

# 补充灌溉对土壤水分和胡麻籽粒产量的影响

燕鹏<sup>1,2</sup>, 崔红艳<sup>1,2</sup>, 方子森<sup>1,2</sup>, 牛俊义<sup>1,2</sup>, 高玉红<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃农业大学 农学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070)

**摘要:**为探讨不同灌水条件下胡麻田土壤水分动态特征和增产效果,以“陇亚杂 1 号”为材料,研究了不同灌溉处理对胡麻田土壤水分、籽粒产量和水分利用效率的影响。试验设置 5 个处理:不灌水(T<sub>0</sub>)、分茎水 80 mm(T<sub>1</sub>)、分茎水 60 mm+盛花水 40 mm(T<sub>2</sub>)、分茎水 80 mm+盛花水 40 mm(T<sub>3</sub>)、分茎水 60 mm+现蕾水 40 mm+盛花水 40 mm(T<sub>4</sub>)。结果表明:分茎期灌水而现蕾期不灌水有利于增加现蕾期 80—140 cm 土层含水量。在盛花期, T<sub>2</sub> 处理 120—140 cm 土层含水量分别比 T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> 处理增加了 11.40% 和 11.08%, 这表明 T<sub>2</sub> 处理对此时期深层土壤水分的提高有明显的促进作用。胡麻成熟期表层土壤的含水量与盛花期相比有所下降,而 100—200 cm 土层的水分随灌水量的增加而明显增加,导致土壤中的无效水增多。随着灌水量增加,农田耗水量增加,而土壤贮水消耗量、降雨量和土壤贮水消耗量占农田总耗水量的比例均降低。可见,减少灌溉量可以提高胡麻对土壤贮水的吸收利用,降低了农田总耗水量,从而更有效地增加灌溉水分利用效率。与 T<sub>0</sub> 处理相比, T<sub>2</sub> 处理的籽粒产量和产量水分利用效率分别显著增加 36.50% 和 12.27%。因此,在本试验条件下, T<sub>2</sub> 处理具有明显的增产节水效益。

**关键词:**胡麻; 灌水; 土壤水分; 产量

**中图分类号:** S274; S563.2; S152.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)01-0328-06

## Effects of Supplemental Irrigation on Soil Moisture and Grain Yield of *Linum usitatissimum* Linn

YAN Peng<sup>1,2</sup>, CUI Hongyan<sup>1,2</sup>, FANG Zisen<sup>1,2</sup>, NIU Junyi<sup>1,2</sup>, GAO Yuhong<sup>1,2</sup>

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Province Key Laboratory of Arid land Crop Science, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to investigate the soil moisture dynamic characteristic and yield-increasing effect under different irrigation conditions, field experiment was carried out to elucidate the effect of different irrigation modes on soil moisture, grain yield and water use efficiency of oil flax which was ‘Longyaza 1’. The experiment had five treatments: no irrigation during the whole growth season (represented as CK); irrigation amount was 80 mm at stem stage (T<sub>1</sub>); irrigation began at stem and full flowering stages, and irrigation amounts were 60 mm and 40 mm (T<sub>2</sub>), 80 mm and 40 mm (T<sub>3</sub>), respectively; irrigation was carried out at stem, squaring and full flowering stages, and irrigation amounts were also 60 mm, 40 mm and 40 mm (T<sub>4</sub>). The results showed that irrigation at stem stage and no irrigation at squaring stage were beneficial to the increase of 80—140 cm soil moisture. Moreover, T<sub>2</sub> treatment increased 120—140 cm soil water storage at full flowering stage and enhanced by 11.40% and 11.08% compared with T<sub>3</sub> and T<sub>4</sub>, suggesting that T<sub>2</sub> treatment had an obvious promoting effect on the improvement of deep soil moisture during this period. The water content in topsoil layer at harvest decreased while the soil moisture in 100—200 cm layer obviously enhanced with the increase of irrigation amount in full flowering stage, but also could boost the invalid water in the soil. Generally, the total water consumption raised and the proportion of soil water consumption amount and precipitation to total water consumption amount reduced with the increase of irrigation amount. Therefore, reducing irrigation improved the absorption and utilization of soil storage water and decreased the total water consumption, which resulted in much more available increase of irrigation water use efficiency. In addition, the yield and water use efficiency of T<sub>2</sub> treatment significantly increased by 36.50% and 12.27%

收稿日期: 2015-11-16

修回日期: 2016-03-17

资助项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-17-GW-9)

第一作者: 燕鹏(1990—), 男, 甘肃金昌人, 在读硕士研究生, 研究方向为作物栽培学与耕作学。E-mail: 1248517282@qq.com

通信作者: 方子森(1958—), 男, 甘肃兰州人, 教授, 主要从事大田作物和中草药栽培研究。E-mail: fangzs@gsau.edu.cn

compared with  $T_0$ , respectively. As far as water-saving and high-yield were concerned in the experiment,  $T_2$  has the distinct water-saving and yield-increasing benefits.

**Keywords:** *Linum usitatissimum* Linn; irrigation; soil moisture; grain yield

胡麻 (*Linum usitatissimum* Linn) 又称油用亚麻, 是世界上继大豆、向日葵、花生之后和芝麻并列的第四大油料作物<sup>[1]</sup>, 具有较强的耐旱、耐寒和耐瘠薄能力, 生育期短、适应性广<sup>[2]</sup>。我国胡麻种植面积近 70 万  $\text{hm}^2$ <sup>[3]</sup>, 是干旱半干旱地区的主要经济作物, 主要分布于甘肃、河北、陕西、内蒙古、宁夏和新疆等省份, 西藏、云南、贵州、广西和山东等地也有零星种植。胡麻油是我国工业用干性植物油和产区群众食用油的主要来源, 富含人体必须的不饱和脂肪酸—— $\alpha$ -亚麻酸, 具有抗癌、增强免疫力等重要作用<sup>[4-5]</sup>。随着人们消费水平的提高和食用油消费市场的拉动, 胡麻种植效益不断提升, 种植面积逐步扩大, 已日益受到农民的青睞并成为调整种植结构的重要作物<sup>[1]</sup>。因此, 促进胡麻生产实现高产优质对于胡麻产业的可持续发展具有重要的意义。

干旱缺水是我国面临的重大资源和环境问题, 特别是在北方干旱和半干旱地区, 水资源短缺已成为制约农业可持续发展面临的瓶颈。在胡麻的栽培种植中, 春季干旱常常影响着胡麻的正常播种和出苗, 致使产量低而不稳, 一般只有  $600 \sim 975 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 水分亏缺严重制约着胡麻商品化、产业化的发展和农民的增产增收<sup>[6-7]</sup>。姚玉璧等<sup>[8]</sup>研究认为, 5 月中、下旬前后的干旱对甘肃省胡麻产量的影响最大, 此时期胡麻正处于现蕾、开花后的关键生育时期, 对水分的需要最为迫切, 在春旱发生频率  $> 50\%$  的地方, 胡麻产量明显偏低。可见, 根据胡麻的需水规律科学合理灌水是保证胡麻高产稳产的关键所在。然而, 近年来在胡麻种植方面普遍存在灌水次数过多、灌水量偏大, 水资源严重浪费的现象, 引起胡麻贪青晚熟、倒伏和病虫害大量发生, 最终导致胡麻减产, 同时也不利于胡麻油分的积累<sup>[8]</sup>。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<sup>[9]</sup>。因此, 在胡麻不同的生育时期合理的灌水, 最大限度地利用有限的水资源, 势在必行。本研究基于当前我国西北干旱地区胡麻生产的现状, 探讨灌溉时期和灌水量对土壤水分动态变化和胡麻籽粒产量以及水分利用效率的影响, 旨在为优化胡麻灌溉制度和高产稳产栽培技术提供理论依据和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2014 年 3—8 月在甘肃省兰州市榆中县

( $92^{\circ}13' - 108^{\circ}46'E, 32^{\circ}11' - 42^{\circ}57'N$ ) 良种繁育场进行。试验区地处黄土高原丘陵沟壑区, 海拔高度 1 875 m, 年平均气温  $7^{\circ}\text{C}$ , 年日照时数 2 563 h, 无霜期 146 d, 年降雨量 382 mm, 年蒸发量 1 341 mm。

试验地前茬为小麦, 常年精耕细作, 土质较好, 肥力中等。试验地土壤属沙壤土, 胡麻播种前试验田 0—20 cm 土层土壤养分含量为: 有机质 16.50 g/kg, 全氮 1.12 g/kg, 全磷 0.80 g/kg, 全钾 20.11 g/kg, 碱解氮 59.26 mg/kg, 速效磷 13.11 mg/kg, 速效钾 125.34 mg/kg, pH 值 7.69。

### 1.2 试验设计

采用单因素随机区组设计方法。试验设置 2 个浇水时期, 分别为分茎期+盛花期\分茎期+现蕾期+盛花期; 分茎期设 60, 80 mm 的 2 个灌水量处理, 现蕾期和盛花期均灌水 40 mm, 由此构成  $T_1, T_2, T_3, T_4$  处理, 以不灌水为对照 ( $T_0$ ), 共 5 个处理 (表 1)。小区面积为  $28 \text{ m}^2$  ( $7 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ), 3 次重复。小区之间, 留 1.5 m 的隔离区。基肥用量为  $\text{N } 90 \text{ kg}/\text{hm}^2, \text{P}_2\text{O}_5 75 \text{ kg}/\text{hm}^2, \text{K}_2\text{O } 53 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。所施肥料为尿素 (含 N 46.4%)、磷酸二铵 (含  $\text{P}_2\text{O}_5$  46%, N 18%)、硫酸钾 (含  $\text{K}_2\text{O}$  52%)。供试胡麻品种为陇亚杂 1 号, 3 月 22 日播种, 播种密度为 750 万株/ $\text{hm}^2$ , 人工条播, 播深 3 cm, 行距 20 cm。灌水量用水表计量, 田间管理同当地大田生产, 8 月 7 日收获。2014 年胡麻生育期间总降雨量为 274.6 mm。

表 1 水分处理方案

处理	灌水时期			mm
	分茎期	现蕾期	盛花期	灌水总量
$T_0$	0	0	0	0
$T_1$	80	0	0	80
$T_2$	60	0	40	100
$T_3$	80	0	40	120
$T_4$	60	40	40	140

注: 分茎期、现蕾期和盛花期灌水时间分别为 4 月 28 日、6 月 4 日、6 月 29 日, 每次灌水 10 d 后测定土壤水分。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量 于胡麻播种前和主要生育时期用土钻随机取不同处理各小区 0—200 cm 土层的土, 20 cm 为 1 层, 称土壤鲜重后, 在  $105^{\circ}\text{C}$  恒温下烘 8 h 至恒重, 称土壤干重, 计算土壤含水量, 其公式为: 土壤含水量 = (土壤鲜重 - 土壤干重) / 土壤干重  $\times 100\%$ 。根据土壤含水量计算土壤贮水量<sup>[10]</sup>。土壤

贮水量:  $S_w = d \cdot r \cdot \omega \times 0.1$ , 式中:  $S_w$  为土壤贮水量 (mm);  $d$  为土层厚度 (cm);  $r$  为土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\omega$  为土壤含水量 (%)。

1.3.2 耗水量 采用农田水平衡法<sup>[11]</sup>计算作物耗水量 (mm):  $ETa = P + I + \Delta W$ , 式中:  $ETa$  为作物生育期耗水量 (mm), 包括植物蒸腾量与棵间蒸发量;  $P$  为降雨量 (mm);  $I$  为灌溉量 (mm);  $\Delta W$  为作物不同生育时期之间的土壤贮水变化量, 即土壤贮水消耗量。

1.3.3 籽粒产量测定 收获时在每个小区中随机取样 30 株, 带回实验室进行考种。分别测定单株有效果数、果粒数、千粒重和单株产量。收获时按小区单打单收, 晒干后称取胡麻籽粒重量, 测得小区实际产量。

1.3.4 水分利用效率 产量水分利用效率 [ $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ] = 籽粒产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) / 作物全生育期耗水量 (mm); 灌水利用效率 [ $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ] = 籽粒产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) / 灌水量 (mm)<sup>[12]</sup>。

## 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 17.0 统计软件进行数据处理和差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 胡麻不同生育时期 0—200 cm 土层土壤含水量的动态变化

2.1.1 胡麻分茎期和现蕾期 0—200 cm 土层土壤含水量的动态变化 由图 1 可知, 在胡麻分茎期, 各处理 0—120 cm 土层的土壤含水量变化幅度较大, 而在

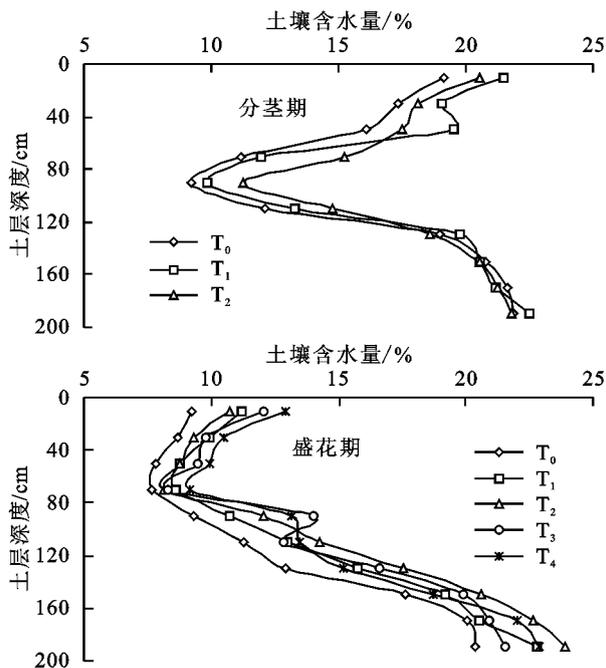
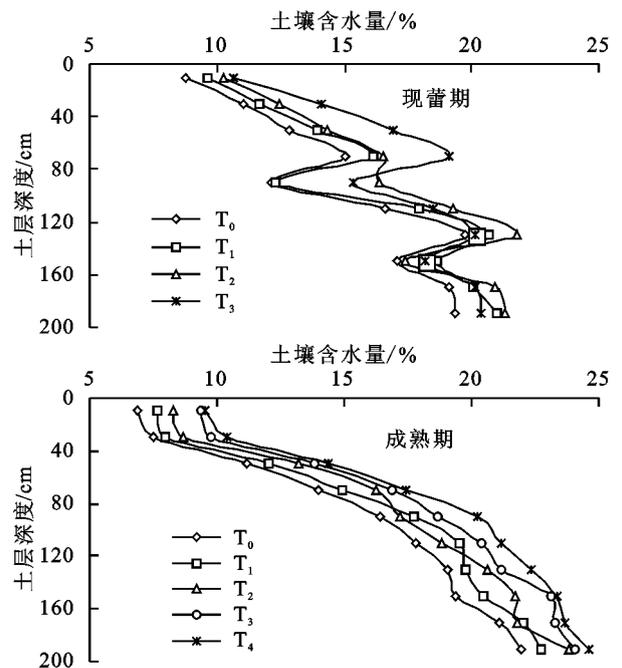


图 1 胡麻不同生育时期各处理 0—200 cm 土层土壤含水量的动态变化

2.1.2 胡麻盛花期和成熟期 0—200 cm 土层土壤含水量的动态变化 由图 2 可知, 胡麻开花以后, 随着

120—200 cm 土层各处理土壤含水量的变化趋势几乎相同。就 0—60 cm 土层的土壤含水量而言,  $T_1$  处理的土壤含水量比  $T_0$  处理增加了 15.46%;  $T_2$  处理在 60—100 cm 土层的土壤含水量较高, 较  $T_0$  处理增加了 29.94%; 在 100—120 cm 土层的土壤含水量以  $T_4$  处理的最高, 高于  $T_0$  处理 24.72%。可见, 不同的灌水量对胡麻分茎期 0—120 cm 土层的土壤含水量有一定的影响, 且  $T_1$  处理有利于提高土壤浅层的含水量, 而与  $T_2$  处理相比, 对深层的土壤含水量没有明显作用。就现蕾期 0—200 cm 土层土壤含水量的变化趋势来看, 由于胡麻植株生长的加快和土壤表层水分的强烈蒸发, 在 0—40 cm 和 140—200 cm 土层的土壤含水量明显低于分茎期相同处理各土层土壤含水量。0—40 cm 土层土壤含水量处理间差异表现为  $T_4 > T_2 > T_1 > T_0$ , 与  $T_0$  处理相比, 灌水处理的土壤含水量增加了 8.03%~27.53%; 在 60—80 cm 土层土壤含水量仍以  $T_4$  处理的最高, 高于  $T_0$  处理 26.82%; 而 80—140 cm 土层土壤含水量处理间差异表现为  $T_2 > T_4 > T_1 > T_0$ , 且各处理的土壤含水量分别比  $T_0$  处理增加了 18.60%, 11.46% 和 5.06%; 各处理在 140—200 cm 土层土壤含水量差异不大, 以  $T_1$  处理的最高,  $T_2$  处理的次之, 分别高于  $T_0$  处理 7.42% 和 7.20%。现蕾期是胡麻植株营养生长和生殖生长并进阶段, 此时胡麻需水较多, 生长也旺盛, 但与  $T_2$  处理相比,  $T_4$  处理尽管在现蕾期多浇了 1 次水, 但是并没有增加 80—140 cm 土层土壤含水量。



植株耗水的加剧, 各土层的土壤含水量下层 (100—200 cm) 的明显大于上层 (0—100 cm)。不同处理土

壤含水量 0—20 cm 土层的明显高于 20—40 cm 和 40—60 cm,这可能与测定前遇到较大的降雨有关。在 60—80 cm 土层的土壤含水量最低,而后随着土层的不断加深,各处理的土壤含水量逐渐增加,灌水处理在 80—200 cm 土层的土壤含水量比  $T_0$  增加了 11.41%~21.33%。在 120—140 cm 土层, $T_2$  处理的土壤含水量高于  $T_0$  处理 19.41%,与其他处理相比,增幅为 10.31%~11.40%,这表明  $T_2$  处理对此时期土壤含水量的提高有明显的促进作用。在盛花期灌水量均为 40 mm 的条件下, $T_2$  处理较  $T_3$ , $T_4$  处理更有利于提高 120—140 cm 土层的土壤含水量。就胡麻成熟期土壤含水量的变化趋势来看,胡麻植株进入衰老阶段生长,根系对深层土壤的水分吸收有所降低,因此各处理在 100—200 cm 土层的土壤含水量明显高于盛花期相同处理各土层土壤含水量。此外,由于温度较高和未进行灌溉,土壤表层土壤含水量明显低于盛花期的。0—40 cm 土层各处理土壤含水量的变化趋势不大,表现为  $T_4 > T_3 > T_2 > T_1 > T_0$ ,且灌水处理的土壤含水量比  $T_0$  处理增加了 8.49%~34.46%。在 40—200 cm 土层, $T_1$ , $T_2$ , $T_3$  和  $T_4$  处理的土壤含水量随着土层的加深一直维持增大的趋势,各处理的土壤含水量较  $T_0$  处理分别增加了 5.80%,8.20%,13.83%和

17.84%。可见,随着灌水量增加,土壤中滞留的水分也随土层的加深而逐渐增加,但此时胡麻已经成熟,导致土壤中的无效水增多,这将不利于胡麻水分利用效率的提高。

## 2.2 不同处理对总耗水量、总耗水量中不同来源水分及其占总耗水量比例的影响

由表 2 可知,不同灌水处理胡麻总耗水量的变化趋势表现一致:随着灌水量的增加,耗水量随之也增加。与  $T_0$  处理相比,不同灌水处理的耗水量显著增加了 16.89%~25.00%,而降雨量和土壤贮水消耗量占总耗水量的比例分别降低了 14.48%~20.04%和 27.97%~55.52%,均达到了显著差异水平( $p < 0.05$ ),这表明在不灌水条件下,降雨和土壤水是供应胡麻生长发育的主要耗水来源。就不同处理的土壤贮水消耗量而言,不同处理间表现为  $T_0 > T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ ,与  $T_0$  处理相比,灌水处理的土壤贮水消耗量降低幅度为 15.82%~44.43%,且呈显著差异水平。不同处理的灌水量占总耗水量的百分率表现为随灌水量的增大而增加,而降水和土壤贮水所占比例则呈下降趋势。可见,增加灌水量明显促进了胡麻对灌溉水的吸收利用,而不利于降水和土壤贮水的吸收利用。

表 2 不同处理对不同来源水分消耗量占总耗水量百分率的影响

处理	总耗水量/ mm	灌水量		降雨量		土壤贮水消耗量	
		数量/mm	比例/%	数量/mm	比例/%	数量/mm	比例/%
$T_0$	377.34c	0	0	274.6	72.81a	102.74a	27.21a
$T_1$	441.09b	80	18.14d	274.6	62.27b	86.49b	19.60b
$T_2$	458.80ab	100	21.80c	274.6	59.87bc	84.20b	18.37b
$T_3$	462.13ab	120	25.97b	274.6	59.42bc	67.53c	14.61c
$T_4$	471.69a	140	29.68a	274.6	58.22c	57.09c	12.10c

注:同一列数字无相同字母间差异达 5% 的显著水平,下表同。

## 2.3 不同处理对胡麻籽粒产量及其构成因子的影响

由表 3 可见,不同灌水处理对胡麻的籽粒产量及其构成因子的影响比较明显。就单株有效果数而言, $T_3$  处理的最多, $T_3$  处理的次之,较  $T_0$  处理分别显著增加了 11.15%,8.99%。除  $T_4$  处理外,其他灌水处理的果粒数比  $T_0$  处理显著增加了 4.80%~10.01%( $p < 0.05$ )。不同灌水处理的千粒重从大到小依次为: $T_2 > T_3 > T_4 > T_1 > T_0$ ,除  $T_1$  处理外,其他灌水处理的千粒重均显著高于  $T_0$  处理,且  $T_2$ , $T_3$  处理的千粒重比  $T_0$  处理分别显著增加了 12.13%和 9.66%,但  $T_2$ , $T_3$  处理之间差异不显著( $p > 0.05$ )。 $T_4$  处理的单株产量最大, $T_3$  处理的次之,分别比  $T_0$  处理显著增加了 53.18%和 38.64%,而  $T_2$ , $T_3$  处理之间未达到显著差异水平( $p > 0.05$ )。随着灌水量的增加,胡麻的籽粒产量呈现先增加后降低的趋势。 $T_2$  处理的籽粒产量最大,

高达 2 579.00 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于  $T_0$  处理 36.50%, $T_3$  处理的次之,为 2 361.33 kg/hm<sup>2</sup>,比  $T_0$  增加了 24.98%,差异显著;而  $T_1$ , $T_4$  处理的籽粒产量也分别比  $T_0$  处理显著增加了 14.02%和 16.37%,但  $T_1$  和  $T_4$  处理之间差异不显著。可见,适量灌水的  $T_2$  处理却有利于胡麻高产的形成。

表 3 不同处理对胡麻籽粒产量及其构成因子的影响

处理	单株有 效果数	果粒数	千粒 重/g	单株 产量/g	籽粒产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
$T_0$	8.34c	7.09c	8.90c	0.44c	1889.33d
$T_1$	8.87b	7.43b	9.05bc	0.55b	2154.12c
$T_2$	9.09ab	7.80a	9.98a	0.67a	2579.00a
$T_3$	9.27a	7.67a	9.76a	0.61ab	2361.33b
$T_4$	9.00b	7.25bc	9.21b	0.52bc	2198.67c

## 2.4 不同处理对胡麻水分利用效率的影响

由图 2 可知,不同灌水处理间的产量水分利用效率

表现为  $T_2 > T_3 > T_0 > T_1 > T_4$ , 与  $T_0$  处理相比,  $T_2, T_3$  处理的产量水分利用效率分别增加了 12.27% 和 2.05%, 且  $T_2$  处理与  $T_0$  处理之间有显著差异 ( $p < 0.05$ ), 而  $T_1, T_4$  处理较  $T_0$  处理分别降低了 2.46% 和 6.91%, 且  $T_4$  处理与  $T_0$  处理之间差异显著。就胡麻的灌水利用效率而言, 随着灌水量的增加, 灌水利用效率不断减小。不同灌水处

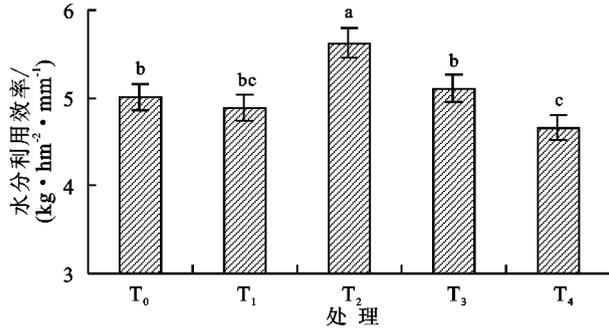
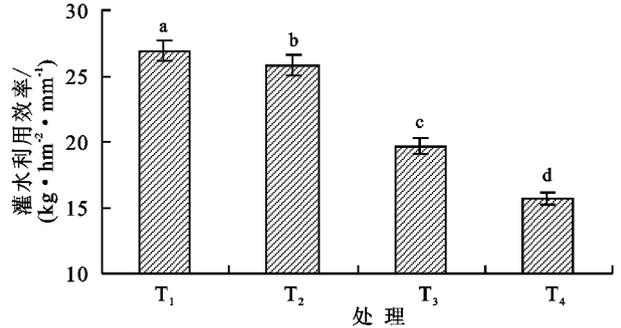


图2 不同处理对胡麻产量水分利用效率和灌水利用效率的影响

理中以  $T_1$  处理的最高, 为 26.93 kg/(hm<sup>2</sup> · mm),  $T_2$  处理的次之, 为 25.79 kg/(hm<sup>2</sup> · mm),  $T_4$  处理的最低, 为 15.70 kg/(hm<sup>2</sup> · mm), 与  $T_4$  处理相比,  $T_1, T_2$  处理的灌水利用效率显著增加了 71.45% 和 64.22%, 且各灌水处理间差异表现显著。可见, 在本试验条件下,  $T_3$  处理是兼顾高产和节水的最佳灌溉方式。



### 3 讨论

土壤水分是作物赖以生存的基础, 地面水与地下水相互转化以及降水和人工灌溉补给地下水的过程受到灌溉、降雨、耕作方式、农田形式和大气条件等多种因素的影响<sup>[13-14]</sup>。旱地农业的实践表明, 作物对水分的吸收利用具有高度的可塑性, 节水灌溉可以满足作物代谢需水, 增强作物的抗逆性, 同时由于诱导了作物根系补偿吸水的特性, 从而使水分利用效率得到明显的提高<sup>[15-17]</sup>。因此, 发展节水灌溉, 力求用尽可能少的水资源达到农作物的高产和稳产<sup>[18]</sup>, 是缓解我国干旱和半干旱地区水资源紧缺的有效途径。

合理的灌溉量和灌溉时期是保证节水农业可持续发展的前提。农作物的水分供应主要来源于土壤水分, 土壤水分的运移规律对于科学制定灌溉方案、有效调控土壤水分, 节约水资源和提高农作物产量等起着举足轻重的作用<sup>[19-20]</sup>。李淑文等<sup>[21]</sup>研究表明, 农田土壤水分以 0—20 cm 土壤表层贮水量变动受降水、灌水影响较大, 作物根系主要吸收 0—80 cm 土层的土壤水分。在本试验中, 胡麻分茎期灌水使 0—120 cm 土层的土壤水分含量增加了 11.81%—14.52%, 与灌溉量 60 mm 的  $T_2$  处理相比, 灌溉量为 80 mm 的  $T_1$  处理更有利于提高土壤浅层的含水量, 而在 120—200 cm 土层各处理土壤含水量的变化趋势几乎相同。现蕾期是胡麻植株营养生长和生殖生长并进阶段, 此时胡麻需水较多, 生长比较旺盛, 且土壤表层水分强烈蒸发。在 0—40 cm 和 140—200 cm 土层的土壤含水量明显低于分茎期相同处理各土层土壤含水量, 在 0—80 cm 土层以  $T_4$  处理的平均土壤含水量最高, 明显高于对照  $T_0$  处理 27.31%; 而在 80—140 cm 土层

却以  $T_2$  处理的最高,  $T_4$  处理尽管在现蕾期多浇了 1 次水, 但是并没有增加 80—140 cm 土层土壤含水量。胡麻开花以后, 随着植株耗水的加剧, 在 60—80 cm 土层的土壤含水量最低, 而后随着土层的不断加深, 各处理的土壤含水量随之增加; 在盛花期灌水量均为 40 mm 的条件下,  $T_2$  处理在 120—140 cm 土层的土壤含水量分别高于  $T_3, T_4$  处理 11.40% 和 11.08%。这表明  $T_2$  处理对此时期深层土壤水分的提高有明显的促进作用, 这可能与现蕾期限制供水增强了胡麻深层根系的吸水能力, 而盛花期补灌则延缓了根系的衰老, 产生了补偿效应有关, 这为籽粒产量的形成奠定了良好的基础。胡麻成熟期, 根系对深层土壤的水分吸收有所降低, 与盛花期相比, 由于温度较高和未进行灌溉, 表层土壤的含水量有所下降, 而 100—200 cm 土层的土壤含水量却有明显的增加, 且  $T_4, T_3$  处理的土壤含水量维持较高。可见, 随着灌水量增加, 土壤中滞留的水分也随土层的加深而逐渐增加, 但此时胡麻已经成熟, 导致土壤中的无效水增多, 这将不利于胡麻水分利用效率的提高。

适宜的灌溉时期和灌水量可以调整作物水分的供需关系, 有利于优化作物的灌溉制度。过多或过少的灌水不仅抑制作物根系对土壤贮水的利用能力, 而且还会造成水资源的无效浪费<sup>[22]</sup>。水分状况对作物生长发育和耗水规律的影响作用最终会反映在产量和水分利用效率上<sup>[23]</sup>。有研究表明, 随着灌水量增加, 农田耗水量增加, 而土壤贮水消耗量减少<sup>[24-25]</sup>, 本文与前人在小麦上的研究结果一致。王志敏等<sup>[26]</sup>研究认为, 减少灌溉量能够提高土壤水分利用效率, 降低麦田的总耗水量。张永玲等<sup>[27]</sup>研究发现, 适度缺水在不减产或略有增产的前提下, 玉米的耗水量大大降低,

而水分利用效率明显增加。本研究中,随着灌水量的增加,降雨量和土壤贮水消耗量占农田总耗水量的比例均降低,而灌水量占总耗水量的比例提高。可见,减少灌溉量可以提高胡麻对土壤贮水的吸收利用,降低了农田总耗水量,从而更有效地利用土壤水资源,增加灌溉水分利用效率。高延军等<sup>[28]</sup>研究认为,实现作物高效用水的基本途径是将作物充分利用环境水和最大限度地节约本身用水有效结合。Kang 等<sup>[29]</sup>研究表明,在不同的生育时期,小麦对水分的需求存在一定的差异,同时灌水时期也是影响水分利用效率的重要因素。通过调控有限水分在作物全生育期的分配比例,实现有限土壤水分的高效利用,是增加作物水分利用效率的有效途径<sup>[30-32]</sup>。本试验结果表明,不同灌水量和灌水时期对胡麻的籽粒产量和水分利用效率影响比较明显。 $T_2$  处理获得了最高的籽粒产量和产量水分利用效率,比  $T_0$  处理显著增加了 36.50% 和 12.27%。可见,在本试验条件下,4 种灌水方式中以  $T_2$  处理(分茎期、盛花期分别灌水 60 mm 和 40 mm)的灌溉效果最佳,具有明显的增产节水效益。

## 4 结论

分茎水有利于提高土壤表层的贮水量,而现蕾期控制灌水却增加了 80—140 cm 土层的土壤含水量。在盛花期灌水量均为 40 mm 的条件下,与  $T_3$ ,  $T_4$  处理相比, $T_2$  处理在 120—140 cm 土层的土壤含水量分别增加了 11.40% 和 11.08%,这表明  $T_2$  处理对此时期深层土壤水分的提高有明显的促进作用。胡麻成熟期土壤表层含水量与盛花期相比有所下降,而 100—200 cm 土层的水分随灌水量的增加而明显增加,导致土壤中的无效水增多,这将不利于提高胡麻的水分利用效率。本研究中,随着灌水量增加,农田耗水量增加,而土壤贮水消耗量、降雨量和土壤贮水消耗量占农田总耗水量的比例均降低。可见,减少灌溉量可以提高胡麻对土壤贮水的吸收利用,降低了农田总耗水量,从而更有效地增加灌溉水分利用效率。与不灌水处理相比, $T_2$  处理的籽粒产量和产量水分利用效率分别显著增加 36.50% 和 12.27%。因此,在本试验条件下, $T_2$  处理(分茎期、盛花期分别灌水 60 mm 和 40 mm)具有明显的增产节水效益。

### 参考文献:

[1] 崔红艳,方子森,牛俊义. 胡麻栽培技术的研究进展[J]. 中国农学通报,2014,30(18):8-13.  
 [2] 崔红艳,胡发龙,方子森,等. 不同水分处理对胡麻干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(5):34-40.

[3] 罗世武,王勇,岳国强,等. 不同施肥水平与方法对胡麻的增产效应[J]. 现代农业科技,2009(15):10-11.  
 [4] 党占海,赵蓉英,王敏,等. 国际视野下胡麻研究的可视化分析[J]. 中国麻业科学,2010,32(6):305-313.  
 [5] 崔红艳,许维成,孙毓民,等. 有机肥对胡麻产量和品质的影响[J]. 核农学报,2014,28(3):518-525.  
 [6] 张雷,李小燕,牛芬菊,等. 旱地微垄地膜覆盖沟播栽培对土壤水分和胡麻产量的影响[J]. 作物杂志,2011,(4):95-97.  
 [7] 汪磊,严兴初,谭美莲. 我国胡麻施肥技术研究进展[J]. 湖北农业科学,2011,50(2):217-220.  
 [8] 姚玉璧,邓振铨,王润元,等. 气候变化对甘肃胡麻生产的影响[J]. 中国油料作物学报,2006,28(1):49-54.  
 [9] 山仑,徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. 应用生态学报,1991,2(1):70-76.  
 [10] 廖允成,韩思明,温晓霞. 黄土台塬旱地小麦土壤水分特征及水分利用效率研究[J]. 中国生态农业学报,2002,10(3):55-58.  
 [11] 江晓东,李增嘉,侯连涛,等. 少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水、肥利用的影响[J]. 农业工程学报,2005,21(7):20-24.  
 [12] 张永丽,于振文. 灌水量对不同小麦品种籽粒品质、产量及土壤硝态氮含量的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(5):155-158.  
 [13] 沈荣开. 土壤水资源及其计算方法浅议[J]. 水利学报,2008,39(12):1395-1400.  
 [14] 蒋静,冯绍元,王永胜,等. 灌溉水量和水质对土壤水盐分布及春玉米耗水的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(11):2270-2279.  
 [15] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought: from genes to the whole plant[J]. Functional Plant Biology,2003,30(3):239-264.  
 [16] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions[J]. Trends in Plant Science,2000,5(11):482-488.  
 [17] Eapen D, Barroso M L, Ponce G, et al. Hydrotropism; root growth responses to water[J]. Trends in Plant Science,2005,10(1):44-50.  
 [18] 段爱旺,张寄阳. 中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J]. 农业工程学报,2000,16(4):41-44.  
 [19] 孙占祥,冯良山,杜桂娟,等. 玉米灌溉田土壤水分变化及其耗水规律研究[J]. 玉米科学,2010,18(1):99-102,107.  
 [20] 康绍忠,张富仓. 玉米生长条件下农田土壤水分动态预报方法的研究[J]. 生态学报,1997,17(3):245-251.  
 [21] 李淑文,于森,杜建云,等. 不同灌水处理下土壤水分动态及玉米水分利用效率研究[J]. 河北农业大学学报,2010,33(4):17-21.  
 [22] 邓西平,山仑. 旱地春小麦对有效灌溉水高效利用的研究[J]. 干旱地区农业研究,1995,13(3):42-46.

- phy, 1993, 17(1):50-68.
- [12] 刘千枝. 景电灌区植被类型对风沙流结构的影响[J]. 甘肃林业科技, 1997, 22(3):13-17.
- [13] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面风沙流结构变异的初步研究[J]. 科学通报, 2004, 49(11):1099-1104.
- [14] 武建军, 罗生虎, 闫光虎, 等. 脉动风场下风沙流结构的数值模拟[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3):602-606.
- [15] 任春勇, 武生智. 沙源供给条件对风沙流结构的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3):597-601.
- [16] Zhang K, Qu J, Zu R, et al. Characteristics of wind-blown sand on Gobi/mobile sand surface[J]. Environmental Geology, 2008, 54(2):411-416.
- [17] 王自龙, 赵明, 冯向东, 等. 民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流结构的观测研究[J]. 水土保持学报, 2009(4):72-75.
- [18] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 不同下垫面对风沙流特性影响的风洞模拟研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(3):352-355.
- [19] 钟卫, 孔纪名, 杨涛. 植被沙障对近地表风沙流特征影响的风洞实验[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6):872-876.
- [20] 汪季, 胡志敏. 近地表风沙流结构对不同植被覆盖度的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5):30-33.
- [21] 范冬冬, 李生字, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地高大复杂纵向沙垄区沙丘分形特征[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6):941-947.
- [22] 凌裕泉. 塔克拉玛干沙漠的流场特征与风沙活动强度的关系[J]. 中国沙漠, 1988, 8(2):25-37.
- [23] 杨兴华, 何清, 艾力, 等. 1996—2008 年塔中地区的风沙环境特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(2):21-25.
- [24] 杨兴华, 何清, 艾力. 塔克拉玛干沙漠塔中地区春夏季风蚀起沙研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4):770-776.
- [25] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. The Journal of Geology, 1922, 30(5):377-392.
- [26] Folk R L. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameter[J]. Jour. Sediment Petrol, 1957, 27(1):3-26.
- [27] 徐满厚, 刘彤, 赵新俊, 等. 绿洲—荒漠交错带防护林与自然植被的协同防风效能及优化模式探讨[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5):1224-1232.
- [28] 刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5):1200-1207.
- [29] 王翠, 李生字, 雷加强, 等. 近地表风沙流结构对过渡带不同下垫面的响应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):52-56.
- [30] Leys J, McTainsh G. Soil loss and nutrient decline by wind erosion—cause for concern[J]. Australian Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 7(3):30-35.
- [31] Zobeck T M, Fryrear D W. Chemical and physical characteristics of windblown sediment I. Quantities and physical characteristics[J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29(4):1032-1036.
- [32] Dong Z, Liu X, Wang H, et al. The flux profile of a blowing sand cloud: a wind tunnel investigation[J]. Geomorphology, 2003, 49(3):219-230.

(上接第 333 页)

- [23] 宋淑亚, 刘文兆, 王俊, 等. 覆盖方式对玉米农田土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2):210-212.
- [24] 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[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9):1965-1970.
- [25] 褚鹏飞, 王东, 张永丽, 等. 灌水时期和灌水量对小麦耗水特性、籽粒产量及蛋白质组分含量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4):1306-1315.
- [26] 王志敏, 王璞, 李绪厚, 等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(5):38-44.
- [27] 张永玲, 肖让, 成自勇. 膜上灌对河西绿洲灌区玉米水分利用效率和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2010(5):9-10.
- [28] 高延军, 张喜英, 陈素英, 等. 冬小麦品种间水分利用效率的差异及其影响因子分析[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(5):45-49.
- [29] Kang S, Zhang L, Liang Y, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55(3):203-216.
- [30] 苑涛, 何秉宇. 干旱区水资源承载力分析及应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3):341-342.
- [31] 张显双, 李秋梅, 李红蕊, 等. 水土保持是水土资源可持续利用的基础[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6):79-80.
- [32] 张小红, 张绪成. 半干旱区旱地不同覆盖方式对糜子耗水和产量的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5):29-34.