

不同灌水处理对不同抗旱型小麦品种生长发育和产量的影响

杨 程,张德奇,时艳华,李向东,张素瑜,邵运辉,方保停,岳俊芹

(河南省农业科学院 小麦研究所/小麦国家工程实验室/农业部黄淮中部小麦生物学与遗传育种重点实验室/农业部中原地区作物栽培科学观测实验站/河南省小麦生物学重点实验室,河南 郑州 450002)

摘要:为了探明黄淮麦区不同干旱敏感型冬小麦品种对不同灌溉方式的响应特征,以黄淮麦区大面积推广的2个冬小麦品种抗旱型的矮抗58(AK58)和干旱敏感型的郑麦7698(ZM7698)为研究对象,在隔离池中通过不同时期定量灌水研究总灌水量不变的情况下拔节期和开花期水分调配对2个小麦品种的群体数量、个体发育、产量构成的影响。结果表明,ZM7698在拔节期灌水100 mm + 开花期灌水100 mm(B1F1)处理下具有最高的群体数量和次生根数,而AK58在拔节期灌水200 mm + 开花期不灌水(B2F0)处理下群体数量和次生根数最高;2个小麦品种均在B2F0处理下株高最高,B1F1和B0F2(拔节期不灌水+开花期灌水200 mm)处理株高均较其显著下降。与B2F0处理相比,B1F1和B0F2处理ZM7698和AK58两个品种旗叶SPAD值均显著下降,ZM7698叶片SPAD值下降幅度大于AK58。ZM7698和AK58的小穗孕性对不同灌水处理的响应明显不同,ZM7698结实小穗比率表现为B0F2>B1F1>B2F1,AK58则表现为B1F1>B0F2>B2F0。AK58的产量表现为B1F1>B2F0>B0F2,穗数表现为B2F0>B1F1>B0F2,穗粒数表现为B1F1>B2F0>B0F2,千粒质量表现为B0F2>B1F1>B2F0;而ZM7698的产量则表现为B1F1>B0F2>B2F0,穗数表现为B2F0>B1F1>B0F2,千粒质量表现为B0F2>B1F1>B2F0,穗粒数表现为B2F0>B0F2>B1F1。AK58和ZM7698的强势粒千粒质量均随着开花期灌水量的增加而显著增加,但AK58的增加幅度明显高于ZM7698;ZM7698弱势粒千粒质量仅在B1F1和B0F2处理间有显著差异,而AK58弱势粒千粒质量在B1F1和B0F2处理下均显著高于B0F2处理。综上所述,抗旱型品种AK58和干旱敏感型品种ZM7698均在拔节—开花期均匀灌水(B1F1)条件下产量最高,但是产量构成因素变化不同,AK58和ZM7698小穗发育过程和强、弱势粒灌浆过程对拔节期和开花期土壤水分敏感性的不同是造成2个小麦品种产量构成不同的重要原因。

关键词:冬小麦;群体数量;灌水;叶绿素含量;产量

中图分类号:S512.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-3268(2019)05-0010-06

Effects of Different Irrigation Treatments on Growth and Yield of Different Drought-Resistant Wheat Cultivars

YANG Cheng,ZHANG Deqi,SHI Yanhua,LI Xiangdong,ZHANG Suyu,
SHAO Yunhui,FANG Baoting ,YUE Junqin

(Wheat Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences/National Laboratory of Wheat Engineering/Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Breeding in Central Huang-Huai Region, Ministry of Agriculture/

收稿日期:2018-10-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0301102-1);国家自然科学青年基金项目(31601242);作物生物学国家重点实验室开放课题(2017KF02);河南省基础与前沿技术研究计划项目(162300410253);河南省农业科学院科研发展专项(2103015)

作者简介:杨 程(1987-),男,河南巩义人,助理研究员,博士,主要从事小麦栽培生理研究。

E-mail:luckytiger.com@163.com

通信作者:李向东(1967-),男,河南遂平人,研究员,博士,主要从事小麦栽培与耕作研究。E-mail:hnlxd@126.com

Scientific Observing and Experimental Station of Crop Cultivation in Central Plains,
Ministry of Agriculture/Henan Provincial Key Laboratory of Wheat Biology, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to explore the effects of different irrigation methods on different drought-resistant wheat cultivars in Huang-huai wheat region, an experiment was carried out with drought-resistant wheat cultivar Aikang 58 (AK58) and drought-sensitive wheat cultivar Zhengmai 7698 (ZM7698), which were widely planted in the Huang-huai wheat region. The effect of different irrigation treatments on the population size, individual development, yield components of two wheat cultivars under a quota irrigation with 200 mm during the whole growth period with different distribution modes between jointing stage and flowering stage were studied. The results showed that ZM7698 had the highest population size and secondary root number in the case of uniform irrigation with 100 mm at jointing stage and flowering stage (B1F1), while AK58 had the highest population size and secondary root number in the case of irrigation amount of 200 mm at the jointing stage (B2F0). Both two wheat varieties had the highest plant height under B2F0 treatment, B1F1 treatment of ZM7698 and B0F2 treatment of AK58 significantly reduced the plant height compared with B2F0 treatment respectively. Under B1F1 and B0F2 treatments, the chlorophyll contents of flag leaves of both AK58 and ZM7698 decreased significantly, and the decrease extent was larger in ZM7698 than that in AK58 compared with B2F0 treatment. The responses of spikelet fertility of ZM7698 and AK58 to different irrigation treatment were different, the set spikelet ratio of ZM7698 showed as B0F2 > B1F1 > B2F1, while AK58 showed as B1F1 > B0F2 > B2F0. The yield, spike number, grain number per spike and thousand grains weight of AK58 showed as B1F1 > B2F0 > B0F2, B2F0 > B1F1 > B0F2, B1F1 > B2F0 > B0F2 and B0F2 > B1F1 > B2F0, respectively. While the yield, spike number, grain number per spike and thousand grains weight of ZM7698 showed as B1F1 > B0F2 > B2F0, B2F0 > B1F1 > B0F2, B2F0 > B0F2 > B1F1 and B0F2 > B1F1 > B2F0. The thousand grains weight of strong kernels of AK58 and ZM7698 both significantly increased with the increase of irrigation amount at flowering stage, but the increase extent was larger in AK58 than that in ZM7698. The thousand kernels weight of weak kernels of ZM7698 only had significant difference between B1F1 treatment and B0F2 treatment, while that of AK58 was significantly higher in B1F1 and B0F2 treatments than that in B0F2 treatment. In conclusions, both AK58 and ZM7698 had the highest yield under uniform irrigation at jointing stage and flowering stage (B1F1), but the yield components were different among different treatments; the different sensibility of spikelet development, filling processes of strong kernels and weak kernels to soil water content at jointing stage and flowering stage caused the different yield components of ZM7698 and AK58.

Key words: Winter wheat; Population size; Irrigation; Chlorophyll content; Yield

黄淮麦区是我国小麦主产区,该区域小麦生育期内降水量较小,整个生育期降水分布不均匀,需要根据墒情进行补充灌溉^[1]。近年来,随着生活、工业、农业等用水量的增加,地下水位逐渐下降^[2]。因此,在保障农业生产和国家粮食安全的前提下,减少农业用水,对保护地下水资源和生态环境至关重要。

合理的灌溉措施是减少农业用水、提高水分利用效率的重要手段。张永平等^[3]研究发现,小麦叶与非叶器官光合性能及其日变化特征有较大不同,非叶器官光合作用对水分亏缺的敏感性低于叶片,生育期浇2次水可以获得与浇4次水相似的群体日光合积累量;马富举等^[1]研究发现,扬花期灌水量直接影响花后旗叶净光合速率,拔节期限量灌溉和

扬花期充足灌溉的组合能够加快干物质积累,提高穗粒数,并最终提高产量;马新明等^[4]研究表明,开花后土壤相对含水量保持在60%,旗叶最大光能转换效率和籽粒产量最高;孟兆江等^[5]研究表明,小麦拔节前轻度水分亏缺条件下叶片光合速率无明显下降,且拔节期灌水具有超补偿效应,产量和水分利用效率均增加。这些研究为小麦节水栽培技术的应用提供了参考,但是大部分研究在大田环境下进行,无法排除试验小区之间土壤水分和营养的相互影响,且前人研究的生育期内灌水量明显不同,在生育期内总灌水量相同的情况下,各生育时期灌水量调配对小麦生长发育、产量的影响还不清楚。为此,选取黄淮麦区大面积推广的2个小麦品种干旱敏感型的郑麦7698(ZM7698)和抗旱型的矮抗58(AK58)为研究对

象,在生育期灌水总量不变的情况下,研究拔节期和开花期不同灌水组合对小麦生长发育和产量的影响,为排除小区之间土壤水分相互影响,试验在隔离池中进行,以期为黄淮麦区小麦节水栽培提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于 2016—2017 年在河南省农业科学院现代农业科技试验示范基地自动控制干旱棚内的隔离池中进行。试验地土壤为砂壤土,每个隔离池面积均为 $1.2 \text{ m} \times 1.67 \text{ m}$,1 个隔离池即为 1 个小区,四周用地上水泥墙隔离,水泥墙高 2 m,底部开放,安装 4 m 高的自动移动式遮雨棚,下雨、雪时将防雨棚推上,其余时间为自然光照。

供试材料为干旱敏感型小麦品种 ZM7698 和抗旱型小麦品种 AK58。

1.2 试验设计

试验共设置 3 个灌水处理:拔节期灌水 200 mm + 开花期不灌水 (B2F0)、拔节期灌水 100 mm + 开花期灌水 100 mm (B1F1)、拔节期不灌水 + 开花期灌水 200 mm (B0F2),每个处理重复 3 次。拔节期灌水时间为 3 月 10 日,开花期灌水时间为 4 月 23 日。通过流量计控制灌水量。小麦于 2016 年 10 月 16 日播种,行距 0.2 m,株距 0.02 m。田间管理按高产田进行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长发育指标 出苗后,每个小区选取中间 1 行 (1.67 m) 小麦,调查株数,计算基本苗数。

拔节后期(3 月 28 日),每个小区选取中间 1 行

(1.67 m) 小麦,调查总茎数,计算群体数量;每小区随机挖取 3 株小麦,调查次生根数,并测量株高。

收获期,每个小区随机选取 10 穗,调查小麦小穗数、结实小穗数和不孕小穗数。

1.3.2 SPAD 值 灌浆初期(4 月 28 日),采用日本美能达公司生产的 SPAD - 502 叶绿素计测定旗叶 SPAD 值,每个小区随机测定 5 个叶片。

1.3.3 产量及其构成因素 成熟期,每个小区取 1 行,调查穗数;每小区随机选取 10 株进行室内考种,分别调查穗粒数和千粒质量,每小区实收计产。

成熟期,每个处理取 12 个穗,把穗中部小穗(第 5~12 小穗)上第 1~2 位籽粒和第 3~5 位籽粒剥离出来,分别作为强势粒和弱势粒。籽粒经 105°C 杀青 30 min, 80°C 烘干至恒质量,称质量,获得强势粒和弱势粒的千粒质量^[6-7]。

1.4 数据处理及统计分析

采用 Excel 2016 进行数据分析,采用 SigmaPlot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理对小麦生长发育的影响

由表 1 可知,2 个小麦品种不同灌水处理基本苗数间的差异均不显著,而群体数量、次生根数、株高在不同灌水处理间差异明显。对于 ZM7698 来说,B1F1 和 B2F0 处理群体数量、次生根数无显著差异,均显著高于 B0F2 处理;B2F0 处理株高最高,B1F1 处理最低,两者差异显著。对于 AK58 来说,B2F0 处理群体数量、次生根数、株高均最高,B1F1 处理次之,B0F2 处理均最低,两者差异均达到显著水平。

表 1 不同灌水处理对小麦生长发育的影响

Tab. 1 The effect of different irrigation treatments on the growth and development of wheat

品种 Cultivar	处理 Treatment	基本苗数/ $(\times 10^4 \text{ 株}/\text{hm}^2)$ Basic seedling number/ $(\times 10^4 \text{ plants}/\text{ha})$	群体数量/ $(\times 10^4 \text{ 茎}/\text{hm}^2)$ Population size/ $(\times 10^4 \text{ stems}/\text{ha})$	次生根数/(条/株) Secondary root number/(roots/plant)	株高/cm Plant height
ZM7698	B2F0	238.50a	600.15d	38.95a	52.00bc
	B1F1	244.95a	610.05d	40.67a	47.00d
	B0F2	241.95a	570.30e	27.07d	47.67d
AK58	B2F0	243.90a	772.65a	33.88b	55.50a
	B1F1	244.95a	720.15b	32.17bc	51.67c
	B0F2	240.15a	675.30c	30.50c	48.67d

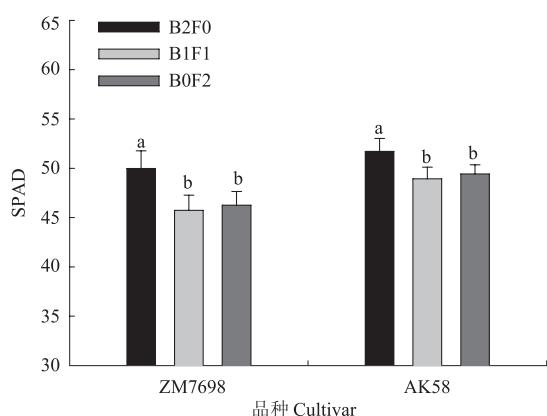
注:同列数据后不同小写字母表不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: The different lowercase letters after data of the same column mean significant differences among different treatments of the same cultivar ($P < 0.05$), the same below.

2.2 不同灌水处理对小麦叶片 SPAD 值的影响

叶绿素是光合电子传递链中光系统 I 和光系统 II 蛋白质复合体的重要组成成分,与叶片光合能力密切相关,而旗叶光合作用是影响产量的重要因素。

由图 1 可知,与 B2F0 处理相比,B1F1 和 B0F2 处理 ZM7698 和 AK58 旗叶 SPAD 值均显著下降,ZM7698 的 SPAD 值下降幅度大于 AK58,说明 ZM7698 对土壤含水量更加敏感。



不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Different lowercase letters mean significant differences among different treatments of the same cultivar ($P < 0.05$)

图1 不同灌水处理对小麦叶片SPAD值的影响

Fig.1 The effect of different irrigation treatments on SPAD value of wheat leaves

2.3 不同灌水处理对小麦小穗孕性的影响

穗粒数是小麦产量的重要决定因子,保持较高的穗粒数是提高小麦产量的重要手段,而小穗孕性是影响小麦穗粒数的重要因素。如表2所示,与ZM7698相比,AK58具有较多的小穗数、结实小穗数和不孕小穗数。对于ZM7698来说,B1F1处理和B0F2处理小麦小穗数和不孕小穗数均较B2F0处理显著下降,结实小穗数下降但不显著,进而使得结实小穗比率增加、不孕小穗比率下降。对于AK58来说,B2F0处理小麦小穗数和结实小穗数均与B1F1处理无显著差异,但2个处理均显著高于B0F2处理;B2F0处理不孕小穗数显著高于B1F1和B0F2处理,B1F1和B0F2处理间无显著差异,进而使得B1F1处理结实小穗比率最高、不孕小穗比率最低。

表2 不同灌水处理对小麦小穗孕性的影响

Tab.2 The effect of different irrigation treatments on spikelet fertility of wheat

品种 Cultivar	处理 Treatment	小穗数/(个/穗) Spikelet number per spike	结实小穗数/(个/穗) Seed-setting spikelet number per spike	不孕小穗数/(个/穗) Sterile spikelet number per spike	结实小穗比率/% Seed-setting spikelet ratio	不孕小穗比率/% Sterile spikelet ratio
ZM7698	B2F0	19.67c	18.83c	0.83c	95.90	4.10
	B1F1	19.33d	18.67c	0.67d	96.61	3.39
	B0F2	19.22d	18.56c	0.67d	96.72	3.28
AK58	B2F0	21.83a	20.83a	1.00a	95.49	4.51
	B1F1	21.89a	21.00a	0.89bc	96.04	3.96
	B0F2	21.22b	20.28b	0.94b	95.55	4.45

产量高低是评价栽培技术优劣的重要指标。如表3所示,对于ZM7698来说,B2F0处理小麦产量最低,B1F1处理最高,3个处理间的差异均显著;对于AK58来说,B1F1处理产量最高,B2F0处理次之,两者差异不显著,但均显著高于B0F2处理。对于ZM7698来说,千粒质量在B1F1和B0F2处理之间没有显著差异,但均显著高于B2F0处理;穗粒数表现为B2F0>B0F2>B1F1,处理间差异均达到显著

水平;穗数在B2F0和B1F1处理之间没有显著差异,但均显著高于B0F2处理。对于AK58来说,千粒质量以B0F2处理最高,显著高于B1F1和B2F0处理,B2F0处理最低;穗粒数表现为B1F1>B2F0>B0F2,处理间差异均达到显著水平;穗数表现为B2F0>B1F1>B0F2,其中,B2F0处理与其他2个处理间的差异均达到显著水平,其他2个处理间的差异不显著。

表3 不同灌水处理对小麦产量及其构成因素的影响

Tab.3 The effects of different irrigation treatments on wheat yield and its components

品种 Cultivar	处理 Treatment	产量/(kg/hm ²) Yield	千粒质量/g 1 000-grain weight	穗粒数 Grains number per spike	穗数/(×10 ⁴ /hm ²) Spike number
ZM7698	B2F0	6 598.63d	45.14c	35.68a	463.50c
	B1F1	8 041.40a	54.22a	32.01c	462.00c
	B0F2	7 046.01c	54.82a	33.90b	411.00d
AK58	B2F0	7 307.02bc	40.66d	33.74b	577.50a
	B1F1	7 406.17b	42.38d	36.67a	525.00b
	B0F2	6 622.27d	49.75b	30.46c	507.00b

为了进一步研究千粒质量的影响因素,分别对各处理的强势粒和弱势粒的千粒质量进行了测定。如图2所示,ZM7698强势粒千粒质量随着开花期灌

水量的增加逐渐提高,而弱势粒表现为B0F2处理显著高于B1F1处理,其他处理间差异均不显著;AK58强势粒千粒质量也随着开花期灌水量的增加

逐渐提高,而弱势粒表现为 B2F0 处理显著低于其他 2 个处理,其他 2 个处理间差异不显著。同时可以看出,在开花期灌水量增加的情况下,AK58 强势粒和弱势粒千粒质量增加程度明显高于 ZM7698。

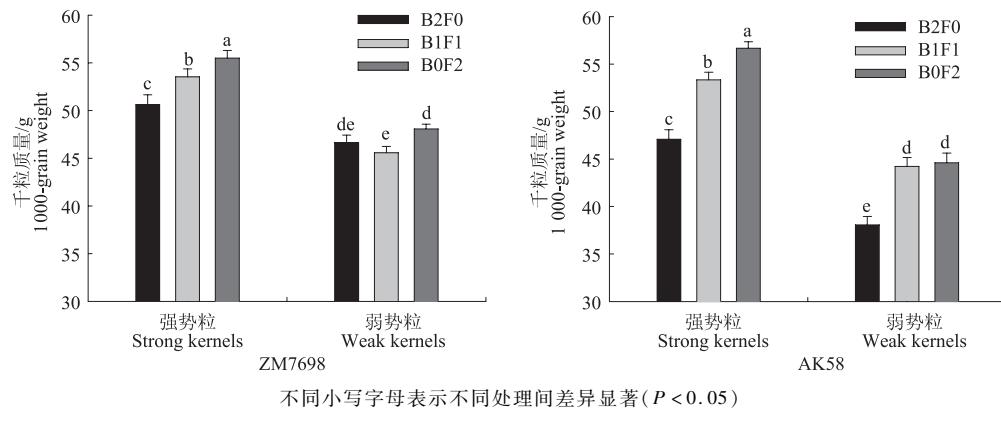


图 2 不同灌水处理对小麦强、弱势粒千粒质量的影响

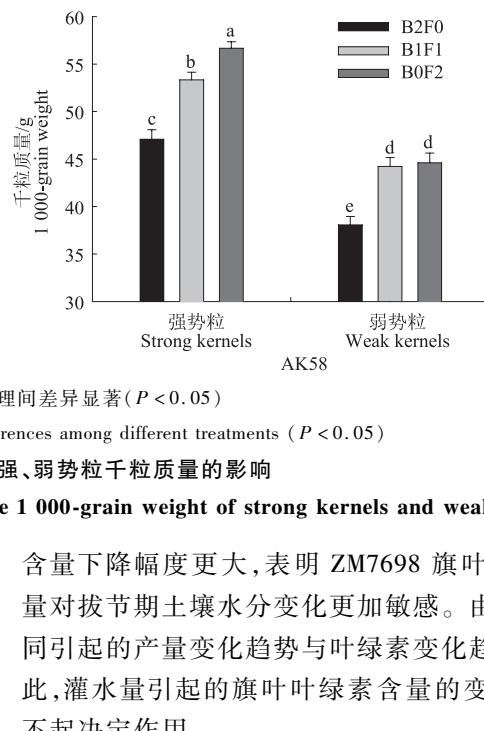
Fig. 2 The effect of different irrigation treatments on the 1 000-grain weight of strong kernels and weak kernels

3 结论与讨论

小麦生育期内,群体数量呈先上升后下降的趋势,在拔节后期群体数量达到最大^[8-9]。同时有研究表明,小麦拔节期群体数量与穗数呈显著正相关^[10-12]。因此,拔节期群体数量是穗数的重要决定因素。王红光等^[13]的研究表明,小麦拔节期灌水量增加能够提高穗数。本研究发现,2 个小麦品种在播种量相同、基本苗数没有显著差异的情况下,拔节期灌水处理 B2F1 和 B1F1 与不灌水处理 B0F2 相比,群体数量显著提高,这与前人^[13]研究结果相符。但是 ZM7698 的 B1F1 和 B2F0 处理群体数量之间没有显著差异,而 AK58 群体数量随着拔节期灌水量的增加呈递增趋势,表明与 ZM7698 相比,AK58 拔节期群体数量对土壤水分更加敏感。次生根是小麦进行养分吸收的主要器官,次生根数的变化与群体数量呈相同趋势,说明拔节期灌水量的增加对群体数量的提高可能与次生根对养分的吸收量增加有关,需要进一步研究证明。而 2 个小麦品种株高对不同灌水处理的响应呈不同趋势,说明 ZM7698 和 AK58 对土壤水分的适应程度明显不同。

旗叶的光合作用是小麦灌浆期籽粒干物质积累的重要能量来源,叶绿素是叶片光合作用过程中能量吸收与传递的关键组分^[14-15]。高温、低温、干旱等逆境胁迫所导致的小麦旗叶叶绿素含量下降均会使产量降低^[16-17]。本研究发现,拔节期灌水量下降导致小麦旗叶叶绿素含量下降,这与前人^[16-17]研究结果一致,但是 2 个小麦品种相比,ZM7698 叶绿素

以上结果表明,开花期,灌水量对 ZM7698 和 AK58 强势粒、弱势粒的灌浆均有提高作用,其中,AK58 的强势粒和弱势粒灌浆对开花期水分更加敏感。



含量下降幅度更大,表明 ZM7698 旗叶的叶绿素含量对拔节期土壤水分变化更加敏感。由于灌水量不同引起的产量变化趋势与叶绿素变化趋势不同。因此,灌水量引起的旗叶叶绿素含量的变化对产量并不起决定作用。

本研究发现,2 个小麦品种均以 B1F1 处理产量最高,但是 2 个小麦品种产量构成因素的变化趋势不同,ZM7698 通过保持较高的穗数和千粒质量提高产量,而 AK58 主要通过穗粒数的提高来提高产量。已有研究表明,拔节期水分不足能够引起小麦小花败育^[18-20]。在本研究中,ZM7698 的 B1F1 和 B0F2 的处理小穗数降低,而结实小穗比率提高,但是穗粒数没有提高,说明拔节期水分不足导致高位小花败育,从而使单个小穗籽粒数下降;而 AK58 在 B1F1 处理下结果显著不同,穗粒数显著增多,与结实小穗比率变化趋势相同,说明不同抗旱型小麦品种小穗发育过程对土壤水分适应性的不同直接导致了穗粒数对水分响应结果的不同。强势粒和弱势粒的千粒质量直接决定了最终的千粒质量,开花期灌水量增加明显提高强势粒和弱势粒的千粒质量,尤其是 AK58,其千粒质量对开花期水分更加敏感,说明 AK58 和 ZM7698 强势粒和弱势粒灌浆过程对水分响应的不同导致了不同灌水条件下不同抗旱性小麦品种千粒质量的差异。因此,AK58 和 ZM7698 小穗发育过程和强、弱势粒对拔节期和开花期土壤水分敏感性的不同是造成 2 个小麦品种产量构成不同的重要原因。

综上所述,灌水总量相同的情况下,拔节期灌水

能够维持较高的小麦群体数量和次生根数量。抗旱型品种 AK58 和干旱敏感型品种 ZM7698 均在拔节—开花期均匀灌水(B1F1)条件下产量达到最大,但是产量构成因素变化趋势不同,AK58 和 ZM7698 小穗发育过程和强、弱势粒灌浆过程对拔节期和开花期土壤水分敏感性的不同是造成 2 个小麦品种产量构成不同的重要原因。

参考文献:

- [1] 马富举,杨程,张德奇,等.灌水模式对冬小麦光合特性、水分利用效率和产量的影响[J].应用生态学报,2018,29(4):1233-1239.
- [2] 张嫚,周苏政,杨习文,等.减氮适墒对冬小麦土壤硝态氮分布和氮素吸收利用的影响[J].中国农业科学,2017,50(20):3885-3897.
- [3] 张永平,张英华,王志敏.不同供水条件下冬小麦叶与非叶绿色器官光合日变化特征[J].生态学报,2011,31(5):1312-1322.
- [4] 马新明,熊淑萍,李琳,等.土壤水分对不同专用小麦后期光合特性及产量的影响[J].应用生态学报,2005,16(1):83-87.
- [5] 孟兆江,段爱旺,王景雷,等.调亏灌溉对冬小麦根冠生长影响的试验研究[J].灌溉排水学报,2012,31(4):37-41.
- [6] JIANG D, CAO W, DAI T, et al. Activities of key enzymes for starch synthesis in relation to growth of superior and inferior grains on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) spike[J]. Plant Growth Regulation, 2003, 41:247-257.
- [7] 徐莹,王林林,陈炜,等.施氮量对旱地小麦强势粒和弱势粒灌浆及产量的影响[J].麦类作物学报,2013,33(3):489-494.
- [8] 叶优良,王桂良,朱云集,等.施氮对高产小麦群体动态、产量和土壤氮素变化的影响[J].应用生态学报,2010,21(2):351-358.
- [9] 王毅,任爱霞,孙敏,等.休闲期深翻覆盖配施氮磷肥对旱地小麦群体动态、叶面积的影响及其与产量的相关性[J].山西农业科学,2014,42(3):242-246.
- [10] 陈梦楠,高志强,孙敏,等.旱地小麦深施磷肥对群体动态及产量形成的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2016,36(6):395-399.
- [11] 张兰生,张晶,党建友,等.锌腐酸肥料对冬小麦群体、产量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2018(2):109-112.
- [12] 崔帅,王红光,李东晓,等.限水减氮对高产麦田群体动态和产量形成的影响[J].麦类作物学报,2016,36(8):1060-1068.
- [13] 王红光,于振文,张永丽,等.推迟拔节水及其灌水量对小麦耗水量和耗水来源及农田蒸散量的影响[J].作物学报,2010,36(7):1183-1191.
- [14] 赵甍,王秀伟,毛子军.不同氮素浓度下 CO₂ 浓度、温度对蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 幼苗叶绿素含量的影响[J].植物研究,2006,26(3):337-341.
- [15] 衣艳君,李芳柏,刘家尧.尖叶走灯藓 (*Plagiomnium cuspidatum*) 叶绿素荧光对复合重金属胁迫的响应[J].生态学报,2008,28(11):5437-5444.
- [16] 张英华,杨佑明,曹莲,等.灌浆期高温对小麦旗叶与非叶器官光合和抗氧化酶活性的影响[J].作物学报,2015,41(1):136-144.
- [17] 王志强,梁威威,范雯雯,等.不同土壤肥力下冬小麦春季干旱的复水补偿效应[J].中国农业科学,2011,44(8):1628-1636.
- [18] 周吉红,毛思帅,王俊英,等.限量灌溉对京郊小麦产量、水分利用效率及效益的影响[J].麦类作物学报,2016,36(8):1043-1049.
- [19] 王瑞霞,闫长生,张秀英,等.春季低温对小麦产量和光合特性的影响[J].作物学报,2018,44(2):288-296.
- [20] 郭天财,冯伟,赵会杰,等.水氮运筹对干旱年型冬小麦旗叶生理性状及产量的交互效应[J].应用生态学报,2004,15(3):453-457.