

黄土塬区冬小麦产量及水分利用效率对播前底墒变化与生育期差别供水的响应

李超¹, 刘文兆^{1,2}, 林文², 韩晓阳², 周玲¹, 王亚萍¹

(¹西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】通过黄土塬区播前底墒变化和生育期差别供水(降水+补充灌溉)对冬小麦产量、耗水量以及水分利用效率影响的田间试验,揭示该区域农田有限水资源高效利用的调控机制,明确现有措施下冬小麦旱作生产潜力可实现水平。【方法】划设田间试验小区,在夏闲期通过覆盖保水与生物耗水措施形成底墒差异的基础上,设计如下试验:(1)由不同底墒+生育期降水形成4个冬小麦全生育期无补灌处理,以分析冬小麦产量及水分利用效率对播前底墒变化的响应。其2 m土层底墒变化范围为350—550 mm。(2)相同底墒下不同生育期灌水处理:在平均底墒约为500 mm下分别在拔节期、孕穗期和灌浆期补充灌溉40 mm,探讨冬小麦不同生育期对等量灌溉的响应差别。(3)高底墒542.3 mm与571.6 mm下分别进行灌2水与4水处理,形成冬小麦全生育期比较充分的供水条件,研究冬小麦在低水分胁迫下产量提升的可能程度及其水分利用效率特征。【结果】(1)在黄土塬区降水季节分布特征下,播前底墒对冬小麦产量具有决定性作用,产量随底墒线性增加。在做好夏闲期蓄水保墒的基础上,旱作冬小麦产量可达到充分供水情况下能够取得产量的88%—90%水平。(2)与2 m土层底墒为500 mm且生育期无补充灌溉的处理比较,供水增加同为40 mm时,表现为底墒增加处理的产量提高了11.8%,次之是在拔节期与孕穗期分别补灌的处理,但三者间产量无显著差异;播前底墒较高并在拔节期及孕穗期补充灌溉的处理冬小麦产量达到试验年份较高水平,且作物水分利用效率(WUE)也得到提高。(3)冬小麦产量与耗水量表现为Logistic曲线关系,随着耗水量的增大,产量提升速率表现为先快后慢,边际水分利用效率(MWUE)则持续降低,而WUE表现为上升、达到峰值和下降三个阶段,且WUE到达其最高值的耗水量小于产量到达其最高值的耗水量。【结论】黄土塬区气候条件下,播前底墒差别与生育期差别供水对冬小麦产量均有影响,由底墒或不同生育时期分别增加等量供水在总供水水平相同时其增产效应基本一致;采用Logistic曲线模型可以较好地模拟冬小麦产量与耗水量之间的关系,揭示产量、耗水量及WUE间的内在联系。

关键词: 播前底墒; 补充灌溉; 冬小麦产量; 耗水量; 水分利用效率; 黄土高原

Grain Yield and WUE Responses to Different Soil Water Storage Before Sowing and Water Supplies During Growing Period for Winter Wheat in the Loess Tableland

LI Chao¹, LIU WenZhao^{1,2}, LIN Wen², HAN XiaoYang², ZHOU Ling¹, WANG YaPing¹

(¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi; ²Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】A field experiment was carried out to study the influence of soil water storage before sowing and

收稿日期: 2017-02-13; 接受日期: 2017-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(41571036)、国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001)、国家重点研发计划课题(2016YFC0501602)

联系方式: 李超, E-mail: 915902219@qq.com. 通信作者刘文兆, E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

different water supplies (precipitation + supplemental irrigation) during a growing period on wheat yield, water consumption and water use efficiency, to reveal the regulation mechanism of effective utilization of limited water resources in farmland, and to make clear the achievable level of dryland production potential of winter wheat under the existing measures in the Loess Tableland.

【Method】Field experimental plots were designed as follows, based on different soil water contents achieved by either covering the plot or growing a crop in the summer fallow period. (1) In order to analyze the response of wheat yield and water use efficiency to the change of soil water storage before sowing, four rain-fed treatments with different soil water storage levels were formed in the whole growth period of winter wheat. The water storage in 2 m soil profile changed in the range of 350 - 550 mm. (2) Under the same average soil water storage of 500 mm, 3 respective treatments with one time irrigation of 40 mm at jointing stage, booting stage or filling stage were applied to explore different responses of equal irrigation at different growth stages of winter wheat. (3) Under the high water storage levels of 542.3 mm and 571.6 mm, treatments of 2 times and 4 times irrigation were carried out, respectively, to study the possible increase of winter wheat yield and the features of water use efficiency under low water stress. 【Result】(1) Under the seasonal distribution of precipitation characteristics of Loess Plateau, the soil water storage before sowing had a decisive effect on wheat yield, and wheat yield increases linearly with the soil water storage. When soil water is well conserved in the summer fallow period, the yield of winter wheat in dryland farming can reach 88% - 90% level of wheat yields under sufficient water supply. (2) Compared with the treatment of 500 mm water storage in the 2 m soil profile and no supplemental irrigation, per increase of 40 mm water supply yield increased by 11.8% for the soil water storage increase, followed by irrigation at the jointing stage and booting stage respectively. However, no significant differences between the three treatments were detected. The winter wheat yield of the treatment with higher soil water storage before sowing and 2 times irrigation in both the jointing stage and booting stage reached a high yield level in the test years with a high WUE. (3) There was a Logistic relationship between yield and water consumption. With the increase of water consumption, the yield increased fast at first and then slowly; the marginal water use efficiency (MWUE) declined continuously; WUE showed three stages of change: rising, peak and falling; and the water consumption at the maximum WUE was less than that at the maximum yield. 【Conclusion】Under the climate condition of the Loess Plateau, both the soil water storage before sowing and different water supply during a growing period influenced the yield of winter wheat. Equal incremental water supply by soil water storage or irrigation in different growth periods had basically the same effect on yield when the total water supply was the same. The relationship between yield and water consumption of winter wheat could be simulated by a Logistic curve model that can be used to reveal the intrinsic relationships among yield, water consumption and WUE.

Key words: soil water storage before sowing; supplementary irrigation; winter wheat yield; water consumption; water use efficiency; Loess Plateau

0 引言

【研究意义】黄土高原南部是中国北方冬小麦产区的一部分。近年来随着化肥的大量施用和农田生产力的提高,该地区限制作物产量的主控因子已逐步从养分条件转变为水分条件,农田生产力的进一步提升很大程度上取决于当地水资源供应状况及利用水平^[1-2]。研究并探明该地区冬小麦产量与水分供给之间的关系对于小麦增产及其水分高效利用皆具有重要意义。【前人研究进展】黄土高原深厚的土层可以贮存大量水分持续供给冬小麦生长发育,对冬小麦防旱抗旱具有积极作用^[3-6]。底墒的重要性与冬小麦的生长特性和期间所处的气候环境紧密相关。在小麦返青前的较长时期,小麦根系分布较浅,充足的上层土壤水分,可以满足苗期和休眠时期用水;而在返青后,小麦迅速生长,但此时期正值黄土高原春季少雨阶段,因此,播前底墒对冬小麦的作用尤其重要^[7-9]。

“麦收隔年墒”“三伏多雨好种麦”等农谚也反映了中国北方劳动人民在长期生产中积累的宝贵经验:充足的播前底墒是冬小麦生产的重要保障。节水农业作为灌溉农业与旱地农业的有效结合,是农业进一步发展的必然选择^[10-11],黄土高原通过降雨径流蓄水进行补充灌溉已成为该地区农业增产的途径之一^[12]。该区域冬小麦生育期内降水只及冬小麦需水量的1/2左右^[9],且降水季节分布不均匀,小麦生长处于种植年的雨季后以及收获年的雨季前,关键生育期易发生旱情,导致粮食减产。可见在黄土塬区,麦田水分亏缺是不可避免的,加之小麦在不同生育阶段的需水要求有别,保证小麦生育期内特别是高需水阶段的水分供应可实现产量与水分利用效率的同步提高^[13-14]。【本研究切入点】目前关于底墒对冬小麦产量的重要性已经取得共识,但是对底墒变化的研究以及底墒、生育期降水与补充灌溉结合的研究还需加强;冬小麦全生育期产量与水分间的关系模型,也有待于进一步的探

究。【拟解决的关键问题】黄土塬区冬小麦产量与水分利用效率对播前底墒变化以及生育期差别供水的响应过程特征,不同生育时期增加等量供水对产量的影响差别,具有普适性的冬小麦水分生产函数模型,以及考虑区域冬小麦旱作生产潜力实现的田间水分管理措施选择。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于陕西长武农田生态系统国家野外科学

观测研究站。该区属暖温带半湿润偏旱性季风气候,年均气温 9.1℃,降水年际及季节变化大,年均降水量 584 mm,主要集中在 7—9 月,为典型的一年一熟旱作农业区;地带性土壤为中壤质黑垆土,土层深厚,地下水埋深 40—80 m,田间持水量 22.4%,萎蔫湿度 9%^[1,15-16]。试验时间为 2015 年 7 月至 2016 年 6 月,其中 7—9 月为夏闲期,10 月到次年 6 月为冬小麦生育期。从播种到收获,试验年份冬小麦生育期降水量为 207.8 mm,与同期多年均值大致相等,逐月分布也比较接近(图 1)。

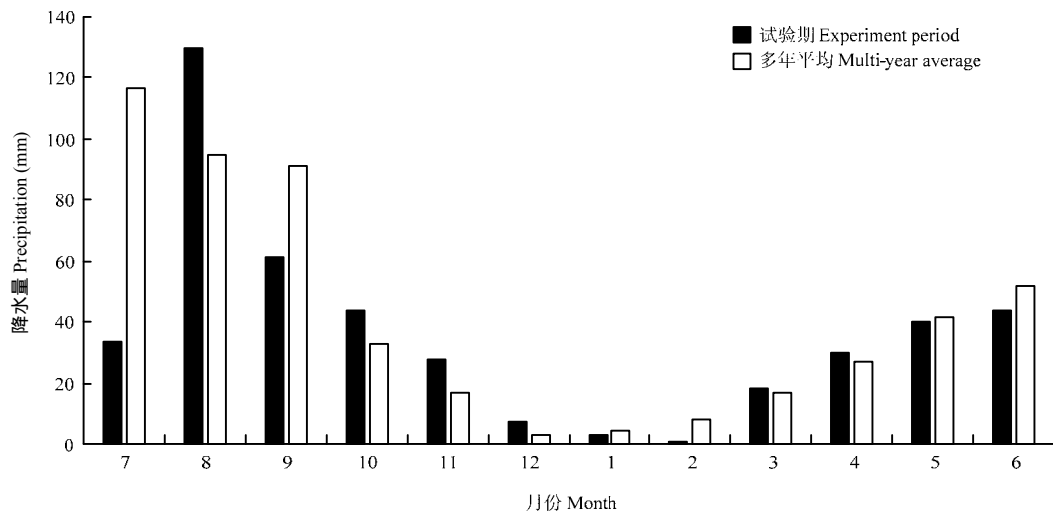


图 1 试验期间逐月降水量

Fig. 1 Monthly precipitation during the experiment

1.2 试验设计

田间划设小区,每小区面积 6 m×4.5 m,于 2015 年夏闲期通过覆盖保墒与玉米不同密度种植差别耗水形成不同底墒基础。具体操作为:在小区初始水分状况调查的基础上,对含水量高的小区进行覆膜、秸秆覆盖以及休闲等保水处理,而在含水量低的小区种植不同密度玉米,最终形成高低差别的冬小麦播前底墒条件,并在播种前采用混土法把所有小区耕层土壤混合匀平,消除养分差异。

供试冬小麦品种为长旱 58,于 2015 年 9 月 26 日播种,翌年 6 月 25 日收获。各小区统一施肥达到当地中上供肥水平(180 kg N·hm⁻²,N:P:K=16:9:3)。每小区播种量按 170 kg·hm⁻² 计算,行距 25 cm。

试验设计包括对照 CK 和 WT1—WT8 共 9 组水分处理,重复 3 次。CK、WT1、WT2、WT3 为 4

组不同底墒处理,全生育期不灌溉,2 m 土层底墒变化范围在 350—550 mm;WT4、WT5、WT6 分别于拔节、孕穗、灌浆期各灌 1 水;WT7 于拔节、孕穗期灌 2 水;WT8 于返青、拔节、孕穗、灌浆期灌 4 水。其中 WT2、WT4、WT5、WT6 底墒基本处于同一水平,2 m 土层约为 502 mm,WT3 与 WT7 底墒相近约为 543 mm。具体底墒情况与试验设计见表 1。

1.3 田间测定与计算

1.3.1 土壤含水量及贮水量 采用烘干法测定土壤含水量,播种期和收获期测定深度为 5 m,其余生育期测定深度为 2 m,其中 1 m 以上土层每 10 cm、1 m 以下土层每 20 cm 测定一次,称量湿土重后 105℃ 烘至恒重,再称量干土重,计算土壤质量含水量。

土壤贮水量由式(1)计算:

表 1 试验设计

Table 1 Design of experiment

处理 Treatment	播前 2 m 土层底墒 Soil water storage in 2 m depth before sowing (mm)	生育期灌溉 Irrigation amount in growth period (mm)				总灌溉量 Total irrigation (mm)
		返青期 Regreening stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Filling stage	
CK	358.2	/	/	/	/	/
WT1	444.8	/	/	/	/	/
WT2	500.4	/	/	/	/	/
WT3	543.8	/	/	/	/	/
WT4	501.4	/	40	/	/	40
WT5	497.5	/	/	40	/	40
WT6	507.9	/	/	/	40	40
WT7	542.3	/	40	40	/	80
WT8	571.6	25	40	40	40	145

“/”表示未进行灌溉 “/” Indicates no irrigation

$$SW=0.10 \times \rho \times H \quad (1)$$

式中, SW 为贮水量 (mm); θ 为土壤质量含水量 (%); ρ 为土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), 试验田土壤取值 $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; H 为土层深度 (cm)。

1.3.2 叶面积指数 采用 LAI-2000 植物冠层仪测定。

1.3.3 冬小麦耗水量与水分利用效率 采用农田水量平衡法计算冬小麦生育期耗水量即麦田蒸散量 ET。研究区域地下水埋藏较深, 其上移补给可忽略不计; 同时试验田地势平坦, 小区间有垄相隔, 无地表径流产生; 以 5 m 深度计, 降水及灌水均难以形成渗漏损失。因此耗水量采用式 (2) 计算:

$$ET=P+I+\Delta SW \quad (2)$$

式中, ET 为计算时段耗水量 (mm); P 为同时段降水量 (mm); I 为同时段灌溉量 (mm); ΔSW 为计算时段 5 m 土层土壤贮水量初始值与期末值之差 (mm)。

水分利用效率 (WUE) 由式 (3) 计算:

$$WUE=Y/ET \quad (3)$$

式中, WUE 为作物水分利用效率 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$); Y 为作物籽粒产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); ET 为全生育期耗水量 (mm)。产量及产量组成测定按照《农业气象观测规范》^[17]进行。其他气象资料由试验站布设的气象观测场提供。

1.4 数据处理及分析

采用 Microsoft Excel 2013、Spss 19.0 等软件进行数据处理及统计分析。

2 结果

2.1 不同水分处理对冬小麦叶面积指数 (LAI) 的影响

叶面积指数 (LAI) 是作物蒸腾耗水以及产量形成过程中的重要参数^[18-19]。图 2 是不同处理冬小麦全生育期平均 LAI 与产量结果。平均 LAI 的计算方法为拟合 LAI 与生育天数之间的曲线关系式后, 采用积分运算求得曲线与生育天数围成的面积从而获取平均 LAI。LAI 与产量 (Y) 间有很好的关系, 由过原点的直线模拟, $Y=3448LAI$, 决定系数 R^2 为 0.96, 达极显著水平。

冬小麦叶面积指数的变化大致可以分为两个阶段, 从出苗到越冬期, LAI 缓慢增长, 进而在一个较低水平上相对稳定; 小麦返青后, 叶面积指数快速增加, 于抽穗期前后达到最高, 而后随着叶片的泛黄枯萎迅速减小。图 3 为本试验各处理的 LAI 动态图, 可以看到冬小麦进入返青期后, LAI 开始迅速增加, 不同供水水平下各处理 LAI 变化的动态相似, 但峰值与均值有别。

2.2 冬小麦产量与水分利用效率对播前底墒和生育期灌溉的响应

2.2.1 冬小麦水分消耗、产量及 WUE 对播前底墒的响应 已有研究表明, 试验区域冬小麦 90% 根系在 0—200 cm 范围内^[20-21], 按 2 m 深度计算土壤底墒如表 2 所示。随着播前底墒的提高, 冬小麦生育期内总耗水量、土壤耗水量及其占比均不断增大, WT1、WT2、WT3 处理总耗水量较 CK 分别增加了 24.1%、48.9%、

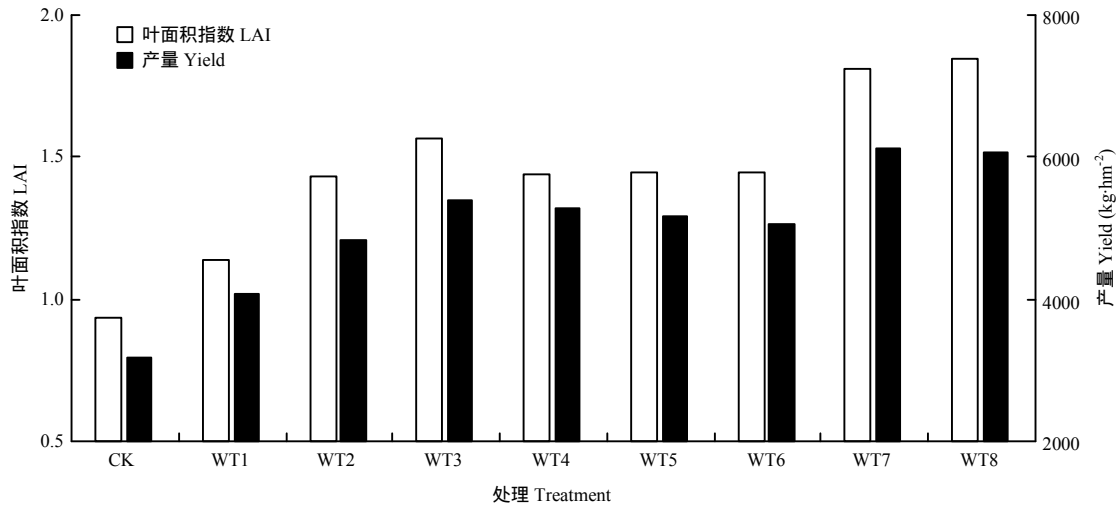
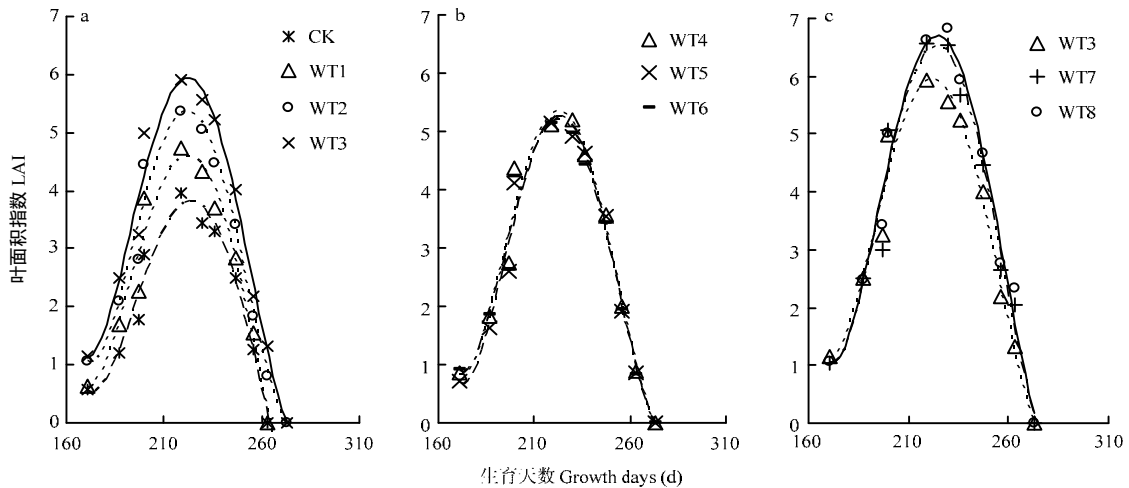


图2 不同处理下冬小麦叶面积指数与产量表现

Fig. 2 LAI and grain yield of winter wheat in different treatments



a: 不同播前底墒处理; b: 相同底墒条件下不同生育期等量灌溉处理; c: 充足底墒条件下不同灌溉量处理
a: Different soil water storage before sowing; b: Equivalent irrigation at different growth stages under the same soil moisture; c: Different irrigation amount under high soil moisture

图3 不同处理下冬小麦返青后 LAI 动态变化

Fig. 3 LAI changes of winter wheat in different treatments after regreening stage

82.3%；土壤耗水增加 82.5%、167.5%、281.9%。产量较 CK 分别提高 28.4%、51.4%、69.3%，在产量组成中有效穗数与穗粒数均随底墒的提高而增加，千粒重基本不变。

无补充灌溉条件下，冬小麦耗水量、产量均受到播前底墒的显著影响。冬小麦全生育期耗水量随着播前底墒的增加而增加。WUE 则表现为先上升后下降的趋势，WT1 处理的 WUE 较高为 11.22 kg·hm⁻²·mm⁻¹。

产量与播前 2 m 土层底墒存在显著的线性正相关关系，生育期雨养条件下每公顷农田 2 m 土层底墒每增加 1 mm，产量可提高 11.9 kg。本试验所有无灌溉处理中以 WT3 的产量表现最高，为 5 388 kg·hm⁻²，该处理 2 m 土层播前底墒为 543.8 mm（达田间持水量的 93.4%），说明在黄土塬区气候条件下充足的播前底墒是旱作冬小麦高产的关键因素。

表 2 各处理冬小麦水分消耗、产量、WUE 与产量组成

Table 2 Water consumption, yield, WUE and yield components of winter wheat in different treatments

处理 Treatment	底墒 Soil water storage before sowing (mm)	总耗水量 Total water consumption (mm)	土壤耗水量 Soil water consumption (mm)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	(灌溉水+降水) 利用效率 Use efficiency of precipitation and irrigation water (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	作物水分利用 效率 WUE (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	有效穗数 Number of efficient panicles (个/m ²)	穗粒数 Grain number per panicle (颗)	千粒重 1000-grain weight (g)
CK	358.2e	293.5e	85.7e	3183e	15.32f	10.85ab	327.1d	26.8bc	45.1a
WT1	444.8d	364.2d	156.4cd	4088d	19.67d	11.22ab	382.4d	26.4bc	45.4a
WT2	500.4c	437.1c	229.3b	4820c	23.20b	11.03ab	422.5c	28.1bc	45.6a
WT3	543.8ab	535.1b	327.3a	5388b	25.93a	10.07ab	498.8b	31.1abc	45.5a
WT4	501.4c	446.9c	199.1bc	5279b	21.30c	11.81a	494.4b	27.9bc	45.2a
WT5	497.5c	428.5c	180.7d	5157b	20.81cd	12.03a	436.3bc	27.8bc	45.0a
WT6	507.9bc	474.1c	226.3b	5043bc	20.35cd	10.64ab	426.5c	28.5bc	46.4a
WT7	542.3ab	508.4b	220.6b	6120a	21.26c	12.04a	685.0a	31.6ab	41.6b
WT8	571.6a	656.0a	303.2a	6073a	17.21e	9.26b	672.2a	33.9a	41.5b

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 土壤耗水量指 5 m 土层贮水播前与收获时之差

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$); Soil water consumption refers to the difference of 5 m soil water storage before sowing and at harvesting

2.2.2 生育期补充灌溉对冬小麦产量、产量组成和 WUE 的影响 WT2、WT4、WT5、WT6 四组处理播前底墒基本一致 (表 2)。WT4、WT5、WT6 分别在拔节期、孕穗期和灌浆期灌溉 40 mm, 产量较 WT2 均有所提高, 其中拔节期和孕穗期灌溉产量提升达到显著水平, 而在灌浆期灌溉并不显著, 表明冬小麦补充灌溉在时期选择上不宜太迟。拔节、孕穗期灌溉处理的 WUE 对比 WT2 有所增加, 灌浆期灌溉则使 WUE 降低, 但均未达到显著水平; 说明在底墒达到 500 mm 时, 灌溉时期对冬小麦 WUE 影响不明显。

WT7、WT8 两组处理在高底墒下进行多次灌溉, 以检验比较持续的充分供水条件下冬小麦的产量效应。两组处理有效穗数显著高于其他处理, 穗粒数也处于较高水平, 虽然千粒重有一定程度的降低, 但产量显著高于其他处理, 达到试验中的最高水平。WT3、WT7、WT8 处理在小麦拔节期末灌水之前 2 m 土层含水量为 17.0%、16.6%、17.2%, 均超过田间持水量的 70%, 显示充足的播前底墒可以使小麦在播种至拔节期都能得到较为充分的水分供应。而在灌浆期 WT3 处理 2 m 土层含水量为 13.2%, WT7、WT8 则由于补充灌溉分别为 16.3%、17.3%, 未进行补灌的 WT3 处理在灌浆期及其后受到较重的水分胁迫, 产量受到一定影响。

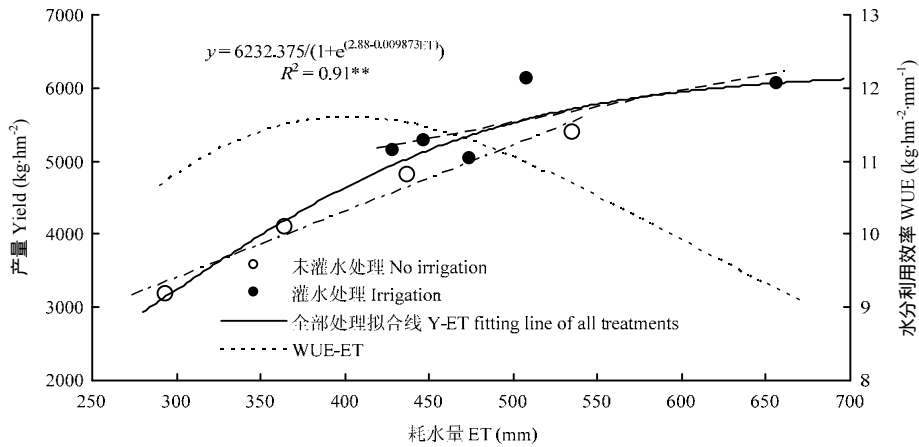
WT8 处理较 WT7 多消耗 147.6 mm 水量, 产量却较 WT7 略有降低, 但无显著差异, 居同一水平。WT7 处理的 WUE 显著高于 WT8, 表明 WT8 存在水资源的浪费。因此黄土塬区冬小麦生产应首先设法提升播前底墒水平, 在拔节前期适度供水以形成合理的群体结构, 孕穗期适度供水使冬小麦灌浆在良好的水分条件下进行, 从而获得较高产量。在较高的播前底墒以及与降水分布相协调的合理灌溉定额下, 冬小麦可由低于持续充分供水条件下的耗水量而获得高产, 增产与节水得到同步实现。

处于雨养条件下的 WT3 处理播前底墒较 WT2、WT4、WT5 和 WT6 处理高约 40 mm, 产量较 WT2 提升显著, 增加了 568 kg·hm⁻², 增幅达 11.8%, 与不同生育期通过等量补灌使总的供水量居同一水平的 WT4、WT5 和 WT6 相比, 产量有增加但不显著, 说明通过提高播前底墒与增加等量的生育期灌溉得到的增产效果在统计意义上具有一致性。

2.3 冬小麦产量、WUE 与水分消耗的关系

有关作物全生育期水分生产函数的研究有很多报道^[22-25], 通过分析作物产量与水分利用效率变化过程, 以寻求有效的管理方式使水资源得到充分利用。图 4 为本试验所有处理冬小麦产量 Y 与总耗水量 ET 的数据点, 采用 Logistic 曲线拟合。

把未灌水处理与灌水处理分开进行分析, 其 Y-ET



**表示 0.01 水平下显著性
* * Indicates 0.01 level of significance

图 4 冬小麦耗水量、产量及水分利用效率之间的关系

Fig. 4 Relationship between ET, grain yield and water use efficiency of winter wheat

关系都表现为线性趋势。未灌水处理生育期除降水外无额外水分投入，与灌水处理相比其耗水量与产量总体上要小一些，但 Y-ET 趋势线较之于灌溉处理者，其斜率却要大一些，说明在此情况下，增加单位水分消耗的产出效率较高，而在补充灌溉的处理中，增加单位水分投入的效率降低。

全部处理的 Y-ET 关系曲线表现为随 ET 增加先快速后缓慢的上升趋势，在水分条件较差时，随着耗水量的增加冬小麦的增产效应较为明显；随着水分投入的不断增大，水分对小麦生长的制约作用逐渐减弱，单位耗水量的增产效应不断下降。当总耗水量在 300、400、500 和 600 mm 时，每公顷增加单位毫米水分消耗分别可增产 15.36、11.71、6.18 和 2.67 kg，表明边际水分利用效率^[24]持续降低。根据 Y-ET 关系绘制 WUE-ET 曲线，如图 4 示，可以看到 WUE-ET 曲线分为明显上升，趋于稳定以及逐渐下降 3 个阶段，当冬小麦总耗水量处于 402 mm 左右时，WUE 达到最大 11.60 kg·hm⁻²·mm⁻¹；当耗水量超过 402 mm 后，WUE 随着耗水量的增加逐渐减小。

图 5 为本试验数据及康绍忠等^[26]与房全孝等^[27]的试验数据各自做标准化计算后的结果，2 条线分别是本试验结果的拟合线与所有数据的拟合线。与康绍忠及房全孝的试验数据相比，本试验中各处理相对产量高于 0.5，更低的生产需要进一步的水分胁迫才能实现，在水分胁迫各阶段均有足量试验的基

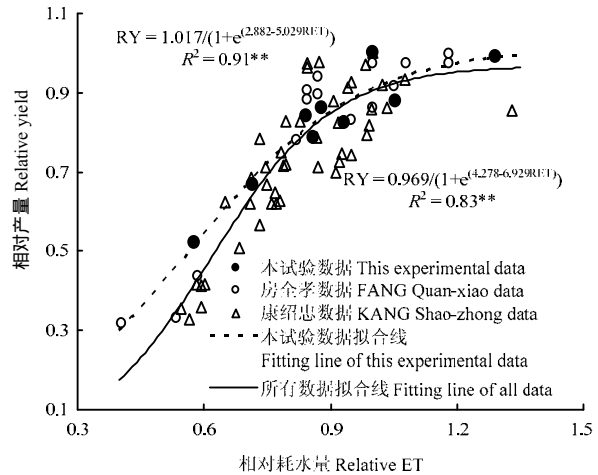


图 5 冬小麦相对产量与相对耗水量关系

Fig. 5 Relationship between relative yield and relative ET of winter wheat

础上，可得到更具普遍意义的 Logistic 模型。一般情况下，水分、养分等资源投入于农业生产都会有报酬递减的现象，通过水分生产函数，分析边际水分利用效率，寻找供水水平、水分消耗与产量之间的最佳结合点，在获得较高产量的同时，又有较高的水分利用效率，可使水资源投入的产出效率达到最佳。这对于在有限的水资源条件下，缓解地区缺水、保证粮食安全具有重要的意义。

标准化计算：

$$RY = \frac{Y}{Y_{\max}} \quad (4)$$

$$RET = \frac{ET}{ET_{\max-Y}} \quad (5)$$

式(4)、(5)中 Y 、 ET 为同一来源数据中的产量与耗水量; Y_{\max} 、 $ET_{\max-Y}$ 为其最大产量与相应的耗水量; RY 、 RET 即为相对产量与相对耗水量。

图 6 是总供水水平 (water supply, 即 WS) 与耗水量 (ET) 的关系图, 二者间存在显著的线性关系, 表明在试验条件下耗水量随着供水量的增加而线性增加。这里总供水量是指生育期降水量、补充灌溉量与 2 m 土层底墒贮水量之和。当处理不同, 但总供水量相同时, 其耗水量在统计上也是相同的。由图 4 给出的产量与耗水量的拟合曲线知, 其产量在统计上也是相同的。这与前面对不同时段增加等量供水, 包括播前底墒或生育期补灌, 在总供水水平相同时, 增产效果基本一致的结论相同。

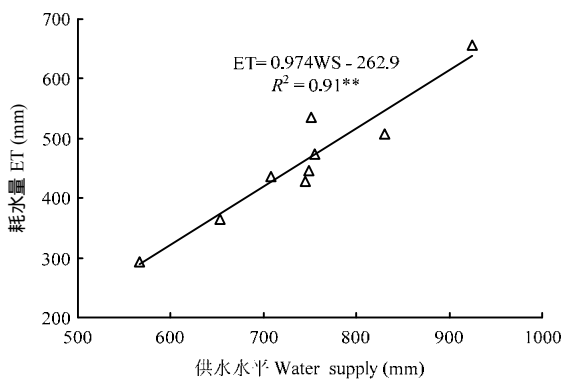


图 6 冬小麦农田供水水平与耗水量的关系

Fig. 6 Relationship between water supply and water consumption in the winter wheat field

3 讨论

播前底墒显著影响小麦产量这一结论已有共识^[6, 28-35]。本研究通过设定不同的底墒水平, 以播种前 2 m 土层土壤储水量为底墒进行分析表明, 播前底墒影响冬小麦对土壤水分的利用程度, 随着播前底墒的提高, 冬小麦总耗水量、土壤耗水量不断增大, 对降水依赖减小。在黄土旱塬地区, 雨养条件下冬小麦产量与底墒呈现线性关系, 播前底墒每增加 1 mm,

冬小麦产量可提高 $11.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 试验中最高底墒已达到田间持水量的 98%。充足的播前底墒保证冬小麦良好的出苗状况并促进其分蘖, 最终提升成熟期单位面积有效穗数, 产量得到提高。已有研究中^[6, 35-36]底墒对 WUE 的影响多与小麦品种、氮肥、磷肥等因素的效应一起进行讨论。本研究在其他条件一致的前提下, 设定系列底墒水平, 表明随着播前底墒不断提高, 旱作冬小麦 WUE 表现为先上升后下降的趋势。播前底墒对产量的影响说明了研究区域做好夏闲期蓄水保水的重要性。各类抑制土表蒸发的覆盖措施在保蓄雨水方面发挥了重要作用, 目前生产实践中应用到的覆盖措施包括秸秆覆盖与薄膜覆盖等。

较为充分的持续供水的 WT7 处理产量为 $6120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相同底墒水平但未施行生育期补灌的 WT3 处理产量为 $5388 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相当于前者的 88.0%。WT3 的底墒是夏闲期通过覆盖措施达到的中上土壤含水量水平, 在试验条件下, WT8 所实现的底墒水平更高, 2 m 土层贮水量为 571.6 mm, 如果不作生育期补充灌溉, 依据图 4 和图 6 可推算出其产量为 $5502.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相当于 WT7 处理的 89.9%, 亦即表明试验年份在做好夏闲期蓄水保墒的条件下, 黄土塬区旱作冬小麦产量可达到充分供水情况下能够取得产量的 88%—90%。

合理的补充灌溉时期是实现小麦高产稳产的重要保障^[37-43]。关于冬小麦最佳补充灌溉时期的研究已有很多, 最佳灌溉时期自播种期至灌浆期均有报道, 如王朝辉等^[44]研究发现分蘖、拔节和灌浆期是小麦需水关键期, 在拔节期补充灌溉小麦对氮、磷、钾的吸收量增加幅度最大; 崔世明等^[39]研究表明灌底墒水和拔节中期水是兼顾小麦籽粒产量和水分利用效率的最佳方式。本研究结果显示增加等量供水, 由播前底墒提供或由生育期灌溉得到, 在总供水量相同时, 其增产效果基本一致。小麦拔节期和孕穗期对水分的需求强度较大, 应保证水分供给。对比播前底墒充足的 3 个处理的冬小麦产量、LAI 以及各生育阶段的土壤水分状况, 充足的底墒在冬小麦拔节期前可以持续发挥充足的水分供给作用, 其后随着小麦对水分的不断消耗, 加之降雨补充不能及时跟进, 底墒已不能完全保证冬小麦生长的水分需求, 冬小麦植株发育及产量形成受到一定的影响。本试验显示在底墒充分的前提下进行拔节、孕穗期补充灌溉可获得高产 (WT7), 表明充

足的播前底墒加上与降水分布相配合的适度灌溉可使冬小麦产量与 WUE 同时得到显著提高。

关于作物全生育期产量-水分关系已有大量的研究报告^[22, 24, 26-27, 45]，作物产量与耗水量间的关系大都采用直线型或二次抛物线型曲线进行研究，在水分较差时，两者表现为直线关系；在水分条件良好时表现为二次抛物线关系。在二次抛物线中随着耗水量的增加，产量会出现下降趋势，但产量下降的原因与显著性，以及相应的 ET 测算的可靠性仍是问题。本试验中着力显示的是水分胁迫差别对冬小麦生长的影响，在其他胁迫的影响一致或者不凸显时，当产量达到最高水平后，再加大水分供应，随着耗水量的继续增加，产量保持稳定，未出现达到显著水平的升降差别。冬小麦产量(Y)与全生育期耗水量(ET)表现为 Logistic 曲线关系，呈现出先快速后缓慢的上升趋势，在水分状况较差时，增加麦田水分投入的增产效应较为明显，而当水分条件较好时，水分投入的边际效率降低。WUE 则随着冬小麦水分消耗的增加表现为先快速上升、相对稳定和逐渐下降 3 个阶段，且先于产量达到其最高值。已有研究表明，关于作物产量与耗水量的关系，通过边界线的方法表现为随 ET 先线性增加而后呈平台稳定的特征^[46]。Logistic 曲线可由单一函数较好地体现这一特点。图 4 中，Y-ET 拟合线以与 ET 轴平行的直线 $Y=6\ 232.4$ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 为渐近线，便具有平台效果。

4 结论

黄土塬区播前底墒显著影响冬小麦产量、耗水量和 WUE，充足的底墒对旱作高产具有决定性作用。随着底墒的提升，小麦产量呈线性增加，本试验中每公顷农田 2 m 土层播前底墒每增加 1 mm，冬小麦产量可提高 11.9kg。夏闲期地表覆盖是增加土壤贮水的有效途径，由此在试验年份达到了充分供水条件下能够取得产量的 88%—90%。

增加等量供水，由播前底墒提供或由生育期补充灌溉给予，在总供水量相同时，其增加冬小麦产量的效果基本一致，但补灌时期不宜太迟。旱作环境下若有一定补充灌溉条件，应设法保证冬小麦高需水阶段包括拔节与孕穗期的水分供给，如此产量与 WUE 都可达到较高水平，增产与节水目标得以同时实现。

冬小麦产量-耗水量关系采用 Logistic 曲线进行拟合，随着耗水量增加产量的变化速率由快而慢，边际水分利用效率逐渐降低，WUE 表现为先升后降的下凹型曲线，WUE 的最大值先于产量而实现。

References

- [1] 黄明斌, 李玉山. 黄土塬区旱作冬小麦增产潜力研究. 自然资源学报, 2000, 15(2): 143-148.
HUANG M B, LI Y S. On potential yield increase of dry land winter wheat on the loess tableland. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(2): 143-148. (in Chinese)
- [2] 钟良平, 邵明安, 李玉山. 农田生态系统生产力演变及驱动力. 中国农业科学, 2004, 37(4): 510-515.
ZHONG L P, SHAO M A, LI Y S. Changes of ecosystem productivity responding to driving forces in semiarid region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 510-515. (in Chinese)
- [3] 李开元, 李玉山. 黄土高原农田水量平衡研究. 水土保持学报, 1995, 9(2): 39-44.
LI K Y, LI Y S. Study on field water balance of loess plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(2): 39-44. (in Chinese)
- [4] 李玉山, 喻宝屏. 土壤深层储水对小麦产量效应的研究. 土壤学报, 1980, 17(1): 43-54.
LI Y S, YU B P. The effect of water storage in deep soil layer on the growth and yield of wheat plant. *Acta Pedagogical Sinica*, 1980, 17(1): 43-54. (in Chinese)
- [5] 刘庚山, 安顺清, 吕厚荃, 郭安红. 华北地区不同底墒对冬小麦生长发育及产量影响的研究. 应用气象学报, 2000, 11(S1): 164-169.
LIU G S, AN S Q, LV H Q, GUO A H. Research on the effect of soil moisture before sowing on the growth and yield of winter wheat in north China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, 11(S1): 164-169. (in Chinese)
- [6] 孟晓瑜, 王朝辉, 李富翠, 李可懿, 薛澄, 李生秀. 底墒和施氮量对渭北旱塬冬小麦产量与水分利用的影响. 应用生态学报, 2012, 23(2): 369-375.
MENG X Y, WANG Z H, LI F C, LI K Y, XUE D, LI S X. Effects of soil moisture before sowing and nitrogen fertilization on winter wheat yield and water use on Weibei Plain of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 369-375. (in Chinese)
- [7] 刘庚山. 冬小麦底墒耗失特征及高效利用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
LIU G S. Consumption characteristics and effective use of available

- soil water stored at planting by winter wheat[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [8] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. 生态学报, 1983(2): 91-101.
LI Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the Loess region. *Acta Ecologica Sinica*, 1983(2): 91-101. (in Chinese)
- [9] 李玉山. 土壤-作物水分关系及其调节. 见: 黄土高原土壤与农业. 北京: 农业出版社, 1989: 342-365.
LI Y S. Soil water - crop relations and their regulations. In: Soil and agriculture in the Loess Plateau, Beijing: Agriculture Press, 1989: 342-365. (in Chinese)
- [10] 刘文兆, 李玉山. 黄土高原节水农业的理论与实践. 水土保持学报, 1992, 6(1): 1-6.
LIU W Z, LI Y S. Theory and practice of water-saving agriculture on the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(1): 1-6. (in Chinese)
- [11] 山仑. 植物水分利用效率和半干旱地区农业用水. 植物生理学通讯, 1994(1): 61-66.
SHAN L. Plant water use efficiency and agricultural water use in semiarid areas. *Plant Physiology Journal*, 1994(1): 61-66. (in Chinese)
- [12] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 汪有科. 黄土高原半干旱区集雨补灌生态农业研究进展. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3187-3194.
ZHAO X N, WU P T, FENG H, WANG Y K. Advance in research of supplemental irrigation of collected rain water for eco- agriculture in semi-arid loess plateau of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(9): 3187-3194. (in Chinese)
- [13] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础. 应用生态学报, 1991, 2(1): 70-76.
SHAN L, XU M. Water-saving agriculture and its physic-ecological bases. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(1): 70-76. (in Chinese)
- [14] 王仰仁, 荣丰涛, 李从民, 王铁广, 南振明. 水分敏感指数累积曲线参数研究. 山西水利科技, 1997(4): 20-24.
WANG Y R, RONG F T, LI C M, WANG T G, NAN Z M. Study on parameters of cumulative curve of water sensitivity index. *Shanxi Hydromechanics*, 1997(4): 20-24. (in Chinese)
- [15] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应. 农业工程学报, 2011, 27(9): 203-207.
CHENG L P, LIU W Z. Soil moisture distribution in deep layers and its response to different land use patterns on Loess Tableland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 203-207. (in Chinese)
- [16] 李玉山, 张孝忠, 郭明航. 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究. 土壤学报, 1990, 27(1): 1-7.
LI Y S, ZHANG X Z, GUO M H. The field responses of crops to water and fertility in the southern Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 1990, 27(1): 1-7 (in Chinese)
- [17] 国家气象局. 农业气象观测规范. 北京: 气象出版社, 1993.
China Meteorological Administration. *Standard Specification for Agricultural Meteorological Observation*. Beijing: China Meteorological Press, 1993. (in Chinese)
- [18] BREDA N J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(392): 2403-2417.
- [19] 冯伟, 朱艳, 姚霞, 田永超, 曹卫星. 基于高光谱遥感的小麦叶干重和叶面积指数监测. 植物生态学报, 2009, 33(1): 34-44.
FENG W, ZHU Y, YAO X, TIAN Y C, CAO W X. Monitoring leaf dry weight and leaf area index in wheat with hyper spectral remote sensing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 34-44. (in Chinese)
- [20] 陈培元, 詹谷宇, 谢伯泰. 冬小麦根系的研究. 陕西农业科学, 1980(6): 1-6+49.
CHEN P Y, ZHAN G Y, XIE B T. Study on root system of winter wheat. *Shaanxi Agricultural Sciences*, 1980(6): 1-6+49. (in Chinese)
- [21] 苗果园, 张云亭, 尹钧, 侯跃生, 潘幸来. 黄土高原旱地冬小麦根系生长规律的研究. 作物学报, 1989, 15(2): 104-115.
MIAO G Y, ZHANG Y T, YIN J, HOU Y S, PAN X L. A Study on the development of root system in winter wheat under unirrigated conditions in semi-arid loess plateau. *Acta Agronomica Sinica*, 1989, 15(2): 104-115. (in Chinese)
- [22] 刘昌明, 周长青, 张士锋, 王小莉. 小麦水分生产函数及其效益的研究. 地理研究, 2005, 24(1): 1-10.
LIU C M, ZHOU C Q, ZHANG S F, WANG X L. Study on water production function and efficiency of wheat. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 1-10. (in Chinese)
- [23] 刘文兆. 依边际分析法确定田间最优经济水量投入的唯一性准则. 中国农业大学学报, 1997(S1): 121-125.
LIU W Z. An essential requirement of marginal analysis method for calculating farmland water input with the maximum profits in water-saving irrigation. *Journal of China Agricultural University*,

- 1997(S1): 121-125. (in Chinese)
- [24] 刘文兆. 作物生产、水分消耗与水分利用效率间的动态联系. 自然资源学报, 1998, 13(1): 23-27.
- LIU W Z. Dynamic interrelations of crop production, water consumption and water use efficiency. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(1): 23-27. (in Chinese)
- [25] 刘文兆, 苏敏, 徐宣斌, 李秧秧. 养分优化管理条件下作物水分生产函数. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 47-49.
- LIU W Z, SU M, XU X B, LI Y Y. Crop water Production function under dynamic optimal management of fertilizer supply. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(1): 47-49. (in Chinese)
- [26] 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.
- [27] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 于舜章, 罗毅, 于强, 欧阳竹. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34-39.
- FANG Q X, CHEN Y H, LI Q Q, YU S Z, LUO Y, YU Q, OU Y Z. Effects of irrigation on water use efficiency of winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(4): 34-39. (in Chinese)
- [28] 孔扬庄, 瞿唯青, 韩湘玲, 孟广清. 黄淮海平原冬小麦播前底墒对其产量形成的作用. 农业气象, 1987(3): 34-37.
- KONG Y Z, QU W Q, HAN X L, MENG G Q. The effect of soil water content before sowing on yield of winter wheat. *Agricultural Meteorology*, 1987(3): 34-37. (in Chinese)
- [29] 李凤民, 刘小兰, 王俊. 底墒与磷肥互作对春小麦产量形成的影响. 生态学报, 2001, 21(11): 1941-1946.
- LI F M, LIU X L, WANG J. Effects of pre-sowing irrigation and P fertilization on spring wheat yield information. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1941-1946. (in Chinese)
- [30] 任三学, 赵花荣, 郭安红, 刘庚山, 安顺清. 底墒对冬小麦植株生长及产量的影响. 麦类作物学报, 2005, 25(4): 79-85.
- REN S X, ZHAO H R, GUO A H, LIU G S, AN S Q. Impact of available soil water at planting on plant growth and yield of winter wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(4): 79-85. (in Chinese)
- [31] 张丽华, 姚艳荣, 裴翠娟, 董志强, 贾秀领, 马瑞昆. 干旱年型播前土壤底墒、播种密度及灌溉对冬小麦的产量效应. 华北农学报, 2011, 26(S1): 185-188.
- ZHANG L H, YAO Y R, PEI C J, DONG Z Q, JIA X J, MA R K. Yield response to pre-planting soil moisture, planting density and irrigation in winter wheat in a typical dry year. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(S1): 185-188. (in Chinese)
- [32] 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): 68-75.
- 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 conditions on winter wheat growth and nutrient uptake. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 29(4): 68-75. (in Chinese)
- [33] MUSICK J T, JONES O R, STEWART B A. Water-yield relationships for irrigated and dry land wheat in the U.S. southern plains. *Agronomy Journal*, 1994, 86(6): 980-986.
- [34] NORWOOD C A. Dryland winter wheat as affected by previous crops. *Agronomy Journal*, 2000, 92(1): 121-127
- [35] 孟晓瑜, 王朝辉, 杨宁, 杨荣, 章孜亮, 赵护兵. 底墒和磷肥对渭北旱塬冬小麦产量与水、肥利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1083-1090.
- MENG X Y, WANG Z H, YANG N, YANG R, ZHANG Z L, ZHAO H B. Effects of soil moisture before sowing and phosphorus fertilization on winter wheat yield, water and fertilizer use efficiencies on Weibei Tableland of the Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1083-1090. (in Chinese)
- [36] 罗俊杰, 黄高宝. 底墒对旱地冬小麦产量和水分利用效率的影响研究. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 102-104+111.
- LUO J J, HUANG G B. Effects of different soil water before sowing on winter wheat yield and WUE in semiarid areas. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(3): 102-104+111. (in Chinese)
- [37] KARROU M, OWEIS T. Water and land productivities of wheat and food legumes with deficit supplemental irrigation in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 2012, 107: 94-103.
- [38] FANG Q, MA L, YU Q, AHUJA L R, MALONE R W, HOOGENBOOM G. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat-maize double cropping systems in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1165-1174.
- [39] 崔世明, 于振文, 王东, 张永丽. 灌溉时期和数量对小麦耗水特性及产量的影响. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 442-446.
- CUI S M, YU Z W, WANG D, ZHANG Y L. Effect of irrigation stage and amount on water consumption characteristics and grain yield in wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(3): 442-446. (in Chinese)

- [40] 刘彦军. 灌溉量灌溉时间对麦田耗水量及小麦产量的影响. 河北农业科学, 2003, 7(2): 6-11.
LIU Y J. The effects of irrigation rate and time on water consumption and output of wheat. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2003, 7(2): 6-11. (in Chinese)
- [41] 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)
- [42] 王德梅, 于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1965-1970.
WANG D H, YU Z W. Effects of irrigation amount and stage on water consumption characteristics and grain yield of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1965-1970. (in Chinese)
- [43] 姚宁, 宋利兵, 刘健, 冯浩, 吴淑芳, 何建强. 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. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2379-2389.
YAO N, SONG L B, LIU J, FENG H, WU S F, HE J Q. Effects of water stress at different growth stages on the development and yields of winter wheat in arid region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2379-2389. (in Chinese)
- [44] 王朝辉, 李生秀. 不同生育期缺水 and 补充灌溉对冬小麦氮磷钾吸收及分配影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 265-270.
WANG Z H, LI S X. Effects of water deficit and supplemental irrigation at different growing stage on uptake and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(3): 265-270. (in Chinese)
- [45] 刘文兆. 水源有限条件下作物合理灌溉定额的确定. 水利学报, 1998(9): 75-80.
LIU W Z. Rational irrigation quota under limited water supply. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998(9): 75-80. (in Chinese)
- [46] LIN W, LIU W Z. Establishment and application of spring maize yield to evapotranspiration boundary function in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2016, 178: 345-349.

(责任编辑 李云霞)