DOI: 10.3724/SP.J.1006.2010.01183

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

王红光 于振文* 张永丽 王 东

山东农业大学农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 山东泰安 271018

摘 要: 于 2007—2008 和 2008—2009 小麦生长季, 以高产中筋冬小麦品种济麦 22 为材料, 采用测墒补灌的方法, 研究推迟拔节水及不同灌水水平对冬小麦耗水量、耗水来源、单位土地面积上旗叶叶面积和蒸腾速率、株间蒸发量、籽粒产量及水分利用效率的影响。结果表明, 测墒补灌后 0~140 cm 土层能够达到目标含水量。相同补灌时期, 随补灌水平的提高, 拔节至开花阶段日耗水量增大, 0~120 cm 土层贮水消耗量减小, 生育期总灌水量和田间耗水量增加, 土壤贮水消耗量先增加后减小, 土壤贮水消耗量和降水量占田间耗水量的比例降低。相同补灌水平, 由拔节期推迟至拔节后 10 d 补灌则麦田日耗水量减小, 挑旗期日耗水量增大, 拔节至开花阶段 80~120 cm 土层土壤贮水消耗量增加, 生育期总灌水量和田间耗水量亦增加, 降水量、灌水量和土壤贮水消耗量占田间耗水量的比例不变; 灌浆初期单位土地面积上旗叶叶面积和蒸腾速率降低, 株间蒸发量增加; 公顷穗数降低, 穗粒数、千粒重、籽粒产量、水分利用效率和灌水生产效率增加。本试验条件下, 在拔节后 10 d 补灌至 0~140 cm 土层平均土壤相对含水量为 75%, 开花期补灌至 70% (2007—2008 年度) 是兼顾节水、高产的最优处理。

关键词: 冬小麦; 测墒补灌; 耗水量; 株间蒸发量; 水分利用效率

Effects of Delayed Irrigation at Jointing Stage and Irrigation Level on Consumption Amount and Resources of Water in Wheat and Farmland Evapotranspiration

WANG Hong-Guang, YU Zhen-Wen*, ZHANG Yong-Li, and WANG Dong

Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: Water-saving irrigation is a hotspot in cultivation research of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). Many investigations have been carried out to reduce the irrigation frequency and water amount. However, the conclusions are quite different due to the great discrepancies on precipitation and experimental condition. In this study, a strategy of water-controlled irrigation based on measuring soil water content was adopted, and several delayed irrigation treatments were tested for their effects on water consumption, water use efficiency (WUE), and wheat yield in two sites of Shandong province, China in 2007–2008 and 2008–2009 growing seasons. The expected water content of 0–140 cm soil layer was designed for 65–80% in different treatments, and two irrigations were given at jointing or 10 d after jointing and flowering stages. In the treatments irrigated at the same time, the daily water consumption from jointing to flowering stage and the water consumption amount in the whole growth duration increased with promoting the level of supplemental irrigation, but the soil water consumption amount in 0–120 cm soil layer decreased. The consumption amount of soil water showed an increase–decrease trend, and its percentage to the total water consumption amount decreased. Simultaneously, the consumption percentage of precipitation to the total water consumption amount was also reduced. Under the same irrigation level, compared with normal irrigation at jointing, the delayed irrigation (at 10 d after jointing) reduced the daily water consumption from jointing to 10 d after jointing stage, but promoted the daily water consumption at flagging stage. From jointing to flowering stage, the consumption amount of soil water in 80–120 cm soil layer, the total water consumption amount increased with the more irrigation water supplied. However, the consumption percentages of precipitation, supplemental irrigation, and soil water were in minor changes. At early filling stage, the flag leaf area and the transpiration per unit area of soil decreased and the evaporation increased in the delayed irrigation treatment. Although reduced spike number per hectare, the grain number, thousand-grain weight, grain yield, WUE, and irrigation production efficiency were higher in the delayed irrigation treatment than in the treatment of irrigation at jointing stage. Under the experimental condition (2007–2008 growing season), the

本研究由国家自然科学基金项目(30871478)和农业部现代小麦产业技术体系项目(nycytx-03)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 于振文, E-mail: yuzw@sdaa.edu.cn; Tel: 0538-8241484

第一作者联系方式: E-mail: jlwanghongguang@163.com

Received(收稿日期): 2010-02-10; Accepted(接受日期): 2010-04-21.

first supplemental irrigation at 10 d after joining with a relative water content of 75% in 0–140 cm soil layer and the second irrigation at flowering with a relative water content of 70% were considered to be an optimal water-saving management for wheat high-yielding production.

Keywords: Winter wheat; Supplemental irrigation based on testing soil moisture; Water consumption amount; Evaporation; Water use efficiency

水资源不足是限制我国北方小麦生产的主要因素,提高水分利用效率和灌溉水利用率是小麦生产迫切需要解决的问题^[1]。有研究表明,在底墒充足条件下,春季灌两水,每次灌水量 60 mm 即可满足小麦对水分的需求^[2],拔节前轻度水分亏缺不会对小麦籽粒产量造成不利影响^[3],甚至会使其略有增加^[4]。小麦拔节期 0~50 cm 土层平均含水量的调亏下限为 65%,孕穗至灌浆前期 0~100 cm 土层含水量下限为 60%,灌浆后期 0~100 cm 土层含水量下限为 50%^[5]。在不降低作物产量的情况下减少作物蒸腾量,是节水农业的核心问题^[6]。关于灌水次数和灌水量及小麦各生育时期土壤水分亏缺下限已有很多研究,但在高产条件下推迟拔节水和不同灌水水平对小麦耗水特性和农田蒸散量的影响研究较少。本试验采用测墒补灌的方法,研究高产条件下推迟拔节水和不同灌水水平对冬小麦耗水量、耗水来源、旗叶蒸腾速率、株间蒸发量、籽粒产量及水分利用效率的影响,以期对小麦节水高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于 2 个小麦生长季分别在山东泰安山东农业大学实验农场(117.15°E, 36.15°N)和在山东兖州小孟镇史王村大田(116.41°E, 35.41°N)进行田间试验,供试品种均为高产中筋品种济麦 22。

2007—2008 生长季试验田土壤类型为棕壤,播种前 0~20 cm 土层含有机质 1.4%、全氮 0.1%、碱解氮 94.2 mg kg⁻¹、速效磷 38.2 mg kg⁻¹、速效钾 80.0 mg kg⁻¹, 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180 和 180~200 cm 土层的土壤含水量分别为 17.8%、18.4%、20.2%、19.6%、20.4%、23.4%、28.3%、28.9%、25.6%和 26.4%, 0~140 cm 土层平均土壤容重为 1.5 g cm⁻³,平均田间持水量为 25.2%。小麦生育期间降水量,播种至冬前期为 21.1 mm,冬前至返青期为 12.5 mm,返青至拔节期为 13.8 mm,拔节至开花期为 57.3 mm,开花至成熟期为 37.0 mm。设 7 个处理(表 1),除拔节期和开花

表 1 不同处理的目标相对含水量和实际相对含水量(0~140 cm 土层平均值)及灌水量

Table 1 Expected relative water content and actually relative water content (0–140 cm) and irrigation amount of different treatments

处理 Treatment	拔节期或拔节后 10 d Jointing or 10 d after jointing stage				开花期 Flowering stage			
	目标相对含水量 ERWC (%)	相对含水量 RWC (%)	相对误差 RE (%)	灌水量 Irrigation amount (mm)	目标相对含水量 ERWC (%)	相对含水量 RWC (%)	相对误差 RE (%)	灌水量 Irrigation amount (mm)
2007–2008								
W0	—	—	—	0	—	—	—	0
W1	65	64.8	0.3	1.0	70	70.4	0.6	55.3
W2	75	74.2	1.1	54.0	70	69.8	0.3	34.3
W3	80	80.9	1.1	81.0	70	69.5	0.7	21.4
W4	65	64.3	1.1	7.0	70	70.7	1.0	55.0
W5	75	74.1	1.2	60.0	70	69.1	1.3	29.5
W6	80	80.6	0.8	87.0	70	71.1	1.6	19.9
2008–2009								
W0	—	—	—	0	—	—	—	0
W1	75	75.4	0.5	23.5	75	75.8	1.1	35.9
W2	75	74.7	0.4	38.1	75	75.2	0.3	27.4

2007–2008 年度 W4、W5 和 W6 处理及 2008–2009 年度 W2 处理在拔节后 10 d 灌水,其他处理(不含 W0)拔节期灌水。

Treatments W4, W5, and W6 in 2007–2008 and W2 in 2008–2009 growing season were irrigated 10 d after jointing stage, and other treatments except for W0 were irrigated at jointing stage. ERWC: expected relative water content; RWC: relative water content; RE: relative error.

期以外, 其余生育时期均不灌水。小区面积为 $2\text{ m} \times 4\text{ m} = 8\text{ m}^2$, 小区之间设 1 m 宽的隔离带, 随机区组排列, 3 次重复。基肥用量为每公顷纯氮 105 kg , P_2O_5 112.5 kg , K_2O 112.5 kg , 拔节期每公顷追施 135 kg 纯氮。所施肥料为尿素(含 N 46.4%)、磷酸二铵(含 P_2O_5 46%, N 18%)、硫酸钾(含 K_2O 52%)。2007 年 10 月 10 日播种, 四叶期定苗, 基本苗 180 株 m^{-2} 。其他管理措施同高产田。

2008—2009 生长季试验田土壤类型为棕壤, 播种前 0~20 cm 土层含有机质 1.3%、全氮 0.1%、碱解氮 100.2 mg kg^{-1} 、速效磷 24.9 mg kg^{-1} 、速效钾 108.3 mg kg^{-1} 。0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180 和 180~200 cm 土层的土壤含水量分别为 18.7%、18.6%、19.8%、20.3%、21.8%、22.1%、20.3%、20.6%、20.9% 和 21.7%, 0~140 cm 土层平均土壤容重为 1.6 g cm^{-3} , 平均田间持水量为 24.5%。小麦生育期间降水量, 播种至冬前期为 13.6 mm , 冬前至返青期为 16.7 mm , 返青至拔节期为 28.9 mm , 拔节至开花期为 54.9 mm , 开花至成熟期为 26.3 mm 。设 3 个处理(表 1), 除拔节期和开花期以外, 其余生育时期均不灌水。小区面积为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} = 16\text{ m}^2$, 小区之间设 2 m 宽的隔离带, 随机区组排列, 3 次重复。施肥、播种和定苗及田间管理措施均与上一年度相同。

1.2 土壤含水量测定及灌水量计算

采用干重法测定土壤质量含水量。灌水量 m (mm) = $10\rho_b H(\beta_i - \beta_j)$ [7], 式中, H 为土层深度(cm), 本试验的土层深度为 140 cm ; ρ_b 为土壤干容重(g cm^{-3}); β_i 为目标含水量(田间持水量乘以目标相对含水量); β_j 为灌溉前土壤含水量。用水表计量灌水量。

1.3 田间耗水量及水分利用效率和灌水生产效率计算

采用水量平衡法计算田间耗水量[8]。

水分利用效率 $WUE = Y/ET_a$ [9]; 灌水生产效率 $IPE = \Delta Y/I$ [10]。式中, WUE 和 IPE 分别为水分利用效率($\text{kg hm}^{-2}\text{ mm}^{-1}$)和灌水生产效率($\text{kg hm}^{-2}\text{ mm}^{-1}$); Y 为籽粒产量(kg hm^{-2}); ΔY 为灌溉后增加的产量(kg hm^{-2}); ET_a 为小麦生育期间实际耗水量(mm), 是各阶段耗水量之和; I 为实际灌水量(mm)。

1.4 株间蒸发量及单位土地面积上旗叶叶面积和蒸腾速率测定

用内径 75 mm 、壁厚 5 mm 的 PVC 管自制小型蒸发器, 置于冬小麦行间土壤, 测定株间蒸发量[11]。

参照叶面积指数计算方法[12]确定单位土地面积的旗叶叶面积, $A_fPA = DA_f$, 式中, A_fPA 为单位土地面积的旗叶叶面积, D 为群体密度(m^{-2}), A_f 为单叶旗叶叶面积(m^2)。

用 Li-6400 便携式光合仪(Li-Cor, USA)测定旗叶蒸腾速率, 旗叶蒸腾速率(T , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{ s}^{-1}$)与单位土地面积上旗叶叶面积(A_fPA)的乘积为单位土地面积上旗叶蒸腾速率(TPA), 即 $TPA = TA_fPA$ 。

1.5 数据分析

采用 DPS 7.05 和 SPSS 11.5 统计分析软件分析数据, 用 Microsoft Excel 2003 软件计算和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对小麦拔节至开花和开花至成熟阶段 0~200 cm 土层土壤贮水消耗量的影响

2007—2008 生长季, 拔节至开花期 W_0 和 W_1 处理 0~80 cm 土层土壤贮水消耗量显著高于其他灌水处理(图 1), 说明灌拔节水显著降低该阶段 0~80 cm 土层土壤贮水消耗量; 比较相同补灌时期不同补灌量的各处理的 0~120 cm 土层土壤贮水消耗量, 拔节期灌水的表现为 $W_1 > W_2 > W_3$, 拔节后 10 d 灌水的表现为 $W_4 > W_5 > W_6$ (图 1), 说明拔节期补灌水平越高, 0~120 cm 土层土壤贮水消耗量越低; 相同补灌水平不同补灌时期的各处理间比较, 0~80 cm 土层土壤贮水消耗量为 $W_2 > W_5$, $W_3 > W_6$, 而 80~120 cm 土层土壤贮水消耗量为 $W_5 > W_2$, $W_6 > W_3$ (图 1), 说明拔节后 10 d 补灌比拔节期补灌降低了拔节至开花阶段 0~80 cm 土层土壤贮水消耗量, 提高了 80~120 cm 土层土壤贮水消耗量。

开花至成熟期, W_0 处理 100~160 cm 土层土壤贮水消耗量显著高于灌水处理(图 1), 说明不灌水显著提高了该阶段 100~160 cm 土层土壤贮水消耗量; 相同补灌时期不同补灌量的各处理比较, 0~100 cm 土层土壤贮水消耗量表现为 $W_3 > W_2 > W_1$, $W_6 > W_5 > W_4$ (图 1), 说明随拔节期补灌水平的提高使开花至成熟阶段 0~100 cm 土层供水能力提高; 相同补灌水平不同补灌时期各处理的土壤贮水消耗量比较, 0~80 cm 土层为 $W_5 > W_2$, $W_6 > W_3$, 80~120 cm 土层为 $W_2 > W_5$, $W_3 > W_6$ (图 1), 说明与拔节期补灌相比, 拔节后 10 d 补灌提高了开花至成熟阶段 0~80 cm 土层土壤贮水消耗量, 降低了 80~120 cm 土层土壤贮水消耗量。

2008—2009 生长季, 拔节至开花阶段小麦主要利用 0~120 cm 土层的水分, W_2 处理 0~80 cm 土层土

壤贮水消耗量低于 W1 处理, 80~120 cm 土层土壤贮水消耗量高于 W1 处理; 开花至成熟阶段, W2 处理 0~80 cm 土层土壤贮水消耗量高于 W1 处理, 80~140 cm 土层土壤贮水消耗量低于 W1 处理(图 2), 说明拔节后 10 d 补灌拔节水增加了拔节期根系对 80~120 cm 土层水分的吸收, 提高了开花至成熟阶段 0~80 cm 土层根系的吸收能力。

2.2 不同处理对小麦不同生育阶段日耗水量的影响

2007—2008 生长季小麦日耗水量为播种至拔节阶段最小, 随生育进程逐渐增大, 开花至成熟阶段最大; W0 处理拔节至成熟阶段日耗水量显著低于灌水处理; 相同补灌时期的日耗水量, 拔节至开花阶段表现为 W3>W2>W1, 拔节后 10 d 至开花阶段为

图 1 各生育阶段不同土层耗水量(2007–2008)

Fig. 1 Soil water consumption amount in various soil layers at different growth stages (2007–2008)

A: 拔节至开花; B: 开花至成熟。W0: 不灌水; W1、W2 和 W3: 拔节期灌水; W4、W5 和 W6: 拔节后 10 d 灌水。

A: from jointing stage to flowering stage; B: from flowering stage to maturity stage. W0: no irrigation; W1, W2, and W3: irrigated at jointing stage; W4, W5, and W6: irrigated at 10 d after jointing stage.

图 2 各生育阶段不同土层耗水量(2008–2009)

Fig. 2 Soil water consumption amount in various soil layers at different growth stages (2008–2009)

A: 拔节至开花; B: 开花至成熟。W0: 不灌水; W1: 拔节期灌水; W2: 拔节后 10 d 灌水。

A: from jointing stage to flowering stage; B: from flowering stage to maturity stage. W0: no irrigation; W1: irrigated at jointing stage; W2: irrigated at 10 d after jointing stage.

W6>W5>W4, 开花至成熟阶段差异不显著(图 3), 说明随拔节期补灌水平提高, 拔节至开花阶段小麦日耗水量增大; 相同补灌水平不同补灌时期的日耗水量, 拔节至拔节后 10 d 为 W1>W4, W2>W5, W3>W6, 拔节后 10 d 至开花阶段为 W4>W1, W5>W2, W6>W3 (图 3), 说明拔节后 10 d 补灌拔节水显著降低拔节至拔节后 10 d 的小麦日耗水量, 提高了拔节后 10 d 至开花阶段的日耗水量, 有利于促进拔节初期分蘖的两极分化和保证挑旗期的水分需求。

2008—2009 生长季小麦日耗水量为开花至成熟

阶段最大, 播种至拔节阶段最小; W0 处理拔节至成熟阶段小麦日耗水量显著低于灌水处理; W2 处理拔节至拔节后 10 d 的日耗水量显著低于 W1 处理, 拔节后 10 d 至开花阶段则显著高于 W1 处理, 开花至成熟阶段差异不显著(图 3), 说明将补灌时期后延至拔节后 10 d 增加了挑旗期的日耗水量。

2.3 不同处理对灌浆初期单位土地面积上旗叶叶面积和蒸腾速率及株间蒸发量的影响

W0 处理灌浆初期单位土地面积上旗叶叶面积和蒸腾速率最小, 株间蒸发量最大(图 4); 相同补灌

图 3 不同处理各生育阶段日耗水量

Fig. 3 Daily water consumption of different treatments at various growth stages

STJ: 播种至拔节; JTJ: 拔节至拔节后 10 d; JTF: 拔节后 10 d 至开花; FTM: 开花至成熟。2007—2008 年度, W0: 不灌水; W1、W2 和 W3: 拔节期灌水; W4、W5 和 W6: 拔节后 10 d 灌水。2008—2009 年度, W0: 不灌水; W1: 拔节期灌水; W2: 拔节后 10 d 灌水。STJ: from sowing to jointing; JTJ: from jointing to 10 d after jointing; JTF: from 10 d after jointing to flowering; FTM: from flowering to maturity. In 2007—2008 growing season, W0: no irrigation; W1, W2, and W3: irrigated at jointing stage; W4, W5, and W6: irrigated at 10 d after jointing. In 2008—2009 growing season, W0: no irrigation; W1: irrigated at jointing stage; W2: irrigated at 10 d after jointing.

图 4 灌浆初期单位土地面积上旗叶叶面积和蒸腾速率及株间蒸发量(2007—2008)

Fig. 4 Flag leaf area per unit area of soil, transpiration per unit area of soil, and soil evaporation at early filling stage (2007—2008)

W0: 不灌水; W1、W2 和 W3: 拔节期灌水; W4、W5 和 W6: 拔节后 10 d 灌水。

W0: no irrigation; W1, W2, and W3: irrigated at jointing stage; W4, W5, and W6: irrigated at 10 d after jointing.

时期各处理的株间蒸发量为 $W1>W2>W3$, $W4>W5>W6$, 单位土地面积上旗叶面积和蒸腾速率为 $W2$ 、 $W3>W1$, 而 $W4$ 、 $W5$ 和 $W6$ 处理间差异不显著(图 4), 说明随拔节期补灌水平的提高, 灌浆初期单位土地面积上旗叶面积和蒸腾速率逐渐增大, 株间蒸发量逐渐降低, 随拔节后 10 d 补灌水平提高, 灌浆初期单位土地面积上旗叶面积和蒸腾速率差异不显著, 株间蒸发量逐渐降低; 相同补灌水平不同补灌时期的株间蒸发量为 $W5>W2$, $W6>W3$, 单位土地面积上旗叶面积和蒸腾速率表现为 $W2>W5$, $W3>W6$ (图 4), 说明拔节后 10 d 补灌增加了灌浆初期株间蒸发量, 降低了单位土地面积上旗叶面积和旗叶蒸腾速率。

2.4 不同处理对田间耗水的水分来源及其占田间耗水量百分率的影响

2007—2008 生长季, $W0$ 处理田间耗水量最低, 土壤贮水消耗量及其占田间耗水量的比例最高(表 2); 相同补灌时期不同补灌水平的各处理间比较, 田间耗水量、灌水量及其占田间耗水量的比例为 $W3>W2>W1$, $W6>W5>W4$, 土壤贮水消耗量为 $W2>W1$ 和 $W3$, $W5>W6>W4$, 土壤耗水量和降水量占田间耗水量的比例为 $W1>W2>W3$, $W4>W5>W6$ (表 2), 说明随拔节期补灌水平的提高, 田间耗水量、灌水

量及其占田间耗水量的比例升高, 土壤贮水消耗量先升高后降低, 土壤贮水消耗量和降水量占田间耗水量的比例降低; 相同补灌水平不同补灌时期的各处理间比较, 灌水量为 $W4>W1$, $W5>W2$, $W6>W3$, 土壤贮水消耗量为 $W5>W2$, $W1$ 和 $W4$ 以及 $W3$ 和 $W6$ 之间差异不显著, 田间耗水量为 $W5>W2$, $W6>W3$, 但降水量、灌水量和土壤贮水消耗量占田间耗水量的比例差异均不显著(表 2), 说明拔节后 10 d 补灌没有改变各水分来源占田间耗水量的百分率。

2008—2009 生长季 $W0$ 处理田间耗水量最低, 土壤贮水消耗量和降水量占田间耗水量的比例最高; $W2$ 处理灌水量和田间耗水量高于 $W1$ 处理, 土壤贮水消耗量、降水量、灌水量和土壤贮水消耗量占田间耗水量的比例两处理差异均不显著(表 2), 说明拔节后 10 d 补灌的水量增加, 但各水分来源占田间耗水量的百分率不变。2008—2009 与 2007—2008 生长季试验结果一致。

2.5 不同处理对小麦籽粒产量、产量构成因素和水分利用效率的影响

2007—2008 生长季, $W0$ 处理穗数、穗粒数和籽粒产量均显著低于各灌水处理(表 3); 相同补灌时期不同补灌水平的各处理间比较, $W2$ 和 $W3$ 处理的穗数、穗粒数和籽粒产量显著高于 $W1$ 处理, $W5$ 和 $W6$

表 2 不同处理对田间耗水量的水分来源及其占田间耗水量的百分率的影响

Table 2 Effects of different treatments on water consumption resources and the ratio of different water resources to water consumption amount

处理 Treatment	田间耗水量 Water consumption (mm)	降水 Precipitation		灌水 Irrigation		土壤贮水消耗 Soil water consumption	
		总量 Amount (mm)	百分率 Percentage (%)	总量 Amount (mm)	百分率 Percentage (%)	消耗量 Amount (mm)	百分率 Percentage (%)
2007–2008							
W0	381.4±2.7 e	141.7	37.2±0.5 a	—	—	239.7±1.7 a	62.9±0.9 a
W1	414.5±2.9 d	141.7	34.2±0.5 b	56.3	13.6±0.4 c	216.5±1.5 de	52.2±0.7 b
W2	450.3±3.2 c	141.7	31.5±0.5 c	88.3	19.6±0.6 b	220.2±1.6 c	48.9±0.7 c
W3	460.8±3.3 b	141.7	30.8±0.4 cd	102.4	22.2±0.6 a	216.8±1.5 cde	47.0±0.7 d
W4	419.6±3.0 d	141.7	33.8±0.5 b	62.0	14.8±0.4 c	215.9±1.5 e	51.5±0.7 b
W5	457.6±3.2 b	141.7	31.0±0.5 cd	89.5	19.6±0.6 b	226.4±1.6 b	49.5±0.7 c
W6	468.3±3.3 a	141.7	30.3±0.4 d	106.9	22.8±0.7 a	219.7±1.6 cd	46.9±0.7 d
2008–2009							
W0	316.2±2.2 c	140.4	44.4±0.6 a	—	—	175.8±1.2 a	55.6±0.8 a
W1	360.6±2.6 b	140.4	38.9±0.6 b	59.34	16.5±0.5 a	160.9±1.1 b	44.6±0.6 b
W2	370.1±2.6 a	140.4	37.9±0.5 b	65.48	17.7±0.5 a	164.2±1.2 b	44.4±0.6 b

2007—2008 年度, $W0$: 不灌水; $W1$ 、 $W2$ 和 $W3$: 拔节期灌水; $W4$ 、 $W5$ 和 $W6$: 拔节后 10 d 灌水。2008—2009 年度, $W0$: 不灌水; $W1$: 拔节期灌水; $W2$: 拔节后 10 d 灌水。数据后相同字母表示该年度中处理间无显著差异($P<0.05$)。

In 2007—2008 growing season, $W0$: no irrigation; $W1$, $W2$, and $W3$: irrigated at jointing stage; $W4$, $W5$, and $W6$: irrigated at 10 d after jointing. In 2008—2009 growing season, $W0$: no irrigation; $W1$: irrigated at jointing stage; $W2$: irrigated at 10 d after jointing. In each growing season, values followed by the same letter are not significantly different between treatments ($P<0.05$).

表 3 不同处理对小麦产量及其构成因素和水分利用效率的影响
Table 3 Effect of irrigation treatments on yield and its components and water use efficiency in wheat

处理 Treatment	穗数 Spike number ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg hm^{-2})	产量水分利用效率 Water use efficiency ($\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$)	灌水生产效率 IPE ($\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$)
2007–2008						
W0	640.0 $\pm$ 9.1 c	31.3 $\pm$ 0.4 d	40.4 $\pm$ 0.6 ab	7896.3 $\pm$ 55.8 d	20.7 $\pm$ 0.2 b	—
W1	668.7 $\pm$ 9.5 b	34.2 $\pm$ 0.5 c	40.9 $\pm$ 0.6 ab	8750.4 $\pm$ 61.9 c	21.1 $\pm$ 0.2 a	15.2 $\pm$ 0.3 b
W2	711.7 $\pm$ 10.1 a	36.2 $\pm$ 0.5 b	40.4 $\pm$ 0.6 ab	9041.7 $\pm$ 63.9 b	20.1 $\pm$ 0.1 c	13.0 $\pm$ 0.3 d
W3	723.0 $\pm$ 10.2 a	36.1 $\pm$ 0.5 b	40.0 $\pm$ 0.6 b	9029.8 $\pm$ 63.9 b	19.6 $\pm$ 0.1 d	11.1 $\pm$ 0.2 e
W4	666.7 $\pm$ 9.4 b	34.2 $\pm$ 0.5 c	41.1 $\pm$ 0.6 ab	8836.8 $\pm$ 62.5 c	21.1 $\pm$ 0.2 a	15.2 $\pm$ 0.3 b
W5	679.4 $\pm$ 9.6 b	39.3 $\pm$ 0.6 a	41.6 $\pm$ 0.6 a	9378.6 $\pm$ 66.3 a	20.5 $\pm$ 0.1 b	16.6 $\pm$ 0.4 a
W6	687.4 $\pm$ 9.7 b	39.2 $\pm$ 0.6 a	41.3 $\pm$ 0.6 ab	9400.8 $\pm$ 66.5 a	20.1 $\pm$ 0.1 c	14.1 $\pm$ 0.3 c
2008–2009						
W0	558.5 $\pm$ 4.0 c	31.0 $\pm$ 0.4 c	40.9 $\pm$ 0.6 a	6704.6 $\pm$ 47.4 c	21.2 $\pm$ 0.2 c	—
W1	645.0 $\pm$ 4.6 a	35.4 $\pm$ 0.5 b	40.6 $\pm$ 0.6 a	7902.7 $\pm$ 55.9 b	21.9 $\pm$ 0.2 b	20.2 $\pm$ 0.4 b
W2	628.0 $\pm$ 4.4 b	38.4 $\pm$ 0.5 a	40.6 $\pm$ 0.6 a	8437.2 $\pm$ 59.7 a	22.8 $\pm$ 0.2 a	26.5 $\pm$ 0.6 a

2007–2008 年度, W0: 不灌水; W1、W2 和 W3: 拔节期灌水; W4、W5 和 W6: 拔节后 10 d 灌水。2008–2009 年度, W0: 不灌水; W1: 拔节期灌水; W2: 拔节后 10 d 灌水。数据后相同字母表示该年度中处理间无显著差异($P < 0.05$)。

In 2007–2008 growing season, W0: no irrigation; W1, W2, and W3: irrigated at jointing stage; W4, W5, and W6: irrigated at 10 d after jointing. In 2008–2009 growing season, W0: no irrigation; W1: irrigated at jointing stage; W2: irrigated at 10 d after jointing. In each growing season, values followed by the same letter are not significantly different between treatments ($P < 0.05$). IPE: irrigation production efficiency.

处理穗粒数和产量显著高于 W4 处理, 水分利用效率 W1 和 W4 处理最大, W3 和 W6 处理最小, 灌水生产效率 W5 处理最大, W3 处理最小(表 3), 说明拔节期补灌水平最低的 W1 和 W4 处理显著降低了穗粒数和产量, 拔节期补灌水平最高的 W3 和 W6 处理显著降低了水分利用效率和灌水生产效率, W2 和 W5 处理的产量、水分利用效率和灌水生产效率均较高, 均为相同补灌时期的最优处理; 相同补灌水平不同补灌时期的各处理间比较, W5 和 W6 处理的穗数分别低于 W2 和 W3 处理, 穗粒数、千粒重、籽粒产量、水分利用效率和灌水生产效率分别高于 W2 和 W3 处理(表 3), 说明拔节后 10 d 补灌降低了穗数, 但提高了穗粒数和千粒重, 从而提高了籽粒产量、水分利用效率和灌水生产效率。

2008—2009 生长季 W0 处理的穗数、穗粒数、籽粒产量和水分利用效率均显著低于灌水处理; 拔节后 10 d 补灌的 W2 处理穗数低于拔节期灌水的 W1 处理, 而穗粒数、籽粒产量、水分利用效率和灌水生产效率高于 W1 处理, 两处理千粒重差异不显著(表 3), 说明拔节后 10 d 补灌能满足挑旗孕穗期的水分需求, 减少小花的退化, 增加穗粒数, 从而提高籽粒产量、水分利用效率和灌水生产效率。

3 讨论

围绕减少农作物的灌溉次数和灌水量已开展过

较多研究。刘彦军^[13]提出冬小麦以春灌 3 水最佳, 每次灌水量 75 mm, 在生育期降水量 159 mm 条件下, 籽粒产量达 8 101.5 kg hm^{-2} , 水分利用效率为 16.1 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 。张忠学和吴文良^[14]在华北高产粮区的研究表明, 最佳灌水模式为春灌 2 水, 每次 75 mm, 在生育期降水量 111.4 mm 条件下, 冬小麦籽粒产量为 7 716.7 kg hm^{-2} , 水分利用效率为 15.9 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 。刘庚山等^[15]通过人工控制有限供水, 在拔节期一次性供水 75 mm, 结果籽粒产量仅为 4 045.4 kg hm^{-2} , 水分利用效率为 14.2 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 。本试验在前人研究基础上确定春灌拔节水和开花水, 灌水量通过灌水前测定土壤墒情来确定, 在 2007—2008 生长季(小麦生育期降水量 141.7 mm)的 6 个处理中灌水量最低为 56.3 mm, 最高为 106.9 mm, 籽粒产量最低为 8 750.4 kg hm^{-2} , 最高为 9 400.8 kg hm^{-2} , 水分利用效率最低为 19.6 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$, 最高为 21.1 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$; 2008—2009 生长季(小麦生育期降水量 140.4 mm) W1 和 W2 处理总灌水量分别为 59.3 mm 和 65.5 mm, 籽粒产量分别为 7 902.7 kg hm^{-2} 和 8 437.2 kg hm^{-2} , 水分利用率为 21.9 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 和 22.8 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 。两生长季降水量均在 140 mm 左右, 总灌水量最高为 106.9 mm, 小麦产量达 7 900.0~9 400.8 kg hm^{-2} , 水分利用率为 19.6~22.8 $\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$, 说明测墒补灌能在节水条件下实现高产和高水分利用率的目标。

冬小麦耗水量与产量呈二次抛物线函数关系^[16], 在中等干旱条件下小麦耗水量大幅下降, 而产量的降幅较小, 有利于水分利用效率的提高^[17-20]。也有研究认为, 适度水分亏缺可以同时提高作物产量和水分利用效率^[21-23], 但水分逆境显著降低了小麦粒重和产量^[24]。在本试验中, 2007—2008 生长季拔节期灌水的3个处理中以W3处理耗水量最大, 并且籽粒产量和水分利用效率均低于W2处理, 在拔节后10 d灌水的3个处理中以W6处理耗水量最大, W5和W6处理的产量无差异, 但W5处理水分利用效率和灌水生产效率显著高于W6。相同补灌水平不同补灌时期的处理间比较, W5和W6处理籽粒产量、水分利用效率和灌水生产效率均显著高于W2和W3, W5处理耗水量仅比W2处理多7.3 mm, 但产量高 336.9 kg hm^{-2} , 灌水生产效率高 $3.6 \text{ kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$, 说明随着补灌水平的提高, 籽粒产量上升变缓, 甚至出现下降, 由拔节期推迟至拔节后10 d补灌拔节水能显著提高籽粒产量、水分利用效率和灌水生产效率。

土壤贮水是冬小麦水分的重要来源^[25], 随灌水量的增加, 冬小麦总耗水量也增加, 土壤贮水特别是深层贮水消耗量相应减少^[26-28], 土壤贮水消耗量占总耗水量的比例降低^[29-30]。本试验结果表明, 相同补灌时期的各处理随补灌水平提高, 拔节至开花阶段0~120 cm土层土壤贮水消耗量显著降低, 全生育期灌水量和总耗水量增加, 土壤贮水消耗量和降雨量占总耗水量的比例降低。W0处理土壤贮水消耗量最大, 总耗水量最小, 灌水处理中W1和W4处理灌水量和总耗水量最小, 土壤贮水消耗量占总耗水量的比例最大, W3和W6处理土壤贮水消耗量占总耗水量的比例最小。相同补灌水平不同补灌时期的处理间比较, W4、W5和W6处理拔节至开花阶段80~120 cm土层土壤贮水消耗量分别大于W1、W2和W3处理, 全生育期灌水量和总耗水量亦如此, 但全生育期土壤贮水消耗量及其占总耗水量的比例并没有减小, 说明由拔节期延迟至拔节后10 d补灌拔节水, 虽然增加了灌水量和总耗水量, 但同时增加了土壤贮水消耗量, 故并未降低土壤贮水消耗量占总耗水量的比例。

有研究指出, 株间蒸发主要受表层(0~10 cm)土壤水分控制, 随着土壤表层含水量的减少, 蒸发速度降低, 随着叶面积指数的增加, 株间蒸发量减少, 因此不同灌水处理蒸发强度的差异一般只出现在灌水和降水后的几天之内, 其他时段内的差异很小或

无显著差异^[31]。小麦的蒸腾速率随光照强度增加而增加^[32], 当光合有效辐射超过 $1\,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时, 光合速率随光合有效辐射的增加而下降, 蒸腾量依然呈线性增加, 超出此临界值的蒸腾为奢侈蒸腾, 通过合适的调控措施, 降低这部分蒸腾并不影响光合生产^[33]。在本试验中, 所有灌水处理开花期均灌水至同一水平, 灌浆初期株间蒸发测定前刚降雨29.5 mm, 故所有处理土壤表层含水量相差较小。拔节期随补灌水平的提高, 灌浆初期单位土地面积上旗叶叶面积增大, 株间蒸发量减少, 单叶旗叶蒸腾速率无显著差异, 但单位土地面积上旗叶蒸腾速率增大; 随拔节后10 d补灌水平提高, 灌浆初期单位土地面积上旗叶叶面积和蒸腾速率差异不显著, 株间蒸发量降低但差异较小。与拔节期补灌相比, 拔节后10 d补灌增加了灌浆初期株间蒸发量, 降低了单位土地面积上旗叶叶面积和蒸腾速率。

本试验两年降雨量相近, 在其他降雨年型下的适宜补灌时期和补灌水平有待进一步研究。

4 结论

测墒补灌能在节水条件下实现高产和高水分利用率的目标。与拔节期补灌相比, 拔节后10 d补灌在不降低降水量和土壤贮水消耗量所占总耗水量的比例的情况下显著提高籽粒产量、水分利用效率和灌水生产效率。拔节后10 d补灌至0~140 cm土层土壤相对含水量的75%、开花期补灌至70%的处理获得较高的籽粒产量和水分利用效率, 灌水生产效率最高, 是适合本试验条件(2007—2008)的高产节水的最佳灌溉方案。

References

- [1] Kang S-Z(康绍忠), Hu X-T(胡笑涛), Cai H-J(蔡焕杰), Feng S-Y(冯绍元). New ideas and development tendency of theory for water saving in modern agriculture and ecology. *J Hydraulic Eng* (水利学报), 2004, (12): 1-7 (in Chinese with English abstract)
- [2] Liu D-Y(刘殿英), Shi L-Y(石立岩), Dong Q-Y(董庆裕). The effect of top-dressing and irrigation time on the root system, root activities and plant characters in winter wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1993, 19(2): 149-155 (in Chinese with English abstract)
- [3] Cai H-J(蔡焕杰), Kang S-Z(康绍忠), Zhang Z-H(张振华), Chai H-M(柴红敏), Hu X-T(胡笑涛), Wang J(王键). Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2000, 16(3): 24-27 (in Chinese with English abstract)
- [4] Meng Z-J(孟兆江), Jia D-L(贾大林), Liu A-N(刘安能), Pang H-B(庞鸿宾), Wang H-Z(王和洲), Chen J-P(陈金平). Effect of regulated deficit irrigation on physiological mechanism and water

- use efficiency of winter wheat. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2003, 19(4): 66–69 (in Chinese with English abstract)
- [5] Li B-F(李百凤), Feng H(冯浩), Wu P-T(吴普特). Studies on optimum low limits of soil moisture index for deficit irrigation of crops. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2007, 25(3): 227–231 (in Chinese with English abstract)
 - [6] Jie Y-L(接玉玲), Yang H-Q(杨洪强), Cui M-G(崔明刚), Luo X-S(罗新书). Relationship between soil water content and water use efficiency of apple leaves. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2001, 12(3): 387–390 (in Chinese with English abstract)
 - [7] Shan L(山仑), Kang S-Z(康绍忠), Wu P-T(吴普特). *Water Saving Agriculture in China* (中国节水农业). Beijing: China Agriculture Press, 2004. pp 229–230 (in Chinese)
 - [8] Liu Z-J(刘增进), Li B-P(李宝萍), Li Y-H(李远华), Cui Y-L(崔远来). Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2004, 20(4): 58–63 (in Chinese with English abstract)
 - [9] Hou L-T(侯连涛), Jiang X-D(江晓东), Han B(韩宾), Jiao N-Y(焦念元), Zhao C(赵春), Li Z-J(李增嘉). Effects of different mulching treatments on the gas exchange parameters and water use efficiency of winter wheat. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2006, 22(9): 58–63 (in Chinese with English abstract)
 - [10] Wang J-S(王建生), Xu Z-K(徐子恺), Yao J-W(姚建文). Analysis of food throughput per unit water use. *Adv Water Sci* (水科学进展), 1999, 10(4): 429–434 (in Chinese with English abstract)
 - [11] Sun H-Y(孙宏勇), Liu C-M(刘昌明), Zhang Y-Q(张永强), Zhang X-Y(张喜英). Study on soil evaporation by using micro-lysimeter. *J Hydraulic Eng* (水利学报), 2004, (8): 114–118 (in Chinese with English abstract)
 - [12] Duan A-W(段爱旺). Measuring leaf area index of crop colony. *Irrig & Drainage* (灌溉排水), 1996, 15(1): 50–53 (in Chinese with English abstract)
 - [13] Liu Y-J(刘彦军). The effects of irrigation rate and time on water consumption and output of wheat. *J Hebei Agric Sci* (河北农业科学), 2003, 7(2): 6–11 (in Chinese with English abstract)
 - [14] Zhang Z-X(张忠学), Wu W-L(吴文良). Optimal irrigation regime for yield improving and water saving in winter wheat. *Irrig & Drainage* (灌溉排水), 2001, 20(3): 20–24 (in Chinese with English abstract)
 - [15] Liu G-S(刘庚山), Guo A-H(郭安红), Ren S-X(任三学), An S-Q(安顺清), Lin R-N(林日暖), Zhao H-R(赵花荣). The effect of limited water supply on root growth and soil water use of winter wheat. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2003, 23(11): 2343–2352 (in Chinese with English abstract)
 - [16] Zhang S-Q(张胜全), Fang B-T(方保停), Wang Z-M(王志敏), Zhou S-L(周顺利), Zhang Y-H(张英华). Influence of different spring irrigation treatments on water use and yield formation of late-sowing winter wheat. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2009, 29(4): 2035–2044 (in Chinese with English abstract)
 - [17] Yang J C, Zhang J H, Huang Z L, Zhu Q S, Wang L. Remobilization of carbon reserves is improved by controlled soil-drying during grain filling of wheat. *Crop Sci*, 2000, 40: 1645–1655
 - [18] Panda R K, Behera S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions. *Agric Water Manag*, 2003, 63: 37–56
 - [19] Li F M, Liu X L, Li S Q. Effects of early soil moisture distribution on the dry matter partition between root and shoot of winter wheat. *Agric Water Manag*, 2001, 49: 163–171
 - [20] Xu Z Z, Yu Z W, Wang D, Zhang Y L. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes. *J Agron & Crop Sci*, 2005, 191: 439–449
 - [21] Hu M-Y(胡梦芸), Zhang Z-B(张正斌), Xu P(徐萍), Dong B-D(董宝娣), Li W-Q(李魏强), Li J-J(李景娟). Relationship of water use efficiency with photoassimilate accumulation and transport in wheat under deficit irrigation. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(11): 1884–1891 (in Chinese with English abstract)
 - [22] Turner N C. Further progress in crop water relations. *Adv Agron*, 1996, 58: 293–338
 - [23] Turner N C. Plant water relations and irrigation management. *Agric Water Manag*, 1990, 17: 59–73
 - [24] Fan X-M(范雪梅), Jiang D(姜东), Dai T-B(戴廷波), Jing Q(荆奇), Cao W-X(曹卫星). Effects of nitrogen supply on flag leaf photosynthesis and grain starch accumulation of wheat from its anthesis to maturity under drought or water logging. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2005, 16(10): 1883–1888 (in Chinese with English abstract)
 - [25] Zhou L-Y(周凌云). Water consumption and water use efficiency of wheat field in Fengqiu region. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1995, 6(suppl): 57–61 (in Chinese with English abstract)
 - [26] Fang Q-X(房全孝), Chen Y-H(陈雨海), Li Q-Q(李全起), Yu S-Z(于舜章), Luo Y(罗毅), Yu Q(于强), Ou-Yang Z(欧阳竹). Effects of soil moisture on radiation utilization during late growth stages and water use efficiency of winter wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(6): 861–866 (in Chinese with English abstract)
 - [27] Musick J T, Jones O R, Stewart B A, Dusek D A. Water-yield relationship for irrigated and dryland wheat in the US Southern Plains. *Agron J*, 1994, 86: 980–986
 - [28] Oweis T, Zhang H, Pala M. Water use efficiency of rainfed and irrigation bread wheat in a Mediterranean environment. *Agron J*, 2000, 92: 231–238
 - [29] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, Shen Y J, Zhang Y Q. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agric Water Manag*, 2006, 85: 211–218
 - [30] Han Z-J(韩占江), Yu Z-W(于振文), Wang D(王东), Zhang Y-L(张永丽). Effects of soil moisture testing and supplemental irrigation on dry matter accumulation and distribution and water use efficiency in winter wheat. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2009, 20(11): 2671–2677 (in Chinese with English abstract)
 - [31] Liu H(刘浩), Duan A-W(段爱旺), Gao Y(高阳). Soil evaporation variation and estimating model from winter wheat field in intercropping patterns. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2006, 22(12): 34–38 (in Chinese with English abstract)
 - [32] Wan C-J(万长建), Zheng Y-F(郑有飞), Zhang J-J(张建军). Analysis and calculation on law of transpiration rate of wheat. *Agric Meteorol* (中国农业气象), 1998, 19(6): 10–13 (in Chinese with English abstract)
 - [33] Wang H-X(王会肖), Liu C-M(刘昌明). Experimental study on crop photosynthesis, transpiration and high efficient water use. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2003, 14(10): 1632–1636 (in Chinese with English abstract)