

# 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响

姚宁<sup>1,2</sup>, 宋利兵<sup>1,2</sup>, 刘健<sup>1,2</sup>, 冯浩<sup>1,2,3</sup>, 吴淑芳<sup>1,2</sup>, 何建强<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

<sup>3</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 【目的】为了探究不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量形成的影响, 通过 2012—2013 和 2013—2014 两个生长季在遮雨棚人工控水试验, 对比分析不同分段受旱条件下冬小麦的株高、叶面积指数、生物量、物候期和产量等生态生理指标的动态变化过程。【方法】试验将冬小麦整个生育期划分为越冬、返青、拔节、抽穗和灌浆 5 个主要生长阶段, 每相邻两个生长阶段连续受旱, 形成 4 个不同的受旱时段水平 (D1—D4), 根据小麦生育期的需水量, 设置灌水定额分别为 40 和 80 mm 两个水平 (I1 和 I2), 共形成 8 个处理, 每处理 3 次重复, 在遮雨棚内采用裂区试验布置, 此外在旁边设置 1 个各生育期全灌水的对照处理。【结果】在冬小麦营养生长阶段进行连续水分胁迫时, 明显影响小麦的正常生长发育, 越冬期和返青期受旱时冬小麦的株高和叶面积指数都最小, 但是拔节后受旱对小麦植株生长影响不明显, 且拔节期后冬小麦株高和叶面积指数的平均生长速率均为拔节前的 10 倍; 拔节期前各处理小麦的生物量都没有明显的差异, 但是拔节后各处理差异明显, 越冬期和返青期受旱处理的生物量明显低于其他各处理, 并且后期复水也不能弥补生物量的严重损失; 干旱胁迫能缩短冬小麦的生育期, 在同一灌溉水平下, 受旱阶段 D1、D2、D3、D4 的抽穗期和开花期比对照处理延迟 1—3 d, 且受旱时期越早、胁迫程度越大, 则生育期越提前, 成熟期最多可提前 5 d; 相同灌溉水平下, 若抽穗和灌浆期受旱 (即越冬、返青、拔节期灌水) 可获得较高的有效穗数和穗粒数, 但千粒重较低; 而抽穗和灌浆期灌水, 可以提高冬小麦千粒重, 但穗数和穗粒数较低; 在 I1 和 I2 水平下, 越冬期和返青期受旱处理的产量最低, 仅为对照处理产量的 42% 左右, 但 I1 水平下拔节期和抽穗期受旱的处理产量最高, 约为对照处理的 63%, I2 水平下返青期和拔节期受旱的处理产量最高, 约为对照处理的 75%。【结论】灌水定额和受旱阶段具有明显的交互作用, 返青期和灌浆期为旱区冬小麦田间水分管理的关键时期, 生产中需加强这两个生长阶段的田间水分管理以确保高产。

**关键词:** 冬小麦; 水分胁迫; 生长阶段; 物候期; 生物量; 产量

## Effects of Water Stress at Different Growth Stages on the Development and Yields of Winter Wheat in Arid Region

YAO Ning<sup>1,2</sup>, SONG Li-bing<sup>1,2</sup>, LIU Jian<sup>1,2</sup>, FENG Hao<sup>1,2,3</sup>, WU Shu-fang<sup>1,2</sup>, HE Jian-qiang<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; <sup>2</sup>Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; <sup>3</sup>Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi)

**Abstract:** 【Objective】 To investigate the influences of water stress at different growth stages on the growth and yields of winter wheat, field experiments were conducted under a rainout shelter during two seasons of 2012-2013 and 2013-2014. The dynamic changes of several eco-physical characteristics of wheat growth were measured and compared, including height, leaf area

收稿日期: 2014-11-12; 接受日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51209176)、国家高技术研究发展计划 (“863”计划) (2013AA102904)、高等学校学科创新引智计划 (“111”计划) (B12007)、高等学校博士学科点专项科研基金 (新教师类) (20120204120019)

联系方式: 姚宁, E-mail: yaoning@nwsuaf.edu.cn. 通信作者何建强, E-mail: jianqiang\_he@nwsuaf.edu.cn

index, phenology, biomass, and yield. 【Method】 The whole growth season of wheat was divided into five growing stages (wintering, greening, jointing, heading, and grain filling). Water stress occurred at two continuous stages, while irrigations were applied at other stages, which resulted in four different levels of stress period (D1-D4). Two irrigation levels of 40 mm (I1) and 80 mm (I2) were applied. A total of eight treatments, with three replicates for each, followed a split-plot experiment design. An extra control treatment with irrigation at all five stages was arranged beside. 【Result】 The results showed that normal growth and development of wheat could be obviously influenced by continuous water stress given at vegetative stages. The height, LAI and biomass were the worst for all treatments, when water stress occurred at the stages of wintering and greening. However, the negative influences on wheat growth were not notable when water stress occurred after jointing stage. The average growth rate of height and LAI after jointing was about ten times as that before jointing. There were no notable differences of biomass between all of the treatments until the jointing stage. The biomass values of treatments with water stresses at wintering and greening stages were remarkably lower than other treatments. The irrigation later could not recover these serious biomass losses. Water stress could shorten the whole growth season of wheat, with a maximal 5-day advancing of maturation. At the same irrigation level, the heading and flowering stages could be delayed for 1-3 days for different levels of stress period. For the same irrigation level, relatively higher numbers of productive ears and seeds per ear could be obtained when water stress occurred at the heading and grain filling stages, but with a lower thousand-kernel weight. On the contrary, a relatively higher thousand-kernel weight could be achieved when irrigation was applied at the heading and grain filling stages, but with lower numbers of productive ears and seeds per ear. For irrigation levels of I1 and I2, yields were the lowest when water stress occurred at wintering and greening stages, which was only 42% of the control treatment. However, the treatments with the highest yield were different for different irrigation levels. For I1, it was the treatment with water stress at jointing and heading stages that had the highest yield, or about 63% of the control treatment. For I2, it was the treatment with water stress at greening and jointing stages, which had a yield of about 75% of the control treatment. 【Conclusion】 There was a clear interaction between the intensity and occurring stage of water stress. In general, the greening and filling stages were the critical periods of water demand for winter wheat. Reasonable irrigation managements are needed at these two growth stages to guarantee a higher yield of winter wheat in arid region.

**Key words:** winter wheat; water stress; growth stage; phenology; biomass; yield

## 0 引言

【研究意义】冬小麦是西北干旱半干旱地区的主要粮食作物之一，干旱缺水已成为小麦产量长期低而不稳的主要原因。关中地区冬小麦生育期约为每年10月中旬至次年6月初，而该地区秋季多雨，春季干旱，尤其在冬小麦返青、拔节、灌浆等重要需水时期（3—5月）降水较少，从而加剧了冬小麦生育期的干旱程度<sup>[1]</sup>。大量研究表明，水分胁迫直接影响小麦的生理生态指标和形态结构，进而影响其生长状况和产量<sup>[2-6]</sup>。例如，拔节后期至孕穗期受旱，可造成小花大量不孕，穗粒数减少，而灌浆期缺水则会使麦粒小而瘪<sup>[7]</sup>。灌浆期干旱可以明显影响小麦的灌浆速率，而使小麦灌浆时间缩短，显著影响小麦粒重和最终产量<sup>[8-9]</sup>。Innes 和 Blackwell<sup>[10]</sup>发现在开花前不同生育阶段出现水分胁迫会减少穗粒数，穗粒数减少显然又会影响小麦的产量。因此，探讨冬小麦不同生育阶段的耗水生产特性，对灌溉水的优化分配具有重要意义，也是保证旱区冬小麦高产稳产的重要措施。【前人研究进展】不同生育时期受旱对作物物候期和

产量的影响不同，最终的产量损失不仅与胁迫强度有关，还与作物的生长阶段有关<sup>[11-16]</sup>。Ozturk 等<sup>[17]</sup>研究表明，与充分灌溉相比，连续受旱、早期受旱、雨养以及后期受旱4种不同处理下，小麦产量分别下降了65.5%、40.6%、30.5%和24.0%，降幅存在明显差异。而有些粮食作物在其营养生长阶段的早期和成熟阶段需水量相对较小，对水分胁迫的影响不敏感，对水分胁迫表现出一定的耐受性<sup>[13]</sup>。Igbadun 等<sup>[18]</sup>建议只要在开花期充分灌溉，即使在营养生长阶段和灌浆期进行有限灌溉，仍会获得较高的玉米产量。上述研究为非充分灌溉的实施提供了作物生理学的基础。非充分灌溉实质是一种对水资源优化使用的方法，它在作物对水分胁迫最为敏感的生长阶段进行灌溉，而在其他阶段降雨就能满足作物生长的最低要求<sup>[19-20]</sup>。有研究发现非充分灌溉的适宜时段应该在作物的早期生长阶段<sup>[21]</sup>。虽然水分亏缺会对作物的最终产量造成影响，但影响较小，而使水资源的水分生产力大大提高了，从而使水分生产力而不是作物产量最大化<sup>[22-23]</sup>。非充分灌溉适宜于小麦等大田作物<sup>[24-27]</sup>，有研究表明在三叶-返青时期亏缺灌溉可增产0.88%—8.25%，节水

12.80%—18.55%<sup>[26]</sup>。【本研究切入点】总体上,前人的研究焦点主要集中于单个生育时期水分胁迫对作物的生长和产量的影响,对生育期内多个生长阶段连续受旱对作物的影响研究较少,还有待深入。【拟解决的关键问题】本研究通过遮雨棚下进行的严格田间控水试验,研究不同灌溉水平和不同生育时期连续受旱对旱区冬小麦生长发育过程和产量形成的影响,其目的在于进一步研究冬小麦对相邻两个生育阶段连续受旱的敏感性和响应机制,探明冬小麦最佳灌水时期和灌水量,为旱区冬小麦非充分灌溉制度的制定和水分利用效率的提高提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

田间试验于2012年10月至2014年6月在陕西杨凌西北农林科技大学节水灌溉试验站(34°17' N, 108°04' E, 海拔506 m)进行。该地区为关中旱作类型区,属于暖温带季风半湿润气候区,降水年内分布不均,易形成季节性干旱。试验区土壤为壤土,0—20 cm 土层土壤 pH 为 8.14,有机碳含量 8.20 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量 0.62 g·kg<sup>-1</sup>。试验小区播种面积为 8 m<sup>2</sup>,小区之间有 1.5 m 深的聚乙烯塑料隔离层,可防止侧渗。试区建有活动遮雨棚,降雨时关闭,以杜绝降雨对试验的影响。2012—2013 和 2013—2014 两年度冬小麦生育期内最高气温(maximum temperature)和最低气温(minimum temperature)动态变化见图 1。

### 1.2 试验设计

本试验供试冬小麦品种为关中地区主栽品种之一的小偃 22,播种日期分别为 2012 年和 2013 年的 10

月 15 日,采用条播种植,深度 5—6 cm,行距 25 cm,播种密度 400 万株/hm<sup>2</sup>,收获日期分别于 2013 年 6 月 2 日和 2014 年 6 月 7 日。各处理施肥水平相同,均施用 140 kg N·hm<sup>-2</sup>和 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>作底肥,生长阶段不再追肥。出苗后在各个试验小区内随机选取能够代表小区整体长势的 1 m<sup>2</sup>植株样方进行标记,作为最终产量测定区域,不允许扰动,其他周期性采样在样方外进行。

试验因素为灌溉水平和受旱时段。根据冬小麦各个生育期的需水情况,试验设置灌水定额分别为 40 mm (I1) 和 80 mm (I2) 两个水平;从冬小麦进入越冬起,将冬小麦生育期划分为越冬、返青、拔节、抽穗和灌浆 5 个生长阶段,由于单个生育时期受旱对作物生长影响不大,而相邻两个生长阶段连续受旱可以研究较长的受旱时期对作物生长的影响,因此本次试验设计每相邻两个生长阶段连续受旱,即越冬+返青时段受旱(D1)、返青+拔节时段受旱(D2)、拔节+抽穗时段受旱(D3)和抽穗+灌浆时段受旱(D4) 4 个水平,共 8 个处理,每个处理设置 3 个重复,共计 24 个小区,在遮雨棚内按照裂区试验设计布设各小区(表 1)。另外设置完全灌水处理作为对照,设置 3 个重复。灌水方式为畦灌,用桶量取所需水量。两年度试验的处理相同。

### 1.3 试验测定项目与方法

1.3.1 土壤水分 在标记区外选取植株覆盖的代表性点,土钻取样,深度为 1 m,每隔 20 cm 取样一次,取样后立即回填钻孔,混合均匀存入铝盒,在 105℃ 下用烘干法测定。拔节期前两周取土样一次,拔节后每周取样一次,采样后的钻孔用细土面及时回填,相邻取样钻孔距离均大于 50 cm。田间初始数据见表 2。

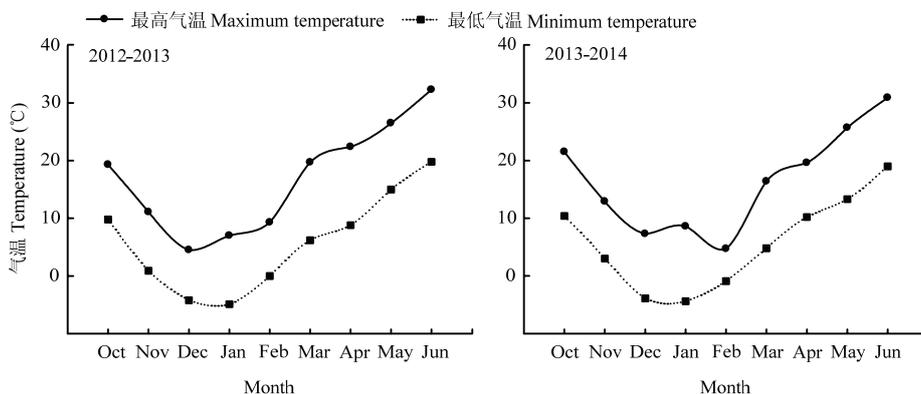


图 1 两年度(2012—2013 和 2013—2014)冬小麦生育期内月平均气温变化

Fig. 1 Monthly average temperatures in the two growth seasons (2012-2013 and 2013-2014) of winter wheat

表 1 冬小麦不同生长阶段受旱试验的灌水处理

Table 1 Experimental treatments of water stress at different stages of winter wheat (mm)

处理 Treatment	越冬期 (12.15) Wintering	返青期 (3.15) Greening	拔节期 (4.15) Jointing	抽穗期 (5.1) Heading	灌浆期 (5.15) Filling	总灌水量 Total irrigation water
CK	80	80	80	80	80	400
I1D1	0	0	40	40	40	120
I1D2	40	0	0	40	40	120
I1D3	40	40	0	0	40	120
I1D4	40	40	40	0	0	120
I2D1	0	0	80	80	80	240
I2D2	80	0	0	80	80	240
I2D3	80	80	0	0	80	240
I2D4	80	80	80	0	0	240

表 2 试验区初始土壤理化性质

Table 2 Initial soil properties of the experimental plot

土层 Layer (cm)	容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	凋萎含水量 Wilting point (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	田间持水量 Field capacity (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	初始含水量 Initial water content (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	
				2012—2013	2013—2014
0-20	1.26	0.15	0.25	0.23	0.20
20-40	1.35	0.16	0.26	0.24	0.21
40-60	1.30	0.16	0.26	0.26	0.18
60-80	1.32	0.14	0.29	0.27	0.18
80-100	1.35	0.15	0.24	0.29	0.21

1.3.2 株高、叶面积和地上部生物量 在各标记区随机选取 3 株小麦进行标定,测定它们不同生育阶段的平均株高;在各标记区随机选取 3 行小麦,采用植物冠层分析仪 (Sunscan, 上海点将精密仪器有限公司) 在中午 11:30—13:30 测定小麦的叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI); 每小区取 5 株小麦,剪去地下部分后于 105℃ 下杀青 0.5 h、75℃ 烘至恒重,测其干重。以上 3 个指标均在拔节期前每两周测定一次,拔节后每周测定一次。

1.3.3 生育期观测 分别观察冬小麦的出苗、返青、拔节、抽穗、开花、灌浆、成熟和收获等 8 个主要生育时期,当小区 50% 小麦出现某生育期特征时,视为该小区已经到该生育期,并记录日期。

1.3.4 产量 小麦成熟后,收获样方内地地上部生物量,统计有效穗数,并取 10 株考察平均穗粒数,最后所有麦穗经人工脱粒,在 105℃ 下杀青 0.5 h、75℃ 烘至恒重后计算产量,并用天平量取千粒重。

## 1.4 统计分析

试验数据采用 Sigmaplot 11.0 处理和作图,用 DPS 7.05 软件统计分析,并用 LSD 法检验差异显著性,显著水平设定为  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

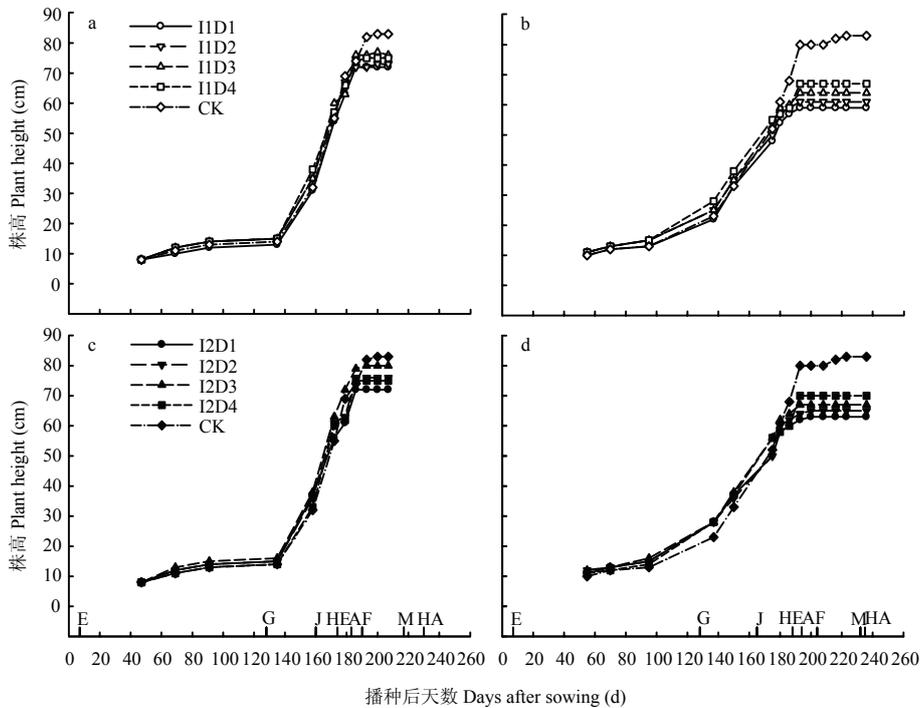
### 2.1 各处理对冬小麦株高和叶面积的影响

在灌溉水平 I1 下 (图 2-a), 不同阶段受旱没有对小麦株高造成明显影响,但在 I2 下略有差别 (图 2-c), 其中受旱阶段 D3 (拔节+抽穗期受旱) 的株高最高,而 D1 (越冬+返青期受旱) 的株高最矮,这说明营养生长阶段前期灌水能够在一定程度上提高冬小麦株高,且灌水量越大效果越明显。上述趋势在 2013—2014 年度 (图 2-b 和 2-d) 的试验中表现更为明显。无论在灌溉水平 I1 下 (图 2-b) 还是 I2 下 (图 2-d), 都是受旱阶段 D4 (抽穗+灌浆期受旱) 和 D3 (拔节+抽穗期受旱) 的株高较高且接近,而 D2 (返青+拔

节期受旱)和 D1(越冬+返青期受旱)的株高较低且接近。通过对比分析,可以进一步判断出在返青期灌水能够提高冬小麦株高,表明返青水可以促进小麦的营养生长。

两年度各处理小麦株高均低于对照处理(图 2)。两个生长季中,小麦株高均表现出返青期前缓慢增长,

随后进入快速增长阶段,到抽穗期趋于稳定。如在 2012—2013 年度,从出苗到小麦株高 15 cm,大约花了 130 d,平均增高速率约为  $0.12 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ;而小麦株高从 15 cm 增加到 75 cm 约 50 d,平均增高速率约为  $1.2 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,约为前一增速的 10 倍。株高在抽穗后(播后 180 d 左右)则基本保持在 70—80 cm。



字母 E、G、J、HE、A、F、M、HA 分别为出苗、返青、拔节、抽穗、开花、灌浆、成熟和收获期。下同

The letters E, G, J, HE, A, F, M and HA represent the different growth stages of emergence, greening, jointing, heading, anthesis, filling, maturity and harvest, respectively. The same as below

图 2 2012—2013 (a、c) 和 2013—2014 (b、d) 年度分段受旱条件下冬小麦株高随时间的变化规律

Fig. 2 Plant heights of winter wheat at different growth stages under different conditions of water stress in the two seasons of 2012-2013 (a, c) and 2013-2014 (b, d)

在同一灌溉水平下,受旱时段 D4(抽穗+灌浆期受旱)和 D3(拔节+抽穗期受旱)具有相近的 LAI 值,且高于受旱时段 D2(返青+拔节期受旱)和 D1(越冬+返青期受旱)。这表明在返青期灌水能够提高冬小麦的 LAI,和株高的变化趋势相似。同时,处理 I2D3 和 I2D4 对应的最大 LAI 值略大于处理 I1D3 和 I1D4,表明灌水量较大时对 LAI 有一定的提高作用。类似的变化趋势在 2013—2014 年度也存在(图 3-b 和 3-d)。

两年度各处理小麦 LAI 均低于对照处理(图 3)。在两年度试验中,各处理冬小麦的 LAI 在返青前(播后的 130 d 左右)缓慢增长,随后开始迅速增大,到

灌浆期(播后 190 d 左右)达到最大值,此后随植株的衰老,叶片枯萎, LAI 迅速下降。以 2012—2013 年度为例,从出苗到返青(约 130 d) LAI 由 0 增加到大约 1.0,平均增速约为  $7.7 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$ ;而从返青到灌浆(约 60 d), LAI 由 1.0 增加到大约 5.6,平均增速约为  $7.7 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ ,约为上一增速的 10 倍。这和株高增速的变化情况基本一致。综上所述,若在返青期发生水分胁迫,会对冬小麦个体和叶面积产生一定的抑制作用。相反,若在作物生长后期发生胁迫,冬小麦形态已经定型,因此不会对株高和叶面积产生大的影响。

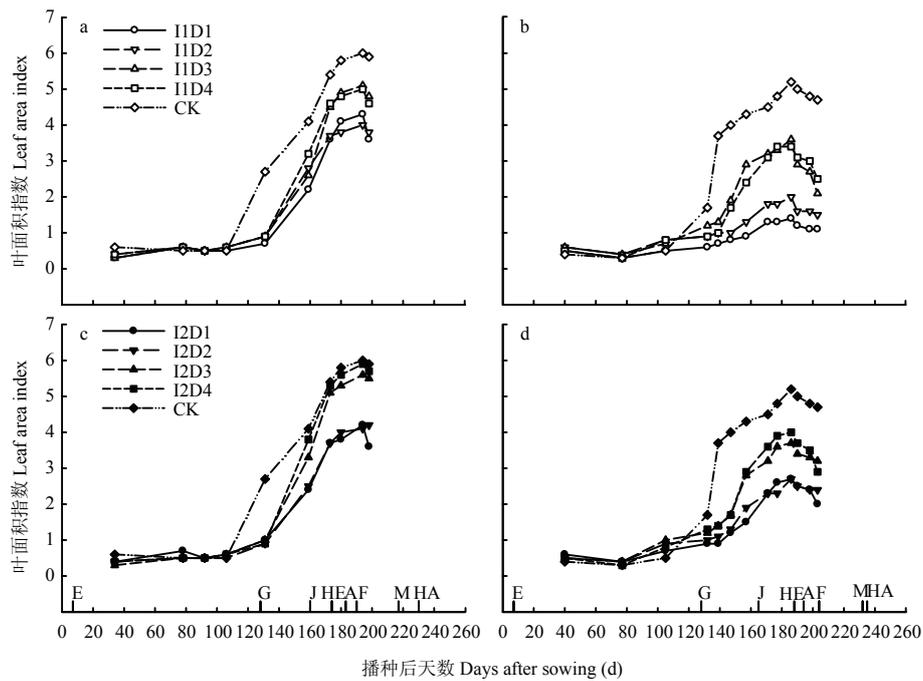


图3 2012—2013 (a、c) 和 2013—2014 (b、d) 年度分段受旱条件下冬小麦叶面积指数随时间的变化规律

Fig. 3 Leaf area index of winter wheat at different growth stages under different conditions of water stress in the two seasons of 2012-2013 (a, c) and 2013-2014 (b, d)

## 2.2 各处理对冬小麦地上部生物量的影响

2012—2013 年度各处理地上部生物量明显低于对照处理 (图 4-a 和 4-c)。在灌溉水平 I1 下, 所有受旱阶段水平的地上部生物量均无明显差异; 在 I2 下, 受旱阶段 D1 (越冬+返青期受旱) 的地上部生物量略低于其他水平。但在 2013—2014 年度, 情况则较为复杂。这主要是因为 2012—2013 年度播种前降水较多, 土壤墒情较佳, 返青前后没有严重的水分胁迫, 拔节期复水后小麦生长均一, 而 2013—2014 年度播前土壤墒情较差, 若越冬和返青期受旱, 土壤水分胁迫加剧, 拔节期复水后各处理差异很大。因此水分胁迫对冬小麦生物量的影响更为明显。该年度各处理地上部生物量均低于对照处理 (图 4-c 和 4-d)。在灌溉水平 I1 下, 受旱阶段 D1 (越冬+返青期受旱) 的地上部生物量最低, 其次为 D2 (返青+拔节期受旱), 而 D3 (拔节+抽穗期受旱) 和 D4 (抽穗+灌浆期受旱) 地上部生物量最高, 且彼此间无明显差别; 在灌溉水平 I2 下, 受旱阶段 D1 (越冬+返青期受旱) 的地上部生物量明显低于其他 3 个受旱阶段水平, 而 D2 (返青+拔节期受旱)、D3 (拔节+抽穗期受旱) 和 D4 (抽穗+灌浆期受旱) 间则差别较小。这表明在冬小麦营养

生长前期, 如果长时间受旱, 会对地上部生物量造成较大的损失, 后期灌水并不能弥补这种损失。受旱阶段 D2 (返青+拔节期受旱) 和 D1 (越冬+返青期受旱) 相比, 只是将返青期的灌水提前到了越冬期, 从而能够保证在土壤中有足够的水分供小麦营养生长前期使用, 最终的生物量就没有发生大的减少。因此, 应保证在拔节期之前通过降雨或者灌溉进行一次水分补充, 才能保证冬小麦地上部生物量不发生大的减少。

在两个年度中, 试验各处理的地上部生物量和株高、LAI 一样, 均表现出类似的发展趋势, 即拔节 (播后 150 d 左右) 以前增长很缓慢, 随后迅速增长, 到成熟期 (播后 240 d 左右) 达到最大, 之后基本保持不变。

## 2.3 各处理对冬小麦生育期的影响

2012—2013 和 2013—2014 两年度, 不同分段受旱处理对冬小麦主要生育期均产生了不同程度的影响。在 2012—2013 年度, 各处理在拔节以前, 主要生育期基本一致 (图 5-a), 没有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 但从拔节以后抽穗、开花、灌浆和成熟期因水分胁迫情况的不同而发生了变化, 差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。其中 I1D1 处理因为全生育期灌水量仅为 120 mm, 且

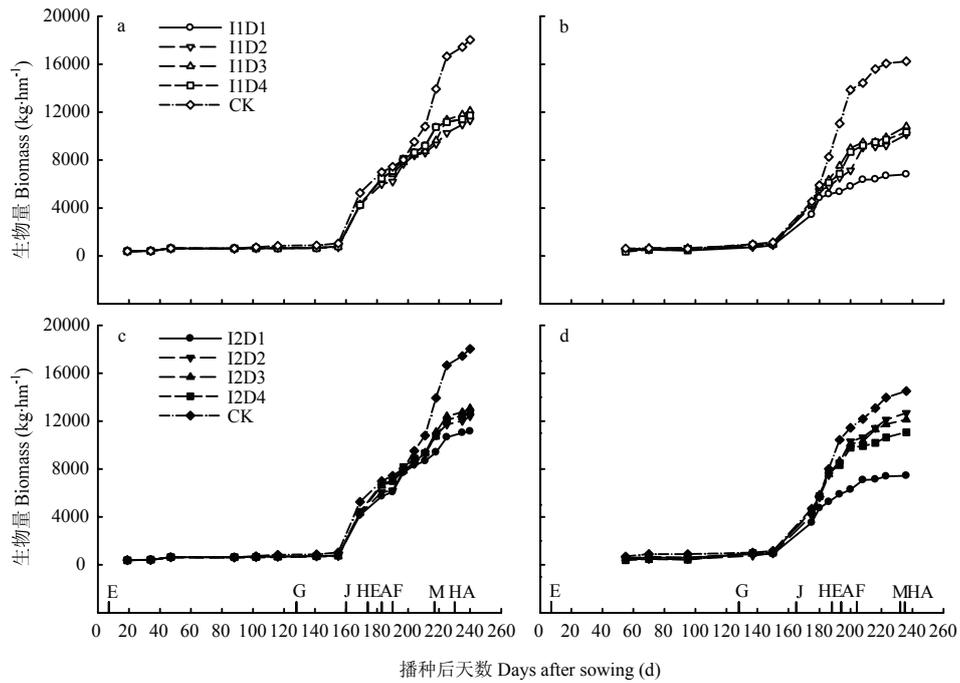


图 4 2012—2013 (a、c) 和 2013—2014 (b、d) 年度分段受旱条件下冬小麦地上部分生物量积累的规律

Fig. 4 Aboveground biomass accumulation of winter wheat at different growth stages under different conditions of water stress in the two seasons of 2012-2013 (a, c) and 2013-2014 (b, d)

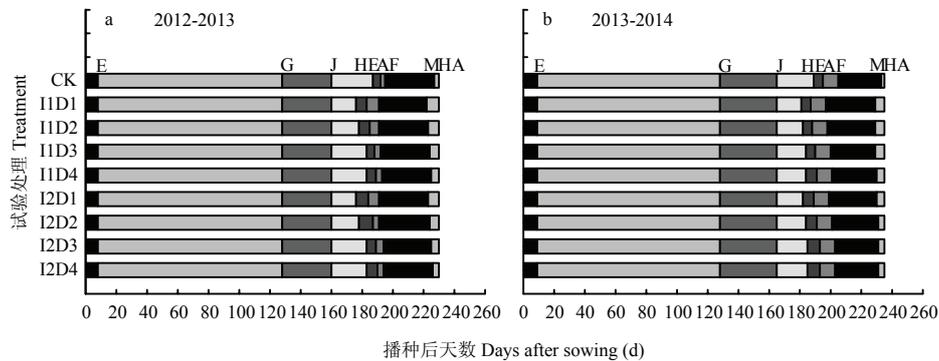


图 5 两年度分段受旱对冬小麦生育期的影响

Fig. 5 Growing stages of winter wheat under different conditions of water stress in the two whole growing periods

越冬和返青期连续受旱，因此后期各生育期均比其它处理提前，其中成熟期最大提前约 5 d。同一灌溉水平 (I1 或 I2) 下，受旱阶段 D1、D2、D3、D4 的抽穗期和开花期依次延迟 1—3 d，换言之，水分胁迫发生的越早，则抽穗和开花期提前越早。不同的灌溉水平也对物候期有影响，其中 I1 各处理的抽穗和开花期比 I2 对应各处理均提前 1—3 d，这表明水分胁迫程度较重对冬小麦物候期有一定的提前作用。2012

—2013 年度对照处理的抽穗、开花、灌浆和成熟期均晚于其他各处理，其中，抽穗期最大差值为 9 d (图 5-a)。2013—2014 年度也有类似特性，这再次表明，干旱胁迫发生的越早，则冬小麦的抽穗、开花和灌浆期越提前。

### 2.4 各处理对冬小麦产量的影响

在 2012—2013 和 2013—2014 年度，不同的水分胁迫情形对冬小麦产量和产量构成因子均产生了较明

显的影响(表 3)。在 2012—2013 年度 I1 水平下,受旱阶段 D3(拔节+抽穗受旱)和 D4(抽穗+灌浆受旱)的有效穗数和穗粒数均高于 D1(越冬+返青受旱)和 D2(返青+拔节受旱),这是因为越冬和返青灌水使得小麦营养生长期前期水分充足,有效分蘖占总分蘖的比重较大,形成的有效穗数较多,但千粒重低于 D1 和 D2,这表明灌浆期缺水对小麦千粒重有减小的作用,进而影响最终的籽粒产量。受旱阶段 D1 和 D2 之间, D3 和 D4 之间无显著差异,表明返青期是影响有效穗数、穗粒数和产量的关键期,而抽穗期是影响千粒重的关键期。小麦的最终产量是由有效穗数、穗粒数、千粒重共同决定的,获得最高和最低产量的处理分别为 I1D3 和 I1D1,这表明在营养生长阶段早期,尤其是返青期缺水对冬小麦的减产作用较明显。在灌溉水平 I2 下也存在类似的特性。

2013—2014 年度与上年度有较大不同,有效穗数、穗粒数和产量均明显低于上年度。这是由于 2013—2014 年度播种前土壤墒情较差,拔节前水分供应不足所致,也可能与当年气候变化有很大关系。因此,水分亏缺对小麦产量的影响变得也更为明显。2013—2014 年度灌溉水平 I1 和 I2 下,受旱阶段 D3(拔节+抽穗受旱)和 D4(抽穗+灌浆受旱)的有效穗数、穗粒数和千粒重之间接近,且均高于 D1(越冬+返青受旱)和 D2(返青+拔节受旱),这和 2012—2013 年度的结果基本是一致的。无论在灌溉水平 I1 或 I2 下,受旱阶段 D1(越冬+返青受旱)的产量都是最低的,仅为最大值(I1D3 和 I2D2)的 66%和 67%,再次证明若播种期土壤墒情不足,则冬小麦越冬和返青期受旱会造成较大的产量损失,即便后期充足灌水,也不能完全弥补。

表 3 2012—2013 和 2013—2014 年度不同分段受旱试验处理对冬小麦产量和产量构成因子的影响

Table 3 Influences of water stress at different growth stages on the growth and yields of winter wheat in the two seasons of 2012-2013 and 2013-2014

处理 Treatment	2012—2013				2013—2014			
	有效穗数 Productive panicles ( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	有效穗数 Productive panicles ( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
CK	676.50	38	36.20	8407	617.00	30	47.23	7488
I1D1	562.67b	33b	33.73a	5079d	453.33b	22c	44.27a	2927b
I1D2	557.67b	31c	33.28a	5202c	455.00b	23c	43.31a	4375a
I1D3	679.33a	37a	27.06b	5626a	491.33a	25b	41.42b	4440a
I1D4	670.67a	38a	26.84b	5316b	491.67a	27a	40.40b	4168ab
I2D1	580.33c	33b	36.99a	5755d	451.00b	24c	45.71a	3503c
I2D2	598.67bc	34b	34.51a	6682a	466.00b	26b	46.10a	5243a
I2D3	675.33a	36a	27.84b	6460b	518.67a	30a	43.89b	4884b
I2D4	652.33ab	36a	27.75b	6323c	520.67a	31a	43.10b	4733b

同一年度中,每列不同字母表示在同一灌溉水平下处理间差异显著( $\alpha=0.05$ )

In the same season, values with different letters within each column are significantly different at  $\alpha=0.05$  for the same irrigation level

### 3 讨论

本研究结果表明,不同生育阶段进行水分胁迫对旱区小麦株高、LAI 和地上部分生物量都有明显的影响。拔节前受旱的各处理株高、LAI 和生物量均低于拔节后受旱的处理,且 D3 阶段受旱的值最大, D1 阶段受旱的值最小。这表明在冬小麦营养生长前期,如果长时间受旱,会对地上部生物量造成较大的损失,

后期灌水并不能弥补这种损失。受旱阶段 D2 和 D1 相比,只是将返青期的灌水提前到了越冬期,从而能够保证在土壤中有足够的水分供小麦营养生长期使用,因此最终的生物量没有发生大的减少。因此,水分胁迫不一定总是不利的,在作物生长过程中进行适宜的水分亏缺可以增强作物后期的抗旱能力,避免植株生长过旺消耗过多的水分和营养物质<sup>[28]</sup>。在关中地区,如果出苗后施加一定的水分胁迫,越冬或返青期

增加一次灌水, 可以减小水分胁迫对植株个体生长的抑制作用, 一定程度上能够提高冬小麦株高、LAI 和地上部分生物量, 且灌水量越大效果越明显。

不同分段受旱对冬小麦物候期也有很大影响, 且拔节后更明显。同一灌溉水平下, 水分胁迫发生的越早, 抽穗和开花期越提前, 越冬期受旱可使成熟期提前 3 d。不同的灌溉水平也对物候期有影响, 灌水量越小, 物候期越提前, 最大可使成熟期提前 3 d。因此, 水分胁迫越早, 胁迫越严重, 物候期越提前, 这与前人研究结果一致<sup>[29]</sup>。关中地区为一年两熟制地区, 适宜的水分胁迫, 既可以缩短冬小麦的物候期, 避免影响下一季作物的种植, 还可能实现稳产或减产最小的目的。

本研究还表明灌水定额和受旱阶段具有明显的交互作用, 在 I1 和 I2 水平下, 水分胁迫对小麦有效穗数, 单穗籽粒数、千粒重以及产量均有显著影响。在 I1 水平下, 如果 D1 阶段受旱, 则无法满足冬小麦前期的正常生长, 加之后期灌水量小, 复水后生长状况仍然不好, 导致最终产量偏低; 而在 D3 阶段受旱时, 拔节前灌水能满足小麦正常生长的需求, 后期灌水对产量贡献不大, 因此产量最高, 但由于灌浆时缺水导致千粒重较低, 这表明灌浆水对籽粒形成有明显的影响。在 I2 水平下, D2 阶段受旱时产量最高, 这是由于越冬复水, 满足小麦正常生长的需求, 在经过返青和拔节受旱后, 抽穗和灌浆期复水可提高小麦有效穗数、穗粒数和千粒重, 从而可获得较高的产量。因此, 不同生育阶段水分胁迫对小麦产量及其构成因素都有很大的影响, 拔节水可明显增加有效穗数, 抽穗和灌浆期灌水可以提高穗粒数和千粒重<sup>[30]</sup>。

本研究认为返青期和灌浆期为冬小麦的关键灌水时期, 这与前人研究略有不同, 他们认为冬小麦的关键需水期均为拔节期到抽穗期<sup>[31-34]</sup>。这主要是因为前人的研究都是在非控水条件下进行的, 也就是说除了不同阶段的灌水外还有降雨补给, 而本研究是在遮雨棚下进行的严格控水试验, 几乎完全得不到降雨补给, 底墒越来越低, 因此小麦苗期的灌溉影响就显得更为明显。此外, 对于苗期(出苗到拔节期)均不灌水的处理, 经长期受旱后再复水, 小麦无法恢复正常生长, 导致减产严重, 这也再次说明了返青水对小麦稳产的重要作用。

## 4 结论

在干旱半干旱地区, 拔节前灌水能够减小水分胁迫

对植株个体生长的抑制作用, 在一定程度上提高冬小麦株高、LAI 和地上部分生物量, 且灌水量越大提高幅度越大; 水分胁迫越早, 胁迫越严重, 生育期提前越早, 最多可使成熟期提前 5 d, 若返青期或拔节期进行适宜的水分胁迫, 可以避免影响下一季作物的种植; 越冬期、返青期和拔节期灌水可以增加小麦的有效穗数和穗粒数, 抽穗期和灌浆期灌水可以增加小麦的千粒重; 返青期和灌浆期为冬小麦水分管理的关键时期, 若在这几个阶段灌水, 不仅可以保证小麦的正常生长, 缩短小麦的生育期, 还可以增加有效穗数、穗粒数和千粒重, 最终达到节水稳产的目的。

## References

- [1] 王文佳, 冯浩. 基于 CROPWAT-DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 795-802.  
Wang W J, Feng H. Water requirement and irrigation systems of winter wheat: CROPWAT-DSSAT model solution in Guanzhong District. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(6): 795-802. (in Chinese)
- [2] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 周涌, 金轲, 郭世昌, 王自力, 王书子. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响. 中国农业科学, 1996, 29(4): 67-74.  
Cheng X G, Wang D S, Zhang M R, Zhou Y, Jin K, Guo S C, Wang Z L, Wang S Z. Effects of different soil moisture condition on winter wheat growth and nutrient uptake. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 29(4): 67-74. (in Chinese)
- [3] 王俊儒, 李生秀. 不同生育时期水分有限亏缺对冬小麦产量及其构成因素的影响. 西北植物学报, 2000, 20(2): 193-200.  
Wang J R, Li S X. Effect of water-limited deficit stress in different growth stages on winter wheat grain yields and their yield constituents. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(2): 193-200. (in Chinese)
- [4] 申孝军, 孙景生, 刘祖贵, 张俊鹏, 刘小飞. 灌水控制下限对冬小麦产量和品质的影响. 农业工程学报, 2011, 26(12): 58-65.  
Shen X J, Sun J S, Liu Z G, Zhang J P, Liu X F. Effects of low irrigation limits on yield and grain quality of winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 26(12): 58-65. (in Chinese)
- [5] 胡梦芸, 张正斌, 徐萍, 董宝娣, 李魏强, 李景娟. 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. 作物学报, 2007, 33(10): 1711-1719.  
Hu M Y, Zhang Z B, Xu P, Dong B D, Li W Q, Li J J. Relationship of water use efficiency with photoassimilate accumulation and transport

- in wheat under deficit irrigation. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10): 1711-1719. (in Chinese)
- [6] 刘晓英, 罗远培, 石元春. 水分胁迫后复水对冬小麦叶面积的激发作用. *中国农业科学*, 2001, 34(4): 422-428.
- Liu X Y, Luo Y P, Shi Y C. The stimulating effects of rewatering in subjecting to water stress on leaf area of winter wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(4): 422-428. (in Chinese)
- [7] 金善宝. *中国小麦学*. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- Jin S B. *China Wheat*. Beijing: China Agriculture Press, 1996. (in Chinese)
- [8] 吴少辉, 高海涛. 干旱对冬小麦粒重形成的影响及灌浆特性分析. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(2): 49-51.
- Wu S H, Gao H T. Analysis on the effect of drought on the grain weight grow and the character of the grain filling of winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(2): 49-51. (in Chinese)
- [9] 房稳静, 张雪芬, 郑有飞. 冬小麦灌浆期干旱对灌浆速率的影响. *中国农业气象*, 2006, 27(2): 98-101.
- Fang W J, Zhang X F, Zheng Y F. Influence of drought on filling velocity of winter wheat during filling period. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(2): 98-101. (in Chinese)
- [10] Innes P, Blackwell R. The effect of drought on the water use and yield of two spring wheat genotypes. *The Journal of Agricultural Science*, 1981, 96(3): 603-610.
- [11] Çakir R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 2004, 89(1): 1-16.
- [12] Claassen M, Shaw R H. Water deficit effects on corn. I. grain components. *Agronomy Journal*, 1970, 62(5): 652-655.
- [13] Doorenbos J, Kassam A H. *Yield Response to Water*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979.
- [14] 王晨阳, 郭天财, 彭羽, 朱云集, 马冬云, 张灿军. 花后灌水对小麦籽粒品质性状及产量的影响. *作物学报*, 2004, 30(10): 1031-1035.
- Wang C Y, Guo T C, Peng Y, Zhu Y J, Ma D Y, Zhang C J. Effects of post-anthesis irrigation on grain quality indices and yield in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(10): 1031-1035. (in Chinese)
- [15] 胡继超, 曹卫星, 姜东, 罗卫红. 小麦水分胁迫影响因子的定量研究. *作物学报*, 2004, 30(4): 315-320.
- Hu J C, Cao W X, Jiang D, Luo W H. Quantification of water stress factor for crop growth simulation. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(4): 315-320. (in Chinese)
- [16] 陈晓远, 罗远培. 开花期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究. *作物学报*, 2001, 27(4): 512-516.
- Chen X Y, Luo Y P. Study on the compensatory effect of rewatering during the flowering stage after previous water stress in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(4): 512-516. (in Chinese)
- [17] Ozturk A, Aydin F. Effect of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2004, 190(2): 93-99.
- [18] Igbadun H E, Tarimo A K, Salim B A, Mahoo H F. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop. *Agricultural Water Management*, 2007, 94(1): 1-10.
- [19] English M. Deficit irrigation. I: analytical framework. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1990, 116(3): 399-412.
- [20] Kirda C, Kanber R, Tulucu K. Yield Response of Cotton, Maize, Soybean, Sugar Beet, Sunflower and Wheat to Deficit Irrigation// *Crop Yield Response to Deficit Irrigation*. Boston, MA: Kluwer Academic Publication, 1999: 21-38.
- [21] 蔡焕杰, 康绍忠. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究. *农业工程学报*, 2000, 16(3): 24-27.
- Cai H J, Kang S Z. Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(3): 24-27. (in Chinese)
- [22] Fereres E, Soriano M A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(2): 147-159.
- [23] Zhang H, Oweis T. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 1999, 38(3): 195-211.
- [24] Kang S Z, Zhang 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. *Agricultural Water Management*, 2002, 55(3): 203-216.
- [25] 孟兆江, 贾大林, 刘安能, 庞鸿宾, 王和洲, 陈金平. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 66-69.
- Meng Z J, Jia D L, Liu A N, Pang H B, Wang H Z, Chen J P. Effect of regulated deficit irrigation on physiological mechanism and water use efficiency of winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(4): 66-69. (in Chinese)
- [26] 山仑. 节水农业与作物高效用水. *河南大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(1): 1-5.
- Shan L. Water-saving agriculture and of crop high efficient use of water. *Journal of Henan University: Natural Science*, 2003, 33(1): 1-5. (in Chinese)
- [27] 张步琮, 李凤民, 齐广平. 调亏灌溉对干旱环境下春小麦产量与水

- 分利用效率的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 58-62.
- Zhang B C, Li F M, Qi G P. Effects of regulated deficit irrigation on grain yield of spring wheat in an arid environment. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 58-62. (in Chinese)
- [28] 陈晓远, 罗远培. 不同生育期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 35-37.
- Chen X Y, Luo Y P. Compensatory effects of water-recovery during different growth durations on winter wheat under water stress. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(1): 35-37. (in Chinese)
- [29] 孙宏勇, 刘昌明. 不同时期干旱对冬小麦产量效应和耗水特性研究. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 13-16.
- Sun H Y, Liu C M. Effects of water stress in different growth stage on water consumption and yield in winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(2): 13-16. (in Chinese)
- [30] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 刘祖贵, 李晓东. 不同灌水处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究. 灌溉排水学报, 2006, 25(2): 20-23.
- Xiao J F, Liu Z D, Duan A W, Liu Z G, Li X D. Studies on effects of irrigation systems on the grain yield constituents and water use efficiency of winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(2): 20-23. (in Chinese)
- [31] 刘小飞, 孙景生, 王景雷, 刘祖贵, 张寄阳, 张俊鹏, 梁媛媛. 冬小麦喷灌水量与产量关系研究. 安徽农业科学, 2008, 36(2): 475-476, 513.
- Liu X F, Sun J S, Wang J L, Liu Z G, Zhang J Y, Zhang J P, Liang Y Y. Study on the relationship between the sprinkling water volume and the yield of winter wheat. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(2): 475-476, 513. (in Chinese)
- [32] 武永利, 刘文平, 马雅丽, 班胜林. 山西冬小麦作物需水量近45年变化特征. 安徽农业科学, 2009, 37(16): 7380-7383.
- Wu Y L, Liu W P, Ma Y L, Ban S L. Study on characteristics of winter wheat water requirements in 45 years in Shanxi. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(16): 7380-7383. (in Chinese)
- [33] 谭念童, 林琪, 姜雯, 刘义国, 李玲燕. 限量灌溉对旱地小麦旗叶光合特性日变化和产量的影响. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 805-811.
- Tan N T, Lin Q, Jiang W, Liu Y G, Li L Y. Effect of limited irrigation on diurnal variation in flag-leaf photosynthesis and yield of dryland wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 805-811. (in Chinese)
- [34] 夏国军, 阎耀礼, 程水明, 高松洁, 罗毅. 旱地冬小麦水分亏缺补偿效应研究. 干旱地区农业研究, 2001, 19(1): 80-83.
- Xia G J, Yan Y L, Cheng S M, Gao S J, Luo Y. Research on compensatory effects to water deficits on dryland winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, 19(1): 80-83. (in Chinese)

(责任编辑 张晶)