文章编号:1000-7601(2017)01-0171-07 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2017.01.26

生育期水分调控对河西地区滴灌春小麦生长和水分利用的影响

张雨新[1,2],张富仓[1,2],邹海洋[1,2],陈东峰[1,2]
(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为探索干旱地区有利于春小麦生长和提高产量的大田滴灌灌水模式,以春小麦永良 4 号为试验材料,在不同生育期(苗期~分蘖,拔节~孕穗,抽穗~开花,灌浆~成熟)设置 5 个土壤水分下限 W1(55%、60%、55%、50%),W2(60%、65%、60%、55%),W3(65%、70%、65%、60%),W4(70%、75%、70%、65%)和充分灌溉(CK)(75%、80%、75%、70%),研究了不同生育期土壤水分调控对河西地区滴灌春小麦生长、产量和水分利用效率的影响。结果表明:一定施肥水平下,随着土壤水分下限的提高,各处理株高、叶面积指数均不断增大,在成熟期充分灌溉(CK)处理分别比 W4 处理高 2.19%和 7.93%;不同水分下限处理条件下,春小麦干物质的总积累量和成熟期干物质向籽粒的分配量均为 W4 处理最大,比 CK 分别显著高 5.63%和 17.14%;各处理春小麦产量和水分利用效率随着土壤水分下限的增加均呈先增加后减小的变化趋势,其中 W4 处理的水分利用效率比 W3 处理降低 2.82%,但其产量分别比 W3、CK 处理增加 7.53%和 4.07%。从节水增产的角度考虑,W4 处理可作为基于本试验条件下较适宜的水分处理。

关键词: 滴灌;春小麦;土壤水分;产量;水分利用效率
中图分类号: S275.6; S512.1+2 **文献标志码:** A

Effects of soil water regulation in growing period on spring wheat growth and water use in Hexi areas under drip irrigation

ZHANG Yu-xin[1,2], ZHANG Fu-cang[1,2], ZOU Hai-yang[1,2], CHEN Dong-feng[1,2]
(1. *Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to explore the drip irrigation mode to improve the growth and yield of spring wheat in Arid Areas, field plot experiments were carried out with the spring wheat species of Yongliang 4. Five lower soil water limits (i.e. W1(55%、60%、55%、50%), W2(60%、65%、60%、55%), W3(65%、70%、65%、60%), W4(70%、75%、70%、65%) and sufficient irrigation (CK) (75%、80%、75%、70%)) were applied at different growing stages (emergence ~ tillering, jointing ~ booting, heading ~ anthesis, filling ~ maturity) to study the effects of soil water regulation on spring wheat growth, yield and water use efficiency in Hexi areas. The results showed that at the same fertilizer level, the increase in lower soil water limits increased the plant height and LAI of spring wheat. Compared with the W4 treatments, the plant height and LAI of the sufficient irrigation treatment (CK) increased by 2.19% and 7.93%. However, compared with sufficient irrigation treatment (CK), total dry matter accumulation and its distribution amount to grain of W4 treatment had significantly increased respectively by 5.63% and 17.14%. With the increase in lower soil water limits, the field and water use efficiency(WUE) in all treatments increased first and then decreased. Compared with W3 treatments, the water use efficiency(WUE) of W4 treatment was reduced by 2.82%. However, the treatment W4 showed the highest field, which was increased by 7.53% and 4.07%, compared with that of the W3 and CK treatments. In sum-

收稿日期: 2016-03-11
基金项目: 国家“十二五”863 计划项目(2011AA100504);农业部公益性行业科研专项(201503124);教育部高等学校创新引智计划项目(B12007)
作者简介: 张雨新(1992—),女,辽宁北票人,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:772394594@qq.com。
通信作者: 张富仓(1962—),男,陕西武功人,博士,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:zhangfc@nwsuaf.edu.cn。

mary, the appropriate soil water regulation at growing stages is beneficial to the growth and high yield of spring wheat. Comprehensively considering the water saving and high field, the treatment W4 is selected as the optimal water treatment under the present experimental conditions.

Keywords: drip irrigation; spring wheat; soil water; yield; water use efficiency

水分供应不足会对干旱半干旱地区植被的生长产生严重的影响[1]。甘肃河西地区属于典型的大陆干旱荒漠气候,大部分处于干旱或极度干旱区,多年平均降水量为 139.2 mm,远小于多年平均蒸发量(1 614.6 mm)。除此之外,由于水资源分配的不均衡以及上游过度利用水资源,引起地下水位的大幅度下降,加剧了该地区水资源的紧缺[2]。由于河西地区土壤瘠薄、干旱少雨,抗旱能力较强的春小麦在该区占有较大的比例。但与此同时该地区小麦也存在着春季低温和干旱使得播种困难,后期高温导致产量低等诸多问题。因此改善灌溉条件、提高小麦抗旱保墒能力成为春小麦节水增产的关键[3-4]。

调亏灌溉于 20 世纪 70 年代中期,被澳大利亚持续灌溉农业研究所提出,它是通过人为主动的,在作物生长的某一适当阶段,对其施加水分胁迫,以影响作物的生理和生化过程,进而提高作物的水分利用效率[5]。近年来国内外学者从灌水方式[6]、灌水频数[7]以及灌水定额[8]等方面对作物调亏灌溉做了大量研究。杜太生等[9]研究分析了分根交替灌溉和调亏灌溉对谷类作物土壤水分利用效率的影响,结果表明两种灌水方式下作物的产量均没有显著降低,但是水分利用效率有了很大的提高;分根交替灌溉灌水方式适用于干旱地区宽行谷类作物,而调亏灌溉适用于窄行谷类作物的灌溉。蒋桂英等[10]研究了不同灌水方式对小麦生长发育的影响,结果表明与漫灌相比,滴灌条件下小麦的灌水量有所下降;同时由于滴灌条件下小麦营养器官中的干物质分配量减少,有利于同化物质在籽粒中的积累,提高了粒重,增加了产量,水分生产效率也有所提高。党根有等[11]对春小麦进行了灌水时期和灌水次数的组合处理,研究发现各生育期灌水次数的增加明显促进春小麦叶干物质积累,缓解穗干物质积累量增加速率的降低,降低茎鞘干物质比例。管建慧等[12]通过研究不同灌水量对春小麦耗水特性和产量的影响发现,麦田总的耗水量会随着灌水次数和灌水量的增加而增大,而减少了对土壤水的消耗量。王红光等[13]通过在冬小麦不同生育期设置不同的灌水下限,研究了测墒补灌对小麦干物质积累的影响,结果表明冬小麦营养器官贮藏干物质向籽粒的分配量并未随着补灌水平的提高持续增加。王国栋等[14]研究了测墒补灌条件下北疆绿洲区春小麦的滴灌制度,研究表明灌水下限提高会导致灌溉频率和总灌水量的最终增加,但灌水效益和水分利用效率(WUE)并不随灌水量的增加而提高。

本研究采用滴灌施肥技术,根据各个生育期土壤墒情计算得到的水量对小麦进行灌水,研究不同生育期水分调控对河西地区滴灌春小麦的生长和水分利用效率的影响,以期探索出春小麦不同生育期的需水规律,为河西地区春小麦节水增产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在甘肃省武威市中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站进行,该地区地处腾格里沙漠边缘(37°50′49″N,102°51′01″E)。海拔高度1 500 m,大陆性温带干旱气候,年平均气温 8℃,年均日照时数 3 000 h 以上,年均降水量不足 200 mm,年均水面蒸发量 2 000 mm 以上。试验地土质为灰钙质轻砂壤土,根层土壤干容重为 1.32 $g\cdot cm^{-3}$,田间持水量为(体积含水率)21.3%,灌溉水埋深 25 ~ 30 m。

1.2 试验设计

试验分别在不同生育期设置 5 个土壤水分灌溉下限处理,分别记为 W1、W2、W3、W4 和充分灌溉(CK),每个处理以控制土壤含水量占田间含水量的百分数表示(表 1)。

表 1 不同生育期灌溉土壤水分下限处理(田间持水量的%)

Table 1 Lower limit of soil moisture at different growth stages for various treatments(% of field capacity)

处理 Treatment	苗期 ~ 分蘖 Emergence ~ tillering	拔节 ~ 孕穗 Jointing ~ booting	抽穗 ~ 开花 Heading ~ anthesis	灌浆 ~ 成熟 Filling ~ maturity
W1	55	60	55	50
W2	60	65	60	55
W3	65	70	65	60
W4	70	75	70	65
CK	75	80	75	70

每个处理 3 次重复,共计 15 个小区,小区面积为 50 m^2(5 m × 10 m)。供试春小麦品种永良 4 号,15 cm 等行距播种,1 带 4 行,第 2 ~ 3 行铺设滴灌带,各滴头流量相同。各处理施肥量均在同一水平

并随水施肥。试验中氮肥用尿素(含 N 46%),钾肥用硫酸钾镁(含 K_2O 52%),磷肥用磷酸二铵(含 P_2O_5 46%),各处理施肥量均在同一水平并随水施肥。按照当地大田施肥标准,分别在苗期施 N 18 kg·hm^{-2},P_2O_5 9 kg·hm^{-2},K_2O 9 kg·hm^{-2};在拔节期共施 N 54 kg·hm^{-2},P_2O_5 27 kg·hm^{-2},K_2O 27 kg·hm^{-2},分三次施入,抽穗期和灌浆期同拔节期;生育期内共施 N 180 kg·hm^{-2},P_2O_5 90 kg·hm^{-2},K_2O 90 kg·hm^{-2}。

1.3　测定指标与方法

1.3.1　土壤含水量的测定及灌水量计算　土壤含水量采用传统的土钻取土烘干法测定,取样深度 40 cm;各处理土壤含水量小于设置下限即进行灌溉,灌至田间持水量的 100%,计划湿润层深度为 60 cm。灌水量的计算公式[14]如下:

$$M = 10 \times \gamma \times H \times (100\% \times \theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

式中,M 为灌水量(mm);γ 为土壤容重(g·cm^{-3});H 为计划湿润层深度(cm);θ_i 为田间持水量;θ_j 为测定的土壤含水量。

1.3.2　生长指标的测定　株高:在分蘖、孕穗、开花、灌浆 4 个生育期,每小区连续选取 5 株小麦植株,测定小麦株高。

叶面积指数(LAI):在分蘖、孕穗、开花、灌浆 4 个生育期,每个小区随机选取 3 个点,利用 SUNSAN 冠层分析仪对每个小区的叶面积指数进行测定。

干物质积累与分配:在分蘖、孕穗、灌浆 3 个生育期每小区连续选取 20 株小麦完整植株;开花期和成熟期按茎叶鞘、颖壳 + 穗轴和籽粒分别取样,放入 105℃烘箱中杀青 15 min,80℃烘 48 h 至恒重,称干重。花前与花后的同化物转运量和转运率,计算公式[22]如下:

营养器官开花前贮藏干物质转运量 = 开花期干重 - 成熟期干重;

营养器官开花前贮藏干物质转运率(%) = (开花期干重 - 成熟期干重)/开花期干重 × 100;

开花后干物质输入籽粒量 = 成熟期籽粒干重 - 营养器官花前贮藏干物质转运量;

对籽粒产量的贡献率(%) = 开花前营养器官贮藏干物质转运量/成熟期籽粒干重 × 100。

1.3.3　籽粒产量　成熟期每个小区选取代表性样点 1 m^2,脱粒考种测产,然后烘干重,折算成公顷产量。

1.3.4　水分利用效率(WUE)

$$WUE = Y/ET \quad (2)$$

式中,Y 为作物产量(kg·hm^{-2}),ET 为全生育期内累积作物耗水量(mm)。

作物耗水量[14]通过水量平衡法得到,计算如式(3):

$$ET_{1-2} = 10\sum_{i=1}^{n}\gamma_i H_i(\theta_{i1} - \theta_{i2}) + I + P + K \quad (3)$$

式中,ET_{1-2} 为阶段耗水量(mm);i 为土壤层数;n 为总土层数;γ_i 为第 i 层土壤干容重(g·cm^{-3});H_i 为第 i 层土壤厚度(mm);θ_{i1} 和 θ_{i2} 为第 i 层土壤时段初和时段末的含水率;I 为时段内的灌水量(mm);P 为有效降水量(mm);K 为地下水补给量(mm),由于该地区地下水埋深在 25 ~ 30 m,故 $K = 0$。有效降雨量 P_0 计算如式(4)

$$P_0 = \begin{cases} 0.5 \times TP - 5 & (TP < 50\ \text{mm}) \\ 0.7 \times TP - 15 & (TP > 50\ \text{mm}) \end{cases} \quad (4)$$

式中,P_0 为有效降水量(mm);TP 为总的降雨量(mm)。

1.4　数据分析

采用 SPSS22.0 统计分析软件对试验数据进行显著性方差分析;采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理;采用 Origin 9.3 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　生育期水分调控对春小麦生长的影响

2.1.1　株高　由图 1 可以看出,随着小麦的生长,不同处理条件下的小麦株高变化趋势相同,均表现为开花期前增长迅速,开花期后由于小麦由营养生长进入生殖生长,小麦株高增长缓慢或停止生长。但各处理对小麦株高的影响不同,在分蘖期,不同水分处理对株高影响不显著;孕穗期株高迅速增加,其中 W4 株高增长速率最大(2.44 cm·d^{-1}),分别比 W1、W2、W3、CK 高 53.40%、39.52%、5.02% 和 9.74%,这说明灌水量的增加会增大小麦株高的增长速率,但水分过高增长速率有所下降;开花期与灌浆期处理间株高差异性相同,在灌浆期,充分灌溉(CK)处理株高最大(84 cm),分别比 W1、W2、W3、W4 高 22.27%、18.81%、7.42% 和 2.19%,其中 W4 与 CK 差异不显著($P > 0.05$)。以上结果表明,小麦株高随着灌水量的增加而增大,但是充分灌溉对小麦株高的影响不显著($P > 0.05$)。

2.1.2　叶面积指数(LAI)　由图 2 可以看出,不同水分处理下的 LAI 生长变化均表现为先增后减的趋势,各处理的 LAI 最大值均出现在孕穗期。孕穗期 CK 的 LAI 最大,分别比 W1、W2、W3、W4 高 94.74%、76.19%、25.42% 和 2.78%,CK 与 W4 没有显著性差异($P > 0.05$);分蘖 ~ 孕穗期,各处理的 LAI 随着小麦植株的生长逐渐增大,其中 W4 的 LAI

增长量最大(0.9),这表明灌水量的增加有利于植株叶片的生长,但是充分灌溉对小麦叶面积的影响不显著($P>0.05$);开花~灌浆期 W1、W2、W3、W4、CK 的 LAI 减小速率分别比孕穗~开花期的减小速率高 60.00%、49.33%、42.22%、33.33%和 6.67%,其中充分灌溉(CK)处理的减小速率变化量最小。这说明各处理的 LAI 在开花~灌浆期减小速率较大,同时充分灌溉能够延缓叶片衰老。

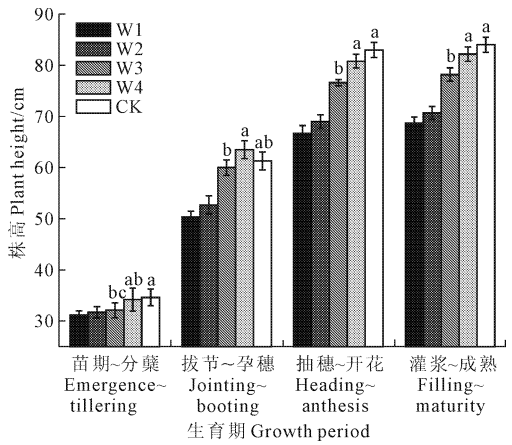

图 1 不同生育期水分调控对春小麦株高的影响

Fig.1 Effects of water regulation on plant height of spring wheat at different stages

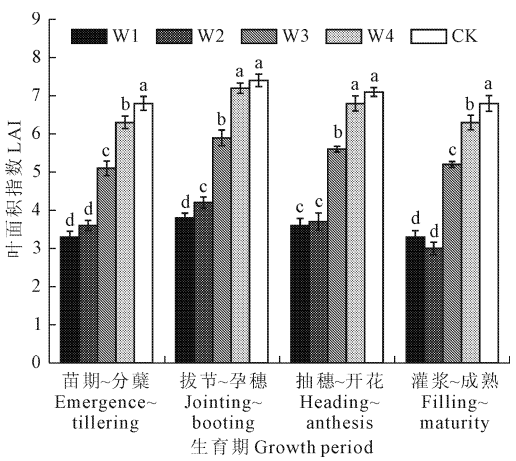

图 2 不同生育期土壤水分调控对春小麦叶面积指数(LAI)的影响

Fig.2 Effects of soil water regulation on LAI of spring wheat at different stages

2.2 生育期水分调控对地上部干物质积累的影响

由图 3 可以看出,随着生育期的推进,不同土壤水分条件下春小麦干物质积累量变化趋势表现为:在孕穗期前积累缓慢,随后干物质积累迅速加快,至开花期各处理的地上部干物质积累速率均达到峰值,而后积累逐渐变缓,在成熟期各处理地上部干物质积累量达到最大值。孕穗期充分灌溉(CK)处理干物质累积最大,各处理出现显著差异;孕穗~开花期小麦的营养生长与生殖生长同时进行,前期以叶为主,后期小麦茎秆和穗也有显著增加;随着灌水量的增加,各处理的干物质积累速率也逐渐增大,其中 W4 的干物质积累速率最大,分别比 W1、W2、W3 和 CK 高 22.76%、17.84%、12.00%和16.67%,其中充分灌溉(CK)处理的积累速率有所下降,这说明,水分过多使得营养生长过盛,营养生长与生殖生长失调,不利于小麦干物质的积累。开花~灌浆期 W1、W2、W3、W4、CK 的地上部干物质积累速率分别为 128.32、139.90、200.50、229.91 $kg\cdot d^{-1}\cdot hm^{-2}$ 和 214.76 $kg\cdot d^{-1}\cdot hm^{-2}$,分别比孕穗~开花期减少 67.93%、66.44%、54.29%、53.20%和 48.99%。这表明,开花期后小麦地上部干物质积累速率下降,同时高灌水量能够延缓干物质积累速率的下降。成熟期小麦地上部干物质最终积累量为 W4 > CK > W3 > W2 > W1,说明高灌水量并未使干物质积累量明显增加,而低灌水量会影响小麦个体的生长。

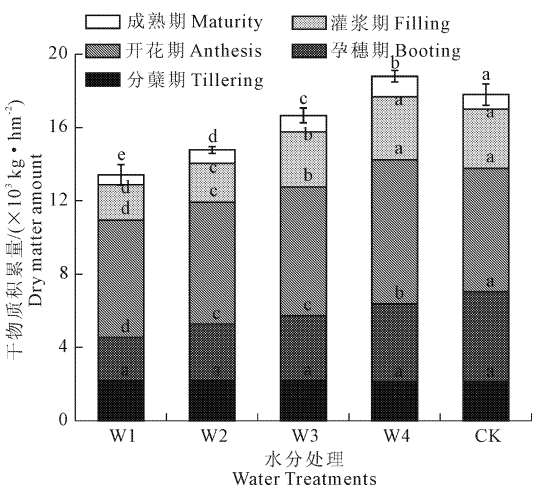

图 3 不同生育期土壤水分调控对春小麦干物质积累量的影响

Fig.3 Effects of soil water regulation on dry matter amount of spring wheat at different stages

2.3 生育期水分调控对春小麦地上部干物质分配和同化物转运的影响

由表 2 可以看出,成熟期不同土壤水分调控条件下,春小麦干物质在各器官中的分配量和分配比例有所差异,可是均满足籽粒 > 茎叶鞘 > 穗轴 + 颖壳。这是由于,各处理小麦茎叶鞘以及穗轴 + 颖壳中的干物质大部分向籽粒中运输,故其分配量和分配比例较小。同时除籽粒外,春小麦的干物质分配量及分配比例均随着灌水量的增加不断增大。而不同处理条件下的小麦籽粒干物质中,W4 分配量最

大,分别比 W1、W2、W3、CK 高 44.71%、30.85%、15.49%、17.14%。由此可以看出,土壤水分的增加有利于春小麦前期的营养生长,进而对成熟期营养器官中干物质的积累有促进作用;与此同时籽粒的干物质分配量并未随着灌水量的增加而持续增大,这表明灌水量过高不利于同化物向籽粒的分配,进而也会对小麦的产量产生影响。

表 2　土壤水分调控对春小麦成熟期干物质分配的影响

Table 2　Effects of soil water regulation on dry matter distribution at mature stage of spring wheat

处理 Treatments	茎秆 + 叶鞘 + 叶片 Stem + sheath + leaf		穗轴 + 颖壳 Spike axis + glume		籽粒 Grain		总干重 Total dry matter amount/g
	数量 Amount/g	比例 Ratio/%	数量 Amount/g	比例 Ratio/%	数量 Amount/g	比例 Ratio/%	
W1	1.04d	31.04ab	0.61c	18.21ab	1.70c	50.75ab	3.35e
W2	1.20c	32.61a	0.60c	16.30b	1.88c	51.09ab	3.68d
W3	1.31b	31.57ab	0.71b	17.11b	2.13b	51.33ab	4.15c
W4	1.38ab	29.42b	0.85a	18.12ab	2.46a	52.45a	4.69b
CK	1.46a	32.88a	0.88a	19.82a	2.10b	47.73b	4.44a

注:同一列中不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Values within the same column with different letters are significantly different($P<0.05$). The same below.

由表 3 可知,各处理营养器官开花前贮藏干物质转运率和贡献率均表现为 W1 > W2 > W3 > W4 > CK,其中 CK 分别比 W1 减小 56.98%、66.49%,W4 分别比 W1 减小 22.60%、39.77%;开花后贮藏干物质积累量随着灌水量的增加逐渐增大,充分灌溉(CK)处理最大,W1、W2、W3、W4 分别比 CK 减小 51.71%、44.46%、31.48%和 2.10%,W4 与 CK 无显著性差异。以上结果表明,与 W1 相反,充分灌溉(CK)处理更有利于促进营养器官开花后贮藏的同化物向籽粒的运输,W4 则更有助于平衡花前与花后同化物向籽粒的再分配,进而有利于高产量的获得。

表 3　土壤水分调控对春小麦营养器官贮藏干物质向籽粒的转运量和开花后干物质积累量的影响

Table 3　Effects of soil water regulation on translocation amount of vegetative organs to grains and accumulation amount after anthesis in spring wheat

处理 Treatment	营养器官贮藏干物质转运量 DMTA /(kg·hm^{-2})	营养器官贮藏干物质转运率 DMTR /%	贮藏干物质转运量对籽粒的贡献率 CDMTATG /%	开花后干物质积累量 DMAAA /(kg·hm^{-2})	开花后干物质积累量对籽粒的贡献率 CDMAAATG /%
W1	3449a	45.30a	50.46a	3382c	49.54d
W2	3649a	43.13b	48.51a	3890c	51.49d
W3	3756a	41.69b	43.97b	4799b	56.03c
W4	2994b	35.06c	30.39c	6857a	69.61b
CK	1417c	19.49d	16.91d	7004a	83.09a

注 Note: DMTA—dry matter translocation amount; DMTR—dry matter translocation ratio; CDMTAATG—contribution of dry matter translocation amount to grains; DMAAA—dry matter accumulation amount after anthesis; CDMAAATG—contribution of dry matter accumulation amount after anthesis to grains.

2.4　生育期水分调控对春小麦产量、水分利用效率(WUE)的影响

由图 4 可以看出,土壤水分调控下春小麦产量和水分利用效率均满足先增加后减小的变化趋势,但是产量和水分利用效率的最大值并不出现在同一处理。不同处理春小麦最终产量为 W4 > CK > W3 > W2 > W1。其中,W4 产量达到 7 476.04 kg·hm^{-2},分别比 W1、W2、W3、CK 显著增加 73.86%、40.58%、7.53%和 4.07%,W3 与充分灌溉(CK)没有显著性差异($P>0.05$)。由此可知,随着灌水量的增加,春小麦的籽粒产量也在增大,但水分过多会导致小麦产量的下降,这也说明过量灌水不利于小麦的节水增产。不同土壤水分调控处理下,小麦水分利用率并未随着灌水量的增加持续增大。其中 W1 的水分利用效率最低,仅为 13.33 kg·mm^{-1}·hm^{-2},这是由于灌水量过低,抑制了小麦的生殖生长,进而影响小麦的水分利用效率。W3 的水分利用效率最高,为 17.36 kg·mm^{-1}·hm^{-2},分别比 W4、充分灌溉(CK)增

加 2.90%和 12.44%，W3 与 W4 没有显著性差异($P>0.05$)。综上所述可知，随着灌水量的增加，小麦的产量和水分利用效率均呈先增大后减小的变化趋势，因此对小麦进行适宜水分调控对其节水增产起到积极的作用。

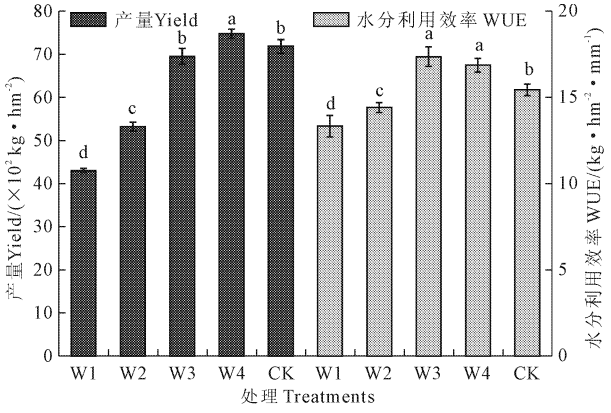

图 4 土壤水分调控对春小麦产量和水分利用效率的影响

Fig.4 Effects of soil water regulation on yield and water use efficiency of spring wheat

3 讨 论

本研究发现，各个生育期不同程度的土壤水分亏缺对于春小麦株高有显著性影响。适宜的水分胁迫不利于株高的增长，但同时也增加了小麦的抗倒伏能力，提高了小麦的产量。在各个生育期内充分灌溉(CK)处理都要显著高于水分胁迫处理(W1)，这是由于高水有利于小麦株高的生长，这与王振华等[15]研究结果一致。在本研究中，小麦株高分蘖～孕穗期的增长速率显著大于其他生育期，这与王冀川等[16]认为的拔节～扬花期土壤水分对株高生长影响最大有差异。随着小麦的生长，小麦叶片也在不断变化。本研究中发现，不同水分条件下的春小麦叶面积指数均呈先增大后减小的变化趋势，在孕穗期达到峰值。但是在各生育期内，W1 的叶面积指数始终最小，这说明高灌水量会使春小麦的叶面积显著增加[14]。

有研究表明[17-18]不同水分处理下，适宜的水分亏缺更有利于小麦干物质积累。在本研究中，各处理春小麦干物质积累量变化趋势相同，其中 W4、CK 始终高于 W1、W2、W3，在开花期各处理干物质积累速率达到峰值，其中 W4、CK 始终高于 W1、W2、W3 处理；在开花期各处理干物质积累速率均达到最大值，这与前人[19]研究结果一致。董剑等[20]研究发现高灌水量有利于干物质向营养器官的分配积累，不利于籽粒干物质的积累。本研究表明，成熟期春小麦干物质在营养器官中的分配量及分配比，均随着灌水量的增加不断增大。而不同处理条件下的小麦籽粒干物质中，W4 分配量最大，这是由于适度的水分胁迫在复水后，可以加快贮存在营养器官中的物质向籽粒中转移[21]。在本研究中，与充分灌溉(CK)相反，水分胁迫(W1)更有利于营养器官开花前贮藏的同化物向籽粒的运输，这与前人[22]研究结果一致。

徐翠莲等[23]研究发现产量的提高必然需要消耗大量的水分，即高产建立在高耗水量的基础之上。本研究中，各处理的产量 W4 > CK > W3 > W2 > W1，这说明灌水量过高使小麦产量有下降趋势。水分利用效率能综合反映耗水量与籽粒产量的相互关系[24]。张忠学等[25]认为供水量越多，耗水量越大，水分利用效率随着灌水次数和灌水量的增多逐渐降低。Panda R K 等[26]连续三年研究了水分亏缺对小麦生长的影响，结果表明与充分灌溉相比，水分亏缺条件下的小麦产量和水分利用效率较高。本研究表明，随着灌水下限的提高，水分利用效率呈先增加后减少的变化趋势。其中 W3 最大，W4 与 CK 没有显著性差异，这说明较高的灌水下限并不能保证高产量和水分利用效率。因此为使不同土壤水分调控下滴灌春小麦的高产与节水达到统一，还需要进一步的研究和验证。

4 结 论

生育期水分调控，对滴灌春小麦的生长、水分利用效率有显著性影响。各处理株高均随着灌水量的增加不断增大，但叶面积指数呈先增大后减小的变化趋势，在孕穗期达到最大值。其中充分灌溉条件下，春小麦的株高和叶面积均高于其他处理，但 W4 与其并没有显著性差异。小麦干物质的积累、分配是产量形成的基础，各处理的干物质积累量随着生育期的推进逐渐增大，其中 W4 干物质积累量和成熟期籽粒中干物质分配量均最大，比充分灌溉(CK)处理分别显著高 5.63%和 17.14%。与此同时，本研究中，W3 处理的水分利用效率最高，但其产量却显著低于 W4 处理。W4 处理作为产量最大的处理，比 CK 显著增加 4.07%，灌水量却低了 7.75%。综上可知，生育期适宜的水分调控更有利于春小麦的生长和高产的获得，从节水增产的角度考虑，W4 可作为基于本试验条件下较适宜的水分处理。

参 考 文 献：

[1] Shan L S, Li Y, Zhao R F, et al. Effects of deficit irrigation on daily

and seasonal variations of trunk sap flow and its growth in Calligonum arborescens[J]. Journal of Arid Land, 2013,5(2):233-243.
[2] 吴立峰.不同灌水和施氮对河西地区春小麦生长和水分利用的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2011.
[3] Wang Z M, Zhang B, Li X Y, et al. Using CropSyst to simulate spring wheat growth in black soil zone of northeast China[J]. Pedosphere, 2006,16(3):354-361.
[4] 杨建仓.我国小麦生产发展及其科技支撑研究[D].北京:中国农业科学院,2008.
[5] 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等.调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,1998,14(4):88-93.
[6] Yohannes F, Tadesse T. Effect of drip and furrow irrigation and plant spacing on yield of tomato at Dire Dawa, Ethiopia[J]. Agricultural Water Management, 1998,35(3):201-207.
[7] El Tilib A M A, El Mahi Y E, Magid H M A, et al. Response of wheat to irrigation frequency and manuring in a salt-affected semi-arid environment[J]. Journal of Arid Environments, 1995,31(1):115-125.
[8] 褚鹏飞,王　东,张永丽,等.灌水时期和灌水量对小麦耗水特性、籽粒产量及蛋白质组含量的影响[J].中国农业科学,2009,42(4):1306-1315.
[9] Du T, Kang S, Sun J, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China[J]. Agricultural Water Management, 2010,97(1):66-74.
[10] 蒋桂英,魏建军,刘　萍,等.滴灌春小麦生长发育与水分利用效率的研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(6):50-54,73.
[11] 党根友,魏亦勤,刘旺清,等.灌水模式对春小麦光合性能和干物质生产的影响[J].麦类作物学报,2015,35(2):198-206.
[12] 管建慧,张永平,蒋阿宁.不同灌水处理对春小麦耗水特性及产量的影响[J].中国农学通报,2009,25(8):272-276.
[13] 王红光,于振文,张永丽,等.测墒补灌对小麦光合特性和干物质积累与分配的影响[J].应用生态学报,2011,22(10):2495-2503.
[14] 王国栋,曾胜和,周建伟,等.基于控墒补灌的春小麦滴灌制度研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):19-25.
[15] 王振华,郑旭荣,姜国军.不同灌水量对滴灌春小麦生长和生理指标的影响[J].核农学报,2015,29(3):538-548.
[16] 王冀川,徐翠莲,韩秀锋,等.不同土壤水分对滴灌春小麦生长、产量及水分利用效率的影响[J].农业现代化研究,2011,32(1):115-119.
[17] 杨晓亚,于振文,许振柱.灌水量和灌水时期对小麦耗水特性和氮素积累分配的影响[J].生态学报,2009,29(2):846-853.
[18] 郑成岩,于振文,马兴华,等.高产小麦耗水特性及干物质的积累与分配[J].作物学报,2008,34(8):1450-1458.
[19] 刘克礼,高聚林,张永平,等.旱作春小麦干物质积累规律的研究[J].麦类作物学报,2003,23(4):75-78.
[20] 董　剑,赵万春,高　翔,等.水氮调控对小麦植株干物质积累、分配与转运的影响[J].华北农学报,2012,27(3):196-202.
[21] 刘　培.土壤水分胁迫对作物的生长发育、生理特征及其产量影响的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
[22] 韩占江,于振文,王　东,等.测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J].作物学报,2010,36(3):457-465.
[23] 徐翠莲,王冀川,高　山,等.土壤水分调控对滴灌春小麦产量及水分利用的影响[J].华北农学报,2013,28(3):127-132.
[24] 刘小刚,张富仓,田育丰,等.限量灌溉对石羊河流域春小麦根区水氮迁移和利用的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):57-62.
[25] 张忠学,于贵瑞.不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2003,21(2):1-4.
[26] Panda R K, Behera S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions[J]. Agricultural water management, 2003,63(1):37-56.

(上接第 164 页)

[17] 王俊国.建薯 1 号马铃薯生育期适宜土壤水分指标研究[J].安徽农业科学,2010,38(32):18119-18120,18154.
[18] 刘战东,肖俊夫,于秀琴.不同土壤水分处理对马铃薯形态指标、耗水量及产量的影响[J].中国农村水利水电,2010,(8):1-3,7.
[19] Turner N C. Plant Water Relations and Irrigation Management[J]. Agri Water Manag, 1990,(17):59-75.
[20] 蔡焕杰,邵光成,张振华.不同水分处理对膜下滴灌棉花生理指标及产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2002,30(4):29-32.
[21] Shock C C, Zalewski J C, Stieber T D, et al. Impact of early - season water deficits on russet bur bank plant development, tuber yield and quality[J]. Am Potato J, 1992,69(12):793-803.
[22] Shock C C, Feibert E B G, Saunders L D. Potato yield and quality response to deficit irrigation[J]. Hort Science, 1998,33(4):655-659.
[23] Anne M, Boland. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach[J]. Journal of Hort - I cultural Science, 1993,68(2):261-264.
[24] Blackman P G, Davies W J. Root to shoot communication in maize plants of the effects of soil drying[J]. J Exp Bot, 1985,(36):39-48.
[25] 赵海超,抗艳红,龚学臣,等.干旱胁迫对不同品种马铃薯生长指标的影响[J].安徽农业科学,2008,36(28):12102-12104.
[26] 高占旺,庞万福,宋伯符.水分胁迫对马铃薯的生理反应[J].马铃薯杂志,1995,9(1):1-6.
[27] 王　婷,海梅荣,罗海琴,等.水分胁迫对马铃薯光合生理特性和产量的影响[J].云南农业大学学报,2010,25(5):737-743.
[28] Fabeiro C, Martin de Sa nta Olalla F, Juan J A. Yield and size of deficit irrigated potatoes[J]. Agricultural Water Management, 2001,48(3):255-266.
[29] 张恒嘉,李　晶.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J].农业机械学报,2013,44(10):143-151.
[30] 何春燕,张　忠,何新林,等.作物水分生产函数及灌溉制度优化的研究进展[J].水资源与水工程学报,2007,18(3):42-45.
[31] 郑建华,黄冠华,黄权中,等.干旱区膜下滴灌条件下洋葱水分生产函数与优化灌溉制度[J].农业工程学报,2011,27(8):25-30.