

基于控墒补灌的春小麦滴灌制度研究

王国栋^{1,2}, 曾胜和^{1,2}, 周建伟^{1,2}, 陈云¹, 梁飞¹, 张磊¹

(1. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所;

2. 农业部作物高效用水石河子科学观测实验站, 新疆, 石河子, 832000)

摘要: 为优化北疆绿洲区滴灌春小麦的灌溉制度, 采用控墒补灌法研究了不同灌水量对滴灌春小麦光合特征、干物质分配及水分利用效率的影响。结果表明, 拔节~开花期小麦株高、干物质积累量和叶面积指数均随着灌水量的增加显著 ($P < 0.05$) 升高。小麦旗叶各时期净光合 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r) 增加显著 ($P < 0.05$) 升高, 而胞间 CO_2 浓度 (C_i) 变化趋势相反; 过量灌溉 T5 各时期 G_s 均有所降低, P_n 和 T_r 成熟期下降显著 ($P < 0.05$); 亏缺灌溉 (T1) P_n 峰值提前至孕穗期, 各时期 WUE 均最低、LS 最高。干物质向籽粒的分配、花前同化物转运率和对籽粒的贡献率随墒度随灌水量增加显著 ($P < 0.05$) 降低。二次曲线拟合表明, 灌水量为 371 mm 时可取得 $7\ 450\ kg \cdot hm^{-2}$ 的高产, 灌溉频率约每 7 d 灌 1 次是本地区春小麦的最佳灌溉方案。

关键词: 春小麦; 滴灌; 光合特性; 干物质分配; 籽粒产量; 水分利用效率

中图分类号: S512.1⁺2; S275.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)06-0019-07

Research on drip irrigation schedule for spring wheat based on soil moisture – controlled irrigation

WANG Guo-dong^{1,2}, ZENG Sheng-he^{1,2}, ZHOU Jian-wei^{1,2},

CHEN Yun^{1,2}, LIANG Fei¹, ZHANG Lei¹

(1. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science;

2. Experimental Station for Crop Water Use of Ministry of Agriculture, Shihezi, Xinjiang, 832000, China)

Abstract: In order to optimize the drip irrigation schedule of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in oasis region of northern Xinjiang, by using the soil moisture-controlled irrigation method, has researched the influences of different irrigation volumes to the photosynthetic characteristics, dry matter distribution and water use efficiency. The results showed that: In the jointing and anthesis stage, the plant height, dry matter accumulation amount and leaf area index of wheat were significantly rised with increasing irrigation water volume ($P < 0.05$). During the wheat flag leaf stage, the net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), and the transpiration rate (T_r) were significantly rised with increasing irrigation water volume ($P < 0.05$). However, variation trend of intercellular CO_2 concentration (C_i) was contrary to P_n , T_r and G_s . Excessive irrigation (T5) led to G_s decline in each growth stage. In mature stage, the P_n and T_r were significantly decreased ($P < 0.05$). Deficit irrigation (T1), the peak value of P_n was advanced to booting stage, the water use efficiency (WUE) total was the lowest in each growing stage, while the stomatic limitation (LS) was the highest. Dry matter allocation to grain, pre-anthesis assimilation translocation rate and the contribution to grain was significantly decreased with the increasing soil moisture and irrigation water volume ($P < 0.05$). Two curve fitting shown that when the irrigation volume was 371 mm, the high grain yield $7\ 450\ kg \cdot hm^{-2}$ can be obtained. It was the best irrigation interval about 7 days for spring wheat in this region.

Keywords: spring wheat; drip irrigation; photosynthetic characteristics; dry matter distribution; grain yield; water use efficiency.

收稿日期: 2014-04-10

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项“北方旱作农业滴灌节水关键技术研究及示范”(201203012); 863 计划“主要粮食作物滴灌关键技术及装备”(2011AA100508); 新疆农垦科学院青年基金“调亏缺灌溉对滴灌春小麦生长的影响研究”(YQJ201308)

作者简介: 王国栋(1982—), 男, 山西太谷人, 助理研究员, 主要从事作物灌溉制度研究。E-mail: 664812734@qq.com。

通信作者: 曾胜和(1962—), 男, 四川南充人, 副研究员, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: Zengsh3217@126.com。

淡水资源紧缺已成为新疆绿洲区制约作物产量和农业发展的重要因素,加之作物生长季有效降雨很少(50~100 mm),没有灌溉就没有农业生产^[1],农业生产对灌溉水的需求非常大。滴灌技术早已服务于棉花、加工番茄等作物,不仅可实现实时、精量的水、肥控制,还能有效减少地表径流、棵间蒸发和深层渗漏^[2]。小麦不仅是新疆播种面积最大的粮食作物,也是公认的高耗水作物^[3]。近年来,滴灌小麦技术在该地区得到了迅速推广,显示出其巨大的节水潜力。同时,合理灌溉制度的制定和水分生产效率的提高对实现农业生产效益最大化也尤为关键^[4]。

Mohamed 等^[5]在摩洛哥的研究表明,同传统灌溉比,滴灌冬小麦产量和水分利用效率可分别提高 28% 和 24%。Arafa 等^[6]认为埃及的滴灌小麦产量与喷灌比较减少了 16%~27%,但可节水 43%~76%。Wang 等^[7]研究了不同灌量新疆春小麦的水分消耗规律,认为灌水首先影响小麦的穗粒数,且拔节期-扬花期灌水较多的分配有利于 WUE 的提高。蒋桂英等^[8-9]则认为在 375 mm 的灌溉定额下,适合

小麦的滴灌频率为每 7 d 灌水 1 次,灌水在土壤剖面的分布均匀,有利于作物生长。

综上所述,尽管许多学者对不同地域的滴灌小麦灌溉制度进行了大量的研究,但多为定量灌溉或以灌溉次数为参数,未考虑适宜作物生长的最优土壤水分供应条件。鉴于此,本文采用控墒补灌法,探讨了不同灌量对春小麦光合特性、干物质积累与分配、产量及水分利用效率的影响,这将对本区春小麦最优田间灌溉制度的建立具有一定指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年 3—7 月在新疆石河子天业化工生态园试验田(45°38'N, 86°09'E)进行。研究区域属于典型的温带大陆性气候,年均气温 6.5℃~7.2℃,年平均降雨量 115 mm、蒸发量 1 942 mm,蒸降比 16.9。试验土壤为灌耕灰漠土(灌淤旱耕人为土),试验地 0~40 cm 土壤性质见表 1。

表 1 试验土壤耕层容重、田间持水量和养分含量情况

Table 1 The soil bulk density, field capacity and nutrient content in experimental field

土层 Soil layer /cm	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	田间持水量 Field capacity /%	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline hydrolytic - N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Olsen - P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Olsen - K /(mg·kg ⁻¹)
0~20	1.15	21.03	24.26	105.07	13.11	55.81
20~40	1.08	21.58	27.12	116.21	14.38	36.16

试验采用随机区组设计,设置 5 个土壤水分灌溉下限处理,即不同生育时期土壤水分控制水平为田间持水量的百分数(表 2)。供试品种新春 22 号,15 cm 等行距播种,1 管 4 行,第 2~3 行铺设滴管带,播种密度 6.3×10^6 株·hm⁻²,滴头流量 2.4 L·h⁻¹,小区面积 60 m²,重复 3 次,井水滴灌,单独水表计量。施肥量同一水平(N 225 kg·hm⁻², P₂O₅ 105 kg·hm⁻², K₂O 75 kg·hm⁻²)。氮肥、钾肥全部滴施;磷酸一铵基施 30%,滴施 70%。2013 年 03 月 23 日播种,07 月 14 日收获,其它管理措施同大田一致。

1.2 土壤水分测定及灌水量计算

采用美国产 Watchdog 3680WD1 型土壤水分传感系统(Spectrum Technologies, Inc., USA)实时监测土壤墒度。传感器埋置滴管带横向 23 cm,探头埋深 40 cm。探头读数(y)与烘干法测定土壤含水率(x)建立函数关系: $y = 267.1x - 22.95$ ($R^2 = 0.913$)。各处理土壤水分小于设置下限即进行滴灌,灌至田间持水量的 100%,计划湿润深度 60 cm,每次灌水量计算如下:

表 2 不同处理土壤水分下限控制设计(田间持水量的%)

Table 2 Design of lower soil moisture limitation for different treatments(% of field capacity)/% θ_i

处理 Treatment	苗期-拔节 Seedling - Jointing	孕穗-乳熟 Booting - Milking	成熟-收获 Maturity - Harvest
T1	60	65	50
T2	65	70	55
T3	70	75	60
T4	75	80	65
T5	80	85	70

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

式中, M 为灌水量(mm); γ 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); H 为计划湿润深度(cm); θ_i 为田间持水量; θ_j 为土壤水分传感器测定的土壤含水率。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 株高、叶面积指数、光合参数及干物质质量测定 于拔节、孕穗和扬花 3 个时期每小区连续选取 20 株小麦植株,测定小麦株高和叶面积指数 LAI(叶

面积指数 = 叶长 × 叶宽 × 0.78 / 播种面积)。小麦旗叶光合特征采用 LCpro + 型便携式光合仪 (Bio-Scientific Ltd., UK) 测定净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (Tr) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 等参数, 分拔节、孕穗、开花、灌浆和乳熟 5 个时期, 上午 13:00 时自然光强测定, 并计算单叶水分利用效率 ($WUE_L = P_n / Tr$) 和气孔限制值 ($LS = 1 - C_i / C_a$)。干物质的测定于拔节、孕穗期取完整植株; 开花期分叶、茎 + 叶鞘和穗; 成熟期分叶、茎 + 叶鞘、颖壳和籽粒, 取样长度 0.5 m 行长, 75℃ 烘干至恒重, 称重, 计算花前及花后的同化物转运量和转运率, 公式^[40]如下:

营养器官开花前贮藏同化物转运量 = 开花期干重 - 成熟期干重;

营养器官开花前贮藏同化物转运率 (%) = (开花期干重 - 成熟期干重) / 开花期干重 × 100;

开花后同化物输入籽粒量 = 成熟期籽粒干重 - 营养器官花前贮藏物质转运量;

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

1.3.2 籽粒产量与水分利用效率 成熟期各处理选取代表性取样点 1 m², 脱粒考种计产, 烘干称重, 折算为公顷产量。记载灌水量和不同时期的降雨量 (107.7 mm), 有效降雨量计算如式(2)^[11]; 小麦耗水量 ET_C 计算如式(3); 水分利用效率为 $WUE = Y / ET_C$ 。

$$P_0 = \begin{cases} 0.5 \times TP - 5 & (TP < 50 \text{ mm}) \\ 0.7 \times TP - 15 & (TP > 50 \text{ mm}) \end{cases} \quad (2)$$

表3 不同处理春小麦株高、干物质和叶面积指数变化

Table 3 Plant height, dry matter mass and leaf area index of spring wheat under different treatments

处理 Treatments	株高/cm Plant height			干物质(10 ³ kg·hm ⁻²) Dry Matter			叶面积指数 Leaf area index		
	拔节期 Jointing 04-29	孕穗期 Booting 05-18	开花期 Flowering 06-02	拔节期 Jointing 04-29	孕穗期 Booting 05-18	开花期 Flowering 06-02	拔节期 Jointing 04-29	孕穗期 Booting 05-18	开花期 Flowering 06-02
T1	41.4c	59.5b	69.2c	4.52e	7.68d	20.21d	3.80d	4.90d	4.21c
T2	45.3b	62.1b	78.5b	5.12d	9.20c	22.88c	4.87c	5.94cd	5.03bc
T3	48.9a	75.1a	88.8a	7.05c	9.29c	25.13b	6.32b	6.54bc	5.72b
T4	49.7a	71.4a	91.5a	7.85b	10.34b	26.11b	7.27a	7.34ab	6.02b
T5	47.6ab	74.2a	90.3a	10.6a	11.02a	30.49a	7.37a	8.04a	7.48a

注:同一列中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

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

2.2 不同灌水量对小麦各生育时期旗叶光合特征的影响

如图1所示,小麦旗叶 P_n 、 G_s 、 Tr 和 WUE_L 随生

式中, P_0 为有效降水量 (mm); TP 为总的降雨量 (mm)。

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

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 ($g \cdot cm^{-3}$); 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; M 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)。

1.4 统计分析

使用 SPSS16.0 软件对试验数据进行显著性方差分析, LSD 法比较; 图表制作采用 Excel 2007 和 SigmaPlot 9.0 共同完成。

2 结果与分析

2.1 灌水对小麦株高、干物质质量和叶面积指数的影响

由表3可知,各处理小麦株高均为开花期 > 孕穗期 > 拔节期,拔节期和开花期 T4 株高最大,孕穗期 T3 最大, T1 各时期株高最低 ($P < 0.05$)。干物质积累至开花期迅速升高,积累量随土壤水分及灌水量的增加呈显著增加趋势 ($P < 0.05$)。不同处理的叶面积指数孕穗期最高,开花期后开始降低;同一生育时期,叶面积指数随灌水量的增加呈显著趋势,各时期 T5 分别比 T1 高出 48.4%、39.0% 和 43.7%,这表明,高水分及灌水量下可使小麦在生育后期保持更大的绿叶面积,有利于光能的截获,并向籽粒提供更多的同化物。

育进程的推移均呈单峰变化趋势。在 T1 和 T2 处理下, P_n 于孕穗期到达峰值,之后迅速下降;其余处理的 P_n 峰值推迟至扬花期; T3、T4 处理扬花期后 P_n

下降速率较为缓慢,叶片表现出较强的光合能力;处理 T5 摘度过高,乳熟期 P_n 的下降较快,不利于同化物向籽粒的运输。各处理的 Tr (图 1B)至灌浆期达到最高,之后不同程度降低;乳熟期水分亏缺和过量的 T1、T2 和 T5 处理, Tr 显著降低($P < 0.05$),同

T4 相比分别降低 40.04%、31.75% 和 29.51%。各处理 WUE_L (图 1C)孕穗期后逐渐下降,T1 的 WUE_L 全生育期显著低于其它($P < 0.05$),水分及灌量对 WUE_L 的影响显著。

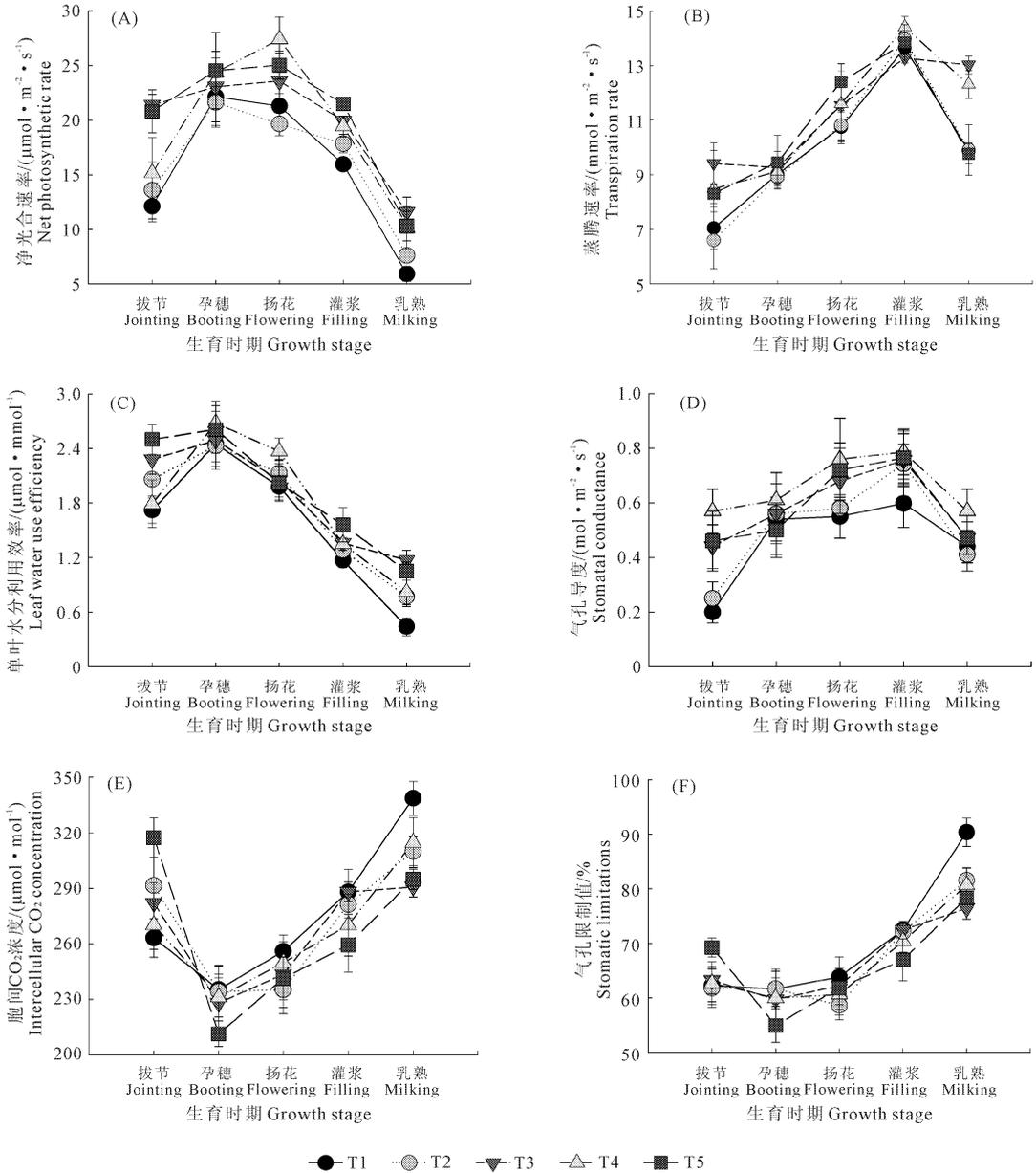


图 1 不同处理对各时期小麦旗叶净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (Tr)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、单叶水分利用效率 (WUE_L) 和气孔限制值 (L_s) 的影响

Fig.1 Effects of different treatments on net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (Tr), intercellular CO_2 concentration (C_i), leaf water use efficiency (WUE_L) and stomatal limitations (L_s) in different growth stages.

G_s 变化规律与 Tr 相同(图 1D),前中期逐渐升高,乳熟期显著降低,于灌浆期达到峰值;T4 全生育期保持最高,而 T1 显著低于其它($P < 0.05$);乳熟期 T5 下降显著。这表明,水分过高或过低均会引起

降低气孔开度,导致 P_n 和 Tr 下降。 C_i 与 L_s 随进程的推移均呈“V”型变化,孕穗期均最小;T1 处理 C_i 在孕穗-乳熟期最高($P < 0.05$),T5 最低。 L_s 变化趋势平缓,逐渐升高;至乳熟期,T1 显著升高($P <$

0.05),同时 C_i 并无显著降低。这表明, P_n 的降低并非气孔限制引起的,可能原因为叶片功能衰退降低了旗叶的光合与同化。

2.3 不同灌量对春小麦成熟期干物质分配和同化物转运的影响

由表4可知,成熟期小麦干物质在茎+叶+鞘和颖壳中的分配量均随土壤水分的增加呈显著增加 ($P < 0.05$)趋势,同时分配比例也呈递增趋势;干物质在籽粒中的分配量从处理 T1 到 T4 递增, T4 达到最高, T5 有所降低。小麦籽粒干重占地上部的比例又称为收获指数 (HI),本试验 T2 最高,之后随土壤水分及灌量的增加 HI 显著降低 ($P < 0.05$)。这表

明,水分及灌量的提高虽可增加干物质向籽粒的分配数量,但过量灌溉致使营养生殖过剩,同化物向籽粒的分配比例显著降低,不利于水分利用效率的提高。

营养器官开花前贮藏同化物向籽粒的转运量和转运率均为 T2 最高,之后逐渐降低 ($P < 0.05$);花前转运量对籽粒的贡献率随墒度及灌量增加呈显著 ($P < 0.05$)递减趋势;花后同化物输入籽粒量和对籽粒的贡献率变化趋势相反。这表明,土壤水分降低有利于花前储存碳库的再转运,升高则促进自花后同化物向籽粒的输入。适度的水分是同时保持花前和花后同化物向籽粒的运输的关键,有利于获得较高的籽粒产量。

表4 不同处理对春小麦成熟期干物质分配的影响

Table 4 Effects of different treatments on dry matter distribution in mature stage of spring wheat

处理 Treatments	茎叶鞘 Stem + leaf + sheath		颖壳 Grain husk		籽粒 Grain	
	数量/(g·stalk ⁻¹) Amount	比例/% Ratio	数量/(g·stalk ⁻¹) Amount	比例/% Ratio	数量/(g·stalk ⁻¹) Amount	比例/% Ratio
T1	0.98 ± 0.08c	31.35a	0.57 ± 0.05d	18.36b	1.57 ± 0.12d	50.29bc
T2	1.07 ± 0.07c	27.62b	0.70 ± 0.05c	18.10b	2.11 ± 0.12c	54.29a
T3	1.38 ± 0.09b	30.99ab	0.80 ± 0.07b	17.93c	2.27 ± 0.12bc	51.07b
T4	1.54 ± 0.11a	31.44a	0.95 ± 0.09a	19.37a	2.41 ± 0.08a	49.19c
T5	1.58 ± 0.11a	32.05a	0.99 ± 0.06a	20.00a	2.37 ± 0.17b	47.95d

注:同一列中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

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

表5 不同处理对开花后营养器官干物质再分配量和开花后积累量的影响

Table 5 Effects of different treatments on dry matter accumulation amount and dry matter redistribution amount after anthesis

处理 Treatments	开花前同化物 转运量 DMTAA /(g·stalk ⁻¹)	开花前同化物 转运率 DMTRA /%	花前转运量对 籽粒的贡献率 CDMTAATG /%	花后同化物 输入籽粒量 DMAAA /(g·stalk ⁻¹)	花后同化物对 籽粒的贡献率 CDMAAATG /%
T1	0.60 ± 0.15ab	37.85 ± 7.76a	38.13 ± 7.46a	0.97 ± 0.08e	61.87 ± 7.46c
T2	0.77 ± 0.06a	41.64 ± 2.07a	36.40 ± 3.49a	1.34 ± 0.13d	63.60 ± 3.49c
T3	0.50 ± 0.21b	26.01 ± 9.17b	21.88 ± 8.92b	1.77 ± 0.22c	78.12 ± 8.92b
T4	0.29 ± 0.06c	16.10 ± 3.54c	11.84 ± 2.38c	2.13 ± 0.07b	88.16 ± 2.38a
T5	0.24 ± 0.08c	13.52 ± 4.00c	8.93 ± 3.24c	2.50 ± 0.20a	91.07 ± 3.24a

注:同一列中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

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

DMTAA: Dry matter translocation amount after anthesis; DMTRA: Dry matter translocation ratio after anthesis; CDMTAATG: Contribution of dry matter translocation amount after anthesis to grains; DMAAA: Dry matter accumulation amount after anthesis; CDMAAATG: Contribution of dry matter assimilation amount after anthesis to grains.

2.4 不同灌水量对春小麦产量构成因素、水分利用效率影响

由表6可知,最终籽粒产量为 T4 最高,同 T1 相比高出 76.93%;灌溉频率随控水墒度的提高显著加快;总灌水量和小麦耗水量均随墒度的提高显著升高;灌溉效益与 WUE 均为 T3 和 T4 显著 ($P <$

0.05)高于其它处理, T1 最低。这表明,墒度下限提高导致了灌溉频率和总灌水量的最终增加,但灌溉效益和 WUE 并不随灌水量的增加而提高,小麦耗水量则主要受灌水量的影响,这和蒋桂英等^[8]人的研究相同。

表 6 不同处理对春小麦产量、灌溉效益和水分利用效率的影响

Table 6 Effect of different treatments on grain yield, irrigation benefit and water use efficiency of spring wheat

处理 Treatments	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	灌溉频率 Frequency /d	总灌水量 IA /mm	灌溉效益 IB /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	耗水量 ET _c /mm	水分利用效率 WUE /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
T1	4425.8d	13	266.7	16.59d	333.27	13.28c
T2	5220.1c	9	291.7	17.90c	365.05	14.30bc
T3	7720.7ab	7	350.0	22.06a	415.85	18.57a
T4	7830.5a	5	375.0	20.88b	437.95	17.88a
T5	7224.2b	4	433.3	16.67d	476.01	15.18b

注:同一列中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

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

IA: Irrigation amount; IB: Irrigation benefit; ET_c: Evapotranspiration; WUE: Water use efficiency.

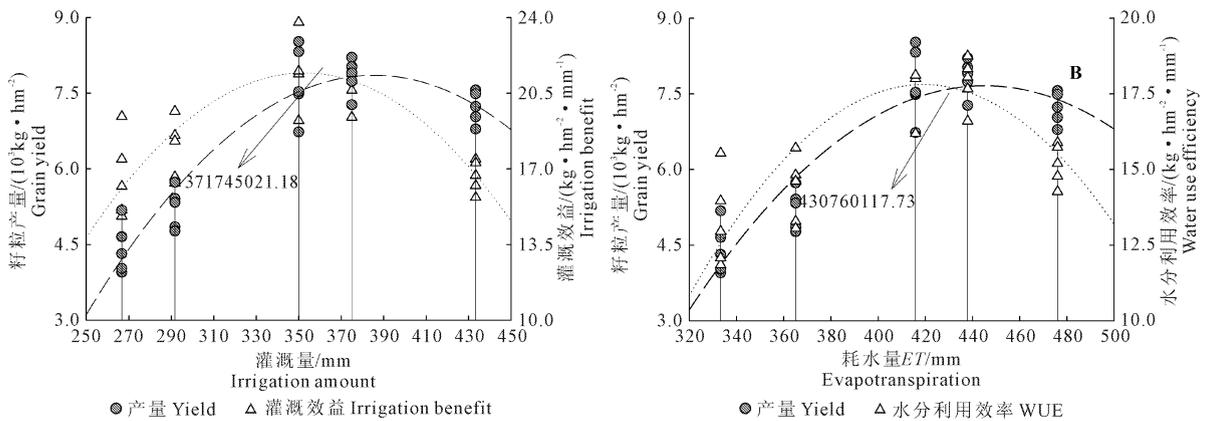


图 2 不同处理春小麦的产量、灌溉效益、水分利用效率与灌量、耗水量间的关系

Fig. 2 Relationships among yield, irrigation benefit, WUE and irrigation amount, ET of spring wheat in different treatments

产量、灌溉效益、水分利用效率分别与灌量、耗水量符合一元二次方程 $y = ax^2 + bx + c$ 的抛物线关系(图 2),公式如下:

$$Y_{CY} = -3.061e^{-1} + 1.997e^{-1}x - 2.591e^{-4}x^2$$

$$(R = 0.8258 > 0.549, n = 20, P < 0.01)$$

$$Y_{IE} = -6.851e^{-1} + 5.103e^{-1}x - 7.236e^{-4}x^2$$

$$(R = 0.8336 > 0.549, n = 20, P < 0.01)$$

$$Y_{CY} = -4.864e^{-4} + 2.530e^{-2}x - 2.843e^{-1}x^2$$

$$(R = 0.8236 > 0.549, n = 20, P < 0.01)$$

$$Y_{WUE} = -1.067e^{-2} + 5.941e^{-1}x - 7.085e^{-4}x^2$$

$$(R = 0.6865 > 0.549, n = 20, P < 0.01)$$

方差分析表明,灌水量与产量、灌溉效益,耗水量与产量和 WUE 间均呈极显著($P < 0.01$)的抛物线关系,但变化趋势并不同步,分别在 371 mm、7 450 kg·hm⁻²、21.18 mm·kg⁻¹·hm⁻²和 430 mm、7 601 kg·hm⁻²、17.73 mm·kg⁻¹·hm⁻²处交汇,理论上为最佳结合点,可同时取得最高的经济产量和最大的水分利用效率。

3 讨论与结论

3.1 不同墒度控制下补充灌溉对小麦生长发育影响的分析

小麦对水分亏缺或过量的响应比其它环境因素的改变更为敏感、复杂^[13], Finn 等^[14]认为干旱可导致小麦根系 ABA 浓度升高,根系衰老加速;渍水则引起呼吸速率降低,细胞分裂素减少,根系生长缓慢^[15]。王冀川等^[16-17]比较了亏缺、适水和丰水对小麦根系及地上部的响应,表明在适水条件下根系分布较为合理,且灌浆期单叶净光合(P_n)、群体光合(CAP)和群体叶源量(CLSC)长时间保持较高水平。Du 等^[18]则认为传统畦灌模式灌溉定额相同时灌水次数越多, P_n 和 Tr 较高,WUE_L也更高。土壤水分对同化物的积累、转运和分配的影响也是显著的,Ercoli 等^[19]认为灌浆期减少灌水可显著增加花前积累碳库向籽粒的转运,茎鞘储存碳库对籽粒产量的贡献更大。本研究结果表明,在拔节—扬花期叶面积随控墒下限及灌水量的提高显著($P < 0.05$)

升高;墒度过低小麦旗叶各生育时期净光合(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和 WUE_L 均显著降低, C_i 和 LS 最高;过量灌溉 T5 成熟期 P_n 和 T_r 下降显著($P < 0.05$)。同化物积累与分配受土壤水分的影响较大,干物质向籽粒的分配、花前同化物转运率和对籽粒的贡献率随墒度随灌水量增加显著($P < 0.05$)降低,最终籽粒产量在过量灌溉下也开始显著降低,不利于灌溉效益和 WUE 的提高。

3.2 基于灌溉效益和水分利用效率的灌溉制度优化

合理的灌溉定额确定是制定灌溉制度的重要指标,本试验基于灌溉效益和水分利用效率的考虑分别估算了滴灌春小麦的最佳灌溉量和耗水量。结果表明,籽粒产量、灌溉效益、 WUE 分别与灌溉量、耗水量呈二次抛物线关系,交汇点分别在 371 mm, 7 450 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 21.2 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 430 mm, 7 601 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 17.7 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。这和程裕伟等^[11]采用定量灌溉法估算的 ET_c 为 579 mm 时最大产量 5 377 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的结果有所不同。灌溉次数则是对灌水量在不同生育阶段进行水量配置的体现^[20]。蒋桂英等^[8]认为在 375 mm 灌量下,4 $\text{d}\cdot\text{次}^{-1}$ (高频)表层土壤贮水量较高;10 $\text{d}\cdot\text{次}^{-1}$ (低频)有利于水分的下渗和侧渗,但水分补给不及时;7 $\text{d}\cdot\text{次}^{-1}$ 作物产量最优。本试验的 T3 灌溉间隔也约为 7 $\text{d}\cdot\text{次}^{-1}$,灌溉效益、 WUE 和产量最高,这也与前人研究结果一致。二次曲线拟合表明,滴灌定额 371 mm(灌溉频率约 7 $\text{d}\cdot\text{次}^{-1}$)可保障土壤处于最优的水分供应状态,是本地区春小麦获得高产的最佳节水方案。虽然同一地域不同年份的春小麦耗水规律是基本相同的^[21],但具体方案还需根据当年的降水分布来确定灌溉时间,在实际生产中可适时调整、灵活掌握。

参考文献:

[1] 张涛,马富裕,郑重,等.滴灌条件下水氮耦合对春小麦光合特性及产量的影响[J].西北农学报,2010,19(6):69-73.

[2] El-Rahman G A. Water use efficiency of wheat under drip irrigation systems at al-magharah area, north Sinai, Egypt [J]. American - Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 2009, 5 (5):664-670.

[3] 薛丽华,胡锐,赛力汗,等.滴灌量对冬小麦耗水特性和干物质积累分配的影响[J].麦类作物学报,2013,33(1):78-83.

[4] 杨会颖,刘海军,李艳,等.膜下滴灌条件下土壤基质势对辣椒产量和水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2012, 30(1):54-60.

[5] Kharrou M H, Er-Raki S, Chehbouni A, et al. Water use efficiency and yield of winter wheat under different irrigation regimes in a semi-arid region[J]. Agricultural Sciences, 2011, 3(2):273-282.

[6] Arafa Y E, Wasif E A, Mehawed H E. Maximizing water use efficiency in wheat yields based on drip irrigation systems. Aust J Basic Appl Sci, 2009, 3:790-796

[7] Wang Jichuan, Xu Cuilian, Gao Shan, et al. Effect of water amounts applied with drip irrigation on water consumption characteristics and yield of spring wheat in Xinjiang[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2013, 5(9):1180-1185.

[8] 蒋桂英,刘建国,魏建军,等.灌溉频率对滴灌小麦土壤水分分布及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):38-42.

[9] 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.

[10] 胡梦芸,张正斌,徐萍,等.亏缺灌溉下小麦水分利用效率与光合产物积累运转的相关研究[J].作物学报,2007,33(11):1884-1891.

[11] 程裕伟,马富裕,冯治磊,等.滴灌条件下春小麦耗水规律研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):112-117.

[12] 中华人民共和国水利部. SL13-2004. 灌溉试验规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2005.

[13] Ahmad R, Qadir S, Ahmad N, et al. Yield potential and stability of nine wheat varieties under water stress conditions[J]. International journal of agriculture and biology, 2003, 5(1):7-9.

[14] Plauborg F, Abrahamsen P, Gjettemann B, et al. Modelling of root ABA synthesis, stomatal conductance, transpiration and potato production under water saving irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98:425-439.

[15] Gutiérrez D, Morcuende R, Pozo A. D, et al. Involvement of nitrogen and cytokinins in photosynthetic acclimation to elevated CO_2 of spring wheat[J]. Journal of Plant Physiology, 2013, 170(15):1337-1343.

[16] 王冀川,徐雅丽,高山,等.滴灌条件下根区水分对春小麦根系分布特征及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011, 29 (2):21-26.

[17] 王冀川,高山,徐雅丽,等.不同滴灌量对南疆春小麦光合特征和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(4):42-48.

[18] Du Taisheng, Kang Shaozhong, Sun Jingsheng, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97:66-74.

[19] Ercoli L, Lulli L, Mariotti M, et al. Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28 (2):138-147.

[20] 聂紫瑾,陈源泉,张建省,等.黑龙港流域不同滴灌制度下的冬小麦产量和水分利用效率[J].作物学报,2013, 39(9):1687-1692.

[21] 宁东峰,李志杰,孙文彦,等.节水灌溉对黄淮海地区冬小麦水分消耗与光合特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2010, 16 (4):852-858.