

干旱胁迫下不同抗旱性小麦品种产量形成与水分利用特征

吴金芝^{1,2} 王志敏^{1*} 李友军² 张英华¹

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100139;

2. 河南科技大学 农学院, 河南 洛阳 471023)

摘要 在移动防雨棚条件下,以晋麦 47(抗旱性强)、偃展 4110(抗旱性弱)和矮抗 58(抗旱性中等)为材料,在足墒播种、安全越冬基础上,设置拔节~成熟期持续干旱(W1)、开花~成熟期干旱(W2)、拔节~成熟期供水适宜(W3)3种水分处理,研究了干旱胁迫对不同抗旱性冬小麦品种产量形成和水分利用的影响。结果表明:供水适宜时3个品种的产量和水分利用效率皆无显著差异,干旱胁迫显著降低了各品种产量,降幅表现为晋麦 47<矮抗 58<偃展 4110。与偃展 4110相比,晋麦 47干旱时生育前期耗水较多,物质积累量较大,单位面积总粒数较高;而在产量形成期(开花~成熟)叶片蒸腾速率较低,耗水量较小,水分生产效率较高,贮藏物质转运对籽粒的贡献率较高,最终获得较高的产量和水分利用效率。矮抗 58在花后干旱条件下具有较高的物质生产能力和花前贮藏物质贡献率,相对产量也较高。综合研究认为,干旱环境下早期的吸水能力和生长能力强、群体库容量大、花前贮藏物质贡献率和花后水分生产效率是抗旱高产品种的重要特征。

关键词 冬小麦;品种;产量形成;水分利用效率;抗旱性

中图分类号 S 513

文章编号 1007-4333(2015)06-0025-11

文献标志码 A

Characteristics of yield formation and water use in different drought tolerance cultivars of winter wheat under drought stress

WU Jin-zhi^{1,2}, WANG Zhi-min^{1*}, LI You-jun², ZHANG Ying-hua¹

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Agronomy, Henan Science and Technology University, Luoyang 471023, China)

Abstract To investigate the effect of drought stress on the yield formation and water use in different drought tolerance cultivars of winter wheat, three cultivars, JM47 (strong drought resistance), YZ4110 (weak drought resistance) and AK58 (moderate drought resistance), were planted under rain-proof shelter conditions in 2012–2013 and 2013–2014. In the trial, three moisture treatments, including persistent drought from jointing to maturity (W1), drought from anthesis to maturity (W2) and suitable water supply from jointing to maturity (W3) were conducted on the basis of seeding at sufficient soil moisture for overwintering security. The results indicated that there were no significant differences in the grain yield and water use efficiency among different cultivars when the water supply was suitable. However, its grain yield was decreased significantly under drought stress conditions, and the order of decreasing level was JM47<AK58<YZ4110. Compared to YZ4110, the water consumption and dry matter accumulation increased at the earlier growth stage of JM47, which led to increasing of the total kernel number per unit area. However, at the yield formation stage (anthesis to maturity) of JM47 the flag leaf transpiration rate was decreased, the water consumption was reduced, and the water production efficiency and the contribution of pre-anthesis translocation to grains were enhanced. Therefore, the strong drought resistance cultivar JM47 gained the higher grain yield and water use efficiency. The cultivar of AK58 also obtained higher grain yield due to the higher dry matter production capacity and pre-anthesis translocation contribution when the drought stress took place from anthesis to maturity. The comprehensive research demonstrated that the main

收稿日期: 2015-03-12

基金项目: 国家小麦产业技术体系(CARS-03);公益性行业专项(201203033-2)

第一作者: 吴金芝, 博士研究生, E-mail: ywujz@126.com

通讯作者: 王志敏, 教授, 主要从事小麦生理生态和高产理论研究, E-mail: zhimin206@263.net

characteristics of the improved varieties with strong drought resistance and higher water efficiency had the stronger water uptake and growth abilities at earlier stage, the bigger population sink, and the higher pre-anthesis translocation contribution and post-anthesis water production efficiency under drought conditions.

Key words winter wheat; cultivars; yield formation; water use efficiency; drought tolerance

我国北方地区水资源紧缺,冬小麦生长在一年中的干旱季节,降水不足,灌水有限,其生长和产量常受干旱胁迫的严重影响。为保障小麦高产稳产,必须培育和推广抗旱节水品种,实施高效节水栽培技术。深入研究抗旱品种的抗旱机制,揭示抗旱品种高产性能,对于抗旱品种选育和节水技术改进具有重要意义。前人^[1-4]针对抗旱品种的形态和生理特性开展了许多分析性研究,但由于对抗旱品种产量形成与水分利用及其相互关系的综合研究较少,因而仍不完全明确抗旱、节水与高产相结合的品种性状与机理^[5-6]。干物质积累是产量形成的基础,高产小麦的重要特征是花后物质积累量大^[7]。但在干旱、高温等逆境胁迫条件下,花前物质积累及贮藏物质运转对产量形成具有不可忽视的作用^[8-9]。干旱既影响光合物质生产,也影响生殖器官发育,小麦拔节~开花期的穗花发育过程对水分胁迫较敏感,此期逆境会导致穗粒数显著下降^[10-11]。高产栽培应在保证拔节前营养生长基础上,促进生殖生长以形成较多的穗粒库容,并平衡花后干物质积累和花前贮藏物质转运,从而实现物质生产(源)、转运效率(流)和单位面积粒数(库)的协同提高^[12-14]。但对抗旱品种的源库性能特征及其对干旱的响应、以及干旱下源库协调机理并不完全清楚。已知小麦的抗旱性和水分利用效率存在明显的基因型差异^[15-16],但对其差异性的机理,以及抗旱性和产量的关系仍有不同观点。有报道表明,水分利用效率和产量与品种抗旱性正相关,且随品种的改良相关性提高^[10,17-18]。灌溉条件下高产高水分利用效率品种在无灌水条件下也会表现出较高的水分利用效率^[18-19]。也有人^[5,20]认为,丰产性与抗旱性难以协调,在水分限制环境下品种改良的主要目标应是提高水分吸收能力而不是提高水分利用效率。

目前需要深入了解的问题是,不同抗旱性小麦品种在不同水分条件下其产量形成和水分利用性状是如何变化的?差异如何?其差异与抗旱性的关系及其对干旱胁迫的响应机理是什么?了解这些问题将有助于改善小麦的产量性能和高效用水。因此,本试验选用3个不同抗旱性小麦品种,拟在移动棚

防雨条件下设置3种水分处理,比较分析不同品种产量形成性状和物质生产特征,以及阶段耗水和水分生产效率的差异,旨在为小麦抗旱节水品种改良与技术进步提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2012—2014年在河南省洛阳市河南科技大学试验场水泥池试验地进行,池内小区面积为 7.2 m^2 ($3\text{ m}\times 2.4\text{ m}$),小区之间无水分侧渗。其上建有可移动防雨棚,可控制降水。每个小区的中央埋入深度为180 cm的中子仪管。0~140 cm土层田间持水量平均为37.8%积体分数,土壤为壤质土,pH 8.11,含有机质11.38 g/kg,碱解氮51.32 mg/kg,速效磷7.02 mg/kg,速效钾124.06 mg/kg。

1.2 试验设计

采用两因素裂区设计,主区为水分,副区为品种。供试品种为:晋麦47(JM47,抗旱性强,具有抗旱节水、高产优点,是山西、陕西、河南及全国旱地小麦区试对照品种^[21])、偃展4110(YZ4110,抗旱性弱,河南大面积推广种植的丰产水地品种,且多年用于河南省中北部春水组区试的对照品种^[22])和矮抗58(AK58,抗旱性中等,具有高产稳产、抗逆适应性广等品种优势,是黄淮小麦主产区的主推品种^[23])。2012—2013年度选用晋麦47和偃展4110两个品种,2013—2014年度选用晋麦47、偃展4110和矮抗58三个品种。在充足底墒、安全越冬基础上,春季设3个水分处理:1)拔节~成熟期持续干旱(W1);2)开花~成熟期干旱(W2);3)拔节~成熟期供水适宜(W3)。2012—2013年水分处理为定额补灌,拔节、开花期灌溉前和成熟期测定土壤体积含水量见图1和表1。从2012—2013年试验结果分析,由于不同品种耗水特征不同,随着生长造成土壤水分差异,进而会对水分处理效应产生一定影响。因此,2013—2014年采用测墒补灌技术进行水分控制,通过定期监测,以保证不同品种土壤水分处理的一致性。控制土层深度为0~140 cm^[24],当0~140 cm土层土壤平均含水量低于目标含水量的上限时补

灌。补灌量计算采用水分平衡法,补灌量 $m = H(\beta_i - \beta_j)$, 式中, m 为补灌量, mm; H 为计划湿润土层深度, mm; β_i 为目标含水量(田间最大持水量乘以目标相对含水量); β_j 为补灌前 0~140 cm 土层土壤体积含水量的平均值。补灌时用水表计量灌水量。2 年度水分处理的具体实施方法见表 2。

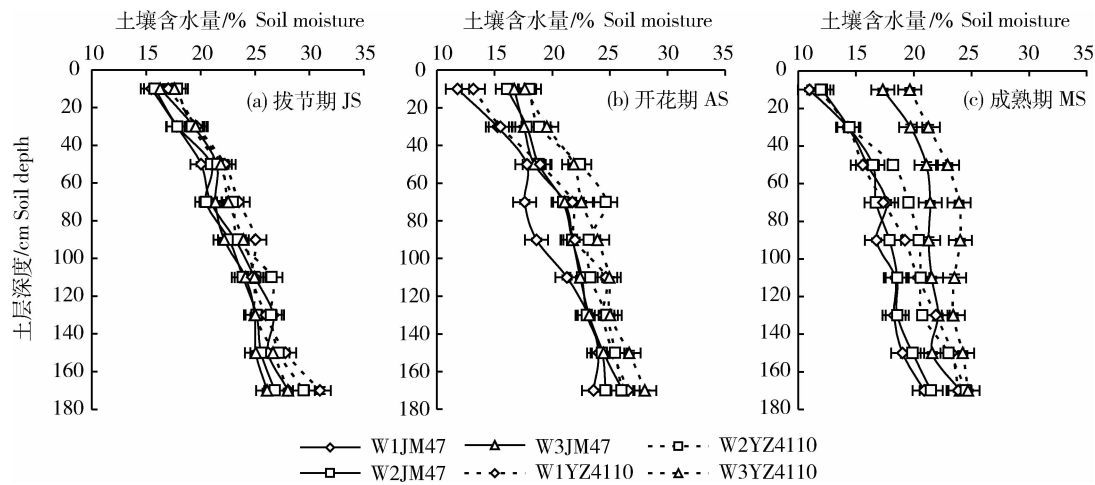


图 1 2012—2013 年冬小麦生长季土壤体积含水量
Fig. 1 Soil volumetric moisture of different treatments in 2012-2013 growing season

表 1 2012—2013 年生长季 0~140 cm 土壤相对含水量
Table 1 Average relative moisture of 0—140 cm soil layers of different treatments in 2012—2013 growing season %

水分处理 Moisture treatment	品种 Cultivars	拔节期 JS	开花期 AS	成熟期 MS
W1	JM47	56.36	47.43	42.44
	YZ4110	59.78	53.04	45.54
W2	JM47	55.47	53.29	43.35
	YZ4110	59.70	58.60	47.60
W3	JM47	56.59	53.35	54.59
	YZ4110	58.74	57.48	59.99

注:JM47,晋麦 47;YZ4110,偃展 4110。下同。
Note:JM47,Jinmai47;YZ4110,Yanzhan4110. The same below.

表 2 2012—2013 年、2013—2014 年冬小麦生长季水分处理控制方法
Table 2 Moisture treatments in 2012—2013 and 2013—2014 growing seasons

水分处理 Moisture treatment	2012—2013 年定额补灌 Supplemental irrigation during different growth stages in 2012—2013	2013—2014 年测墒补灌 Supplemental irrigation after measuring soil moisture content in 2013—2014
W1	拔节~成熟期不浇水	控制 0~140 cm 土层相对含水量:拔节~成熟期为 45%~55%
W2	浇拔节水 75 mm	控制 0~140 cm 土层相对含水量:拔节~开花期为 70%~80%,开花期~成熟期为 45%~55%
W3	浇拔节水、开花水和灌浆期,各 75 mm	控制 0~140 cm 土层相对含水量:拔节~成熟期为 70%~80%

各处理 3 次重复。在播前均灌足底墒水(0~140 cm 土层目标土壤体积含水量为体积田间持水量的 80%,土壤体积含水量以各土层体积分数的平均值表示)。生育期通过移动防雨棚阻挡降水,降水结束后立即移开防雨棚。分别于 2012 年 10 月 16 日和 2013 年 10 月 13 日播种,行距 20 cm,播深 4~5 cm,3 叶期定苗 240 株/m²。每公顷施 N 180 kg、P₂O₅ 172.5 kg、K₂O 112.5 kg,氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾,均底施。其他田间管理同高产田。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生物量及产量

在主要生育时期,在各小区随机取 15~20 株调查植株性状。开花期和成熟期每小区取 0.1 m² 植株分器官测生物量。小麦成熟后,在苗期标定的样方(1.2 m²)调查总穗数,之后全部整株收获,脱粒后测千粒重并计算产量。根据开花和成熟期生物量变化计算花前贮藏物质转运对产量的贡献:

花前贮藏物质转运对籽粒的贡献率/%=(开花期地上部营养器官生物量-成熟期地上部营养器官生物量)/籽粒产量×100

1.3.2 土壤水分

分 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160 和 160~180 cm 9 个层次用 TRIME-PICO TDR 土壤水分测量仪(德国 IMKO 公司生产)测定土壤体积含水量,测定位点为 10、30、50、70、90、110、130、150 和 170 cm 土层。于每个生长季的播前用烘干法对测定值进行标定,2 次标定检测误差均低于 3%。

1.3.3 耗水量

耗水量:ET₁₋₂=∑H(β_i-β_j)+M+P+K,式中,ET₁₋₂为阶段耗水量;H为第i层土壤厚度,mm;β_i和β_j分别为时段初和时段末的平均土壤体积含水量,%;M为时段内的灌水量,mm;P为有效降水量,mm;K为时段内的地下水补给量,mm。由于防雨棚将所有降雨遮挡,P值计为0;地下水埋深>5 m,K值计为0。

日耗水量(mm/d)=生育阶段耗水量(mm)/生育阶段时间(d)。

1.3.4 水分利用效率

水分利用效率(kg/(hm²·mm))=籽粒产量(kg/hm²)/生育期耗水量(mm);

叶片水分利用效率(CO₂/H₂O,μmol/mmol):

于灌浆中期用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合测定仪测定旗叶光合速率、蒸腾速率和水分利用效率,10:00—13:00 每小时循环测定 1 次,测定时选受光方向和生长状况一致的旗叶进行,每小区每次测定 5 片叶。以平均值计算叶片水分利用效率。

1.3.5 水分生产效率

总水分生产效率(kg/(hm²·mm))=成熟期地上部生物量(kg/hm²)/生育期耗水量(mm);

花前水分生产效率(kg/(hm²·mm))=开花期地上部生物量(kg/hm²)/花前耗水量(mm)

花后水分生产效率(kg/(hm²·mm))=(成熟期-开花期)地上部生物量(kg/hm²)/花后耗水量(mm)

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2007 和 DPS 7.05 进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

2012—2013 年生长季(表 3),W3 处理下晋麦 47 和偃展 4110 品种间产量无显著差异;W1 和 W2 处理下,2 品种产量差异显著,晋麦 47 分别比偃展 4110 高 66.27%和 20.64%。产量因素中,有效穗数和总粒数晋麦 47 显著高于偃展 4110,千粒重二者无显著差异。与 W3 相比,W1 处理 2 品种籽粒产量显著降低,但降低幅度晋麦 47(8.16%)明显低于偃展 4110(40.26%)。产量下降的原因,晋麦 47 是由于总粒数减少,而其千粒重相对稳定,并略有升高;偃展 4110 不仅是总粒数减少,而且是千粒重显著下降。与 W3 相比,W2 处理下晋麦 47 产量稳定,而偃展 4110 千粒重显著下降导致产量显著降低,降低幅度达 11.24%。不同水分条件下有效穗数、总粒数和产量的变异系数晋麦 47 小于偃展 4110,穗粒数和千粒重的变异系数 2 品种相当。

2013—2014 年生长季,W3 处理 3 个品种产量无显著差异。W1 处理下,产量晋麦 47>矮抗 58>偃展 4110,晋麦 47 与后二者的差异达显著水平;从产量因素看,总粒数晋麦 47>矮抗 58>偃展 4110,差异显著,千粒重晋麦 47 也高于后二者。W2 处理下,晋麦 47 和矮抗 58 产量差异不显著,两者均显著高于偃展 4110,产量差异是由于总粒数的差异。与

W3 相比,持续干旱处理(W1)显著降低了各品种产量,产量降幅偃展 4110>矮抗 58>晋麦 47;显著降低了各品种总粒数,降低幅度也以矮抗 58 和偃展 4110 较大;对各品种千粒重影响不明显。与 W3 相比,W2 对晋麦 47 和矮抗 58 粒重和产量无显著影响,但显著降低了偃展 4110 的千粒重和产量。不同水分处理产量及其构成因素的变异系数晋麦 47 均低于矮抗 58 和偃展 4110。

上述结果表明,不同抗旱性小麦品种在水分充

足条件下产量差异小,在干旱胁迫条件下产量差异显著增大。抗旱性强的晋麦 47 籽粒产量及其构成因素受干旱的影响较小,后期干旱对其产量无显著影响,中后期持续干旱虽降低了产量,但相对其他品种仍能够维持较高的有效穗数和总粒数,保证了充足的库容,从而获得较高的产量;抗旱性中等的矮抗 58 在拔节后持续干旱下其产量潜力难以发挥,但在花前水分适宜、花后干旱下由于具有较高的有效穗数和粒数,产量也可稳定。

表 3 干旱胁迫对不同抗旱性冬小麦产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of drought stress on yield and its components in different cultivars of winter wheat

生长季 Growing season	水分处理 Moisture treatment	品种 Cultivars	有效穗数/ (10 ⁴ /hm ²) ESN	穗粒数/ Grain SK	总粒数/ (10 ⁴ /hm ²) TGN	千粒重/ g 1 000GW	产量/ (kg/hm ²) GY	产量降幅/% Decrease
2012—2013 年	W1	JM47	439.9 bc	32.0 bc	14 076 b	44.1 bc	5 974 b	8.16
		YZ4110	303.0 d	30.7 c	9 302 c	44.3 bc	3 593 d	40.26
	W2	JM47	479.2 a	33.9 ab	16 267 a	44.0 bc	6 441 a	0.98
		YZ4110	407.0 c	32.5 bc	13 227 b	45.1 b	5 339 c	11.24
	W3	JM47	462.3 a	35.0 a	16 198 a	43.8 c	6 505 a	—
		YZ4110	466.4 a	30.2 c	14 085 b	47.6 a	6 015 ab	—
	CV%	JM47	4.28	4.57	8.03	9.30	4.60	—
		YZ4110	21.09	3.89	20.90	5.42	25.08	—
2013—2014 年	W1	AK58	388.8 c	31.0 cd	12 053 e	44.4 de	5 781 d	18.70
		JM47	475.9 b	29.1 de	13 849 d	46.1 bc	6 544 bc	7.15
		YZ4110	410.0 c	27.4 e	11 234 e	45.5 bcd	5 239 d	21.45
	W2	AK58	482.3 b	35.8 ab	17 266 ab	43.8 e	6 942 a	3.37
		JM47	505.0 ab	33.8 bc	17 069 b	45.8 bcd	7 041 a	0.10
		YZ4110	465.0 b	31.3 cd	14 868 cd	46.6 ab	6 230 c	6.59
	W3	AK58	508.3 ab	35.1 a	17 841 a	45.8 bc	7 111 a	—
		JM47	515.0 a	34.5 b	17 766 ab	45.1 cde	7 048 a	—
		YZ4110	519.4 a	29.8 cde	15 180 c	47.6 a	6 770 ab	—
	CV%	AK58	13.67	8.34	21.19	2.30	10.95	—
		JM47	4.07	9.04	12.88	1.12	4.20	—
		YZ4110	11.77	6.67	15.94	2.26	12.12	—

注:ESN,有效穗数;SK,穗粒数;TGN,总粒数;1 000GW,千粒重;GY,籽粒产量。同一生长季同一列中不同字母表示不同处理间差异达 5%显著水平。CV:同一生长季同一品种不同水分处理间的变异系数。下同。

Note:ESN,Efficient spike numbers;SK,Spike kernels;TGN,Total grains numbers;1 000GW,1000-grain weight;GY,Grain yield. Different letters in the same column in the same growing season indicated significant differences at the 0.05 probability level. CV: The coefficient of variation in different water treatments in the same growth season of the same wheat cultivar. The same as below.

2.2 物质生产及花前物质转运对籽粒的贡献

由表4可以看出,在不同水分条件下抗旱品种晋麦47的总生物量均高于偃展4110,也高于矮抗58,特别是在2种干旱条件下,晋麦47的生物量和花前贮藏物质对产量的贡献率均显著高于偃展4110和矮抗58。在严重干旱下(W1),晋麦47的收获指数也高于偃展4110。

与W3相比,W1处理显著降低了3个品种的花前生物量、花后生物量和总生物量,各指标降低幅度均表现为偃展4110>矮抗58>晋麦47;W2处理降低了3个品种的花后生物量和总生物量,降低幅度也表现为偃展4110>矮抗58>晋麦47。与W3相比,W1和W2处理均提高了3个品种花前贮藏物对产量的贡献率,且晋麦47和矮抗58的提高幅

度明显大于偃展4110;W1和W2处理对各品种收获指数影响较小。

可见,拔节~成熟期持续干旱显著影响冬小麦花前和花后的物质生产量,开花~成熟期干旱主要影响花后物质生产量,2种干旱处理均降低总生物量,但受影响程度以晋麦47较小,偃展4110最大。抗旱性强的品种晋麦47与抗旱性弱的品种偃展4110相比,干旱条件下花前物质积累相对较多,其贮藏物对产量的贡献较大,同时花后能维持相对较高的物质生产能力。

2.3 耗水特性及水分生产效率

2.3.1 耗水特性

两生长季结果(表5)均显示,与W3相比,干旱处理W1和W2均显著降低了各品种总耗水量,显

表4 干旱胁迫对不同抗旱性冬小麦物质生产及花前转运物质贡献率的影响
Table 4 Effects of drought stress on biomass accumulation and contribution of pre-anthesis translocation to grains in different cultivars of winter wheat

生长季 Growing season	水分处理 Moisture treatment	品种 Cultivars	花前生物量/ (kg/hm ²) PRBA	花后生物量/ (kg/hm ²) POBA	总生物量/ (kg/hm ²) TBA	花前贮藏物质对 产量贡献率/% CPTG	收获指数/% HI
2012—2013年	W1	JM47	7 885 d	4 356 b	12 241 b	27.08 a	48.80 a
		YZ4110	5 298 e	2 901 d	8 199 c	19.26 bc	43.82 b
	W2	JM47	8 914 ab	4 452 b	13 366 a	30.88 a	48.19 a
		YZ4110	8 220 cd	3 965 c	12 185 b	25.73 b	43.81 b
	W3	JM47	9 363 a	5 134 a	14 497 a	21.07 b	44.87 b
		YZ4110	8 502 bc	5 075 a	13 577 a	15.63 c	44.30 b
	CV%	JM47	8.69	9.13	8.44	18.77	4.47
		YZ4110	24.17	27.31	24.66	25.33	0.64
2013—2014年	W1	AK58	7 373 d	4 501 c	11 874 d	22.14 a	48.68 a
		JM47	9 148 b	5 372 b	14 520 c	17.91 b	45.07 b
		YZ4110	7 325 d	4 490 c	11 815 d	14.30 c	44.34 b
	W2	AK58	8 148 bc	5 662 ab	13 810 c	18.44 b	50.27 a
		JM47	9 953 a	5 799 ab	15 752 ab	17.64 b	44.70 b
		YZ4110	8 786 b	5 385 b	14 171 c	13.57 c	43.96 b
	W3	AK58	8 795 b	6 150 a	14 945 b	13.51 c	47.58 ab
		JM47	10 064 a	6 167 a	16 231 a	12.50 c	43.43 b
	CV%	YZ4110	8 859 b	5 906 a	14 765 b	12.76 c	45.85 b
		AK58	8.78	15.58	11.47	24.00	2.77
		JM47	5.14	6.88	5.69	19.02	1.94
		YZ4110	10.40	13.61	11.49	11.28	1.39

注:PRBA,花前生物量;POBA,花后生物量;TBA,总生物量;HI,收获指数;CPTG,花前贮藏物质对产量贡献率。下同。
Note:PRBA, Pre-anthesis biomass accumulation; POBA, Post-anthesis biomass accumulation; TBA, Total biomass accumulation; HI, Harvest index; CPTG, Contribution of pre-anthesis translocation to grains. The same as below.

表 5 干旱胁迫对不同抗旱性冬小麦生育阶段耗水特性和生育期耗水来源的影响
Table 5 Effects of drought stress on water consumption characteristic during different growth stages and the source of total water consumption in different cultivars of winter wheat

生长季 Growing season	水分处理 Moisture treatment	品 种 Cultivars	播种～拔节期耗水量 Water consumption in seedling to jointing				拔节～开花期耗水量 Water consumption in jointing to anthesis				开花～成熟期耗水量 Water consumption in anthesis to maturity				总耗 水量 TCA	耗水来源 Source of water consumption		
			CA		DCA		CA		DCA		CA		DCA					
			CA	DCA	CA	DCA	CA	DCA	CA	DCA	CA	DCA	IA	SA				
2012—2013 年	W1	JM47	137.4 a	0.87 b	61.5 b	2.4 b	41.0 c	1.0 c	239.9 e	0	240.4 a	CV%	—	20.19	—	24.32		
		YZ4110	111.2 b	0.70 d	50.6 b	1.9 b	48.2 c	1.1 c	210.0 f	0	210.0 b							
	W2	JM47	146.1 a	0.99 a	94.4 a	3.6 a	73.2 b	1.7 b	313.7 c	75	239.0 a							
		YZ4110	115.8 b	0.73 cd	92.2 a	3.5 a	65.3 b	1.6 b	273.3 d	75	198.0 b							
	W3	JM47	142.8 a	0.90 ab	94.3 a	3.6 a	152.4 a	3.6 a	389.5 a	225	164.6 c							
		YZ4110	124.2 b	0.78 c	88.1 a	3.4 a	141.9 a	3.4 a	354.2 b	225	129.3 d							
	CV%	JM47	6.63	6.63	22.77	22.77	64.49	62.99	23.79	—	20.19							
2013—2014 年	W1	AK58	116.7 b	0.86 a	80.9 b	3.4 b	105.2 de	2.4 d	312.8 c	130.3 c	182.5 ab	CV%	—	24.32				
		JM47	145.4 a	0.91 a	79.2 b	3.3 b	95.0 e	2.0 e	319.6 c	119.9 c	199.7 a							
	W2	YZ4110	117.2 b	0.74 b	80.0 b	3.3 b	100.4 de	2.2 d	297.6 c	121.4 c	176.2 b							
		AK58	134.4 a	0.85 a	89.9 a	3.7 a	142.8 c	3.0 c	367.1 b	175.5 b	191.6 a							
	W3	JM47	137.9 a	0.87 a	100.8 a	4.2 a	125.1 d	2.6 d	363.8 b	178.7 b	185.1 ab							
		YZ4110	112.7 b	0.71 b	95.2 a	4.0 a	140.3 c	2.9 c	348.2 b	180.9 b	167.3 b							
	CV%	AK58	132.0 a	0.83 a	97.9 a	4.1 a	232.4 a	4.8 ab	462.3 a	413.2 a	49.1 c							
		JM47	139.8 a	0.88 a	90.9 a	3.8 a	213.1 b	4.4 b	443.8 a	393.6 a	50.2 c							
	CV%	YZ4110	118.3 b	0.75 b	96.3 a	4.0 a	246.6 a	5.1 a	461.2 a	411.4 a	49.8 c							
		AK58	7.52	7.52	9.50	9.50	37.48	35.14	17.32	63.41	56.55							
	CV%	JM47	2.76	2.76	11.97	11.97	42.50	40.19	16.75	62.44	56.84							
		YZ4110	2.56	2.56	10.07	10.07	46.52	44.26	22.70	64.39	53.81							

注：CA,耗水量;DCA,日耗水量;IA,灌溉量;SA,土壤水消耗量。
Note:CA,Water consumption amount;DCA,Daily water consumption amount;IA,Irrigation water amount;SA,Soil water consumption amount.

著增加土壤水消耗量,W1处理显著降低拔节~开花期和开花~成熟期阶段耗水量和日耗水量,W2处理显著降低开花~成熟期阶段耗水量和日耗水量。不同品种的耗水特性因水分处理的不同而有较大差异。

品种之间比较,2012—2013年生长季,3种水分处理下晋麦47总耗水量和土壤水消耗量均显著高于偃展4110,在干旱处理下品种间耗水量差异增大。2品种耗水的差异主要在播种~拔节期,此阶段耗水量晋麦47显著高于偃展4110,而拔节~成熟阶段耗水量和日耗水量二者差异不显著。2013—2014年生长季,晋麦47在W2和W3处理下总耗水量和土壤水消耗量与偃展4110相比无显著差异,而在W1处理下其总耗水量和土壤水消耗量显著高

于偃展4110,这种差异也主要在播种~拔节期阶段,此阶段耗水量、日耗水量显著高于偃展4110,拔节后耗水二者无显著差异。矮抗58的总耗水量与晋麦47相当,但在W1处理下,其播种~拔节期耗水量也显著低于晋麦47。

上述结果表明,干旱胁迫显著降低小麦耗水量,在干旱条件下抗旱性强的品种晋麦47的耗水量多于抗旱性弱的品种偃展4110,主要是由于前者苗期对土壤水的吸水能力强、耗水较多,而中后期耗水2品种差异不明显。

2.3.2 水分利用和生产效率

从耗水的干物质生产效率看(表6),在W3处理下,3个品种花前水分生产效率、花后水分生产效

表6 干旱胁迫对不同抗旱性冬小麦水分利用效率和生产效率的影响

Table 6 Effects of drought stress on water use and production efficiency in different cultivars of winter wheat
kg/(hm²·mm)

生长季 Growing season	水分处理 Moisture treatment	品种 Cultivars	花前水分生产 效率 WPEB	花后水分生产 效率 WPEA	总水分生产 效率 WPET	水分利用 效率 WUE
2012—2013 年	W1	JM47	39.64 a	106.24 a	50.03 a	24.90 a
		YZ4110	32.74 b	60.19 b	39.04 c	17.11 c
	W2	JM47	37.06 a	60.82 b	42.61 b	20.51 b
		YZ4110	39.52 a	60.72 b	44.58 b	19.53 b
	W3	JM47	39.49 a	33.69 c	37.22 c	16.70 c
		YZ4110	40.05 a	35.76 c	38.33 c	16.98 c
	CV%	JM47	3.73	54.78	15.95	19.81
		YZ4110	10.88	27.30	8.42	8.04
2013—2014 年	W1	AK58	37.31 b	39.07 c	37.96 bc	18.48 bc
		JM47	40.73 a	56.55 a	45.43 a	20.48 a
		YZ4110	37.15 b	44.72 b	39.70 b	17.60 b
	W2	AK58	36.33 b	39.65 c	37.62 bc	18.91 ab
		JM47	41.70 a	46.35 b	43.30 ab	19.35 ab
		YZ4110	42.26 a	38.38 c	40.70 b	17.89 b
	W3	AK58	39.46 a	26.46 d	32.33 c	15.38 cd
		JM47	42.34 a	25.01 d	36.57 cd	15.88 d
		YZ4110	41.28 a	27.71 d	32.01 c	14.46 cd
	CV%	AK58	4.25	21.25	8.78	10.95

注:WPE_B,花前水分生产效率;WPE_A,花后水分生产效率;WPE_T,总水分生产效率;WUE,水分利用效率。
Note:WPE_B,Water production efficiency before anthesis;WPE_A,Water production efficiency after anthesis;WPE_T,Total water production efficiency;WUE,Water use efficiency for grain yield.

率均无明显差异,但在 W1 处理下,晋麦 47 花前水分生产效率、花后水分生产效率及总水分生产效率均显著高于矮抗 58 和偃展 4110,后二者差异不显著;在 W2 处理下,晋麦 47 花后水分生产效率及总水分生产效率也高于偃展 4110。与 W3 相比,W1 和 W2 处理均显著增加了各品种的水分生产效率,晋麦 47 增加幅度较大。不同处理水分利用效率与总水分生产效率表现相似,也以晋麦 47 较高。综合表明,在严重干旱下晋麦 47 具有较高的水分生产效率和水分利用效率。

2.3.3 叶片水分利用效率

由图 2 可知,W3 处理灌浆中期叶片平均蒸腾速率(Tr)表现为晋麦 47>矮抗 58>偃展 4110,平均水分利用效率(WUE)晋麦 47<矮抗 58<偃展 4110,品种间差异均达显著水平;W2 处理晋麦 47

叶片 Tr 显著低于偃展 4110,而 WUE 与偃展 4110 无显著差异;W1 处理下,晋麦 47 叶片 Tr 显著小于、 WUE 显著高于其余 2 品种。与偃展 4110 相比,矮抗 58 的 W2 处理叶片 Tr 显著较低,但 WUE 显著较高;W1 处理叶片 Tr 无显著差异,但 WUE 却显著较低。与 W3 相比,干旱胁迫显著影响灌浆中期叶片的蒸腾速率和水分利用效率,但影响程度因品种而异。对于晋麦 47,2 种干旱胁迫处理均使叶片 Tr 显著降低,而 WUE 显著提高;对于偃展 4110,W1 处理显著降低叶片 Tr ,但 2 种干旱均显著提高其叶片 WUE ;对于矮抗 58,干旱显著降低叶片 Tr ,仅开花后干旱显著增加其叶片 WUE 。表明,晋麦 47 因水分供应状况自我调节叶片水分利用的能力较强,干旱胁迫时能够降低叶片蒸腾速率,提高叶片水分利用效率,但水分较充足时叶片的蒸腾速率高,水分利用效率较低。

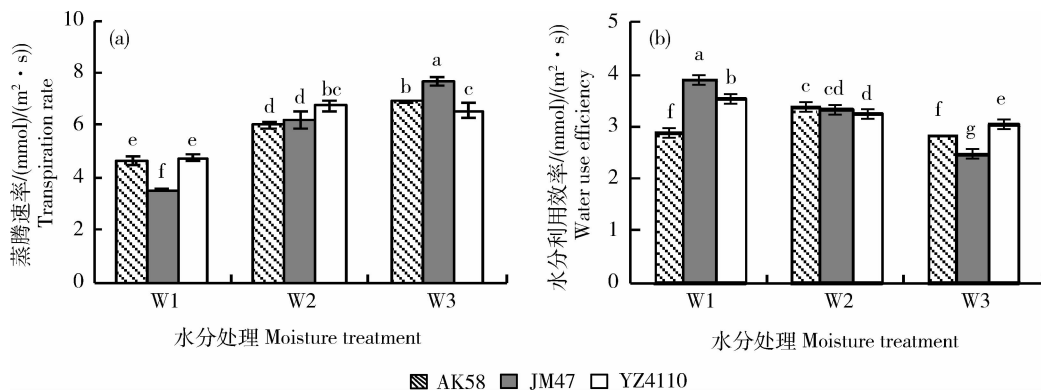


图 2 干旱胁迫对冬小麦灌浆期旗叶蒸腾速率(a)和水分利用效率(b)的影响(2013—2014 年)

Fig. 2 Effects of drought stress on leaves transpiration rate (a) and water use efficiency (b) in middle grain filling stage in different cultivars of winter wheat

3 讨论

3.1 不同抗旱性冬小麦产量差异及其对干旱胁迫的响应

从产量构成看,小麦产量决定于有效穗数、穗粒数和粒重三因素,各构成因素的高低受水分调控。许多研究表明,穗数和穗粒数对干旱反应敏感^[10,14,25],干旱条件下穗数和穗粒数的多少决定了产量高低;亦有研究表明水分状态显著影响千粒重,如:灌浆初期水分胁迫导致千粒重和籽粒产量降低^[26],孕穗期或开花期浇水可提高千粒重,而灌浆期浇水千粒重降低^[27]。本试验结果表明,冬小麦产量及其构成因素对干旱胁迫的响应因品种的抗旱性和干旱胁迫程度而异,抗旱性强的品种晋麦 47 在干

旱胁迫下产量下降幅度较小,在持续干旱和花后干旱 2 种干旱处理下产量均高于抗旱性弱的品种偃展 4110,产量较高的原因主要是由于总粒数较高(穗数和穗粒数的乘积),且千粒重能维持稳定。抗旱性中等的矮抗 58 也由于其具有较高的总粒数,对花后干旱具有较强的适应能力,从而能维持较高的产量。可见,穗数和穗粒数的形成对干旱胁迫较敏感,在干旱环境下,提高产量的关键是保证足够的库容量,在此基础上维持粒重的稳定。抗旱高产品种晋麦 47 的重要特征是在干旱条件下成穗能力较强,总粒数较高,粒重较稳定。

3.2 不同抗旱性冬小麦物质积累及其对干旱胁迫的响应

从物质积累和分配看,小麦产量决定于生物产

量和收获指数,产量物质主要来源于花后物质积累,也有一部分来自于花前贮藏物质的转运^[8]。现代高产品种具有较高的收获指数,有人也把收获指数作为旱地高产品种的选择指标^[6,10],但在后期严重干旱下收获指数的增加难度很大。本研究表明,无论在持续干旱还是在花后干旱下,抗旱品种产量较高的原因主要是生物产量较高,同时收获指数稳定。干旱条件下生物产量与籽粒产量相关性更为密切。一般认为,高产应提高花后物质积累量,但旱地小麦花前和花后的物质积累均对产量具有重要作用。许多研究报道,在后期逆境下花前贮藏物质对产量的贡献会增加^[8]。从本试验看,抗旱高产小麦品种晋麦 47 在干旱处理条件下不仅花后物质积累高于其他品种,而且花前物质积累显著高于其他品种,花前贮藏物质对产量的贡献率也高于其他品种。特别是生长前期,晋麦 47 明显较偃展 4110 和矮抗 58 生长旺盛,其分蘖力强、干物质积累多,这为其能够获得较高的单位面积穗数和总粒数奠定了物质基础。矮抗 58 在拔节后持续干旱时花后物质积累能力虽无显著优势,但其显著提高了花前贮藏物质转运对籽粒的贡献率,收获指数较高;而在花后干旱下由于花前贮藏物质转运对籽粒的贡献率较高,产量也较偃展 4110 提高。抗旱性弱的品种偃展 4110 在干旱胁迫下花前物质积累显著减少,导致总粒数显著下降,加上花后物质积累量减少,而贮藏物运转也少,最终产量显著下降。可见,前期较快生长,积累较多的同化物,既可增加群体库容,又可增加贮藏物质,同时维持或提高花后物质积累和运转,平衡源库关系,有助于提高旱地品种产量^[6,8,10]。

3.3 不同抗旱性冬小麦水分利用和生产效率差异及其对干旱胁迫的响应

从水分利用看,小麦的产量决定于水分利用量和水分利用效率^[6]。一些研究表明,小麦水分利用效率具有明显的基因型差异^[1,15-16],且与品种抗旱性正相关^[18-19],但 Blum^[20]认为在水分限制环境下小麦充分利用水比水分利用效率更重要。本研究表明,不同抗旱性小麦的水分利用和生产效率存在明显差异,且因水分条件的不同而不同^[21]。干旱处理显著降低了各品种耗水量,但却相对提高了水分利用效率,因此,在本试验条件下,干旱减产的原因主要是由于减少了水分利用量。作物耗水量与作物生物量之间存在正相关性^[10],干旱减少了耗水量,导致生物量减少。但生物量的高低也受水分生产效率

影响。在干旱条件下,晋麦 47 的总耗水量较高于偃展 4110,其差异主要是播种~拔节阶段耗水较多,而生育期内的水分生产效率也高于偃展 4110。前期较多地吸收土壤水分,维持了较快的生长势,积累了较多的同化物,使拔节后持续干旱下能够相对保证较多的成穗并有利于幼穗分化,从而形成了较大的库容(总粒数)。在后期籽粒生长阶段,晋麦 47 蒸腾速率较低,阶段耗水较少,但单叶水分利用效率和群体水分生产效率较高,进而获得较高产量和高水分利用效率。可见,前期较高的吸水能力和后期较高的水分生产效率的结合,是抗旱高产品种的重要生理机制。

4 结 论

不同抗旱性冬小麦品种的产量形成和水分利用特性对水分胁迫的响应不同。抗旱性强的品种相对于抗旱性弱的品种,其生育前期水分吸收能力和群体生长能力较强,干旱下花前积累的干物质较多,形成了较多的有效穗数和穗粒数,保证了较大的群体库容;同时,花前物质转运能力和花后物质生产效率较高,从而为产量形成提供了较多的物质来源,进而获得较高的产量。干旱环境下早期的吸水能力和生长能力强、群体库容量大、花前贮藏物质贡献率和花后水分生产效率高是抗旱、高产品种的重要特征。

参 考 文 献

- [1] Akram H M, Sattar A, Ali A, et al. Agro-physiological performance of wheat genotypes under moisture stress conditions[J]. Agric Res, 2010, 48(3): 361-369
- [2] Foulkes M J, Sylvester B R, Weightman R, et al. Identifying physiological traits associated with improved drought resistance in winter wheat[J]. Field Crop Res, 2007, 103(1): 11-24
- [3] Nouri A, Etminan A, Da Silva J T, et al. Assessment of yield, yield-related traits and drought tolerance of durum wheat genotypes (*Triticum turjidum* var durum Desf) [J]. Aust J Crop Sci, 2011, 5(1): 8-16
- [4] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain[J]. Agr Water Manage, 2010, 97(8): 1117-1125
- [5] Blum A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential are they compatible, dissonant, or mutually exclusive [J]? Aust J Agr Res, 2005, 56(11): 1159-1168
- [6] Araus J L, Slafer G A, Reynolds M P, et al. Plant breeding and drought in C₃ cereals: What should we breed for[J]? Annals

- Bot, 2002, 89: 925-940
- [7] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮麦区冬小麦超高产栽培的理论与实践[J]. 作物学报, 2002, 28(5): 577-585
- [8] Blum A, Sinmena B, Mayer J, et al. Stem reserve mobilisation supports wheat grain filling under heat stress[J]. Aust J Plant Physiol, 1994, 21(6): 771-781
- [9] Rebetzke G J, Richards R A. Genetic improvement of early vigour in wheat[J]. Aust Agric Res, 1999, 50(3): 291-301
- [10] Xue Q W, Zhu Z X, Musick J T, et al. Physiological mechanisms contributing to the increased water-use efficiency in winter wheat under deficit irrigation[J]. J Plant Physiol, 2006, 163(2): 154-164
- [11] Bingham J. Varietal response in wheat to water supply in the field, and male sterility caused by a period of drought in a glasshouse experiment[J]. Ann Appl Biol, 1966, 57(3): 365-377
- [12] Foulkes M J, Slafer G A, Davies W J, et al. Raising yield potential of wheat III Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance[J]. J Exp Bot, 2011, 62(2): 469-486
- [13] Schynder H. The role of carbohydrate storage and redistribution in the source-sink relations of wheat and barley during grain filling-a review[J]. New Phytol, 1993, 123: 233-245
- [14] Fischer R A. Understanding the physiological basis of yield potential in wheat[J]. Agric Sci, 2007, 145: 99-113
- [15] Rampino P, Pataleo S, Gerardi C, et al. Drought stress responses in wheat: Physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes[J]. Plant Cell Envir, 2006, 29(12): 2143-2152
- [16] Moustafa M A, Boersma L, Kronstad W E. Response of four spring wheat cultivars to drought stress[J]. Crop Sci, 1996, 36(4): 982-986
- [17] Musick J T, Jones O R, Stewart B, et al. Water-yield relationship for irrigated and dry-land wheat in the US southern plains[J]. Agron J, 1994, 86: 980-986
- [18] Zhang X Y, Chen S Y, Pei D, et al. Improved water use efficiency associated with cultivars and agronomic management in the North China Plain[J]. Agron J, 2005, 97(3): 783-790
- [19] 杨再洁, 陈阜, 史磊刚, 等. 华北平原不同年代小麦品种旗叶光合特性对水分亏缺的响应[J]. 作物学报, 2013, 39(4): 693-703
- [20] Blum A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress[J]. Field Crop Res, 2000, 112(2/3): 119-123
- [21] 董孟雄, 李秀绒, 柴永峰, 等. 旱地小麦新品种: 晋麦 47 号[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(1): 98
- [22] 曹廷杰, 赵虹, 王西成, 等. 国审小麦新品种偃展 4110 的综合表现及利用前景分析[J]. 中国农学通报, 2004, 20(5): 7
- [23] 路开梅, 刘立杰, 张大明. 中筋小麦百农矮抗 58[J]. 中国农技推广, 2008, 24(9): 18
- [24] 段文学, 张永丽, 石玉, 等. 测墒补灌对不同小麦品种耗水特性和氮素分配与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1309-1317
- [25] Ji X M, Shiran B, Wan J L, et al. Importance of pre-anthesis anther sink strength for maintenance of grain number during reproductive stage water stress in wheat[J]. Plant Cell Enviro, 2010, 33(6): 926-942
- [26] Nicholas M E, Turner N C. Use of chemical desiccants and senescing agents to select wheat lines maintaining stable grain size during post-anthesis drought[J]. Field Crops Res, 1993, 31(1/2): 155-171
- [27] 李建民, 王璞, 周殿玺, 等. 灌溉制度对冬小麦耗水及产量的影响[J]. 生态农业研究, 1999, 7(4): 25-28

责任编辑: 袁文业