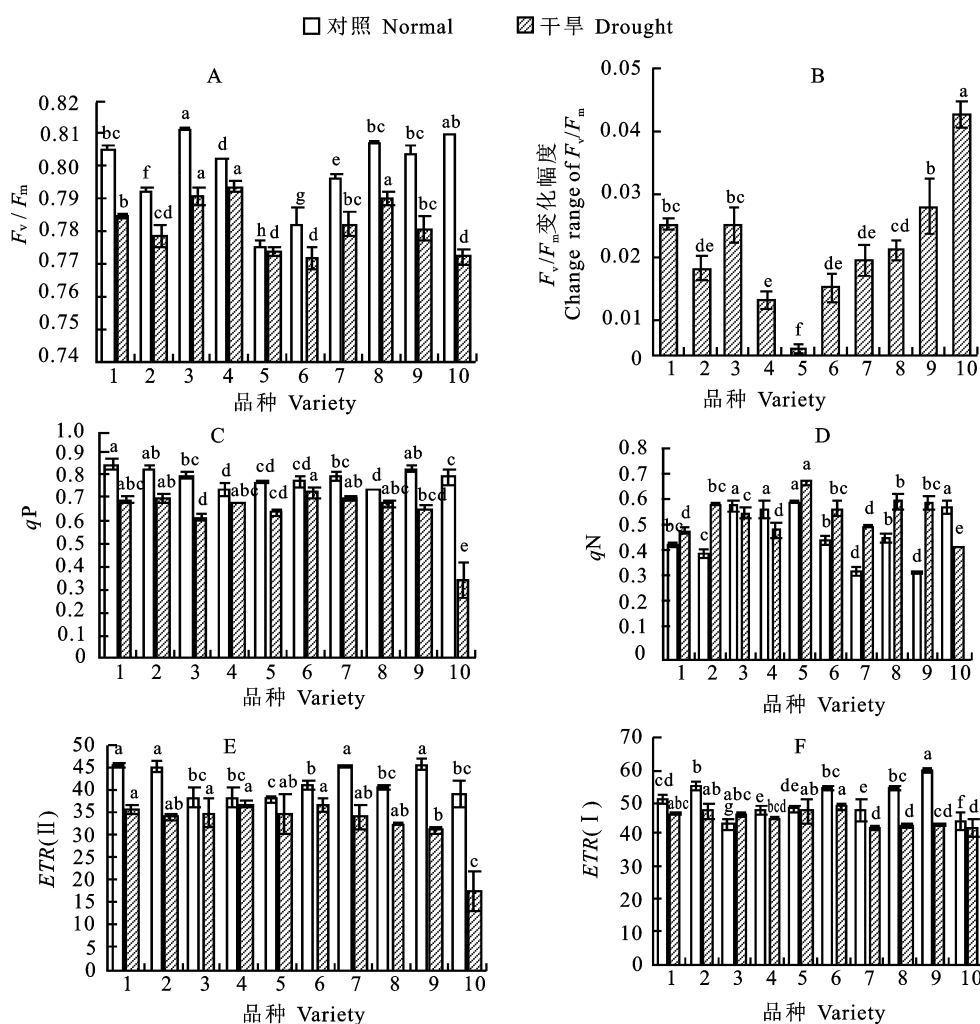


图3 不同小麦材料的叶绿素荧光参数

Fig.3 Chlorophyll fluorescence parameters of different wheat materials

示,干旱胁迫均导致不同小麦的 q^P 显著下降,其中 10 号小麦下降幅度最大为 57.3%。处理组中 3、10 号小麦的 q^P 显著小于 1 号小麦,其他小麦与 1 号小麦相比差异不显著(图 3-C)。不同小麦的 q^N 对干旱胁迫的反应存在差异,10 号小麦 q^N 显著下降,3、4 号小麦 q^N 变化不显著,其他小麦 q^N 显著增加,处理组中,2、3、5、6、8、9 号小麦显著大于 1 号小麦的 q^N (图 3-D)。表明在干旱胁迫下 1、2、4、5、6、7、8、9 号小麦光系统 II 的电子传递活性较大,并且能维持较高的效率完成光系统 II 将捕获的光能转换成化学能。光合电子传递总是与形成的光合磷酸化相耦联,非环式电子传递链的最终电子受体是 NADPH^+ ,因此较高的光系统 II 电子传递活性有助于形成更多的 ATP 和 NADPH 供碳同化之需,从而形成更多的光合产物^[19-20]。5 号小麦 q^N 最大,表明其可以更好通过热耗散释放多余的光能,从而更好的保护光合器官。

$ETR(I)$ 和 $ETR(II)$ 分别表示光系统 I 和光系统 II 的相对电子传递速率。测定结果显示,与对照相比,干旱胁迫导致 1、2、7、8、9、10 号小麦 $ETR(II)$ 显著下降,其中 10 号小麦下降幅度最大为 54.9%,处理组中,9、10 号小麦显著低于 1 号小麦。干旱胁迫下 1、6、8、9 号小麦 $ETR(I)$ 与对照相比显著下降,其中 9 号小麦下降幅度最大(图 3-E,F)。表明干旱胁迫对 9、10 号小麦光合电子传递影响较大,而 3、4、5 号小麦依旧

可以将受激发的电子高效地进行传递,保障光合作用正常进行。

2.4 干旱胁迫对不同彩粒小麦材料叶绿素质量分数的影响

小麦生长发育过程中,功能叶片的叶绿素质量分数直接影响光合作用和光合产物的形成^[8,21]。研究表明经一定程度的干旱处理后,植株会表现出一定抗旱性,即叶绿素质量分数的上升,但在长时间干旱条件下,植株趋于衰败^[22]。测定结果显示,干旱胁迫导致小麦旗叶的叶绿素质量分数显著增加,而不同小麦叶绿素质量分数的增加幅度存在差异,其中 9、10 号小麦干旱胁迫条件下叶绿素质量分数分别增加了 5.7 倍和 4.6 倍,4 号小麦增幅仅为 51.1%(图 4-A)。处理组中不同材料叶绿素质量分数、叶绿素 a 质量分数(chlorophyll content a, Chl a)和叶绿素 b(chlorophyll content, Chl b)质量分数变化趋势相似。其中 7 号小麦叶绿素 a 和叶绿素 b 显著下降 15.5%和 23.3%,干旱胁迫导致除 7 号小麦以外的其他小麦材料叶绿素 a 和叶绿素 b 质量分数的显著增加,且两者的增加趋势相同,其中 9 号小麦叶绿素 a 和叶绿素 b 质量分数增幅最大,分别是对照的 5.6 倍和 6.0 倍(图 4-B)。结合表型鉴定结果表明,本试验干旱胁迫时间较短,植株叶片仍保持绿色,体内叶绿素没有大量降解,叶绿素质量分数与叶片鲜质量存在较大相关性,变化幅度较大,但在一定程度上反映了不同材料抗旱性的差异。

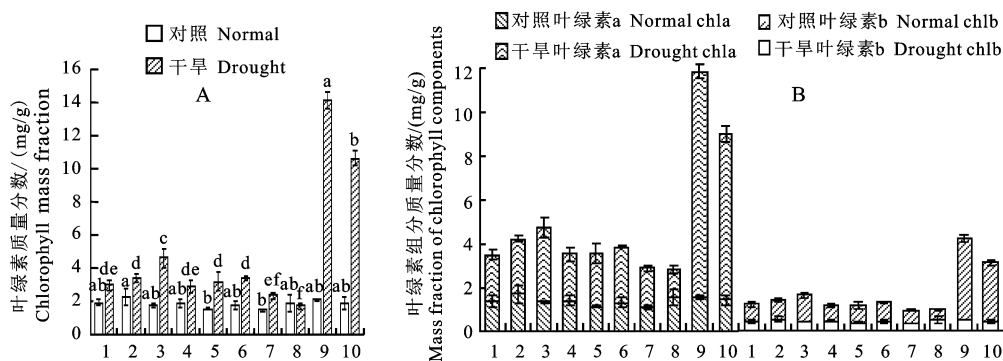


图 4 不同小麦材料的叶绿素质量分数及组分

Fig. 4 Chlorophyll contents and components of different wheat materials

2.5 干旱胁迫对不同彩粒小麦材料叶片游离脯氨酸质量分数的影响

干旱胁迫下游离脯氨酸是小麦的主要渗透调节物质之一,脯氨酸质量分数的增高能够降低叶片细胞的渗透势,防止细胞脱水,同时保护细胞膜

系统,维持胞内酶的结构^[23]。在本试验对照组中,5、9 号小麦与 1 号小麦游离脯氨酸质量分数无明显差异,其余小麦游离脯氨酸质量分数均显著高于 1 号小麦。处理组中,2、4、5 号小麦游离脯氨酸质量分数显著低于 1 号小麦,3、6、9 号小

麦显著高于 1 号小麦。与对照相比,干旱胁迫导致小麦游离脯氨酸显著增加,不同小麦增加幅度存在明显差异,其中 3、6、9 号小麦增幅大于 1 号小麦(表 2)。结合叶片相对含水量分析结果,可以发现脯氨酸质量分数的变化趋势与叶片相对含水量的变化趋势有一定的相关性。

表 2 不同小麦材料的脯氨酸质量分数
Table 2 Proline content in different wheat materials

编号 Number	材料及遗传背景 Material and genetic background	脯氨酸质量分数/(μg/g) Proline mass fraction	
		正常 Normal	干旱 Drought
1	晋麦 47 Jinmai 47	6.26 d	1 092.40 de
2	INDB	24.54 b	158.21 e
3	ZHW/西农 979 杂交后代 ZHW/Xinong 979 hybrid progeny	15.59 c	7 685.35 b
4	ZHW/小偃 22 杂交后代 ZHW/Xiaoyan 22 hybrid progeny	20.97 bc	145.82 e
5	0705-39/INDB 杂交后代 0705-39/INDB hybrid progeny	5.91 d	52.65 e
6	Lango/INDB 杂交后代 Lango/INDB hybrid progeny	24.90 b	4 491.79 c
7	西农 109/INDB 杂交后代 Xinong 109/INDB hybrid progeny	63.13 a	238.81 e
8	西农 109/ZHW 杂交后代 Xinong 109/ZHW hybrid progeny	20.80 bc	1 169.52 de
9	PUR	7.57 d	10 393.36 a
10	ZHW/N1206	24.05 b	2 250.81 d

注:正常和干旱分别代表对照组和处理组的脯氨酸质量分数。数据后不同字母表示材料间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Normal and drought represent the proline content of control group and treatment group respectively. Different letters after data indicate significant difference among varieties at $P<0.05$. The same below.

2.6 不同测定指标之间的相关性分析

相关性分析结果显示,土壤相对含水量与各个参数之间均呈现显著的相关关系,其中与叶片相对含水量(RWC)之间呈极显著的正相关,且相关系数最高为 0.782。而叶片相对含水量(RWC)与复水后成活率、叶绿素质量分数、脯氨

酸质量分数之间为极显著的相关性(表 3)。表明各个参数均可在显著水平上反映土壤水分的变化情况,而土壤水分的变化对叶片含水量影响较大,叶片水分的变化对复水后成活率、叶绿素质量分数、脯氨酸质量分数影响较大。

表 3 不同测定指标的相关性
Table 3 Relevance of different parameters

参数 Parameter	土壤含水量 Soil moisture content	RWC	F_v/F_m	$ETR(I)$	$ETR(II)$	q^P	q^N	叶绿素 质量分数 Chl mass fraction	脯氨酸 质量分数 Proline mass fraction
RWC	0.782**		0.542*	0.474*	0.649**	0.583**	-0.248	-0.831**	-0.851**
F_v/F_m	0.631**	0.542*		0.245	0.578**	0.565**	-0.296	-0.410	-0.313
$ETR(I)$	0.643**	0.474*	0.245		0.686**	0.686**	-0.552*	-0.427	-0.296
$ETR(II)$	0.746**	0.649**	0.578**	0.686**		0.939**	-0.396	-0.668**	-0.395
q^P	0.695**	0.583**	0.565**	0.535*	0.939**		-0.196	-0.613**	-0.381
q^N	-0.494*	-0.248	-0.296	-0.552*	-0.396	-0.196		0.219	0.264
叶绿素质量分数 Chl mass fraction	-0.489*	-0.831**	-0.410	-0.427	-0.668**	-0.613**	0.219		0.774**
脯氨酸质量分数 Proline mass fraction	-0.493*	-0.851**	-0.313	-0.296	-0.395	-0.381	0.264	0.774**	
复水成活率 Survival rate after rehydration	0.513*	0.848**	0.397	0.419	0.641**	0.573**	-0.217	-0.852**	-0.793**

注:“*,**”分别代表 5%和 1%显著水平。
Note:“*,**” indicate significant differences at 0.05 and 0.01 level, respectively.

3 讨论

干旱处理直接影响小麦植株的生长发育,干旱胁迫下小麦的萎蔫程度、株高、叶面卷曲程度等均可作为植株抗旱性鉴定的指标^[4]。本试验中,当土壤相对含水量达到严重干旱胁迫的情况下,不同小麦的植株形态存在显著差异,与1号小麦(对照:‘晋麦47’)相比,4、5号小麦在干旱胁迫下表现出更强的适应能力,而6、9、10号小麦适应能力较差,其余小麦无明显差异。因此推测4、5号小麦的抗旱性强于1号小麦,2、3、7、8号小麦抗旱性与1号小麦相似。通过测定小麦旗叶的相对含水量的结果同样表明4、5号小麦干旱胁迫下依旧能保持较高的叶片含水量,从而缓解干旱对植株形态的影响。而6、9、10号小麦的水分供求对干旱胁迫更敏感。相关性分析结果显示复水后成活率与叶片相对含水量存在极显著的正相关,说明叶片相对含水量可作为抗旱性鉴定的重要生理指标。

干旱胁迫导致小麦光系统Ⅱ的光化学过程发生混乱,叶绿素荧光动力学参数变化灵敏,其变化程度可以用来鉴别小麦忍耐干旱的能力,目前认为抗旱能力愈强,叶绿素荧光动力学参数的变化程度愈小。 F_v/F_m 被认为是反应植物光抑制程度的可靠指标,其变化程度可作为小麦抗旱性鉴定的重要指标^[5,24-25]。 F_v/F_m 、 q^p 、 q^N 、 ETR 等叶绿素荧光参数的测定结果表明干旱胁迫下4、5号小麦能维持良好的光合作用,9、10号小麦光合作用对干旱胁迫较为敏感,而其他小麦的光合作用与1号小麦相似。相关性分析结果表明叶绿素荧光参数与叶片相对含水量、土壤相对含水量之间存在显著的相关性,从而表明叶绿素荧光参数在小麦抗旱鉴定方面具有一定可靠性。 F_v/F_m 、 q^N 、 $ETR(I)$ 与复水后成活率之间无显著的相关性,推测是由于不同小麦的 F_v/F_m 、 q^N 、 $ETR(I)$ 正常生长条件下存在显著差异,而复水后成活率统计时认为不同小麦在正常生长过程中没有差异或者差异很小。

在水分胁迫下,叶片中叶绿素质量分数发生变化,但抗旱性品种比不抗旱品种变化幅度小^[22]。本试验中,虽然土壤相对含水量达到严重干旱胁迫的水平,但由于干旱胁迫时间较短,旗叶水分大量流失,样品质量急剧下降,所以导致大多数小麦叶绿素及其组分含量显著增加。相关性分

析结果显示叶绿素质量分数与叶片含水量达到极显著的相关,亦证明了上述观点。4号小麦变化幅度最小,9、10号小麦变化幅度较大,表明4号小麦的叶绿素调控对干旱具有较强的适应性。结合相关性分析结果发现,叶绿素质量分数与复水后成活率达到极显著的相关,表明叶绿素质量分数可作为小麦抗旱性鉴定的参考指标。干旱胁迫导致叶绿素质量分数升高,但 F_v/F_m 显著下降,推测是干旱胁迫使叶片水分的大量流失,导致水分成为光合作用的限制因子,虽然9、10号小麦叶绿素质量分数较高,但其叶片相对含水量较低,从而导致其 F_v/F_m 较低。

脯氨酸作为细胞质渗透调节物质和防脱水剂在干旱胁迫中发挥重要作用^[26]。本试验中,干旱胁迫下叶片脯氨酸质量分数显著增加,表明植株在干旱条件下通过增加脯氨酸质量分数来调节水分供求关系。2、4、5、7、8、10号小麦与1号小麦相比脯氨酸质量分数无显著变化,表明其在干旱胁迫下的渗透调节和防脱水能力与1号小麦相似。相关性分析中,脯氨酸质量分数与复水后的成活率、叶片相对含水量存在极显著的相关。干旱胁迫下植株体内水分的大量流失导致较多脯氨酸的产生,从而调节植株水分的供求平衡。在本试验中,脯氨酸质量分数越高表明植株失水越严重,受到干旱胁迫的损伤越大。

综合抗旱表型鉴定与生理生化指标测定结果,可以发现4号(‘ZHW’/‘小偃22’杂交后代)和5号(‘0705-39’/‘INDB’杂交后代)彩粒小麦的抗旱性优于对照,9、10号小麦对干旱胁迫较为敏感,2、3、6、7、8号小麦抗旱性与对照无显著差异。2份经过表型与生理生化指标抗旱性鉴定筛选的彩粒小麦新材料对干旱胁迫具有较好的适应性,有望成为新的抗旱种质资源用于旱地小麦育种和抗旱分子机制解析。

参考文献 Reference:

- [1] 刘志勇,王道文,张爱民,等. 小麦育种行业创新现状与发展趋势[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(3): 58-62.
LIU ZH Y, WANG D W, ZHANG A M, *et al.* Current status and perspective of wheat genomics, genetics and breeding[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(3): 58-62.
- [2] 王贺正, 马 均, 李旭毅, 等. 水稻开花期抗旱性鉴定指标的筛选[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1485-1489.
WANG H ZH, MA J, LI X Y, *et al.* Screening identification indexes of drought resistance at flowering stage in rice[J].

- Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(11):1485-1489.
- [3] 吴金芝,王志敏,李友军,等.不同冬小麦品种旗叶绿素荧光特性及其对干旱胁迫的响应[J].麦类作物学报,2015,35(5):699-706.
- WU J ZH, WANG ZH M, LI Y J, *et al.* Flag leaf chlorophyll fluorescence characteristics and its response to drought stress in different cultivars of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(5):699-706.
- [4] 唐晓珍,董玉秀,位思清,等.彩粒小麦面包品质评价[J].中国粮油学报,2009,24(10):19-22.
- TANG X ZH, DONG Y X, WEI S Q, *et al.* Bread quality evaluation of color wheat lines[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2009, 24(10):19-22.
- [5] 杨子光,冀天会,郭军伟,等.小麦苗期抗旱性鉴定研究进展[J].北方农业学报,2009(5):29-31.
- YANG Z G, JI T H, GUO J W, *et al.* Advance of wheat drought resistance identification in seedling stage[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2009(5):29-31.
- [6] ANA G H K, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1991, 42(1):313-349.
- [7] 吴长艾,孟庆伟,邹琦,等.小麦不同品种叶片对光氧化胁迫响应的比较研究[J].作物学报,2003,29(3):339-344.
- WU CH A, MENG Q W, ZOU Q, *et al.* Comparative study on the photooxidative response in different wheat cultivar leaves[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(3):339-344.
- [8] 徐心志,马超,孙倩,等.不同灌水量对黄淮海地区冬小麦叶绿素荧光及光保护特性的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(1):183-190.
- XU X ZH, MA CH, SUN Q, *et al.* Effect of irrigation amount on chlorophyll fluorescence and photo-protection characteristics of flag leaf of winter wheat in Huang-Huai-Hai region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(1):183-190.
- [9] MISHRA S S, PANDA D. Leaf traits and antioxidant defense for drought tolerance during early growth stage in some popular traditional rice landraces from Koraput, India[J]. *Rice Science*, 2017, 24(4):207-217.
- [10] BATES L S, WALDREN R P, TEARE I D. Rapid determination of free proline for water-stress studies[J]. *Plant and Soil*, 1973, 39(1):205-207.
- [11] 高俊凤.植物生理学试验指导[M].北京:高等教育出版社,2006:71-76.
- GAO J F. Guidance of Plant Physiology Experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:71-76.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.气象干旱等级:GB/T20481-2006[S].北京:中国标准出版社,2006:12-17.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Meteorological Drought Grade: GB/T 20481-2006[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2006:12-17.
- [13] SINCLAIR T R, LUDLOW M M. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes[J]. *Functional Plant Biology*, 1986, 13(3):329-341.
- [14] LAFITTE R. Relationship between leaf relative water content during reproductive stage water deficit and grain formation in rice[J]. *Field Crops Research*, 2002, 76(2-3):165-174.
- [15] MERAH O. Potential importance of water status traits for durum wheat improvement under Mediterranean conditions[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2001, 137(2):139-145.
- [16] 张林刚,邓西平.小麦抗旱性生理生化研究进展[J].干旱地区农业研究,2000,18(3):87-92.
- ZHANG L G, DENG X P. Advances in studies on physiology and biochemistry of wheat drought resistance[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2000, 18(3):87-92.
- [17] 王曙光,史雨刚,史华伟,等.春小麦光合特性与抗旱性的关系研究[J].作物杂志,2017(6):29-35.
- WANG SH D, SHI Y G, SHI W H, *et al.* Research on relationship between photosynthetic characteristics and drought resistance in spring wheat[J]. *Crops*, 2017(6):29-35.
- [18] 张其德,张建华.限水灌溉和不同施肥方式对冬小麦旗叶某些光合功能的影响[J].植物营养与肥料学报,2000,6(1):24-29.
- ZHANG Q D, ZHANG J H. Effects of limited irrigation and different fertilization ways on some photosynthetic functions of flag leaves in winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1):24-29.
- [19] WU CH A, MENG Q W, ZOU Q, *et al.* Comparative study on the photooxidative response in different wheat cultivar leaves[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 25(3):339-344.
- [20] 陈四龙,孙宏勇,陈素英,等.不同冬小麦品种(系)叶绿素荧光差异分析[J].麦类作物学报,2005,25(3):57-62.
- CHEN S L, SUN H Y, CHEN S Y, *et al.* Analysis on chlorophyll fluorescence of flag leaves for different winter wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(3):57-62.
- [21] XU L, GAO ZH Q, LI Y L, *et al.* Flag leaf photosynthetic characteristics, change in chlorophyll fluorescence parameters, and their relationships with yield of winter wheat sowed in spring[J]. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 2016, 27(1):133-142.
- [22] 俞世雄,李芬,李绍林,等.水分胁迫对小麦新品系叶绿素含量的影响[J].云南农业大学学报,2014,29(3):353-358.
- YU SH X, LI F, LI SH L, *et al.* Effects of water stress on chlorophyll contents of new wheat lines[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2014, 29(3):353-358.
- [23] 杨凯,昌小平,胡荣海,等.干旱胁迫下小麦脯氨酸积累相关基因的染色体定位[J].作物学报,2001,27(3):363-366.
- YANG K, CHANG X P, HU R H, *et al.* Chromosomal localization of genes associated with proline accumulation under drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(3):363-366.
- [24] 王正航,武仙山,昌小平,等.小麦旗叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的灰色关联度分析[J].作物学报,2010,36(2):217-227.

- WANG ZH H, WU X SH, CHANG X P, *et al.* Chlorophyll content and chlorophyll fluorescence kinetics parameters of flag leaf and their gray relational grade with yield in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(2): 217-227.
- [25] LI T, LIU L N, JIANG C D, *et al.* Effects of mutual shading on the regulation of photosynthesis in field-grown sorghum[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2014, 137: 31-38.
- [26] 宋新颖, 张玉梅, 张洪生, 等. 干旱胁迫对不同冬小麦品种幼苗期生理特性的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(12): 6-11.
- SONG X Y, ZHANG Y M, ZHANG H SH, *et al.* Effect of drought stress on physiological characteristics in different winter wheat seedlings[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(12): 6-11.

Effects of Drought Stress on Development of Different Colored Wheat at Seedling Stage

ZHANG Jianlong¹, YI Ke¹, ZHANG Yilan¹, ZHAO Yidi¹, CHAO Manning^{1,2},
TAN Hongbin³, SUN Fengli^{1,2}, XI Yajun^{1,2} and ZHANG Chao^{1,2}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling Shaanxi 712100, China; 3. Shaanxi Provincial Seed Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract The identification and utilization of excellent germplasm resources are the basis for plant breeding and analysis in the molecular mechanism of drought resistance. For screening materials with excellent drought resistance, we conducted a phenotypic analysis in development of different colored wheat under drought stress, and determined physiological and biochemical indices. Among different colored wheat materials under severe drought stress, significant differences were shown in plant phenotypes, survival rates after rehydration, relative water in leaves, chlorophyll mass fraction, proline mass fraction and chlorophyll fluorescence. Several indicators showed that two materials including the ‘ZHW’/‘Xiaoyan 22’ and ‘0705-39’/‘INDB’ hybrid progenies had better drought resistance. The survival rate after rehydration was significantly correlated with the leaf relative water, proline, chlorophyll contents. And the leaf relative water content was significantly correlated with the F_v/F_m , ETR , and q^P . Drought-resistant phenotype analysis and the examination of physiological and biochemical indicators showed that drought stress significantly affected the growth and development of different colored wheat at the seedling stage, but it had significant differences in drought resistance among varieties. As a result, two wheat materials with good drought resistance could be identified by screening, which could be used for further analyzing the molecular mechanisms of drought resistance for wheat breeding in dry areas.

Key words Colored wheat; Germplasm resources; Drought stress; Chlorophyll fluorescence; Drought resistance identification

Received 2019-08-23

Returned 2019-10-10

Foundation item National Key R&D Program(No. 2017YFD0300202); Yangling Demonstration Zone of Agricultural High-tech Industry, Shaanxi Province, the Major Project of Synergistic Innovation(No. 2018CXY-06).

First author ZHANG Jianlong, male, undergraduate, agricultural major. E-mail: 1272945425@qq.com

Corresponding author ZHANG Chao, male, Ph. D, associate professor. Research area: molecular mechanism analysis of plant drought resistance. E-mail: ahzc2009@163.com

(责任编辑: 成敏 Responsible editor: CHENG Min)