

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201907031

干旱及复水处理对不同小麦品种(系)苗期生长指标的影响*

张平^{1#}, 刘永江^{1#}, 孔治有², 李莉¹, 刘俊娜¹, 王倩朝¹, 环秀菊¹, 覃鹏^{1**}

(1. 云南农业大学 农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201;

2. 保山学院 资源与环境学院, 云南 保山 678000)

摘要:【目的】明确干旱及复水处理对不同小麦品种(系)苗期生长指标的影响。【方法】以抗旱型品种靖麦12号与干旱敏感型品种云0073为材料,以正常水分管理作为对照,待小麦长至三叶期,采用干旱—复水法取幼苗全株测定株高、地上部分干质量、地下部分干质量、根冠比以及初生根数、根长、根平均直径、根体积和根表面积等生长指标的变化情况。【结果】干旱处理下,两品种(系)之间地下部分干质量、根冠比、总根长、根平均直径及根总体积存在极显著差异($P<0.01$),株高、地上部分干质量和根总表面积存在显著差异($P<0.05$)。处理间地下部分干质量、根冠比、根平均直径及根总体积存在极显著差异($P<0.01$),初生根数达显著差异($P<0.05$)。云0073的幼苗除初生根数外,其余指标均较对照显著降低($P<0.05$),而靖麦12号均无显著变化($P>0.05$)。在复水条件下,2个品种的初生根数变化趋势基本一致,其余生长指标靖麦12号均显著优于云0073($P<0.05$)。干旱及复水处理下,品种与株高极显著负相关($P<0.01$),与根平均直径显著负相关($P<0.05$);地下部分干质量与根平均直径和根总体积显著正相关($P<0.01$),与地上部分和根总表面积显著正相关($P<0.05$);地上部分干质量与总根长、根总体积和根总表面积显著正相关($P<0.01$);总根长与根总表面积显著正相关($P<0.01$),与根平均直径和根总体积显著正相关($P<0.05$);根平均直径与根总表面积显著正相关($P<0.05$);根总体积与根总表面积显著正相关($P<0.01$)。【结论】不同抗旱性品种形态指标对干旱响应存在差异,抗旱品种靖麦12号多项指标明显优于干旱敏感品种云0073,受干旱影响相对较小,各项生长指标也表现较好;复水后靖麦12号能较快恢复,而云0073在复水5d后受害有进一步加剧的趋势;干旱及复水处理下,小部分生长指标之间存在负相关性,而大部分指标之间存在正相关性。靖麦12号和云0073相比,靖麦12号表现出较强的抵御干旱及复水后的恢复能力。

关键词: 小麦; 干旱; 复水; 根系; 抗旱性

中图分类号: S 512.05

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 01-0022-07

Effects of Drought and Rewater on the Growth Indicators of Seedlings in Different Wheat Varieties (Lines)

ZHANG Ping¹, LIU Yongjiang¹, KONG Zhiyou², LI Li¹, LIU Junna¹,

WANG Qianchao¹, HUAN Xiuju¹, QIN Peng¹

(1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. College of Resources and Environment, Baoshan University, Baoshan 678000, China)

收稿日期: 2019-07-15

修回日期: 2020-11-07

网络首发时间: 2021-01-14 16:33:53

*基金项目: 云南省农业联合基金重点项目(2018FG001-005); 云南省程顺和院士工作站(2019IC006)。

作者简介: #对本文贡献等同,为并列第一作者。张平(1992—),男,贵州遵义人,硕士研究生,主要从事小麦遗传育种与品质改良研究。E-mail: 1038621748@qq.com; 刘永江(1994—),女,云南昭通人,硕士研究生,主要从事黎麦遗传育种与品质改良研究。E-mail: 1263720503@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 覃鹏(1977—),男,湖北恩施人,博士,教授,主要从事作物遗传育种与品质改良研究。E-mail: qinpeng77@163.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20210114.0920.001.html>



Abstract: [Purpose] To clarify the effects of drought and rewater treatment on the growth indicators of different wheat varieties. [Methods] The drought-resistant variety Jingmai 12 and the drought-sensitive variety Yun 0073 were used as materials in this experiment. When the wheat was grown to the three-leaf stage, the seedlings were taken by drought stress and rewater method to investigate the plant height, shoot dry weight, root dry weight, root-shoot ratio, number of primary roots, root length, root mean diameter and root volume, root surface area, with normal water management as a control. [Results] Analysis of variance showed that the significant differences in dry weight of underground part, ratio of root to shoot, total root length, average root diameter and total root volume between the two varieties (lines) under drought ($P<0.01$), and significant differences in plant height, dry weight of aboveground part and total root surface area ($P<0.05$). Under drought stress, the growth indicators of Yun 0073 seedlings were significantly lower than the control except for the number of primary roots ($P<0.05$), but there was no significant change in all the indicators of Jingmai 12 ($P>0.05$). The change trends of the primary roots number between two varieties were basically the same under rewater conditions, but all other morphological indicators of Jingmai 12 were significantly better than Yun 0073 ($P<0.05$). Under the treatment of drought and rewater, there was a extremely significant negative correlation between varieties and plant height ($P<0.01$), and a significant negative correlation between varieties and average root diameter ($P<0.05$), the dry weight of underground part was extremely positively correlated with average root diameter and total root volume ($P<0.01$), and positively correlated with aboveground part and total root surface area ($P<0.05$), the dry weight of the underground part was extremely positively correlated with the total root volume and the total surface area of the root ($P<0.01$), and extremely positively correlated with the total root length ($P<0.01$), the total root length was extremely positively correlated with the total surface area of the root ($P<0.01$), and positively correlated with the average diameter and the total volume of the root ($P<0.05$), the average root diameter was positively correlated with the total root surface area ($P<0.05$), and the total root volume was extremely positively correlated with the total root surface area ($P<0.01$).

[Conclusion] The response of different drought resistant varieties to drought was different, and many indexes of Jingmai 12 were obviously better than those of Yun 0073, which was sensitive to drought. The effect of drought was relatively small, and the growth indexes were better. Jingmai 12 could recover quickly after rewater, while Yun 0073 was rewater after five days. There was a negative correlation between a small number of growth indicators and a positive correlation between most indicators under drought and rewater. Compared with Yun 0073, Jingmai 12 shows a stronger ability to resist drought and recover water.

Keywords: wheat; drought; rewater; root system; drought resistance

干旱是影响中国小麦产量的主要因素之一, 随着全球气候骤变, 旱灾发生的频率和范围也在扩大。据统计, 世界性干旱导致的减产可超过其他因素所造成的减产的总和^[1-2]。干旱胁迫限制了植物的生长, 由于长期的进化, 植物会通过调整形态构造和各个器官的生长速度来适应干旱胁迫^[3]。了解小麦苗期的抗旱特性, 研究土壤水分胁迫对小麦苗期生长指标的影响, 对选育优质小麦品种和提高小麦产量具有指导意义。

小麦根系的重要作用之一就是土壤中吸收

水分, 其吸收水分的多少, 不仅受土壤物理机械特性的制约, 而且还受到根系生长状况和代谢作用的影响^[4-6]。很久以来, 大多数学者只注意到了植株地上部分对干旱胁迫的生理生化反应, 而对其地下部分即根系的研究和关注还相对较少^[7]。根系生物量、根体积和根系下扎特性等是衡量其抗旱性和耐旱性的重要指标^[8], 也有学者将发芽率、初生根数量和胚芽鞘长短等指标用来评估小麦抗旱性^[9-10]。研究表明: 当土壤干旱时, 作为植物体重要器官的根系, 能首先感受到水分胁迫并

迅速发出信号,使植物植株对干旱做出反应^[11],同时还能改变根系形态以适应土壤干旱;大量研究发现:根长、根冠比等因素变化是对干旱胁迫的响应并最终决定产量的形成^[12-17],苗期株高、地上部分干质量、根干质量等指标均因干旱而下降^[18];龚璞等^[19]发现:干旱胁迫会引起根系总表面积、根系总平均直径以及根系总体积的下降。

云南降水极不均衡,雨季(5—9月)降水量占全年的90%以上,而小麦整个生长阶段(10月—次年4月)都处于旱季,严重影响小麦产量,尤其是旱地小麦产量仅为1500 kg/hm²左右,远低于全国平均水平。本试验以不同品种(系)的小麦为材料,在大棚内采用干旱胁迫—复水法,观测和分析不同品种在干旱及复水处理前后生长指标变化情况,探讨这些指标与小麦抗旱能力之间的联系,为旱地小麦栽培和抗旱性小麦品种选育提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

将云南小麦资源材料350个(地方品种296个,铁壳类46个,育成品种8个)种植于育苗盘中,设置干旱处理与对照,根据三叶一心期干旱处理后的存活率、萎蔫程度以及根长、株高等农艺性状,初步筛选出田间表现优异的抗旱材料20个品种(系)及敏感型材料20个品种(系)。将筛选出的品种(系)种于苗盘,同样设置干旱处理与对照,对照组按照常规栽培管理技术进行田间管理。在三叶一心期取幼苗测定生理生化指标,结合根系相关数据,最终筛选出苗期高抗旱材料靖麦12号及水分敏感型材料云0073作为试验材料。

1.2 干旱处理

挑选两品种饱满整齐的籽粒,用0.2% HgCl₂消毒后,25℃恒温光照培养箱中培养至露白后,挑选露白均匀一致的种子50粒种于遮雨棚下的苗盘内,以营养土和沙石(1:3体积比)混合均匀作为栽培介质,保证一孔一苗,地面铺盖油纸防止根系入土,生长期间正常浇水,相对含水量控制在田间持水量的70%~80%,待幼苗长至三叶一心期开始干旱处理,间隔5d后复水。于干旱处理5d和复水后5d测定各生长指标,以正常水分管理的材料作为对照。

1.3 生长指标测定方法

选取长势一致的小麦幼苗,测定株高、地上和地下部分干质量、初生根数、总根长、根平均直径、根总体积和根总表面积等指标,每项指标均重复3次取样。用游标卡尺测定植株基部到最上部展开叶的叶尖的距离作为株高;利用托普根系扫描仪(MRS-9600TFU2L)扫描测定根长、根平均直径、根总体积、根表面积和初生根数等指标。将植株分为地上部(茎叶)和地下部(根系)两部分,110℃杀青30min,80℃烘干至恒质量,测得地上部分和地下部分干质量,再计算根冠比。

$$\text{根冠比} = \frac{\text{地下部分干质量}}{\text{地上部分干质量}} \times 100\%。$$

1.4 数据统计与分析

以“处理/对照比值”表示干旱及复水处理结果。作图分析使用Origin 2018软件完成;统计分析使用SPSS 25和DPS 7.05软件完成。

2 结果与分析

2.1 幼苗生长指标的品种差异及干旱的影响

品种间地下部分干质量、根冠比、总根长、根平均直径及根总体积存在极显著差异,株高、地上部分干质量、根总表面积存在显著差异;处理与对照地下部分干质量、根冠比、根平均直径及根总体积存在极显著差异,初生根数达显著差异;两因素交互作用的地下部分干质量、地上部分干质量、根冠比、总根长、根总体积及根总表面积存在极显著差异,根平均直径存在显著差异(表1)。

2.2 干旱及复水处理对小麦幼苗株高、干质量及根冠比的影响

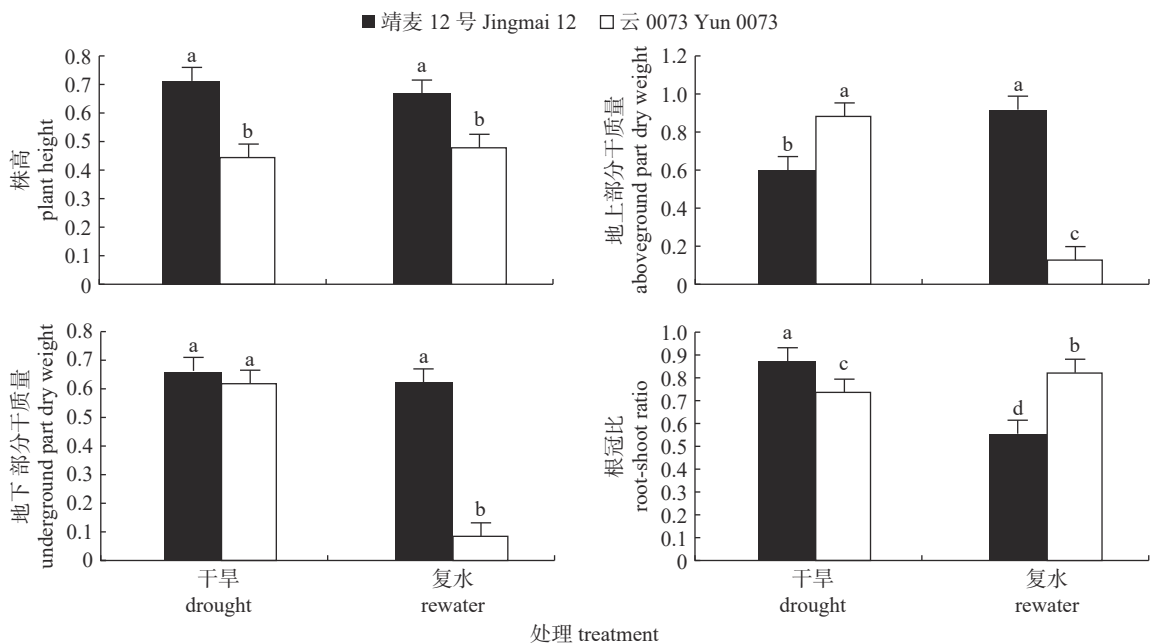
由图1所示:干旱及复水处理下两品种(系)的株高、地上部分干质量和地下部分干质量较对照均表现不同程度的降低,靖麦12号在干旱及复水处理下株高受到的影响均显著小于云0073,干旱后复水株高没有显著变化;干旱下两品种(系)的生物量均表现不同程度的降低,靖麦12号地上部分干质量降幅较云0073更大,而地下部分干质量两品种降幅并无明显差异,复水处理后靖麦12号地上部分干质量与对照趋于一致但地下部分无显著变化,而云0073地上和地下部分干质量继续急剧降低;干旱及复水处理均导致两品种(系)的根冠比表现不同程度的降低,干

表 1 品种及处理间的方差分析 (F 值)

Tab. 1 Variance analysis of varieties and treatment (F value)

变异来源 source of variation	自由度 df	株高/cm plant height	地下部分 干质量/g underground part dry weight	地上部分 干质量/g aboveground part dry weight	根冠比 root-shoot ratio	初生根数 primary root number	总根长/cm total root length	根平均 直径/mm average root diameter	根总体积/cm ³ root total volume	根总 表面积/cm ² root total surface area
品种 cultivar	1	17.71*	55.642**	9.248*	24.191**	0.455	36.816**	172.641**	155.174**	14.612*
处理 treatment	1	0.01	55.114**	7.081	71.259**	8.997*	2.902	27.143**	156.907**	2.893
品种×处理 cultivar × treatment	1	0.565	42.479**	41.511**	222.491**	0.093	67.499**	19.74*	140.623**	21.905**

注: “*”和“**”分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$; 下同。
Note: “*” and “**” indicate $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively; the same as bellow.



注: 以“处理/对照比值”表示干旱和复水处理的结果; 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 下同。
Note: The ratio of treatment to contorl represent the results of drought and rewater treatments; different letters mean significant difference ($P<0.05$); the same as below.

图 1 干旱及复水处理对小麦幼苗株高、干质量和根冠比的影响

Fig. 1 Effects of drought and rewater on the plant height, dry weight and root-shoot ratio of wheat seedlings

旱对云 0073 根冠比的影响显著大于靖麦 12 号, 而复水后靖麦 12 号的根冠比降幅有一定程度降低, 而云 0073 略有增加。

2.3 干旱及复水处理对小麦幼苗根系生长指标的影响

由图 2 所示: 干旱对两品种 (系) 初生根数无显著影响, 复水后两品种 (系) 较对照均显著降低; 受干旱影响, 两品种的总根长均有不同程度的降低, 其中靖麦 12 号的降幅较云 0073 更大, 复水后靖麦 12 号迅速恢复而云 0073 继续急剧下降; 干旱使两品种 (系) 的根平均直径均有不同程

度的降低, 靖麦 12 号降幅显著低于云 0073, 复水后靖麦 12 号无显著变化而云 0073 进一步显著降低; 干旱和复水处理使两品种 (系) 的根总体积显著降低, 在干旱胁迫条件下靖麦 12 号和云 0073 的降幅表现基本一致, 复水后靖麦 12 号保持不变而云 0073 继续大幅度降低; 干旱处理下两品种 (系) 的根总表面积均显著降低, 且靖麦 12 号的降幅较云 0073 更大, 复水后靖麦 12 号有所恢复、而云 0073 继续大幅度降低。

2.4 干旱及复水两品种 (系) 形态指标相关性分析

由表 2 所示: 干旱及复水处理下品种与株高

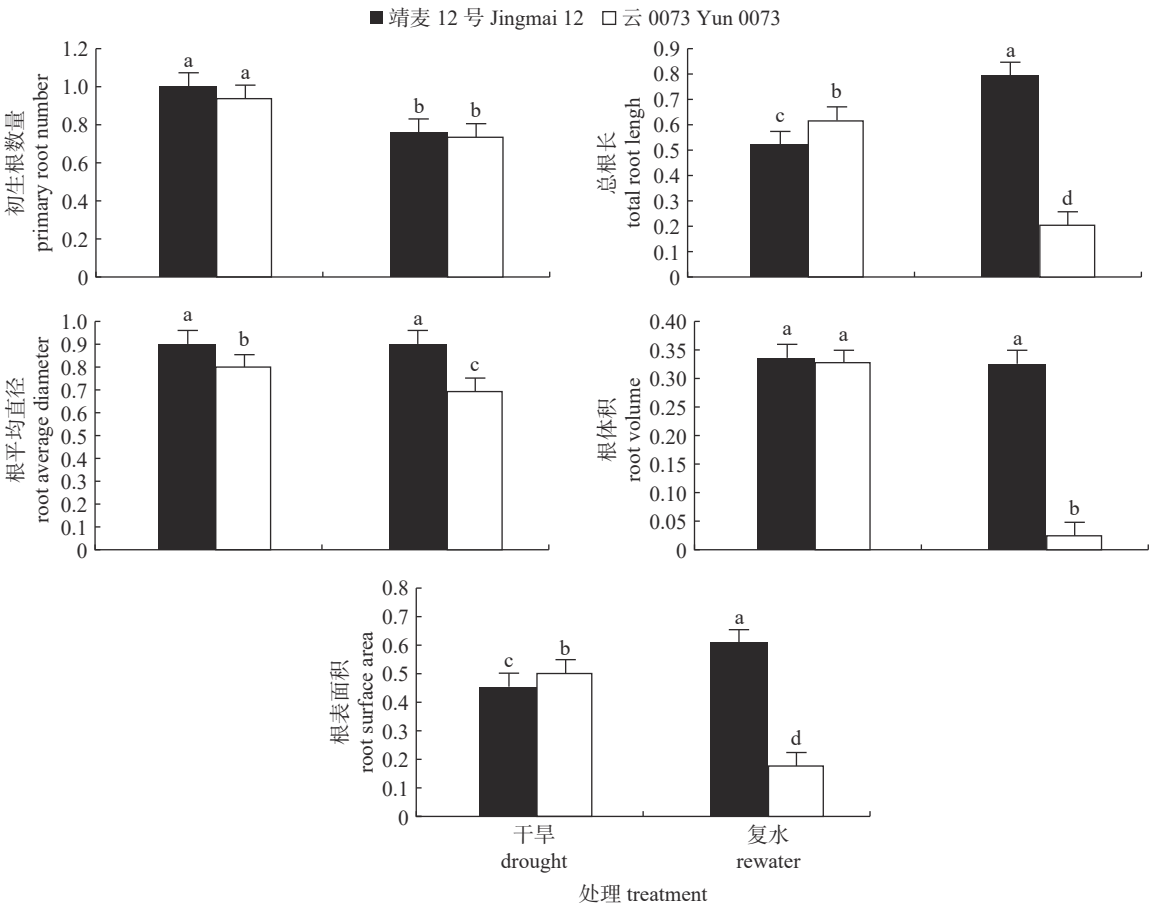


图 2 干旱及复水处理对小麦幼苗地上部分干质量的影响
Fig. 2 Effects of drought and rewater on the aboveground part dry weight of wheat seedlings

表 2 不同品种 (系) 干旱及复水处理下形态指标相关性

Tab. 2 Correlation between two varieties (line) morphology indicators under drought and rewater treatments

指标 index	品种(系) cultivar (line)	处理 treatment	株高 plant height	地下部分 干质量 underground part dry weight	地上部分 干质量 aboveground part dry weight	根冠比 root-shoot ratio	初生根数 primary root number	总根长 total root length	根平均直径 root average diameter	根总体积 root total volume
株高 plant height	-0.98**	-0.02								
地下部分干质量 underground part dry weight	-0.6	-0.6	-0.51							
地上部分干质量 aboveground part dry weight	-0.4	-0.35	0.25	0.90*						
根冠比 root-shoot ratio	0.28	-0.47	-0.11	-0.32	-0.65					
初生根数 primary root number	-0.22	-0.97**	0.26	0.66	0.34	0.48				
总根长 total root length	-0.59	-0.16	0.44	0.87	0.96**	-0.75	0.21			
根平均直径 root average diameter	-0.89*	-0.35	0.83	0.90**	0.73	-0.33	0.51	0.89*		
根总体积 root total volume	-0.59	-0.59	0.49	1.00**	0.91**	-0.35	0.64	0.88*	0.89*	
根总表面积 root total surface area	-0.61	-0.27	0.47	0.92*	0.97**	-0.66	0.32	0.99**	0.86	0.93**

极显著负相关,与根平均直径显著负相关;地下部分干质量与根平均直径和根总体积极显著正相关,与地上部分和根总表面积显著正相关;地上部分干质量与总根长、根总体积和根总表面积呈极显著正相关;总根长与根总表面积显著正相关,与根平均直径和根总体积显著正相关;根平均直径与根总表面积显著正相关;根总体积与根总表面积显著正相关。

3 讨论

小麦的抗旱性由多种因素共同决定,不同小麦品种抗旱机制也不同;干旱胁迫对小麦生理过程的影响是复杂的,也是多方面的。有研究表明:干旱胁迫下抗旱性强的品种具有更发达的根系,生物量和长度较大^[15],可以通过合成渗透调节物质,使根内外水势差减小,根细胞失水减轻,有效延缓根的体积减小^[20];干旱会显著降低冬小麦幼苗根系总长和干质量^[21],且干旱胁迫对地上部的影响要大于地下部^[22],可显著降低株高^[23]。根冠比是反映根系与地上部生长平衡的重要指标^[19],根冠比过大,也可能出现根系冗余。同时干旱胁迫会使根尖到根毛出现的时间缩短,为了吸收水分使根水势显著下降,也会显著降低总根长与根系总表面积^[24]。本研究发现:干旱导致靖麦12号和云0073地上部分干质量、地下部分干质量以及根系总长均有不同程度的下降,且地上部分干质量降幅大于地下部分干质量,还显著降低小麦株高、根冠比、初生根数、根系平均直径和根总体积。干旱胁迫解除后,作物会有一个修复补偿过程,有些甚至会出现超补偿现象^[25-27]。靖麦12号绝大多数指标降幅低于抗旱性弱的云0073,且复水后恢复能力较强;但靖麦12号地上部分干质量、总根长与根系总表面积在干旱处理下降幅高于云0073,可以推测靖麦12号是通过降低地上部分生物量来减少水分蒸发、同时维持较大的根冠比以更好地维持植株生长。靖麦12号的各个指标在干旱-复水后都表现出更好的恢复能力。而靖麦12号复水后根冠比的再次大幅度降低,可能与前期干旱使根系生长受到严重抑制、而地上部分在复水后快速恢复生长有关^[28-29]。

本试验选择形态指标作为观测指标,具有快速、高效、重复性强等特点。靖麦12号和云

0073抵御干旱都是通过多个指标协同作用完成,后期将进一步检测抗氧化酶活性、丙二醛和脯氨酸等生理生化指标以从不同角度考察不同抗旱性小麦品种(系)对干旱胁迫的反应和适应性。

4 结论

干旱处理下,靖麦12号多项生长指标明显优于云0073,受干旱影响相对较小,各项形态指标也表现较好;靖麦12号和云0073相比,靖麦12号表现出较强的抵御干旱及复水后的恢复能力。干旱及复水处理下,小部分生长指标之间存在负相关性,而大部分指标之间存在正相关性。

[参考文献]

- [1] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7601.2000.03.016.
- [2] 抗艳红,赵海超,龚学臣,等.不同生育期干旱胁迫对马铃薯产量及品质的影响[J].安徽农业科学,2010,38(30):16820. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.30.133.
- [3] 徐飞,郭卫华,徐伟红,等.刺槐幼苗形态、生物量分配和光合特性对水分胁迫的响应[J].北京林业大学学报,2010,32(1):24. DOI: 10.13332/j.1000-1522.2010.01.026.
- [4] CHEN Y Y, CHEN P Y, DE LOS REYES B G. Differential responses of the cultivated and wild species of soybean to dehydration stress[J]. Crop Science, 2006, 46(5): 2041. DOI: 10.2135/cropsci2005.12.0466.
- [5] 周晓果,景蕊莲,郝转芳,等.小麦幼苗根系性状的QTL分析[J].中国农业科学,2005,38(10):1951. DOI: 10.3321/j.issn:0578-1752.2005.10.003.
- [6] 郑桂珍,关军锋,李广敏.渗透胁迫下钙对小麦胚芽鞘和根系生长的影响[J].中国农业科学,2005,38(3):486. DOI: 10.3321/j.issn:0578-1752.2005.03.009.
- [7] 李鲁华,李世清,翟军海,等.小麦根系与土壤水分胁迫关系的研究进展[J].西北植物学报,2001,21(1):1. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4025.2001.01.001.
- [8] 李梦达,李向东,牛洪斌,等.小麦品种抗旱性与深根性和深层根系活性的关系[J].麦类作物学报,2017,37(5):666. DOI: 10.7606/j.issn.1009-1041.2017.05.13.
- [9] 关军锋,马春红,李广敏.干旱胁迫下小麦根冠生物量变化及其与抗旱性的关系[J].河北农业大学学报,2004,27(1):1. DOI: 10.3969/j.issn:1000-1573.2004.01.001.
- [10] 卫云宗,刘新月,张久刚.小麦苗期抗旱类型研究[J].中国生态农业学报,2008,16(6):1409. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2008.01409.
- [11] JIA W S, ZHANG J H. Stomatal movements and long-distance signaling in plants[J]. Plant Signaling & Behavior, 2008, 3(10): 772. DOI: 10.4161/psb.3.10.6294.
- [12] 田梦雨,李丹丹,戴廷波,等.水分胁迫下不同基因型小

- 麦苗期的形态生理差异[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 41. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2010.0061](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2010.0061).
- [13] SUBRAHMANYAM D, SUBASH N, HARIS A, et al. Influence of water stress on leaf photosynthetic characteristics in wheat cultivars differing in their susceptibility to drought[J]. *Photosynthetica*, 2006, 44(1): 125. DOI: [10.1007/s11099-005-0167-y](https://doi.org/10.1007/s11099-005-0167-y).
- [14] 王士强, 胡银岗, 余奎军, 等. 小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2452. DOI: [10.3321/j.issn:0578-1752.2007.11.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:0578-1752.2007.11.008).
- [15] NAYYAR H, WALIA D P. Water stress induced proline accumulation in contrasting wheat genotypes as affected by calcium and abscisic acid[J]. *Biologia Plantarum*, 2003, 46(2): 275. DOI: [10.1023/A:1022867030790](https://doi.org/10.1023/A:1022867030790).
- [16] SINGH B, USHA K. Salicylic acid induced physiological and biochemical changes in wheat seedlings under water stress[J]. *Plant Growth Regulation*, 2003, 39(2): 137. DOI: [10.1023/A:1022556103536](https://doi.org/10.1023/A:1022556103536).
- [17] 汪好, 李红霞, 张畅通. 小麦种质资源苗期抗旱性评价[J]. 中国科技论文, 2017, 12(12): 1364. DOI: [10.3969/j.issn.2095-2783.2017.12.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-2783.2017.12.009).
- [18] 赵燕昊, 曹跃芬, 孙威怡, 等. 小麦抗旱研究进展[J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1795. DOI: [10.13592/j.cnki.ppj.2016.0299](https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2016.0299).
- [19] 龚璞, 李宗震, 岳慧芳, 等. 不同小麦抗旱品种种子萌发的根系特征及其与主要激素含量的关系[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(1): 16. DOI: [10.16445/j.cnki.1000-2340.2018.01.004](https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.2018.01.004).
- [20] 唐玉婧, 马猛, 邓西平, 等. 干旱胁迫下小麦抗旱能力与其根系特征间的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 48, 60. DOI: [10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.007](https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.007).
- [21] 单长卷, 梁宗锁. 土壤干旱对冬小麦幼苗根系生长及生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 38.
- [22] 蔡斌, 司纪升, 屈磊, 等. 不同小麦品种苗期抗旱性的灰色关联度分析及评价[J]. 山东农业科学, 2017, 49(4): 10. DOI: [10.14083/j.issn.1001-4942.2017.04.003](https://doi.org/10.14083/j.issn.1001-4942.2017.04.003).
- [23] 陈天青, 王伟, 杨康林, 等. 小麦萌发期耐旱性材料的筛选与评价[J]. 种子, 2014, 33(10): 81. DOI: [10.16590/j.cnki.1001-4705.2014.10.051](https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2014.10.051).
- [24] 马元喜. 小麦的根[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [25] 袁永慧, 邓西平. 干旱与复水对小麦光合和产量的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(7): 1250. DOI: [10.3321/j.issn:1000-4025.2004.07.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-4025.2004.07.018).
- [26] 谷艳芳, 丁圣彦, 高志英, 等. 干旱和复水对冬小麦光合产物分配格局的影响[J]. 中国工程科学, 2012, 14(3): 112. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1742.2012.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1742.2012.03.010).
- [27] 高志红, 陈晓远, 刘晓英, 等. 土壤水分胁迫对冬小麦生长的后效影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(3): 48. DOI: [10.3321/j.issn:1000-7091.2007.03.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-7091.2007.03.012).
- [28] VÉGH K R. Effect of soil water and nutrient supply on root characteristics and nutrient uptake of plants[J]. *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*, 1991, 24: 143. DOI: [10.1016/b978-0-444-89104-4.50024-4](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-89104-4.50024-4).
- [29] ATKINSON D. 11-influence of root system morphology and development on the need for fertilizers and the efficiency of use[J]. *Crops As Enhancers of Nutrient Use*, 1990, 35(2): 411. DOI: [10.1016/13978-0-12-077125-7.50015-3](https://doi.org/10.1016/13978-0-12-077125-7.50015-3).

责任编辑: 何承刚

(上接第 13 页)

- [10] 陈平华, 陈如凯, 高三基. 甘蔗愈伤组织G418最低抑制浓度的测定[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(1): 63. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2286.2005.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2286.2005.01.014).
- [11] 刘家仪, 杨丽涛, 李杨瑞. 甘蔗品种ROC22组织培养体系中G418的浓度筛选[J]. 中国糖料, 2014(3): 9. DOI: [10.13570/j.cnki.scc.2014.03.003](https://doi.org/10.13570/j.cnki.scc.2014.03.003).
- [12] 林美娟, 薛志平, 陈平华, 等. 抗生素G418在甘蔗组织培养中的最佳筛选浓度[J]. 福建农业大学学报, 2006(1): 6. DOI: [10.3321/j.issn:1671-5470.2006.01.002](https://doi.org/10.3321/j.issn:1671-5470.2006.01.002).
- [13] 吴转娣, 吴才文, 曾千春, 等. *CryIAc*和*sck*双价抗虫基因遗传转化甘蔗的研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(11): 2236. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2561.2014.11.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2014.11.023).
- [14] 广州甘蔗糖业研究所. 一种真空渗透辅助农杆菌介导甘蔗遗传转化的方法: 201310088894.X[P]. 2013-07-17.
- [15] 吴振映, 柳絮, 王文英, 等. 利用农杆菌介导法获得转*Cry2A*抗虫基因水稻的研究[J]. 山东农业科学, 2011(5): 1. DOI: [10.14083/j.issn.1001-4942.2011.05.014](https://doi.org/10.14083/j.issn.1001-4942.2011.05.014).
- [16] 邢小龙, 常纪苹, 付忠军, 等. 根癌农杆菌介导*GUS*基因转化玉米芽尖生长点的研究[J]. 植物生理学报, 2016, 52(4): 575. DOI: [10.13592/j.cnki.ppj.2016.0050](https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2016.0050).
- [17] 王文治, 胡天娇, 杨本鹏, 等. 转*Cry2A*基因抗虫甘蔗植株的培育[J]. 分子植物育种, 2020, 18(9): 2893. DOI: [10.13271/j.mpb.018.002893](https://doi.org/10.13271/j.mpb.018.002893).
- [18] DENG L, PAN Y, CHEN X Q, et al. Small RNAs were involved in homozygous state-associated silencing of a marker gene (*Neomycin phosphotransferase II: nptII*) in transgenic tomato plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 68: 8. DOI: [10.1016/j.plaphy.2013.03.022](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.03.022).
- [19] NAKAJIMA I, SATO Y, SAITO T, et al. Agrobacterium-mediated genetic transformation using cotyledons in Japanese pear (*Pyrus pyrifolia*)[J]. *Breeding Science*, 2013, 63(3): 275. DOI: [10.1270/jsbbs.63.275](https://doi.org/10.1270/jsbbs.63.275).

责任编辑: 何馨成