

土壤水分胁迫对不同品种冬小麦生理特性的影响

宋新颖, 邬爽, 张洪生, 林琪, 穆平

(青岛农业大学 农学与植保学院, 山东省抗旱节水创新团队, 山东 青岛 266109)

摘要:为研究水分胁迫条件下不同类型冬小麦品种生理特性的变化特点,在干旱胁迫和正常水分条件下对不同抗旱类型冬小麦品种(青麦6号、鲁麦21、良星99、烟农21、烟农24、济麦22)的旗叶生理特性进行了研究。结果表明:不同小麦品种旗叶在开花后干旱胁迫下的可溶性蛋白含量以及保护酶系统SOD、CAT和POD活性均降低,而可溶性糖含量和丙二醛含量均升高,而且这种降低和升高的幅度随生育进程而增大。旱地品种青麦6号和烟农21在干旱胁迫下旗叶的可溶性糖含量高于其他品种且上升幅度快,青麦6号和鲁麦21可溶性蛋白含量以及SOD、CAT和POD活性均高于其他品种且下降幅度缓慢,而丙二醛含量均低于其他品种且随着生育进程积累速度平缓,产量及产量构成因素降低的幅度小。因此,旱地小麦品种在干旱胁迫条件下能保持一个相对较优的生理状态,其代谢功能和抗旱能力较强,最终获得高产。

关键词:小麦;干旱胁迫;花后;生理特性

中图分类号:S512.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2014)02-0174-07

Effect of Soil Water Stress on Physiological Characteristics in Different Winter Wheat Cultivars

SONG Xin-ying, WU Shuang, ZHANG Hong-sheng, LIN Qi, MU Ping

(College of Agronomy and Plant Protection, Qingdao Agricultural University, Key Laboratory of Dryland Farming Technology in Shandong Province, Qingdao 266109, China)

Abstract: The effect on some physiological characteristics in flag leaf of different wheat cultivars (Qingmai 6, Lumai 21, Liangxing 99, Yannong 21, Yannong 24, Jimai 22) were studied under drought and well watered conditions. The results showed that the soluble protein content, as well as activity of the protective enzyme system SOD, CAT and POD decreased under drought stress after anthesis, the content of MDA and the soluble sugar content increased at the same conditions. Compared with the other four cultivars, the soluble sugar content in flag leaf of Qingmai 6 and Yannong 21 were relatively higher and increased quickly. The soluble protein content and the activity of SOD, CAT and POD were higher and the decreased amplitude was mild at the same time. The content of MDA was lower than other cultivars and increased slowly with the development of drought stress and the decreased amplitude of yield and yield components were small. These indicated that these two cultivars could maintain a relatively superior physiological state under drought stress, and its metabolic function and drought resistance were strong.

Key words: Wheat; Soil water stress; After anthesis; Physiological characteristic

水分是制约小麦生产的主要因素之一,发展节水农业,培育和选择抗旱品种是解决干旱地区水资源不足的主要途径。水分胁迫条件下的小麦生理生化特性的差异被认为是小麦抗旱性差异的内在原因,是研究小麦抗旱机理的主要途径之一^[1-4]。有关

研究表明,影响可溶性糖含量的因素首先是水分,不同水分处理下小麦叶片中可溶性糖的累计与小麦的产量及品质有着密切的关系^[5-6]。吕丽华^[7]认为,水分胁迫使小麦不同叶位叶片可溶性蛋白含量降低,抗旱品种可溶性蛋白含量下降幅度明显小于不抗旱品

收稿日期:2013-10-24

基金项目:山东省现代农业产业体系小麦创新团队项目;山东省作物栽培学与育种学泰山学者岗位专项资金项目;山东省农业良种工程(2012);山东省小麦玉米周年高产高效协同创新中心

作者简介:宋新颖(1988-),女,山东蓬莱人,在读硕士,主要从事小麦抗旱基因定位研究。

通讯作者:穆平(1971-),男,山东博兴人,教授,硕士研究生导师,博士,主要从事作物遗传育种研究。

种。作物在抵御氧化胁迫时会形成一些能清除活性氧的酶系,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等,能有效清除活性氧,提高植物的抗旱性。大量研究表明,小麦的抗旱性与水分胁迫下体内上述酶的活性呈正相关^[8-11]。

小麦生长最适宜的土壤水分含量为田间持水量的70%~80%^[12],而根据方文松等^[13]、霍志国等^[14]的研究表明:土壤含水量占田间持水量55%为冬小麦拔节期水分胁迫效应增产节水的水分临界指标。开花后每7 d测定一次,花后28 d与其他时间相比,正处于小麦成熟收获期,随着干旱时间的延长,此时的干旱程度最重,且叶片衰老程度最高,更能说明小麦品种的抗旱能力的高低。本试验以土壤水分含量占田间持水量的55%和75%这2个水分处理进行研究,以当前大面积推广的抗旱小麦品种和高肥水小麦品种为材料,研究生长发育后期冬小麦生理特性和产量对水分胁迫的反应机制。为今后抗旱基因精确定位、抗旱新品种的培育提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为青麦6号、鲁麦21、济麦22、良星99、烟农24和烟农21。

1.2 试验设计

试验在青岛农业大学莱阳实验站防雨旱棚中进行(2010-2011)。该地区位于东经120.70°,北纬36.9°,属暖温带半湿润季风气候。小麦旱池的面积长2 m,宽2 m,深1.5 m,砌砖水泥池,下不封底,防止全生育期自然降水。土壤质地潮棕壤土,0~25 cm的土层全氮含量8 mg/g,速效磷42.17 mg/g,速效钾78.2 mg/g,有机质含量14.2 mg/g,容重1.32 g/cm³,土壤田间最大持水量25.0%。小麦在播种前按有机肥60 000 kg/hm²,纯氮180 kg/hm²,P₂O₅120 kg/hm²,K₂O 150 kg/hm²的比例,全部基施。同时基施硼砂7.5~15 kg/hm²,硫酸锌15~30 kg/hm²。小麦于2010年10月上旬适期播种,每区8行,行距25 cm,基本苗为180万/hm²。

水分处理:处理1为水分充足对照(CK),控制0~100 cm土壤含水量为田间持水量的75%左右;处理2为干旱胁迫(T),控制0~100 cm土壤含水量为田间持水量的55%左右,土壤水分用时域水分测定仪测定,据0~100 cm土层测定结果控制灌水量,重复3次,随机区组排列。

1.3 性状测定方法

在小麦开花期选取生长一致具有代表性的小麦

植株200株予以标记,开花后每7 d,从标记的小麦中取小麦植株,并对其分解,保留干净的小麦旗叶30片,经液氮处理后放入超低温冰箱中保存,用于小麦的生理指标测定。

可溶性糖测定采用蒽酮比色法^[15],可溶性蛋白质含量测定采用考马斯亮蓝法^[16]。参照王爱国等^[17]的方法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,用高锰酸钾滴定法^[18]测定过氧化氢酶(CAT)活性,采用愈创木酚法^[19]测定过氧化物酶(POD)活性;丙二醛(MDA)含量的测定参照林植芳等^[20]的方法。以上指标均用鲜样测量。

收获与考种:小麦成熟后收获测产,并对单位面积穗数、穗粒数和粒重等性状进行考查。

1.4 数据处理

数据、图表处理利用Excel 2003进行,统计分析和差异显著性检验利用SPSS进行。

2 结果与分析

2.1 土壤水分胁迫对可溶性糖含量的影响

可溶性糖是小麦生长发育和籽粒灌浆的碳源,旗叶中的可溶性糖含量反映了小麦花后的碳代谢活性。从图1可知,旗叶的可溶性糖含量在开花后期呈现逐渐升高的趋势。6个小麦品种在不同水分条件下的可溶性糖含量均以开花期最低,且随着生育进程的推进呈升高趋势。同一品种的干旱胁迫处理比水分对照处理的可溶性糖含量高,说明在干旱胁迫条件下,可溶性糖的含量显著增加。干旱胁迫条件下,青麦6号、烟农21的可溶性糖含量较高,良星99、济麦22的可溶性糖含量低,升高幅度也小。由表1可知,青麦6号受干旱胁迫的影响最小,可溶性糖量始终较高,在开花后28 d,比同期水分对照处理高65%,而良星99和烟农21的可溶性糖量分别只比同期对照处理升高43%和18%。

2.2 土壤水分胁迫对可溶性蛋白含量的影响

植物体内的可溶性蛋白质大多数是参加各种代谢的酶类,其含量是植物总体代谢的一个重要指标。从图2可知,6个不同品种小麦旗叶的可溶性蛋白含量(以鲜质量计)都是在开花后7 d到达最大值,其后含量逐渐减少。干旱胁迫条件下,不同小麦品种的旗叶可溶性蛋白含量均比对照旗叶可溶性蛋白含量降低,尤其在花后14 d时,叶片老化,可溶性蛋白含量大幅下降。在干旱胁迫条件下,旱地品种青麦6号和鲁麦21受干旱胁迫影响较小,可溶性蛋白含量较高;高肥水品种烟农24和良星99受水分胁迫影响大,干旱加速了可溶性蛋白的降解,下降幅度大。

胁迫条件下开花后 28 d,水分亏缺导致可溶性蛋白含量急剧下降,但此时青麦 6 号的可溶性蛋白含量的

T/CK 值仍比烟农 24 的 T/CK 值高 0.02,比良星 99 高 0.3。

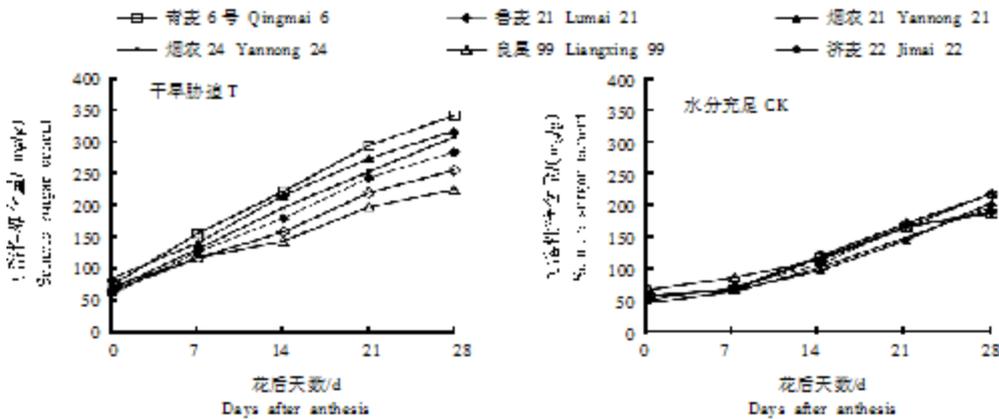


图 1 干旱胁迫和水分充足下可溶性糖含量变化

Fig. 1 Change of soluble sugar content under drought stress and sufficient soil water

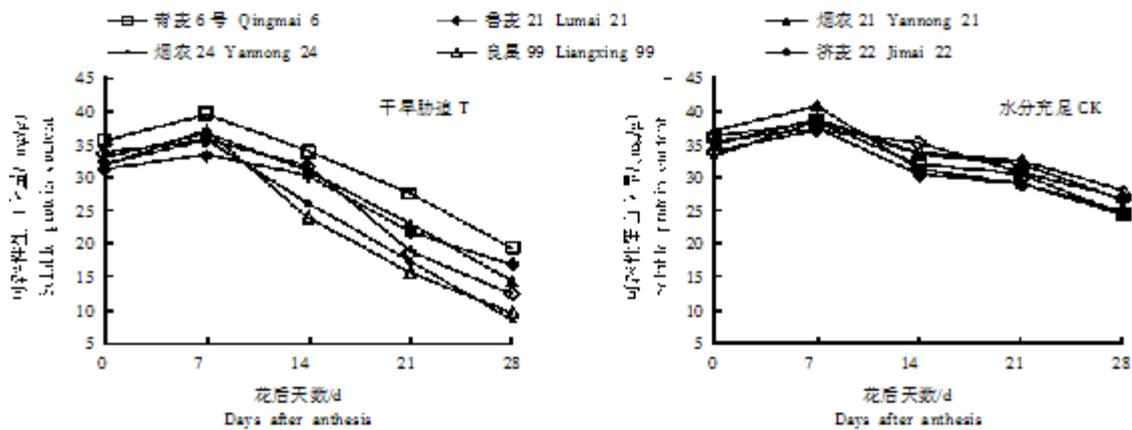


图 2 干旱胁迫和水分充足下可溶性蛋白含量变化

Fig. 2 Change of soluble protein content under drought stress and sufficient soil water

2.3 土壤水分胁迫对 MDA 含量的影响

逆境胁迫导致自由基大量产生,会使膜脂过氧化生成丙二醛(MDA)。因此,MDA 含量(以鲜质量计)不仅标志着膜脂过氧化程度,也间接地表示组织中自由基的含量^[21]。由图 3 可知,不同品种小麦旗叶的 MDA 含量在开花后随着生育进程的推移而

呈上升的趋势。在水分充足的条件下,MDA 含量变化不大,但在干旱胁迫条件下,随着花后时间增加,MDA 升高幅度增加。干旱胁迫加剧了膜质过氧化的作用,加速了小麦旗叶的衰老,但表明小麦叶片通过生理适应,提高了抵抗膜质过氧化能力,膜质过氧化程度得到缓解。在干旱条件下,青麦 6 号和鲁麦

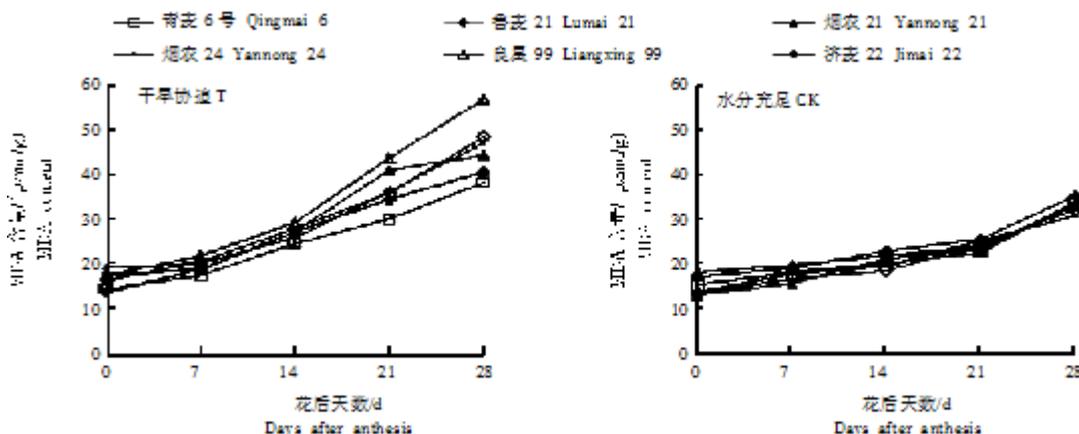


图 3 干旱胁迫和水分充足下 MDA 含量变化

Fig. 3 Change of MDA content under drought stress and sufficient soil water

21 受干旱胁迫影响升高的速度缓慢且幅度低, 积累量较少, 良星 99 和济麦 22 受干旱胁迫影响升高的速度快且幅度高, 积累量大。如开花后 28 d, 青麦 6 号和鲁麦 21 在干旱胁迫下的 MDA 含量分别比同期对照处理高 19%, 22%, 良星 99 则比同期对照高 71%。

2.4 水分胁迫对 SOD 活性的影响

SOD 与其他过氧化物酶等协同作用可防御活性氧或其他过氧化物自由基对植物细胞生物大分子物质的破坏, 是植物体内重要的细胞保护酶防御系统之一。从图 4 可知, 与对照相比, 干旱胁迫下的

SOD 活性(以鲜质量计)下降。在开花后小麦旗叶的 SOD 活性在干旱胁迫和对照条件下都呈逐渐降低的趋势, 但干旱条件下不同小麦品种的下跌幅度有很大不同。青麦 6 号下降幅度较小, 鲁麦 21 其次, 下跌幅度最大的是良星 99。如开花后 28 d 青麦 6 号和鲁麦 21 的 SOD 活性分别比同期对照处理低 12%, 20%, 良星 99 比同期对照处理低 53%。大田中高肥水品种良星 99 和济麦 22 在开花后 28 d, 叶片枯黄, SOD 已基本失活, 而此时旱地品种青麦 6 号和鲁麦 21 叶片呈淡黄绿色, 仍保持较高的 SOD 活性。

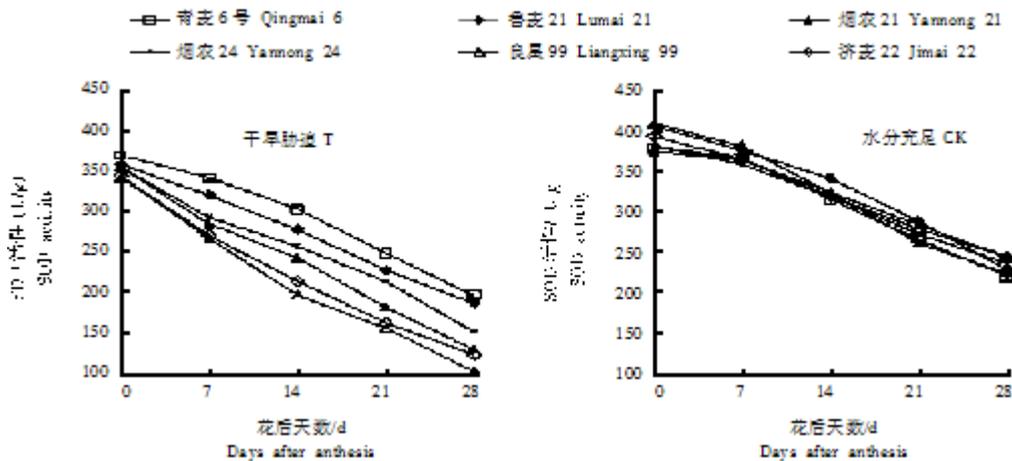


图 4 干旱胁迫和水分充足下 SOD 活性变化

Fig. 4 Change of SOD activity under drought stress and sufficient soil water

2.5 土壤水分胁迫对 CAT 活性的影响

CAT 能够催化过氧化氢分解为水和分子氧, 并起到电子传递作用, 因此, 在小麦膜脂过氧化过程中是一种重要的保护酶, 它不仅与小麦个体发育过程有关, 也与其对不良环境条件的抵抗过程有关。由图 5 可知, CAT 活性(以鲜质量计)的变化趋势与 SOD 活性的变化趋势相同, 水分充足条件下和干旱条件下都呈现下降趋势。与对照相比, 干旱胁迫下

CAT 活性有所下降。对照条件下, 不同小麦品种的 CAT 活性变化幅度差异不大。在干旱胁迫条件下, 不同品种的小麦 CAT 活性的变化幅度差异很大, 青麦 6 号和鲁麦 21 的 CAT 活性均高于其他品种, 良星 99 的 CAT 活性最低, 变化幅度最大。以干旱条件下小麦开花后 28 d 为例, 青麦 6 号的 CAT 活性的 T/CK 值为 0.84, 鲁麦 21 的 T/CK 为 0.77, 良星 99 的 T/CK 只有 0.27。

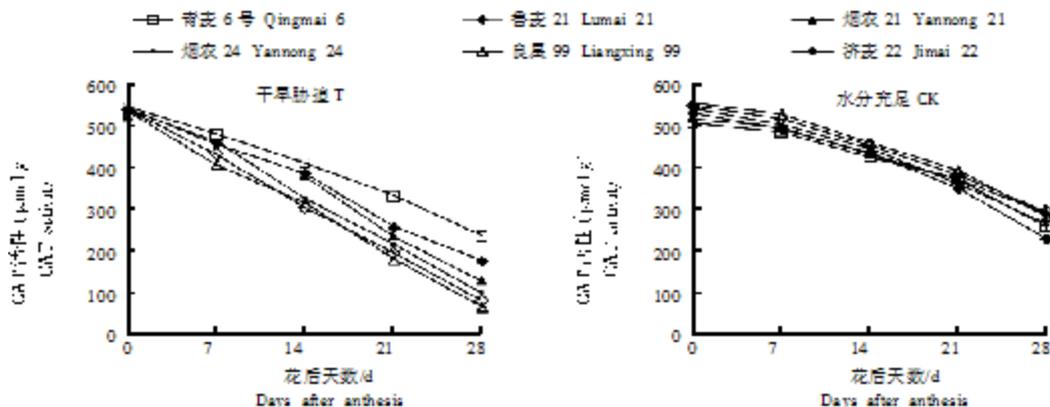


图 5 干旱胁迫和水分充足下 CAT 活性变化

Fig. 5 Change of CAT activity under drought stress and sufficient soil water

2.6 土壤水分胁迫对 POD 活性的影响

POD 与 SOD 一样, 均为植物体内氧化修复系统

的关键酶, 它们活性的高低决定了植物对恶劣环境的耐受能力。由图 6 可知, 虽然 POD 和 SOD 的生

理作用相似,但叶片中这2种酶活性的变化趋势明显不同,这可能由于POD活性的提高在一定程度上对SOD起到一定的补偿作用。干旱胁迫和水分充足条件下,不同小麦品种的旗叶POD活性变化趋势基本一致,呈现先上升后下降的趋势,总体上表现为水分充足下POD活性大于各自的干旱胁迫下的酶活性。在干旱胁迫下,不同小麦品种的活性变化幅

度差异很大。青麦6号和鲁麦21的降低幅度比较缓和,良星99和济麦22的下降幅度较大。在干旱胁迫下开花后28d,青麦6号POD活性的T/CK值比鲁麦21的POD活性的T/CK值高0.14,比烟农24高0.43,明显看出青麦6号在干旱胁迫下的生育后期仍保持着较高的POD活性。

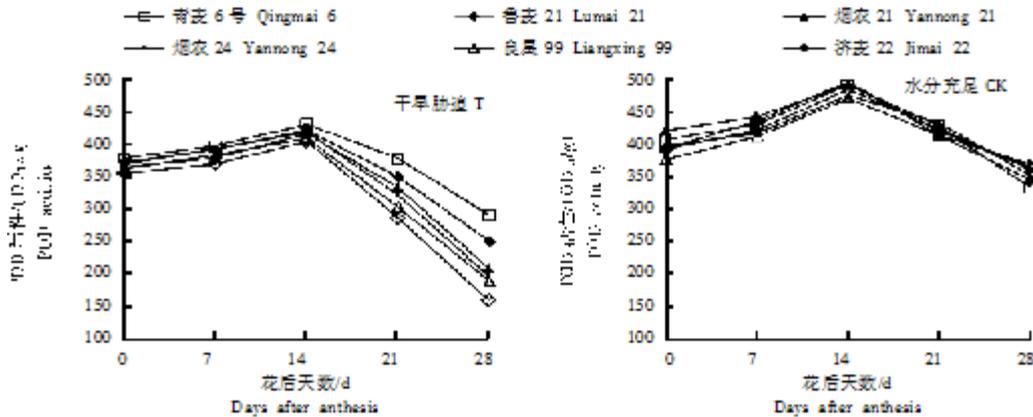


图6 干旱胁迫和水分充足下POD活性变化

Fig. 6 Change of POD activity under drought stress and sufficient soil water

表1 不同生理指标在花后第28天的T/CK值

Tab. 1 The T/CK value of different physiological indicators after flowering 28 days

品种 Cultivars	可溶性糖含量 Soluble sugar content	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	MDA含量 MDA content	SOD活性 SOD activity	CAT活性 CAT activity	POD活性 POD activity
青麦6 Qingmai 6	1.65	0.70	1.19	0.88	0.84	0.87
良星99 Liangxing 99	1.43	0.40	1.71	0.47	0.27	0.54
鲁麦21 Lumai 21	1.42	0.47	1.22	0.80	0.77	0.73
烟农21 Yannong 21	1.18	0.32	1.26	0.54	0.45	0.58
烟农24 Yannong 24	1.39	0.68	1.53	0.55	0.29	0.44
济麦22 Jimai 22	1.33	0.59	1.34	0.62	0.38	0.54

2.7 土壤水分胁迫对小麦产量及其构成因素的影响

抗旱性评价的主要目的是培育干旱条件下能够高产、稳产的品种。因此,最直接的评价指标是干旱条件下的产量和减产百分率^[22]。由表2可见,在水分充足下,烟农21产量最高,鲁麦21最低。在干旱胁迫下,青麦6号产量最高,良星99产量最低,品种

间差异显著。从产量构成因素看,对照条件下,千粒质量高的品种最终产量高。干旱胁迫条件下,不同品种的单位面积穗数、穗粒数和千粒质量均有不同程度的下降,导致干旱胁迫下最终产量水平下降。旱地品种青麦6号无论在穗数还是穗粒数及千粒质量的下降幅度都比其他品种小,特别是在穗数方面

表2 干旱胁迫对小麦产量及其构成因素的影响

Tab. 2 Effects of drought stress on yield and yield components in wheat

品种 Cultivars	穗数/($\times 10^4/\text{hm}^2$) Spike number			穗粒数 Grains number per spike			千粒质量/g 1000-grains weight			产量/(kg/hm^2) Grain yield			抗旱指数 Drought-resistance index
	CK	T	T/CK	CK	T	T/CK	CK	T	T/CK	CK	T	T/CK	
	青麦6 Qingmai 6	643.8a	624.38a	0.97	35.97bc	34.60b	0.96	40.98bc	38.84b	0.95	8066.44b	7132.20a	
良星99 Liangxing 99	615.57b	536.43c	0.87	36.27b	34.53b	0.95	40.01c	36.08c	0.90	7592.98c	5680.61e	0.75	0.86
鲁麦21 Lumai 21	605.57b	576.43b	0.95	38.36a	36.73a	0.96	35.85d	32.94d	0.92	7078.66d	5928.02d	0.84	1.00
烟农21 Yannong 21	638.42a	566.66b	0.89	35.36c	33.73c	0.95	44.74a	41.16a	0.92	8584.87a	6687.03b	0.78	1.05
烟农24 Yannong 24	577.51c	503.06d	0.87	39.87a	36.27a	0.91	41.25bc	37.32c	0.90	8073.25b	5787.99e	0.72	0.84
济麦22 Jimai 22	632.07a	579.89b	0.92	36.65b	33.07c	0.90	42.01b	38.08b	0.91	8272.00ab	6207.20c	0.75	0.94

注:表中不同小写字母表示5%水平差异显著。

Note: Lower case letter in table show significant difference at 5%.

仅下降 3.02%, 所以最终产量下降幅度最小, 仅比对照下降 11.5%。比鲁麦 21 降幅低 4.68 个百分点, 比烟农 24 降幅低 16.73 个百分点。说明干旱胁迫对烟农 24 产量影响最大, 而青麦 6 号由于在干旱胁迫下保证了一定的群体数, 才能在干旱胁迫下获得高产。可以看出, 在水分充足的水浇地, 提高产量以提高粒重为主, 在干旱胁迫下的旱地, 以提高穗数为主。

3 讨论与结论

可溶性糖是高等植物主要的光合产物, 也是碳水化合物代谢和暂时储存的主要形式, 同时也是重要的渗透调节物质。干旱胁迫下小麦叶片中可溶性糖含量在籽粒充实期积累明显, 可增加其渗透调节能力, 在较低叶水势下维持生长。但这种适应性必然使植株光合作用受到抑制, 从而使植株在生长条件较差的情况下维持正常发育, 以至于影响其产量^[23-24]。根据王淑英^[25]的研究表明, 干旱胁迫下可溶性糖含量增加的小麦品种抗旱性强。在本试验中, 青麦 6 号和烟农 21 在干旱胁迫下可溶性糖含量增加幅度较大, 而良星 99 和济麦 22 的可溶性糖增加幅度较小, 说明在干旱胁迫下, 可溶性糖起着重要的渗透调节作用。根据路莘^[26]的研究表明, 可溶性糖不仅仅可以作为一类渗透调节物质, 在干旱胁迫下发挥作用, 而且还是一类重要的脱水保护物质, 在干旱条件下稳定酶活性, 保护膜结构。

可溶性蛋白是叶片中氮的重要存在形式, 其含量下降是叶片衰老的主要特征, 也是重要的渗透调节物质。蛋白质含量在植物体内处于合成与降解的动态平衡之中。大量研究认为, 水分胁迫下可溶性蛋白含量降低, 本试验亦表明在干旱胁迫下, 可溶性蛋白与水分充足下相比含量下降。干旱胁迫导致小麦叶片可溶性蛋白下降, 表明干旱胁迫对小麦植株干物质积累、运转、分配具有一定影响, 导致干物质积累受到影响, 进一步影响可溶性蛋白的含量变化。汤章成^[27]认为, 可溶性蛋白与调解植物细胞的渗透势有关, 高含量的可溶性蛋白帮助维持植物细胞较低的渗透势, 抵抗水分胁迫带来的伤害。在本试验中, 旱地品种青麦 6 号和鲁麦 21 的可溶性蛋白含量下降幅度较小, 在生育后期仍保持着较高的可溶性蛋白含量, 抗旱性增强。

干旱胁迫下, 植物细胞产生 O_2^- 、 OH^- 、 H_2O_2 等自由基, 引起膜脂过氧化, 造成膜系统的伤害, 其产物 MDA 会严重损伤生物膜, MDA 含量标志着叶片脂质过氧化程度。SOD 能清除活性氧的伤害, CAT

能够催化过氧化氢, POD 具有清除氧自由基的作用, 都是植物细胞内重要的保护酶。蒋明义等^[28]研究认为, MDA 含量可作为衡量干旱条件下膜脂过氧化程度的指标, SOD 活性与膜脂过氧化呈负相关。本试验验证了这一观点, 在干旱胁迫下具有较高 MDA 含量的小麦品种具有较低 SOD 活性, 反之亦然。石岩等^[29]研究表明, 随着土壤水分胁迫加剧, 小麦旗叶中的 POD、CAT 活性降低, 细胞膜脂过氧化产物 MDA 含量增加。在本试验中, 与水分充足条件相比, 干旱胁迫下小麦旗叶的 CAT 和 POD 活性均大幅下降。到生育后期, 随着土壤水分胁迫的加重, SOD、POD、CAT 的活性下降幅度增大, MDA 的升高幅度也增大, 加重了膜质过氧化程度, 降低了消除自由基的能力。此时, 旱地品种青麦 6 号和鲁麦 21 仍然保持着较低 MDA 含量, 抗氧化酶活性普遍较其他品种高, 具有较强的活性氧清除能力, 有利于维持植物体内的活性氧代谢平衡, 减少生物后期自由基的积累, 增加抗旱性。

抗旱性评价的主要目的是培育干旱条件下能够高产、稳产的品种。因此, 最直接的评价指标来自于对作物产量变化的评价。石岩等^[30]利用盆栽试验对冬小麦全生育期进行水分胁迫研究表明, 水分胁迫愈重, 产量愈低。因此, 干旱条件下的实际产量是品种抗旱性的重要表现。本试验研究表明: 从土壤水分胁迫对冬小麦主要产量性状的影响看, 不同品种小麦随干旱胁迫的加剧, 穗数、千粒质量和穗粒数均显著降低, 这说明土壤干旱对冬小麦的产量具有显著影响。旱地品种青麦 6 号由于在干旱胁迫下仍保持了较高的穗数, 千粒质量和穗粒数下降水平也并不是很大, 所以最终产量下降最低。

试验得出以下结论: 不同小麦品种在干旱胁迫下旗叶的可溶性蛋白含量以及 SOD、CAT 和 POD 活性均降低, 而可溶性蛋白含量和丙二醛含量均升高, 而且这种降低和升高的幅度随生育进程而增大, 产量也最终减少。通过对 6 个品种比较, 旱地品种青麦 6 号和烟农 21 的在干旱胁迫下旗叶的可溶性糖含量高于其他品种且上升幅度快, 青麦 6 号和鲁麦 21 可溶性蛋白含量以及 SOD、CAT 和 POD 活性均高于其他品种且下降幅度缓慢, 而丙二醛含量均低于其他品种且随着生育进程积累速度平缓, 产量及产量构成因素降低的幅度小。因此, 旱地小麦品种在干旱胁迫条件下能保持一个相对较优的生理状态, 其代谢功能和抗旱能力较强, 最终产量水平也较高。

参考文献:

- [1] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 754 - 758.
- [2] Levitt J. Response of plants to environmental stresses [C]//Water, radiation, salt and other stresses. New York: Academics Press, 1980: 325 - 358.
- [3] Turner N C. Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants [M]//Stress Physiology in Crop Plants. New York: John Wiley and Sons, 1979: 343 - 372.
- [4] Hall A E. Physiological ecology of crops in relation to light, water and temperature [M]//Agroecology. New York: McGraw Hill Publishing Company, 1990: 191 - 233.
- [5] 山 仑, 吴玫君, 谢其明, 等. 小麦灌浆期生理特性和土壤水分条件对灌浆影响的研究[J]. 植物生理学通讯, 1980(3): 41 - 46.
- [6] 李德全, 郭清福, 张以勤, 等. 冬小麦抗旱生理特性的研究[J]. 作物学报, 1993, 19(2): 125 - 132.
- [7] 吕丽华. 不同水分条件下的小麦生理特性和产量性状表现差异[D]. 保定: 河北农业大学, 2005.
- [8] 张秀海, 黄丛林, 沈元月, 等. 植物抗旱基因工程研究进展[J]. 生物技术通报, 2001(4): 21 - 25.
- [9] 王金铃, 张宪政, 苏正椒, 等. 小麦对干旱的生理反应及抗性生理[J]. 国外农学-麦类作物, 1994(5): 44 - 46.
- [10] 何忠诚, 石 岩, 孙 萍, 等. 干旱对小麦生育后期旗叶衰老的影响[J]. 莱阳农学院学报, 2000, 17(1): 35 - 37.
- [11] 李鸿祥, 郭晓维. 不同土壤水胁迫下冬小麦生理生化特性的研究[J]. 北京水利, 1994(4): 68 - 75.
- [12] 于振文. 作物栽培学各论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 32 - 33.
- [13] 方文松, 刘荣花, 邓天宏. 冬小麦生长发育的适宜土壤含水量[J]. 中国农业气象, 2010, 31(增1): 73 - 76.
- [14] 霍志国, 白月明, 温 民, 等. 水分胁迫效应对冬小麦生长发育影响的试验研究[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1528 - 1536.
- [15] 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, 2000: 45 - 47.
- [16] Bradford M M. Protein measurement with the follin phenol reagent[J]. Biochem, 1976, 72(1): 248 - 254.
- [17] 王爱国, 罗广华. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究[J]. 植物生理学报, 1983, 9(1): 77 - 84.
- [18] 郝再彬, 苍 晶, 徐 仲. 植物生理实验技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 2002: 56 - 58.
- [19] 钱嘉渊. 酶的测定方法[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1992: 186 - 194.
- [20] 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 等. 水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及膜质过氧化作用的关系[J]. 植物学报, 1984, 26(6): 605 - 615.
- [21] 刘二明, 朱有勇, 肖放华, 等. 水稻品种多样性混栽持续控制稻瘟病研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(2): 164 - 168.
- [22] 王娟玲, 陈爱萍, 李红玲, 等. 冬小麦品种抗旱特性特征研究[J]. 山西农业科学, 1996, 24(3): 10 - 13.
- [23] 杨美红, 贾俊仙, 李国锋. 水分胁迫对不同耐旱性品种小麦幼芽、幼苗的保护酶和淀粉酶活性的影响[J]. 山西农业科学, 2001, 29(1): 45 - 48.
- [24] 张雅倩, 林 琪, 姜 雯, 等. 水分胁迫条件下不同肥水类型小麦抗旱特性的研究[J]. 华北农学报, 2010, 25(6): 205 - 210.
- [25] 王淑英, 张国宏, 李兴茂, 等. 水分胁迫下不同基因型旱地冬小麦生理变化及其与抗旱性的关系[J]. 西北农业学报, 2010, 19(10): 40 - 44.
- [26] 路 苹. Ca/GA 对干旱逆境下小麦种子萌发蛋白质降解的调控研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 1995.
- [27] 汤章成. 植物对渗透和淹水胁迫的适应机理[M]//汤章成. 植物生理和分子生物学. 北京: 北京科技出版社, 1999: 739 - 745.
- [28] 蒋明义, 荆家海, 王韶唐. 渗透胁迫对水稻幼苗膜脂过氧化体内保护系统的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 1991, 17(11): 80 - 84.
- [29] 石 岩, 于振文. 土壤水分胁迫对小麦根系与旗叶衰老的影响[J]. 西北植物学报, 1998, 18(2): 196 - 201.
- [30] 石 岩, 林 琪, 潘 波, 等. 水分胁迫对冬小麦生长发育和产量形成的影响[J]. 莱阳农学院学报, 1995, 12(4): 247 - 251.