

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2010.00457

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

韩占江^{1,2} 于振文^{1,*} 王 东¹ 张永丽¹

¹ 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; ² 河南科技学院, 河南新乡 453003

摘 要: 于 2007—2008 和 2008—2009 年度小麦生长季, 以高产中筋冬小麦品种济麦 22 为材料, 在山东兖州小孟镇史王村(35.41°N, 116.41°E)采用大田试验, 研究了 4 种灌水处理对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响。结果表明, 不灌水的 W0 处理(土壤相对含水量为播种期 80% + 拔节期 65% + 开花期 65%)成熟期干物质积累量最低, W1 处理(土壤相对含水量为播种期 80% + 拔节期 70% + 开花期 70%)成熟期干物质积累量最高, 籽粒干物质分配量显著高于 W2 处理(土壤相对含水量为播种期 80% + 拔节期 80% + 开花期 80%)和 W3 处理(土壤相对含水量为播种期 90% + 拔节期 80% + 开花期 80%); 开花前贮藏在营养器官中的干物质开花后向籽粒的再分配量和再分配率均为 W0>W3>W2>W1, 开花后干物质积累量对籽粒的贡献率为 W1>W2>W3>W0; W1 处理在灌浆末期保持较高灌浆速率和净光合速率, 提高了开花后干物质的积累量和向籽粒的分配比例, 有利于增加粒重; W0 处理水分利用效率较高, 但产量最低; 灌水处理的籽粒产量、灌溉水利用效率、降水利用效率和灌溉效益两生长季均随测墒补灌量的增加而显著降低。综合两年结果, W1 是本试验条件下高产节水的最佳灌溉处理, 其播种期、拔节期和开花期设计 0~140 cm 土层土壤平均相对含水量分别为 80%、70%和 70%, 在两个小麦生长季中, 通过测墒, 分别补充灌水 43.8 mm 和 13.8 mm, 灌溉水和降水的利用效率最高, 并获得了最高籽粒产量, 分别为 8 837.8 kg hm⁻² 和 9 040.9 kg hm⁻²。

关键词: 冬小麦; 土壤含水量; 节水灌溉; 干物质积累与分配; 水分利用效率

Effects of Supplemental Irrigation Based on Testing Soil Moisture on Dry Matter Accumulation and Distribution and Water Use Efficiency in Winter Wheat

HAN Zhan-Jiang^{1,2}, YU Zhen-Wen^{1,*}, WANG Dong¹, and ZHANG Yong-Li¹

¹ Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; ² Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China

Abstract: Water shortage is a serious problem threatening sustainable agricultural development in the North China Plain (NCP), where winter wheat (*Triticum aestivum* L.) is the largest water-consuming crop. Water-saving technique is one of the most important components in wheat cultivation system in this area. The purpose of this study was to optimize irrigation scheduling for high yield and water use efficiency (WUE) in wheat. Unlike earlier studies in which fixed irrigation amounts were given, we designed a ladder of relative soil moisture content at critical growth stages of wheat. The results are expected to provide general and valuable guidelines to farmers and irrigation managers in high-yielding wheat production in the NCP. The field experiments was conducted with the cultivar of Jimai 22 in Shiwang village (35.41°N, 116.41°E), Yanzhou, Shandong, China in 2007–2008 and 2008–2009 growing seasons. The irrigation treatments were designed based on the contents of relative soil moisture at sowing, jointing, and anthesis stages which were 80%, 65%, and 65% for treatment W0; 80%, 70%, and 70% for treatment W1; 80%, 80%, and 80% for treatment W2; 90%, 80%, and 80% for treatment W3, respectively. The accumulation and distribution of dry matter and water use efficiency (WUE) in wheat plants were investigated subject to soil moisture and supplemental irrigation. The results showed that dry matter accumulation amount in treatment W0 was the lowest whereas that in treatment W1 was the highest at maturity stage. The grain dry matter ratio was significantly higher in treatment W1 than in treatments W2 and W3. After anthesis, the redistribution amount and the ratio of dry matter that stored in vegetative organs before anthesis were presented as W0>W3>W2>W1, and the contribution of dry matter accumulation amount after anthesis to grains as W1>W2>W3>W0. Under

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: hanzhanjiang@163.com

Received(收稿日期): 2009-09-05; Accepted(接受日期): 2009-12-08.

the W1 condition, the filling rate and net photosynthetic rate maintained a relative high level at the end of filling stage, which was favorable for increasing the accumulation and distribution ratio of dry matter and the grain weight at maturity. The WUE in treatment W0 was higher than that in other treatments. However, the grain yield was the lowest in treatment W0. In both growing seasons, the grain yield, irrigation water use efficiency (WUE_i), precipitation use efficiency (WUE_p), and irrigation benefit (IB) in the three irrigation treatments decreased significantly as more water was supplied. Under the experimental condition, the W1 regime was considered as the optimal irrigation treatment, whose relative soil moisture contents in the 0–140 cm soil layer were 80% at sowing, 70% at jointing, and 70% at anthesis stage. When 43.8 and 13.8 mm of water was supplied in the 2007–2008 and 2008–2009 growing seasons, the final grain yield reached the highest level of 8 837.8 kg ha⁻¹ for 2007–2008 and 9 040.9 kg ha⁻¹ for 2008–2009 with the highest WUE_i and WUE_p.

Keywords: Winter wheat; Soil moisture content; Water-saving irrigation; Dry matter accumulation and distribution; Water use efficiency

水资源缺乏已成为全球性亟待解决的问题。我国人均水资源拥有量为世界平均值的 1/4, 是世界上 13 个严重缺水的国家之一^[1]。华北平原是我国的主要农业区, 水资源短缺且分配不均制约该地区农业生产可持续发展的主要限制因子。研究表明, 小麦籽粒产量大部分来自花后干物质的积累及花前营养器官干物质的再分配, 土壤水分状况对小麦干物质积累与分配有显著影响^[2-3], 开花后土壤含水量过高或过低均使小麦旗叶的光合速率降低^[4], 抑制植株生长, 降低干物质积累量, 并使各器官间的干物质分配比例发生变化, 导致籽粒产量减少^[5]。亦有研究认为, 在一定范围内, 随灌水量增大, 小麦生物产量增加, 显著提高开花后干物质的积累量及其对籽粒的贡献率; 灌水量过多显著减少干物质向籽粒的分配, 籽粒产量降低, 灌水量最多的处理未获得最高籽粒产量^[6]。适度的限量灌溉可以降低麦田耗水量, 提高水分利用效率^[7], 并且有利于干物质的积累, 促进籽粒灌浆, 提高小麦籽粒产量^[8-11]。前人研究多采用定量灌溉的方法, 本文以小麦主要生育时期 0~140 cm 的土壤平均相对含水量为目标含水量, 在各生育时期测定土壤墒情, 计算需补充的灌水量, 进行测墒补灌, 研究其对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响, 为制定冬小麦高产节水栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种与试验设计

2007—2008 和 2008—2009 年度小麦生长季在山东省兖州市小孟镇史王村大田(35.41°N, 116.41°E)进行, 种植高产中筋冬小麦品种济麦 22。2007—2008 年度小麦生长季播种前试验田 0~20 cm 土层土壤含有机质 1.5%、全氮 0.10%、碱解氮 62.6 mg kg⁻¹、速效磷 25.0 mg kg⁻¹、速效钾 139.8 mg kg⁻¹。小麦生育期间降水量为播种至拔节期 51.4 mm、拔节至开花期

88.4 mm、开花至成熟期 88.2 mm。播种前 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120 和 120~140 cm 土层的土壤田间持水量分别为 24.70%、25.27%、24.73%、25.01%、24.63%、23.51%和 23.18%, 土壤容重分别为 1.55、1.50、1.51、1.52、1.53、1.58 和 1.56 g cm⁻³, 相对含水量为 62.42%、54.60%、75.44%、89.36%、77.49%、77.00%和 82.73%。2008—2009 年度小麦生长季播种前试验田 0~20 cm 土层土壤含有机质 1.42%、全氮 0.11%、碱解氮 125.1 mg kg⁻¹、速效磷 31.8 mg kg⁻¹、速效钾 177.1 mg kg⁻¹。小麦生育期间降水量为播种至拔节期 59.4 mm, 拔节至开花期 54.9 mm, 开花至成熟期 26.3 mm。播种前 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120 和 120~140 cm 土层的土壤田间持水量分别为 24.53%、24.49%、23.38%、24.94%、25.52%、24.03%和 22.03%, 土壤容重分别为 1.56、1.53、1.58、1.59、1.57、1.59 和 1.64 g cm⁻³, 相对含水量分别为 74.32%、71.17%、75.98%、87.48%、83.46%、85.94%和 91.84%。

两个生长季试验处理一致, 灌水组合均为底墒水+拔节水+开花水, 底墒水设置 2 个水平, 拔节水 3 个水平, 开花水 3 个水平, 分别以 W0、W1、W2 和 W3 表示(表 1)。

灌水量(mm)由公式 $m = 10pbH(\beta_i - \beta_j)$ 计算得出^[12]。

表 1 各水分处理方案的土壤相对含水量
Table 1 Relative soil moisture contents in various treatments of water supply (%)

处理 Treatment	设计相对含水量 Relative soil moisture content designed		
	播种期 Sowing	拔节期 Jointing	开花期 Anthesis
W0	80	65	65
W1	80	70	70
W2	80	80	80
W3	90	80	80

数据为 0~140 cm 土层的平均值。

Data are the averages at 0–140 cm soil layer.

式中, H 为该时段土壤计划湿润层的深度(cm), ρ_b 为计划湿润层内土壤容重(g cm^{-3}), β_i 为设计含水量(田间持水量乘以设计相对含水量), β_j 为自然含水量, 即灌溉前土壤含水量。用水表计灌水量。

小区面积 $4\text{ m} \times 4\text{ m} = 16\text{ m}^2$, 小区间设置 1.0 m 隔离区, 随机区组排列, 3 次重复。小麦播种前, 前茬玉米的秸秆全部粉碎翻压还田。2007—2008 年度生长季基肥用量为 $\text{N } 105.0\text{ kg hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 112.5\text{ kg hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O } 112.5\text{ kg hm}^{-2}$; 拔节期追施 $\text{N } 135.0\text{ kg hm}^{-2}$ 。2008—2009 年度生长季基肥用量为 $\text{N } 105.0\text{ kg hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 150.0\text{ kg hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O } 150.0\text{ kg hm}^{-2}$; 拔节期追施 $\text{N } 135.0\text{ kg hm}^{-2}$ 。所施肥料为尿素(含 $\text{N } 46.4\%$)、磷酸二铵(含 $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 46\%$, 含 $\text{N } 18\%$)和硫酸钾(含 $\text{K}_2\text{O } 52\%$)。2007 年 10 月 8 日播种, 2008 年 6 月 11 日收获; 2008 年 10 月 10 日播种, 2009 年 6 月 4 日收获。四叶期定苗, 基本苗为 180 株 m^{-2} , 其他管理措施同丰产田。两个生长季试验结果趋势一致。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤含水量 用土钻取 $0\sim 200\text{ cm}$ 土层土样, 分层取土, 20 cm 为一层, 置于铝盒中, 采用烘干法测定, 土壤含水量 = (土壤鲜重-土壤干重)/土壤干重 $\times 100\%$ 。

1.2.2 农田耗水量 根据土壤含水量计算农田耗水量^[13]:

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

式中, ET_{1-2} 为阶段耗水量(mm); i 为土层编号; 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(cm); θ_{i1} 和 θ_{i2} 分别为第 i 层土壤时段初和时段末的含水率, 以占干土质量的百分数计; 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), 当地下水埋深大于 2.5 m 时, K 值可以忽略不计。本试验中, 地下水埋深在 5 m 以下, 故地下水补给量可视为 0。

1.2.3 干物质积累与分配 于开花期和成熟期, 按叶、茎+叶鞘、穗轴+颖壳和籽粒分别取样, 并称取鲜重, 80°C 烘至恒重, 称干重。相关计算公式^[14]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 $\times 100$;

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 $\times 100$ 。

1.2.4 光合特性 用英国产 CIRAS-2 型光合作用测定系统, 分别于开花期、开花后 10 d 和 20 d 上午 $9:00\sim 11:00$, 于自然光照下测定旗叶光合特性^[15], 用叶片蒸腾消耗一定量的水所同化的 CO_2 量来表示单叶水平的水分利用效率, 即 $WUE_L = P_n/T_r$ 。式中, WUE_L 为单叶水分利用效率($\mu\text{mol CO}_2\text{ mmol}^{-1}\text{ H}_2\text{O}$), P_n 和 T_r 分别代表净光合速率($\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$)和蒸腾速率($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{ s}^{-1}$), 由光合作用测定系统直接测出。

1.2.5 灌浆速率 于小麦开花期标记同一天开花的单茎, 开花至成熟期每 7 d 取标记的穗, 80°C 烘至恒重, 以其干重计算干物质积累和籽粒灌浆速率。成熟后实收, 晾晒至籽粒含水率为 12.5% 时计产。

1.2.6 水分利用效率和灌溉效益的计算 水分利用效率($\text{kg hm}^{-2}\text{ mm}^{-1}$) $WUE = Y/ET$ ^[15]; 灌溉水利用效率(WUE_I)、降水利用效率(WUE_P)和土壤水利用效率(WUE_S) 分别由 $WUE_I = Y/I$ 、 $WUE_P = Y/P$ 和 $WUE_S = Y/\Delta S$ 计算^[16-18], 单位均为 $\text{kg hm}^{-2}\text{ mm}^{-1}$; 灌溉效益($\text{kg hm}^{-2}\text{ mm}^{-1}$) $IB = \Delta Y/I$ ^[19]。式中, Y 为籽粒产量(kg hm^{-2}), P 为有效降水量(mm), ΔS 为土壤贮水消耗量(mm), ΔY 为灌溉后增加的产量(kg hm^{-2}), ET 为小麦生育期间农田耗水量(mm), 是各阶段耗水量之和, I 为实际灌水量(mm)。

1.3 数据分析

采用 DPS 7.05 和 SPSS 11.5 统计分析软件分析处理, 用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据计算和绘图。

2 结果与分析

2.1 补充灌溉后 $0\sim 140\text{ cm}$ 土层土壤相对含水量

2007—2008 年度生长季, 底墒水调控所得相对含水量和设计相对含水量的相对误差(以下简称“调控误差”)分别为 0.7% 和 0.5% , 拔节水 W_0 、 W_1 、 W_2 、 W_3 处理的调控误差分别为 6.0% 、 4.4% 、 1.5% 和 3.9% ; 开花水 W_0 、 W_1 、 W_2 、 W_3 处理的调控误差分别为 0.2% 、 1.1% 、 7.7% 和 6.0% ; 各处理调控误差平均为 2.8% 。2008—2009 年度生长季, 底墒水的调控误差分别为 1.8% 和 0.8% , 拔节水 W_0 、 W_1 、 W_2 、 W_3 处理的调控误差分别为 3.9% 、 1.7% 、 1.4% 和 2.4% ; 开花水 W_0 、 W_1 、 W_2 、 W_3 处理的调控误差分别为 2.2% 、 2.1% 、 1.0% 和 0.6% ; 各处理调控误差平均为 1.8% (表 2)。表明通过测定土壤墒情, 计算需补充的灌水量进

行灌溉，能够达到预期设计的相对含水量。

2.2 不同处理对旗叶光合特性的影响

随着土壤相对含水量的提高，旗叶净光合速率在开花期为 W0>W1、W2>W3，花后 10 d 为 W3>W2>W1>W0，花后 20 d 为 W1>W2、W3>W0。W1 处理较高，有利于干物质的积累，奠定高产的基础(图 1-A)。各处理旗叶蒸腾速率变化规律与净光合速率一致，W1 处理较高，有利于增加开花期的蒸散量(图 1-B)。开花后 W0 处理单叶水分利用效率均较高，各灌水处理间单叶水分利用效率在开花期无显著差异，花后 10 d 和 20 d 随土壤相对含水量的提高而增加(图 1-C)，说明在本试验节水栽培条件下，增加土壤相对含水量可提高单叶水分利用效率。

2.3 不同处理对小麦干物质积累与分配的影响

2.3.1 不同生育时期干物质积累量 越冬期和返

青期不同处理间干物质积累量无显著差异，而在拔节期，播种期土壤相对含水量为 90%的 W3 处理显著高于相对含水量为 80%的 W0、W1 和 W2 处理(图 2)，说明 W3 处理有利于返青至拔节阶段植株地上部的生长。开花期和成熟期各处理干物质积累量为 W1>W2、W3>W0，W2 和 W3 处理无显著差异(图 2)。

2.3.2 成熟期干物质在不同器官中的分配 成熟期干物质的分配量和比例依次为籽粒>茎秆+叶鞘+叶片>穗轴+颖壳(表3)。灌水处理与 W0 处理比较，降低了茎秆+叶鞘+叶片的干物质分配比例，提高了籽粒的干物质分配量和比例。各灌水处理之间比较，W1 处理籽粒干物质分配量显著高于 W2 和 W3 处理(表 3)，说明播种期、拔节期和开花期土壤相对含水量较低，有利于干物质向籽粒分配，提高籽粒产量；土壤相对含水量增加时，干物质向籽粒分配量和比

表 2 不同处理的灌水量和土壤相对含水量
Table 2 Irrigation amount and relative soil moisture content in different treatments

处理 Treatment	底墒水 Presowing water				拔节水 Water at jointing stage				开花水 Water at anthesis stage			
	DRMC (%)	RMC (%)	RE (%)	I (mm)	DRMC (%)	RMC (%)	RE (%)	I (mm)	DRMC (%)	RMC (%)	RE (%)	I (mm)
2007-2008												
W0	80	79.43	0.7	0	65	61.07	6.0	0	65	65.10	0.2	0
W1	80	79.43	0.7	0	70	66.90	4.4	0	70	69.21	1.1	43.83
W2	80	79.43	0.7	0	80	81.16	1.5	37.78	80	73.86	7.7	45.25
W3	90	90.43	0.5	80.90	80	76.86	3.9	0	80	75.22	6.0	22.48
2008-2009												
W0	80	81.45	1.8	0	65	67.51	3.9	0	65	66.40	2.2	0
W1	80	81.45	1.8	0	70	71.21	1.7	0	70	68.50	2.1	13.77
W2	80	81.45	1.8	0	80	81.10	1.4	46.92	80	79.24	1.0	16.01
W3	90	89.29	0.8	45.50	80	81.96	2.4	24.29	80	79.55	0.6	47.82

土壤相对含水量为 0~140 cm 土层的平均值。DRMC: 设计相对含水量; RMC: 相对含水量; RE: 相对误差; I: 灌水量。
Relative soil moisture contents are the averages at 0-140 cm soil layer. DRMC: designed relative moisture content; RMC: relative moisture content; RE: relative error; I: irrigation amount.

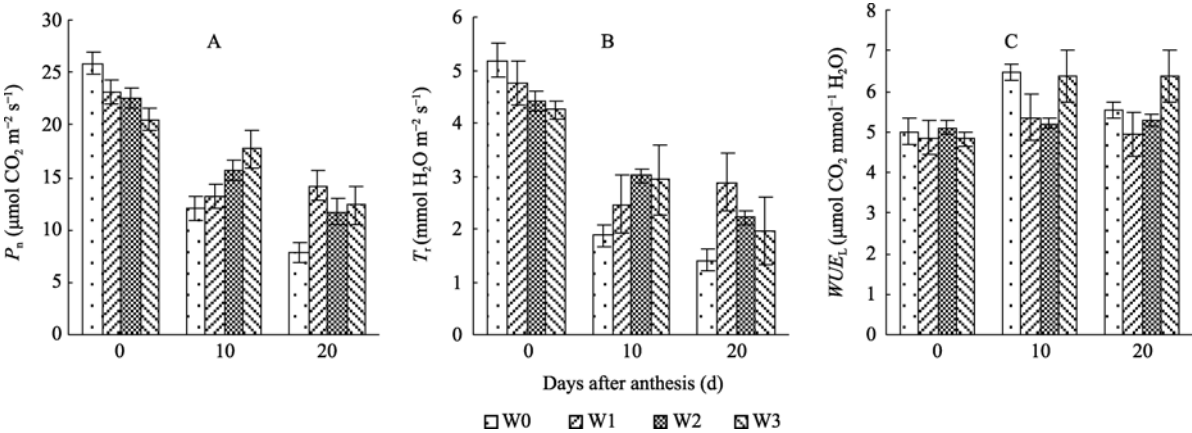


图 1 不同处理对冬小麦旗叶光合速率(A)、蒸腾速率(B)与水分利用效率(C)的影响(2007-2008)
Fig. 1 Effects of different treatments on photosynthetic rate (A), transpiration rate (B), and leaf water use efficiency (C) in winter wheat (2007-2008)

例降低, 亦即适当降低拔节期和开花期的土壤相对含水量, 促进干物质向籽粒分配。

2.3.3 开花后营养器官干物质再分配及其对籽粒贡献率 开花前贮藏在营养器官中的干物质开花后向籽粒的再分配量和再分配率均为 $W0>W3>W2>W1$, 处理间差异显著; 开花后干物质积累量对籽粒的贡献率为 $W1>W2>W3>W0$, 处理间差异显著(表 4), 说明 $W1$ 处理提高了开花后干物质的积累能力, 增加了籽粒中来自开花后干物质的比例, 这是 $W1$ 处理获得高产的生理基础。

2.4 不同处理对冬小麦籽粒灌浆特性的影响

籽粒灌浆速率呈慢—快—慢的单峰变化趋势, 各处理均在花后 21 d 达峰值。W0 处理在达到峰值前灌浆速率显著高于其他处理, 在达到峰值后迅速下降; 灌水处理在达到峰值后下降较缓慢, 开花至

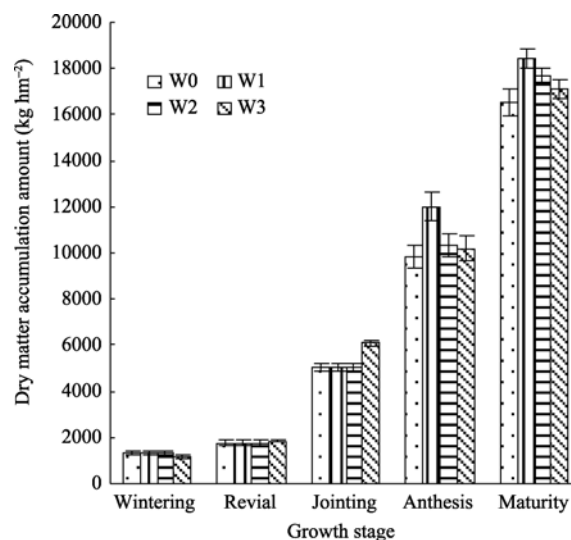


图 2 不同处理对冬小麦干物质积累量的影响(2007–2008)
Fig. 2 Effects of different treatments on dry matter accumulation amount in winter wheat (2007–2008)

表 3 不同处理对冬小麦成熟期干物质在不同器官中的分配的影响
Table 3 Effects of different treatments on dry matter distribution in different organs at maturity in winter wheat

处理 Treatment	籽粒 Grain		穗轴+颖壳 Spike axis + glume		茎秆+叶鞘+叶片 Stem + sheath + leaf	
	数量 Amount (g)	比例 Ratio (%)	数量 Amount (g)	比例 Ratio (%)	数量 Amount (g)	比例 Ratio (%)
2007–2008						
W0	1.48±0.04 c	50.51±1.02 c	0.39±0.02 a	13.17±0.73 a	1.06±0.02 c	36.31±0.84 a
W1	1.78±0.02 a	54.98±0.55 a	0.35±0.01 b	10.93±0.34 b	1.10±0.02 b	34.09±0.57 b
W2	1.67±0.01 b	52.88±0.32 b	0.35±0.02 b	10.99±0.60 b	1.14±0.01 a	36.13±0.23 a
W3	1.66±0.01 b	53.06±0.54 b	0.34±0.01 b	10.93±0.26 b	1.13±0.02 ab	36.01±0.41 a
2008–2009						
W0	1.27±0.10 d	54.61±2.68 c	0.27±0.04 c	11.59±1.82 b	0.79±0.02 c	33.73±1.79 a
W1	1.72±0.03 a	57.70±1.06 a	0.34±0.02 b	11.47±0.73 b	0.92±0.04 a	30.83±1.19 c
W2	1.66±0.02 b	56.10±0.75 b	0.38±0.01 a	12.94±0.41 a	0.92±0.03 a	30.97±0.86 c
W3	1.49±0.05 c	55.47±1.36 c	0.34±0.02 b	12.58±0.84 a	0.86±0.03 b	31.94±1.22 b

各器官测定值均为单茎平均。各列数据后相同字母表示在 0.05 水平差异不显著。

Data are the averages based on a single stalk. Values followed by the same letter within a column are not significantly different at $P < 0.05$.

表 4 不同处理对冬小麦开花后营养器官干物质积累量和干物质再分配量的影响
Table 4 Effects of different treatments on dry matter accumulation and translocation amount of vegetative organ after anthesis in winter wheat

处理 Treatment	营养器官开花前贮藏干 物质转运量 DMTAA (kg hm ⁻²)	营养器官开花前贮藏 干物质转运率 DMTRA (%)	开花前贮藏干物质转运 量对籽粒的贡献率 CDMTAATG (%)	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 (%)
2007–2008					
W0	3589.02±77.74 a	26.34±2.41 a	50.76±1.71 a	3481.93±56.61 d	49.24±1.71 d
W1	1143.29±30.86 d	11.06±3.03 d	12.94±0.99 d	7694.48±49.29 a	87.06±0.99 a
W2	1625.71±71.98 c	15.42±0.63 c	19.20±0.94 c	6840.25±107.97 b	80.80±0.94 b
W3	2426.84±85.98 b	20.19±0.65 b	29.75±1.21 b	5729.61±128.97 c	70.25±1.21 c
2008–2009					
W0	2474.69±21.96 a	27.61±0.21 a	39.74±0.43 a	3752.09±32.94 d	60.26±0.43 d
W1	1560.41±26.26 d	14.72±0.23 d	17.26±0.32 d	7480.47±39.39 a	82.74±0.32 a
W2	1652.41±41.62 c	18.39±1.77 c	20.87±1.59 c	6266.34±77.43 c	79.13±1.59 b
W3	2288.60±49.50 b	24.74±1.67 b	25.57±1.21 b	6662.83±73.75 b	74.43±1.21 c

各列数据后相同字母表示在 0.05 水平差异不显著。

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 accumulation amount after anthesis to grains. Values followed by the same letter within a column are not significantly different at $P < 0.05$.

花后 28 d, 灌水处理间灌浆速率无显著差异, 开花 28 d 后 W1 处理籽粒灌浆速率显著高于 W2 和 W3 处理(图 3), 说明 W1 处理在灌浆末期仍保持较高灌浆速率, 有利于粒重的提高。

2.5 不同处理对籽粒产量和水分利用效率的影响

2007—2008 年度生长季籽粒产量为 $W1>W2>W3>W0$, 2008—2009 年度生长季为 $W1$ 、 $W2>W3>W0$, W1 和 W2 处理间无显著差异(表 5)。W0 处理水分利用效率较高, 但产量最低; 随灌溉量增加, 灌

溉水利用效率、降水利用效率和灌溉效益降低, 两年均为 $W1>W2>W3$; 土壤水利用效率, 2007—2008 年度生长季为 $W1<W0<W2<W3$, 2008—2009 年度生长季为 $W1<W2<W0<W3$ 。综合考虑籽粒产量、灌溉水利用效率和灌溉效益, W1 处理是本试验条件下高产节水的最佳灌溉处理。W1 处理在 2007—2008 年度和 2008—2009 年度生长季根据测墒结果分别补充灌水 43.8 mm 和 13.8 mm, 籽粒产量分别为 8 837.8 kg hm^{-2} 和 9 040.9 kg hm^{-2} , 并获得了最高的灌溉水和降水利用效率。

3 讨论

采用定量灌溉的方法, 前人开展了很多小麦灌溉试验。Li 等^[20]认为, 在华北平原有 3 种适宜的灌溉制度, 分别是播前灌水 75 mm; 播前和拔节期各灌水 75 mm; 播前、拔节期和开花期各灌水 75 mm, 全生育期灌溉量为 75~225 mm, 最高产量可达 7 423 kg hm^{-2} ; 房全孝等^[21]和董宝娣等^[22]提出, 在底墒充足的条件下, 分别在拔节期、挑旗期(或开花期)各灌水 60 mm, 总灌溉量为 120 mm, 籽粒产量可达 7 000~7 500 kg hm^{-2} , 而采用高产高水分利用效率型小麦, 在不降低产量和水分利用效率的情况下, 可减少灌溉量 60~120 mm^[22]。王淑芬等^[23]研究发现, 在华北地区冬小麦最佳灌水方式是丰水年不灌水、平水年灌 1 次拔节水、枯水年灌拔节水和抽穗水, 每

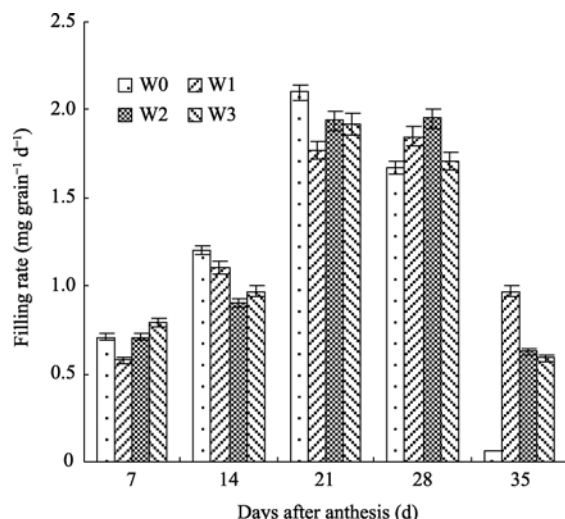


图 3 不同处理对籽粒灌浆速率的影响(2007—2008)
Fig. 3 Effects of different treatments on grain filling rate in winter wheat in 2007—2008 growing season

表 5 不同处理对籽粒产量、耗水量和水分利用效率的影响

Table 5 Effects of different treatments on grain yield, water consumption amount, and water use efficiency in winter wheat

处理 Treatment	籽粒产量 Yield (kg hm ⁻²)	耗水量 Water consumption amount (mm)				水分利用效率 Water use efficiency (kg hm ⁻² mm ⁻¹)					
		总计 Total	I	P	SWCA	WUE	WUE _I	WUE _P	WUE _S	IB	
2007–2008											
W0	7071.0±188.9 d	329.3±8.0 d	0 d	228.0	101.3±8.0 b	21.5±0.6 c	—	31.0±0.8 d	69.8±3.4 c	—	
W1	8837.8±165.4 a	425.5±10.1 a	43.8 c	228.0	153.6±10.1 a	20.8±0.5 d	201.6±3.8 a	38.8±0.7 a	57.5±2.3 d	40.3±0.5 a	
W2	8466.0±36.0 b	374.3±9.6 b	83.0 b	228.0	63.3±9.6 c	22.6±0.5 b	102.0±0.4 b	37.1±0.2 b	133.8±13.9 b	16.8±1.8 b	
W3	8156.5±43.0 c	352.5±3.8 c	103.4 a	228.0	21.1±3.8 d	23.1±0.4 a	78.9±0.4 c	35.8±0.2 c	386.6±49.5 a	10.5±1.4 c	
2008–2009											
W0	6226.8±11.0 c	237.7±11.4 c	0 d	140.6	97.3±11.4 c	26.2±1.1 ab	—	44.4±0.1 d	64.0±4.9 b	—	
W1	9040.9±13.1 a	331.0±10.6 b	13.8 c	140.6	176.8±10.6 a	27.3±0.8 a	656.5±1.0 a	64.4±1.0 a	51.2±1.9 d	204.4±0.2 a	
W2	8951.4±235.8 a	358.2±3.9 a	62.9 b	140.6	154.9±3.9 b	25.0±0.7 b	142.2±3.8 b	63.8±1.7 b	57.8±0.9 c	43.3±3.8 b	
W3	7918.8±246.3 b	315.2±9.5 b	117.6 a	140.6	57.2±9.5 d	22.5±0.6 c	67.3±2.1 c	56.4±1.8 c	138.5±15.9 a	14.4±2.0 c	

I: 灌水量; P: 降水量; SWCA: 土壤水消耗量; WUE: 水分利用效率; WUE_I: 灌溉水利用效率; WUE_P: 降水利用效率; WUE_S: 土壤水利用效率; IB: 灌溉效益。各列数据后相同字母表示在 0.05 水平差异不显著。

I: irrigation amount; P: precipitation; SWCA: soil water consumption amount; WUE: water use efficiency; WUE_I: irrigation water use efficiency; WUE_P: precipitation use efficiency; WUE_S: soil water use efficiency; IB: irrigation benefit. Values followed by the same letter with a column are not significantly different at $P < 0.05$.

次灌水量为 60~75 mm。本文改进确定灌溉量的方法, 通过测定土壤墒情来计算小麦主要生育时期需要补充灌溉的水量。结果表明, W1、W2 和 W3 处理在 2007—2008 生长季分别灌水 43.8 mm、80.0 mm 和 103.4 mm, 产量达到 8 837.8 kg hm⁻²、8 466.0 kg hm⁻² 和 8 156.5 kg hm⁻²; 在 2008—2009 生长季分别灌水 13.8 mm、62.9 mm 和 117.6 mm, 产量达到 9 040.9 kg hm⁻²、8 951.4 kg hm⁻² 和 7 918.8 kg hm⁻²。两生长季总灌溉量均低于 120 mm, 籽粒产量均高于 7 500 kg hm⁻², 说明测墒补灌能够实现节水高产。

小麦在某些生育时期水分相对不足或有限度亏缺, 有利于同化物向籽粒转运, 提高收获指数^[24-25]。王家仁等^[26]研究发现, 在小麦拔节前适度水分亏缺, 有利于协调小麦群体与个体关系、控制营养生长过旺、加快分蘖两极分化, 提高光能利用率, 促使个体发育健壮抗倒伏, 最终实现节水高产高效。拔节期和开花期亏缺灌溉, 促进干物质积累; 灌浆期水分亏缺促进营养器官开花前贮藏干物质向籽粒的再转运^[24,27], 降低净光合速率, 加速功能叶片的衰老^[27]; 随着灌水量和灌水次数的增加, 开花前干物质向籽粒的转化率、转化量和对籽粒产量的贡献率均减少^[28-29]。张永平等^[30]认为, 每次灌水 75 mm, 不同灌水处理下开花后群体光合速率与籽粒产量呈正相关, 但春灌 2 水处理其群体光合速率与春灌 4 水处理无显著差异; 春灌 2 水处理在拔节前控水, 单茎上部叶面积较小, 有利于改善花前群体结构、降低群体呼吸和维持开花后较高的群体光合功能。马东辉等^[4]指出, 开花后土壤含水量过高或过低均使小麦旗叶的光合特性降低, 导致减产; 开花后土壤相对含水量在 60%~70% 时, 小麦旗叶的净光合速率、叶绿素含量和叶面积系数最大, 籽粒产量最高。本试验对小麦需水的关键时期, 即播种期、拔节期和开花期的 0~140 cm 土层土壤相对含水量进行调节, 按照设计相对含水量测墒补灌, 随着灌水量增加, 开花前贮藏的营养器官中的干物质开花后向籽粒的再分配量和再分配率增加, 开花后干物质积累量对籽粒的贡献率降低, 与其他灌水处理相比较, W1 处理在各主要生育时期土壤含水量适宜, 在灌浆末期仍保持较高灌浆速率和净光合速率, 提高了开花后干物质的积累量和向籽粒的分配比例, 有利于增加粒重, 这是 W1 处理获得高产的生理基础。

节水农业要解决的关键问题是提高自然降水和灌溉水的利用效率^[31], 小麦节水栽培是节水农业的

重要内容, 麦田耗水量由降水量、灌溉水量和土壤供水 3 部分组成。充足的底墒能够促进小麦根系对土壤水分和养分的吸收, 提高土壤水分利用效率, 使收获时土壤残留水分减少, 扩充了土壤水库的库容, 使其能够在汛期到来时, 接纳蓄存更多的降水, 充分发挥土壤水库的调控功能^[32]。在拔节和开花期亏缺灌溉促进根系生长, 提高了土壤水分的利用效率^[27]。在干旱条件下, 增施氮肥等栽培措施可显著提高土壤水分利用效率^[33]和降水利用效率^[34]。亏缺灌溉有利于提高经济系数和水分利用效率, 在有的试验中会造成产量降低^[35], 但适度水分亏缺可以同时提高作物产量和水分利用效率^[27]。张喜英等^[36]认为, 在常年降水条件下, 冬小麦灌溉制度是在返青至起身期控制水分, 拔节期和抽穗至开花期各灌水 60~70 mm, 灌浆后期进行水分控制, 可保证较高产量, 提高水分利用效率。在本试验条件下, 灌水处理籽粒产量、灌溉水利用效率、降水利用效率和灌溉效益两生长季均随测墒补灌量的增加而显著降低。综合两年结果表明, W1 处理通过测墒补灌, 显著降低了灌溉水用量, 提高了降水利用效率和土壤贮水消耗量, 水分利用效率也较高, 达到了节水高产的目的。

本试验是用水表计量水管灌溉实施的, 如何在生产中进行测墒补灌, 使这一灌溉方法具有可操作性, 有待于进一步研究。

4 结论

在 2007—2008 和 2008—2009 年度小麦生长季, 分别补充灌水 43.8 mm 和 13.8 mm, 播种期、拔节期和开花期土壤相对含水量分别达到 80%、70% 和 70%, 提高了开花后干物质的积累量和向籽粒的分配比例, 在灌浆末期保持较高灌浆速率和净光合速率, 获得了最高的籽粒产量、灌溉水利用效率、降水利用效率、灌溉效益和较高的水分利用效率, 是本试验条件下高产节水的最佳灌溉处理。测墒补灌较常规定量灌溉显著降低了用水量, 为小麦高产节水栽培技术制定提供参考。

References

- [1] Liu B-C(刘布春), Mei X-R(梅旭荣), Li Y-Z(李玉中), Yang Y-L(杨有禄). The connotation and extension of agricultural water resources security. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2006, 39(5): 947-951 (in Chinese with English abstract)

- [2] Xu Z-Z(许振柱), Li C-R(李长荣), Chen P(陈平), Yu Z-W(于振文), Yu S-L(余松烈). Effect of soil drought on physiological characteristics and dry matter accumulation in winter wheat. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2000, 18(1): 113–118 (in Chinese with English abstract)
- [3] Fang Q-X(房全孝), Chen Y-H(陈雨海), Li Q-Q(李全起), Yu S-Z(于舜章), Yu S-L(余松烈), Dong Q-Y(董庆余), Luo Y(罗毅), Yu Q(于强), Ou-Yang Z(欧阳竹). Effects of irrigation on photosynthate supply and conversion and related enzymes activity during grain filling period. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2004, 30(11): 1113–1118 (in Chinese with English abstract)
- [4] Ma D-H(马东辉), Zhao C-X(赵长星), Wang Y-F(王月福), Wu G(吴钢), Lin Q(林琪). Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis soil water content on photosynthetic characteristics in flag leaves and yield of wheat. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2008, 28(10): 4896–4901 (in Chinese with English abstract)
- [5] Hu J-C(胡继超), Cao W-X(曹卫星), Jiang D(姜东), Luo W-H(罗卫红). Quantification of water stress factor for crop growth simulation: I. Effects of drought and waterlogging stress on photosynthesis, transpiration and dry matter partitioning in winter wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2004, 30(4): 315–320 (in Chinese with English abstract)
- [6] Zhang Z-X(张忠学), Yu G-R(于贵瑞). Effects of irrigation scheduling on development and water use efficiency in winter wheat. *J Irrig Drainage* (灌溉排水学报), 2003, 22(2): 1–4 (in Chinese with English abstract)
- [7] Xu Z-Z(许振柱), Yu Z-W(于振文). The effects of limited irrigation on water utility of winter wheat. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2003, 21(1): 6–10 (in Chinese with English abstract)
- [8] Ren W(任巍), Yao K-M(姚克敏), Yu Q(于强), Ou-Yang Z(欧阳竹), Wang L(王菱). Effect of water control in combination of depth and amount on dry matter partition and water use efficiency of winter wheat. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), 2003, 11(4): 92–94 (in Chinese with English abstract)
- [9] Li A G, Hou Y S, Wall G W, Trent A, Kimball B A, Pinter P J. Free-air CO₂ enrichment and drought stress effect on grain filling rate and duration in spring wheat. *Crop Sci*, 2000, 40: 1263–1270
- [10] Zhang B C, Li F M, Huang G B, Cheng Z Y, Zhang Y H. Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area. *Agric Water Manag*, 2006, 79: 28–42
- [11] Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, Liang Y L, Hu X T, Cai H J, Gu B J. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agric Water Manag*, 2002, 55: 203–216
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] Jiang D(姜东), Xie Z-J(谢祝捷), Cao W-X(曹卫星), Dai T-B(戴廷波), Jing Q(荆奇). Effects of post-anthesis drought and water-logging on photosynthetic characteristics, assimilates transportation in winter wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2004, 30(2): 175–182 (in Chinese with English abstract)
- [15] Du T-S(杜太生), Kang S-Z(康绍忠), Wang Z-C(王振昌), Wang F(王锋), Yang X-Y(杨秀英), Su X-L(苏兴礼). Responses of cotton growth, yield, and water use efficiency to alternate furrow irrigation. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(12): 1982–1990 (in Chinese with English abstract)
- [16] Zheng J(郑捷), Li G-Y(李光永), Han Z-Z(韩振中). Sino-US irrigation water use efficiencies of main crops. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2008, 24(11): 46–50 (in Chinese with English abstract)
- [17] Rehman S, Khalil S K, Rehman A, Amanullah, Khan A Z, Shah N H. Micro-watershed enhances rain water use efficiency, phenology and productivity of wheat under rainfed condition. *Soil Tillage Res*, 2009, 104: 82–87
- [18] Duivenboodew N V, Pala M, Studer C, Biielders C L, Beukes D J. Cropping systems and crop complementarity in dryland agriculture to increase soil water use efficiency: A review. *Neth J Agric Sci*, 2000, 48: 213–236
- [19] 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)
- [20] Li J M, Inanaga S, Li Z H, Eneji A E. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain. *Agric Water Manag*, 2005, 76: 8–23
- [21] 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)
- [22] Dong B-D(董宝娣), Zhang Z-B(张正斌), Liu M-Y(刘孟雨), Zhang Y-Z(张依章), Li Q-Q(李全起), Shi L(石磊), Zhou Y-T(周永田). Water use characteristics of different wheat varieties and their responses to different irrigation schedulings. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2007, 23(9): 27–33 (in Chinese with English abstract)
- [23] Wang S-F(王淑芬), Zhang X-Y(张喜英), Pei D(裴冬). Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2006, 22(2): 27–32 (in Chinese with English abstract)
- [24] 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
- [25] Chen X-Y(陈晓远), Luo Y-P(罗远培). Study on the compensatory effect of rewatering during the flowering stage after previous

- water stress in winter wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2001, 27(4): 513–516 (in Chinese with English abstract)
- [26] Wang J-R(王家仁), Guo F-H(郭风洪), Sun M-Z(孙茂真), Cui R-L(崔若亮), Guo C-R(郭春荣), Bian P(边萍), Fu G-Y(付光永). Preliminary report on water saving and high efficiency technological indexes for winter water wheat irrigation adjusting water shortage. *J Irrig Drainage* (灌溉排水学报), 2004, 23(1): 36–40 (in Chinese with English abstract)
- [27] 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)
- [28] Xue X-Z(薛绪掌), Wang Z-M(王志敏). Influence of irrigation on growth and evapotranspiration of wheat under whole fertilization before sowing. *J Arid Land Resour Environ* (干旱区资源与环境), 2004, 18(2): 141–146 (in Chinese with English abstract)
- [29] Lan X(兰霞), Zhou D-X(周殿玺), Lan L-W(兰林旺). Effects of irrigation on yield components and grain carbohydrate sources of winter wheat. *J China Agric Univ* (中国农业大学学报), 2001, 6(1): 17–22 (in Chinese with English abstract)
- [30] Zhang Y-P(张永平), Wang Z-M(王志敏), Wang P(王璞), Zhao M(赵明). Canopy photosynthetic characteristics of population of winter wheat in water-saving and high-yielding cultivation. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2003, 36(10): 1143–1149 (in Chinese with English abstract)
- [31] Shan L(山仑), Xu M(徐萌). Water-saving agriculture and its physio-ecological bases. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1991, 2(1): 70–76 (in Chinese with English abstract)
- [32] Liu G-S(刘庚山), Guo A-H(郭安红), An S-Q(安顺清), Lü H-Q(吕厚荃), Bai Y-M(白月明), Wen M(温民). Effect of available soil water at planting on growth of root, canopy and soil water use of winter wheat in field. *J Nat Disasters* (自然灾害学报), 2003, 12(3): 149–154 (in Chinese with English abstract)
- [33] Liu W-G(刘文国), Zhang J-C(张建昌), Cao W-X(曹卫贤), Dang Z-P(党占平), Qiang Q(强秦), Gao Y-J(高亚军), Li S-X(李生秀). Effects of different wheat cultivation methods on soil moisture use-efficiency in dryland soil. *Acta Agric Boreali-Occident Sin* (西北农业学报), 2006, 15(5): 47–51 (in Chinese with English abstract)
- [34] Miao G-Y(苗果园), Yin J(尹钧), Gao Z-Q(高志强), Lu B(卢布), Adams W A. Study on the combined effects of simulated rainfalls and nitrogen treatments on the yield and soil moisture dynamic change of rain-fed winter wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1997, 23(3): 263–270 (in Chinese with English abstract)
- [35] Zhang J H, Su X Z, Li B, Su B L, Li J M, Zhou D X. An improved water use efficiency for winter wheat grown under reduced irrigation. *Field Crops Res*, 1998, 59: 91–98
- [36] Zhang X-Y(张喜英), You M-Z(由懋正), Wang X-Y(王新元). A preliminary study on the regulated deficit irrigation system of winter wheat. *Eco-Agric Res* (生态农业研究), 1998, 6(3): 33–36 (in Chinese with English abstract)