

# 基于时序动态模型的不同灌水定额下食葵增产潜能分析

赵经华 徐剑 马英杰 杨文新 胡建强

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**为促进食葵长势,提高食葵产量、水分利用效率,设置5个灌水定额水平(W1:300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W2:375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W3:450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W4:525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W5:600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),分析比较了不同灌水定额对食葵株高、叶片数、盘径和茎粗的影响,探明了不同灌水定额下食葵生长指标与产量和耗水量的关系,利用时序动态评价模型分析了不同灌水定额下提高食葵产量和水分利用效率的潜能。结果表明:食葵株高、叶片数、盘径和茎粗随着灌水定额增加而增大,525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>和600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下食葵生长指标增长效果明显,当灌水定额增加到600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>食葵茎粗不增反减,300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额限制食葵植株生长,高灌水定额更利于促进食葵株高和叶片数增长;食葵生长指标与产量和耗水量存在正向关系,耗水量和产量随着食葵植株长势转优而增加。525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下食葵植株长势优且耗水量高,产量高。600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下增加食葵营养生长时长,耗水量高且不利于食葵增产。在生长阶段,525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>和600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下食葵耗水量高,株高和茎粗缩减量大。评价结果表明,300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下食葵综合长势处于劣势,提高产量和水分利用效率的能力弱,即潜能小;525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下食葵综合长势最优,潜能大。选择525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额作为实际食葵灌溉制度较为适宜。

**关键词:** 食葵; 灌水定额; 生长指标; 时序动态评价模型; 增产潜能

**中图分类号:** S274.1; S565.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0300-10

## Analysis of Increasing Yield Potential of Sunflower under Different Irrigation Quotas Based on Time Series Dynamic Model

ZHAO Jinghua XU Jian MA Yingjie YANG Wenxin HU Jianqiang

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** In order to promote the growth of sunflower and improve the yield and water use efficiency of sunflower, five irrigation quotas were set. The five treatments were 300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> and 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, respectively. The effects of different irrigation quotas on plant height, leaf number, disk diameter and stem diameter of edible sunflower were analyzed and compared. The relationship between growth index of edible sunflower and yield and water consumption under different irrigation quotas was explained. The ability (potential) of different irrigation quotas to increase yield and water use efficiency of edible sunflower was analyzed by time series dynamic evaluation model. The results showed that the plant height, leaf number, disk diameter and stem diameter of sunflower were increased with the increase of irrigation quota. The treatments with 525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> and 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> irrigation quota promoted the growth of sunflower growth index significantly. When the irrigation quota was increased to 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, the stem diameter of sunflower was not increased but decreased, and 300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> irrigation quota limited the growth of sunflower plants. High irrigation quota was more conducive to the growth of plant height and leaf number of sunflower. There was a positive relationship between sunflower growth index and yield and water consumption. Water consumption and yield were increased with the growth of sunflower plants. Under 525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> irrigation quota, sunflower plants grew well, consumed more water and had higher yield. Irrigation quota of 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> increased nutrient growth time and water consumption of sunflower, which was not conducive to yield increase of sunflower. In reproductive growth stage, the water consumption of sunflower under 525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> and 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> irrigation quota was high, and the reduction of plant height and stem diameter was large. The evaluation

收稿日期: 2019-02-25 修回日期: 2019-04-03

基金项目: 新疆教育厅创新项目(XJEDU2017T004)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B05)

作者简介: 赵经华(1979—),男,副教授,博士,主要从事节水灌溉技术研究, E-mail: zhaojinghua\_xj@126.com

results showed that the comprehensive growth of sunflower under  $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  irrigation quota was at a disadvantage, and the ability to improve yield and water use efficiency was weak, that was, the potential was small. The sunflower under  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  irrigation quota had the best comprehensive growth potential. The  $525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  irrigation quota was suitable for the actual sunflower irrigation system. The time series dynamic evaluation model can better solve the problem of field test evaluation, and provide a reference for comprehensive analysis of field test based on dynamic and static indicators.

**Key words:** sunflower; irrigation quota; growth index; time series dynamic evaluation model; yield increase potential

## 0 引言

向日葵 (*Helianthus* L.) 属菊科向日葵属栽培种<sup>[1]</sup>, 源于北美洲。可划分为两种: 油料向日葵 (*Helianthus tuberosus* L.) 主要作为榨油原料, 食用向日葵 (*Helianthus annuus* L., 简称食葵) 主要作为休闲和保健食品<sup>[2]</sup>。食葵抗旱耐碱性能良好, 适应新疆干旱少雨和土地碱性大的种植环境<sup>[3]</sup>, 常年种植面积高达  $20 \text{ 万 hm}^2$ 。新疆已成为全国第二大食葵种植区<sup>[4-5]</sup>, 北疆食葵灌溉制度相对守旧, 水资源利用效率低, 严重阻碍新疆农业经济及生态发展<sup>[6]</sup>。

相关研究表明, 向日葵长势和产量对不同灌水定额响应状态具有差异性, 合适的灌水定额既能保证植株长势良好, 又能增加产量<sup>[7-8]</sup>。田德龙等<sup>[9-10]</sup>研究发现,  $626 \sim 1088 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  灌水量下向日葵株高、茎粗和叶片长势较优, 且产量较高。郭富强等<sup>[11]</sup>研究表明, 与正常灌水定额相比, 80% 正常灌水定额有效促进向日葵产量和株高增大。曾文治<sup>[12]</sup>研究发现, 在氮和盐施加量一定时, 65% 田间持水率灌水量下向日葵株高、花蕾直径、产量增大效果显著。

目前, 关于北疆地区膜下滴灌食葵生长和产量

方面的研究鲜见报道。在农业生产活动中, 北疆多以作物长势作为预测收获丰欠的依据, 且作物灌溉制度多以增加产量为目的, 其节水效能亟待增强<sup>[13-14]</sup>, 故研究滴灌食葵灌溉制度对指导北疆滴灌食葵灌溉具有重要意义。本文在膜下滴灌基础上, 以促进食葵植株生长、提高食葵产量和水分利用效率为目标, 结合时序动态评价方法, 探究不同灌水定额对食葵生长指标的影响, 分析不同灌水定额下食葵生长指标与产量、耗水量的关系, 以期为北疆地区改进食葵灌溉制度提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2017 年 5—9 月在阿尔泰地区灌溉试验站 (东经  $87^{\circ}35'56''$ , 北纬  $47^{\circ}00'56''$ ) 进行, 平均海拔  $538 \text{ m}$ 。土质为多砾石沙土, 试验地  $0 \sim 60 \text{ cm}$  土层土壤容重为  $1.81 \text{ g/cm}^3$ , 田间持水率为 21.2%, 土壤养分全氮质量分数 0.027%, 速效氮质量比为  $19.5 \text{ mg/kg}$ , 速效磷质量比  $9.0 \text{ mg/kg}$ , 速效钾质量比  $92.4 \text{ mg/kg}$ 。2017 年 5—9 月食葵活动积温为  $2502^{\circ}\text{C}$  (大于等于  $15^{\circ}\text{C}$ )。由哈拉霍英干渠提供灌溉用水, 水质 pH 值为 8.10, 试验期间气象数据见表 1。

表 1 2017 年试验站基本气象资料

Tab. 1 Basic meteorological data of experiment station in 2017

气象因素	5月	6月		7月			8月			9月	
	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬
最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	33.42	32.36	37.18	36.20	37.32	33.29	39.29	33.39	35.48	28.52	22.13
平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	20.30	21.63	25.68	25.76	25.12	24.58	26.39	23.25	20.93	18.43	17.68
最高风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	13.09	11.08	14.09	8.56	9.06	6.54	5.54	6.54	8.05	5.03	6.02
平均风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3.30	2.71	1.80	2.22	1.83	1.44	0.91	1.33	1.04	0.96	0.83
总降雨量/mm	24.0	16.8	2.6	4.4	3.4	0	0	10.8	11.8	0	0
有效降雨量/mm	23.6	14.0	0	0	0	0	0	0	6.2	0	0

### 1.2 试验设计

选用中晚熟食葵品种 JN361。选用内镶贴片式滴灌带灌溉, 毛管直径  $16 \text{ mm}$ , 壁厚  $0.2 \text{ mm}$ , 滴头间距  $300 \text{ mm}$ , 滴头流量  $2.2 \text{ L/h}$ 。

经阿勒泰实地调研, 以当地食葵灌溉制度为试验设计依据。试验设 5 个不同灌水定额 W1 ~ W5,

灌水定额分别为  $300$ 、 $375$ 、 $450$ 、 $525$ 、 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , 食葵灌溉方案如表 2 所示, 每个处理 3 个重复, 单个小区  $0.021 \text{ hm}^2$ 。小区布置以 W1 至 W5 灌水定额由大到小顺序方式排列。采用 1 膜 1 管 2 行、 $40 \text{ cm} + 80 \text{ cm}$  宽窄行种植方式, 设计灌水周期为 7 d, 在试验过程中还未达到设计灌水周期食葵已出现缺水现

象,故在实际灌水中缩短灌水周期 1~2 d,实际灌水周期为 6~8 d。

5月18日播种,5月21日灌出苗水,底肥为磷

酸二铵 195 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥 105 kg/hm<sup>2</sup>。在现蕾初期进行第1次试验灌溉(表3)。其他农艺措施与当地一致。

表2 2017年阿勒泰试验站食葵灌溉制度

Tab.2 Sunflower irrigation system at Altay Experiment Station in 2017

处理	灌水定额/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )							总计	灌溉次数/ 次
	07-03	07-11	07-18	07-24	07-30	08-07	08-15		
W1	300	300	300	300	300	300	300	2 100	7
W2	375	375	375	375	375	375	375	2 625	7
W3	450	450	450	450	450	450	450	3 150	7
W4	525	525	525	525	525	525	525	3 675	7
W5	600	600	600	600	600	600	600	4 200	7
灌水周期/d	8		7	6	6	7	7		

表3 2017年食葵生育期

Tab.3 Growth stage of sunflower in 2017

指标	营养生长				生殖生长			
	苗期	现蕾期		初花期	盛花期	成熟期		09-01
	06-22	07-02	07-12	07-22	08-02	08-14	08-21	
苗后时间	27	37	47	57	67	77	87	97

### 1.3 指标测定方法

#### (1) 作物耗水量

利用 TRIME-HD2 型便携式土壤水分测量仪(德国)获得土壤含水率数据。参照康洁<sup>[15]</sup>的测量方法,每个处理设 2 个 Trime 探测管(长度相同,均为 1 m),间隔 20 cm。沿 Trime 探测管方向每隔 10 cm 设 1 个测点,共设 6 个测点。灌水前后、雨后加测。土壤计划湿润层为 600 mm,采用水量平衡原理<sup>[16]</sup>计算作物全生育期耗水量

$$S_{ET} = W_T + P_0 + K + M - (W_t - W_0) \quad (1)$$

式中  $S_{ET}$ ——食葵生育期耗水量(ET),mm

$W_T$ ——计划湿润层增加的储水量,mm

$P_0$ ——有效降雨量,mm

$K$ ——地下水补给量,mm,经水位取样检测结果表明,该地区地下水埋深大于 6 m,因此不计地下水补给

$M$ ——时段灌水量,mm

$W_t$ —— $t$ 时刻土壤计划湿润层储水量,mm

$W_0$ ——初始时刻土壤计划湿润层储水量,mm

#### (2) 生长指标和产量

从出苗日期开始,每 10 d 对食葵株高、叶片数、盘径和茎粗检测一次,测量工具为卷尺(mm)和游标卡尺(mm)。采用同倍比放大法<sup>[17]</sup>,利用株数、面积和干籽粒质量折算产量;籽粒晒干后,在每小区随机选取 100 粒食葵种子,称百粒质量;将壳仁分离,籽粒仁与籽粒壳质量比值称为出仁率;利用产量与耗水量计算作物水分利用效率(WUE)。

### 1.4 分析方法

#### 1.4.1 数据预处理

食葵株高、叶片数、盘径和茎粗的数学量纲不一致,且生长指标间存在不可公度性现象,故需对生长指标数据预处理,为得出准确综合评价结果奠定基础。与产量及其构成等成果性指标不同,生长指标和时序关系密切,在不同时序阶段食葵株高和盘径等生长指标对最终产量影响不同,即不同生育阶段需用不同数据标准化法处理相同生长指标数据。指标可以分为效益型、成本型和区间型,采用刘龙举相应数据处理方法<sup>[18]</sup>。

#### 1.4.2 动态综合评价法

食葵株高、叶片数、盘径和茎粗生长指标是以时间和不同灌水定额为基础的三维立体数据,为体现食葵生长指标在不同生育阶段和时序的重要性,本文利用郭亚军等<sup>[19]</sup>的二次加权评价法,将立体数据中时间维和生长指标维集结,得出最终评价结果。二次加权评价法采用了 TOWA 算子或 TOWGA 算子,由于株高和叶片数等生长指标具有整体性,生长指标间不存在独立性,故本文选用 TOWGA 算子二次加权评价法以强调食葵生长指标在各生育阶段变化的均衡性,二次加权评价公式为

$$h_i = G(\langle t_1, y_i(t_1) \rangle, \langle t_2, y_i(t_2) \rangle, \dots,$$

$$\langle t_v, y_i(t_k) \rangle) = \prod_{k=1}^v b_{ik}^{w_{ik}} \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (2)$$

式中  $h_i$ ——时序动态评价模型评价价值

$G(\cdot)$ ——TOWGA 算子函数

$t_k$ ——苗后时间, d  
 $y_i$ ——线性加权评价值  
 $w_{bk}$ ——食葵生长指标对应苗后时间的权向量元素  
 $b_{ik}$ ——TOWGA 算子的第 2 分量

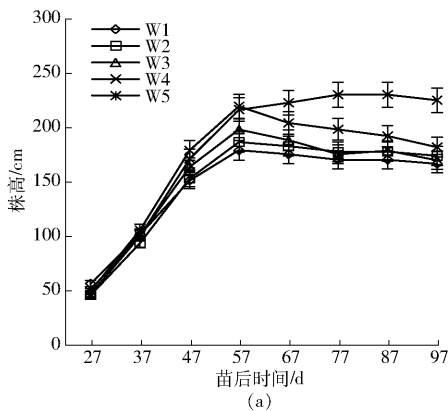
郭亚军等<sup>[19]</sup>采用给定“时间度” $\lambda$  的非线性规划方程求解时间权向量。在给定次数迭代下,通过遗传算法能突破仅接近局部解限制,并得到局部最优解,本文在此方法基础上利用基于遗传算法的粒子群算法<sup>[20]</sup>改进时间权向量求解方法,基本非线性规划方程为

$$\begin{cases} \max \left( - \sum_{k=1}^v w_{bk} \ln w_{bk} \right) \\ \text{s. t.} \begin{cases} \lambda = \sum_{k=1}^v (v - k) w_{bk} / (v - 1) \\ \sum_{k=1}^v w_{bk} = 1 \\ w_{bk} \in [0, 1] \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\lambda$  为时间度,  $\lambda \in [0, 1]$ , 该值是对不同时刻数据重要程度的界定, 当  $\lim \lambda = 1$ , 表示距  $t_k$  时刻远期的数据重要; 当  $\lim \lambda = 0$ , 表示距  $t_k$  时刻近期的数据重要。

### 1.5 统计分析

试验数据经 Excel 2016 整理后, 利用 SPSS 22.0 对数据进行单因素方差分析, 利用 LSD 法检验差异显著性 ( $p < 0.05$ )。采用 Excel 2016 作图, 利用



Matlab 8.0 运行粒子群算法。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水定额对食葵生长指标的影响

#### 2.1.1 对食葵株高和单株叶片数的影响

不同灌水定额对食葵株高影响不同(图 1a), 各处理食葵株高随时间延后而呈现先增长后稳定态势。苗后 27 ~ 47 d, 各处理食葵株高均快速增大, 各处理苗后 47 d 较苗后 27 d 株高分别增长 2.7、3.3、3.2、3.6、4.7 倍, W4 处理植株最高, 且较 W1 处理株高增长率为 17.8%。苗后 47 ~ 57 d, 各处理食葵株高增长速度减缓, 各处理苗后 57 d 较 47 d 株高增长率分别为 18.1%、22.3%、21.2%、23.0% 和 26.2%, W4 处理株高最大, 较 W1 处理增长率为 23.3%。苗后 57 ~ 77 d, W1 ~ W4 处理株高缓慢减小。与苗后 57 d 相比, 苗后 77 d W1 ~ W4 处理株高减小量占比分别为 5.1%、5.2%、11.1% 和 10.3%, W5 处理株高缓慢增大, 增长率为 6.3%。苗后 57 d 左右, W1 ~ W4 处理食葵株高达到最大值。在苗后 77 d, W5 处理株高达到最大值。苗后 77 ~ 97 d, W1 ~ W3 处理株高趋于稳定, W4 处理株高持续下降, W4 处理株高减小量占比为 4.9%, W5 处理株高最大。苗后 87 d, W5 处理株高开始减少, 至苗后 97 d, 减小量占比为 1.8%。综上所述, 食葵株高随灌水定额增加而增大, 高灌水定额有效延长食葵株高增大时间。

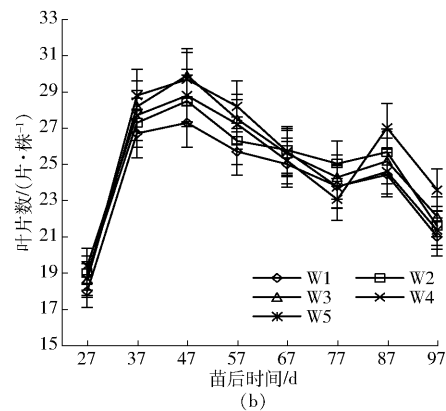


图 1 不同灌水定额下食葵株高和单株叶片数变化规律

Fig. 1 Variations of plant height and leaf number of sunflower under different irrigation quotas

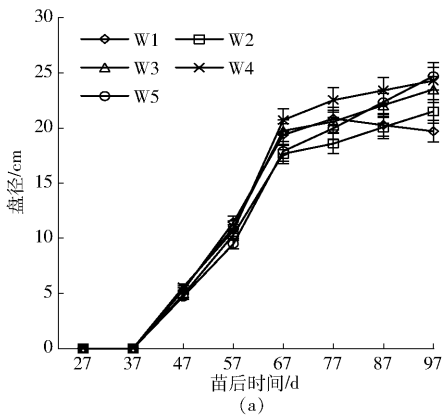
在不同生育阶段食葵叶片数对不同灌水定额响应不同(图 1b)。不同灌水定额下食葵叶片数表现为“双峰”变化规律。苗后 27 ~ 37 d, 不同灌水定额下食葵叶片数快速增大, 叶片数增加速度最快。各处理叶片数增长率分别为 48.2%、44.3%、52.2%、54.4% 和 43.4%。W4 处理叶片数最多, W1 处理最少。W4 和 W5 处理较 W1 处理叶片数增长率分别

为 8.1% 和 4.3%。苗后 37 ~ 47 d, 各处理叶片数增加速度减缓, 并在 47 d 达到第一峰值, 各处理叶片数增长率均在 2.0% ~ 6.0% 范围内, 其中 W3 处理和 W4 处理叶片数最多, W1 处理最少。苗后 47 ~ 77 d, 各处理叶片数逐渐减少, 各处理叶片数减小量占比分别为 13.2%、12.0%、19.1%、20.2% 和 20.4%, 并在苗后 77 d 达到谷值, 其中 W2 处理叶片

数最多,W5处理最少。苗后77~87 d,各处理叶片数表现为“单峰”规律,在苗后87 d叶片数达到第2峰值。W1~W4处理叶片数增长率均在3.0%~4.0%范围内,W5处理为17.3%。其中W5处理叶片数最多,W1处理最少。W5处理较W1处理增长率为11.2%。综上表明,适量的灌水定额具有促进食葵叶片数增多的能力,低灌水定额限制食葵叶片增长。

### 2.1.2 对食葵盘径和茎粗的影响

不同灌水定额对食葵盘径影响不同,各处理食葵盘径随时间延后而呈现先增长后稳定的态势(图2a)。苗后37 d,各处理花盘逐渐出现,至67 d各处理盘径快速增大,且在苗后57~67 d,各处理盘径增长速度最快。苗后67 d较47 d各处理盘径分别增长3.7、3.6、3.7、3.7、3.8倍。其中W4处理盘径最大,W2处理最小,W4处理较W2处理盘径增长率为16.9%。此阶段W5处理盘径与W2处理相近。苗后67~97 d,W2~W4处理盘径缓慢增加,盘径增长率分别为22.2%、18.8%和17.3%,其中W4处理盘径最大,W2处理最小,W4处理较W2处理盘径增长率为21.3%。在该时段W1处理盘径变化趋于平缓,其变化率(增长率或减少量占比)仅为2.1%,在苗后77 d,W1处理盘径达到最大值。苗后77~97 d,W1处理盘径略微减小;苗后67~97 d,较其他处理,W5处理盘径增大速度最快,其增长率为37.8%。至苗后97 d,W5处理盘径最大,W1处理



最小,W5处理较W1处理盘径增长率为23.0%。综上表明,高灌水定额有利于食葵盘径增大,低灌水定额限制食葵盘径生长,缩短盘径增大时长的同时,出现盘径缩减态势。

在不同生育阶段食葵茎粗对不同灌水定额响应不同(图2b),与株高变化规律类似,随时间延后不同灌水定额下食葵茎粗表现为先增大后减小态势。苗后27~47 d,各处理茎粗快速增长,各处理茎粗增长率分别为36.6%、34.6%、35.1%、53.4%和46.0%。其中W4处理茎粗最大,W1处理最小,W4处理较W1处理茎粗增长率为25.3%。该时段各处理茎粗与苗后97 d茎粗占比分别为95.5%、97.8%、100%、100%和97.8%。苗后47~67 d,各处理茎粗缓慢增长,各处理茎粗增长率分别为11.1%、10.8%、11.9%、9.4%和9.2%。其中W4处理茎粗最大,W1处理最小,W4处理较W1处理茎粗增长率为28.7%。苗后67~97 d,各处理茎粗逐渐减小。与苗后67 d相比,苗后97 d各处理茎粗减少量占比分别为5.8%、7.7%、14.0%、15.5%和7.0%。W4处理茎粗最大,W1处理最小,W4处理较W1处理茎粗增长率为10.2%。综上表明,食葵茎粗随着灌水定额增大而增大,较低或较高的灌水定额不利于茎粗增大。由不同时段茎粗占比分析可知,苗后27~47 d是食葵茎粗主要生长阶段,且在苗后47~67 d,不同灌水定额对食葵茎粗影响最大。

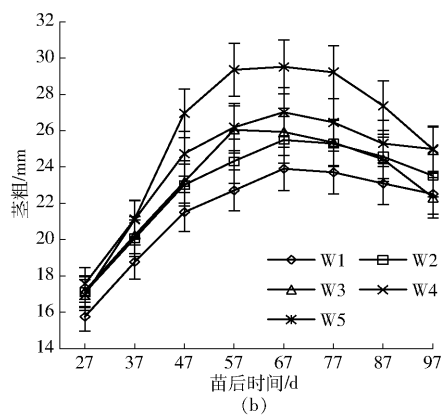


图2 不同灌水定额下食葵盘径和茎粗变化规律

Fig.2 Variations of disc diameter and stem diameter of sunflower under different irrigation quotas

不同灌溉定额对食葵生长指标影响不同。与苗期相比,成熟期W1~W5处理株高分别增长3.0、3.8、3.3、3.7、4.8倍,W5处理株高增长量分别是W1~W4处理的1.6、1.4、1.5、1.4倍。随着灌溉定额增大,W1~W5处理叶片数增长率分别为15.9%、14.2%、19.4%、13.7%和22.2%,W5处理叶片增长量分别是W1~W4处理的1.4、1.6、1.2、1.6倍。与苗期相比,成熟期W1~W5处理盘径增

长倍数分别为3.8、4.4、4.4、4.4、5.3倍,W5处理盘径增长量分别是W1~W4处理的1.4、1.2、1.1、1.1倍。从苗期至成熟期,W1~W5处理茎粗增长率分别为42.6%、38.1%、30.4%、41.6%和48.2%。W5处理茎粗增长量分别是W1~W4处理的1.2、1.3、1.6、1.1倍。分析表明,食葵株高、叶片数、盘径和茎粗随着灌溉定额增加而增大,且高灌溉定额促进食葵株高和叶片数增长的效果较盘径和茎粗

明显。

## 2.2 不同灌水定额下食葵生长指标与产量及耗水量的关系

由2.1节分析发现,在生殖生长阶段W5处理食葵株高、叶片数和盘径的变化规律与其他处理不一致。苗后57~97d,各处理株高开始缓慢减小。与苗后57d相比,苗后97dW1~W4处理株高减小量占比分别为6.8%、7.0%、14.2%和17.1%,W5处理株高增长率为4.2%。与苗后77d相比,苗后97dW1~W4处理叶片数减小量占比分别为12.3%、13.9%、9.3%和9.8%,W5处理叶片数增长率为4.1%。与苗后67d相比,苗后97dW1~W5处理盘径增长率分别为2.1%、22.2%、18.8%、17.3%和37.8%。与苗后67d相比,苗后77~97dW1~W5处理茎粗减小量占比分别为4.9%、7.2%、12.3%、15.2%和5.0%。即在生殖生长阶

段,W1~W4处理食葵株高和叶片数均不同程度减小,W5处理食葵株高和叶片数不减反增,该时段W5处理盘径仍以较高速度增大,其茎粗减小量最小。综上所述W5处理对食葵营养生长时段具有明显延长作用。

不同灌水定额下食葵生长指标与产量及其构成关系密切(表4),其中株高、叶片数、盘径和茎粗取自7次灌溉后(即苗后97d)食葵生长指标的数值,使得生长指标与产量及其构成间具备可比性。在全生育期,W1处理和W2处理食葵株高、叶片数、盘径和茎粗均最小,W1处理单盘干籽粒质量和百粒质量最低(表4);W4处理和W5处理株高、叶片数、盘径和茎粗相对较大,其单盘干籽粒质量、百粒质量和产量最高。表明食葵生长指标和产量及其构成因素存在正向关系,即适宜灌水定额能促进食葵植株生长,且产量较优。

表4 不同灌水定额下食葵生长指标与产量及其构成

Tab.4 Growth indicators, yield and composition of sunflower under different irrigation quotas

参数	W1	W2	W3	W4	W5	
生长指标	株高/cm	166.94 <sup>d</sup>	174.11 <sup>c</sup>	170.10 <sup>c</sup>	182.26 <sup>b</sup>	225.40 <sup>a</sup>
	叶片数/(片·株 <sup>-1</sup> )	21.00 <sup>c</sup>	21.60 <sup>b</sup>	22.11 <sup>b</sup>	21.38 <sup>c</sup>	23.58 <sup>a</sup>
	盘径/cm	19.70 <sup>d</sup>	21.50 <sup>c</sup>	23.50 <sup>b</sup>	24.30 <sup>ab</sup>	24.70 <sup>a</sup>
	茎粗/mm	22.51 <sup>b</sup>	23.52 <sup>b</sup>	22.30 <sup>b</sup>	24.95 <sup>a</sup>	25.00 <sup>a</sup>
产量及其构成	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	2707.49 <sup>d</sup>	4036.15 <sup>c</sup>	4531.86 <sup>b</sup>	4781.86 <sup>a</sup>	4642.59 <sup>ab</sup>
	出仁率/%	43.75 <sup>bc</sup>	48.99 <sup>ab</sup>	47.75 <sup>ab</sup>	47.45 <sup>a</sup>	43.25 <sup>c</sup>
	干籽粒质量/(g·盘 <sup>-1</sup> )	101.48 <sup>d</sup>	151.28 <sup>c</sup>	169.86 <sup>b</sup>	179.23 <sup>a</sup>	174.01 <sup>ab</sup>
	百粒质量/g	21.10 <sup>c</sup>	23.95 <sup>b</sup>	26.25 <sup>a</sup>	27.20 <sup>a</sup>	28.10 <sup>a</sup>
	WUE/(kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	10.54 <sup>b</sup>	14.48 <sup>a</sup>	15.44 <sup>a</sup>	14.37 <sup>a</sup>	13.68 <sup>ab</sup>

注:同一指标的不同字母表示数据间存在显著性差异( $p < 0.05$ )。

图1、2表明,与其他处理相比,W5处理有效促进食葵株高、叶片数和盘径增长,且在生育期末时刻W5处理株高、叶片数和盘径均最大,但W5处理食葵产量排名第2,出仁率最低。造成此现象的原因可能是:W5处理对食葵营养生长时段具有明显延长作用,在生殖生长阶段,W5处理食葵株高、叶片数和盘径继续生长,引起食葵籽粒灌浆不充分,最终导致W5处理灌水定额下食葵产量较低。

结合不同灌水定额下食葵生长指标和耗水量变化曲线(图3)可以看出,6月上旬至7月上、中旬,各处理食葵耗水量均快速增长,各处理食葵株高、叶片数、茎粗和盘径快速增大。至7月中旬,各处理食葵株高占末时段株高76.0%~98.0%,各处理叶片数和茎粗几乎达全生育期最大值;7月中旬至8月中旬,各处理食葵耗水量虽出现波动态势但整体平稳,各处理食葵株高、叶片数和茎粗虽有小幅减小

态势但整体平稳,各处理食葵盘径以较高速度增大;8月中旬至9月上旬,各处理耗水量均减小,同时各处理株高、叶片数和茎粗均减小,盘径缓慢增大。表明不同灌水定额食葵生长指标和耗水规律密切相关,在营养生长阶段,食葵株高、叶片数、盘径和茎粗随食葵耗水量增加而增大。

与苗后57d相比,苗后97dW1~W4处理株高减小量占比分别为6.8%、7.0%、14.2%和17.1%;与苗后67d相比,苗后97dW1~W4处理食葵茎粗减小量占比分别为5.8%、7.7%、14.0%、15.5%;苗后57~97d(即7月下旬至9月上旬),W1处理和W2处理耗水量持续减少,W3处理和W4处理耗水量先增加后减小(图3)。表明不同灌水定额下食葵耗水量与株高和茎粗缩减量关系密切,较高灌水定额下食葵耗水量较高,且株高和茎粗缩减量较大;较低灌水定额下食葵耗水量偏低,且株高和茎粗缩

减量较小。

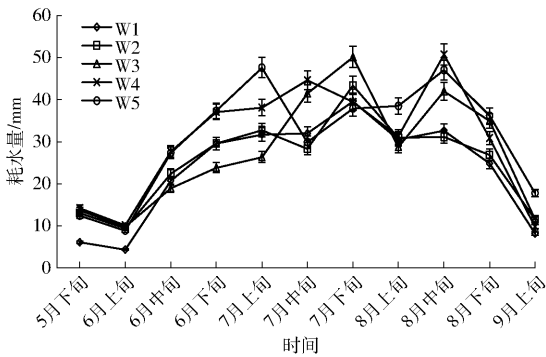


图3 不同灌水定额对食葵耗水量的影响

Fig. 3 Effects of different irrigation quotas on water consumption of edible sunflower

### 2.3 不同灌水定额下食葵生长指标的时序动态评价

由2.2节分析表明,在不同灌水定额条件下,食葵不同生长态势对应不同产量,即通过不同食葵生长指标数据能确定与之对应的产量趋势。本节在不同灌水定额食葵生长指标的基础上,利用时序动态模型对各处理提高食葵产量和水分利用效率的能力(潜能)进行评价。

#### 2.3.1 数据预处理

由2.2节分析可得,苗期至初花期是食葵营养生长阶段,此阶段食葵株高、叶片数、盘径和茎粗属于效益型指标,即生长指标越大越好,选用效益型数据处理方法对苗后27~67 d不同灌水定额下食葵生长指标数据进行预处理。从盛花期至成熟末期食葵应以生殖生长为主,食葵株高、叶片数和茎粗较小或较大均不利于食葵增产,此阶段株高、叶片数、盘径和茎粗转变为区间型指标,选用区间型数据处理方法归一化苗后77~97 d食葵生长指标数据。数据预处理结果见表5。

#### 2.3.2 苗后时间食葵生长指标权重系数确定

为体现数据自身客观性,本文选用熵值法<sup>[21]</sup>确定不同苗后时间食葵生长指标权重系数,为基于时序的动态评价做准备的同时,且能反映在不同苗后时间食葵株高、叶片数、盘径和茎粗指标间相对重要性。权重系数见表6。

由表6可以看出,综合食葵株高、茎粗、叶片数和盘径生长指标,苗后27 d食葵以增大株高为主,茎粗和叶片数相对增长重要程度较低;苗后37 d,食葵以增加叶片数为主,株高和茎粗相对增长重要程度较低。结合图1b可得,苗后37 d各处理食葵叶片数基本增长到最大值,同时说明该阶段食葵以叶片增长为主;苗后47~77 d,食葵以生长株高为主,盘径增大为次要;苗后87~97 d,食葵分别以增大盘径和茎粗为主。

表5 2017年不同灌水定额下食葵生长指标数据预处理结果

Tab. 5 Data preprocessing of sunflower growth indicators under different irrigation quotas in 2017

苗后时间/d	指标	处理				
		W1	W2	W3	W4	W5
27	株高	1.000	0.086	0.474	0.319	0.066
	叶片数	0.257	0.714	0.429	0.500	1.000
	茎粗	0.172	0.740	0.775	1.000	0.657
37	株高	0.644	0.159	0.593	1.000	0.559
	叶片数	0.254	0.286	0.714	1.000	0.476
	茎粗	0.062	0.216	0.244	1.000	0.385
47	株高	0.109	0.069	0.462	1.000	0.722
	盘径	0.647	0.200	0.824	1.000	0.111
	叶片数	0.210	0.462	1.000	0.923	0.577
57	茎粗	0.079	0.275	0.307	1.000	0.592
	株高	0.088	0.190	0.473	1.000	0.924
	盘径	1.000	0.423	0.769	0.615	0.097
67	叶片数	0.206	0.240	0.720	1.000	0.600
	茎粗	0.068	0.241	0.503	1.000	0.525
	株高	0.074	0.159	0.271	0.608	1.000
77	盘径	0.569	0.115	0.683	1.000	0.081
	叶片数	0.625	1.000	0.750	0.875	0.250
	茎粗	0.085	0.285	0.364	1.000	0.555
87	株高	0.064	0.297	0.224	0.954	0.289
	盘径	1.000	0.094	1.000	1.000	0.710
	叶片数	0.367	1.000	0.620	0.342	0.234
97	茎粗	0.086	0.288	0.298	1.000	0.497
	株高	0.064	0.232	0.261	0.692	0.284
	盘径	0.066	0.119	0.592	1.000	0.676
苗后时间/d	叶片数	0.136	0.779	0.390	0.088	0.733
	茎粗	0.082	0.471	0.503	0.914	0.780
	株高	0.632	0.802	0.712	0.990	0.051
97	盘径	0.051	0.445	0.886	1.000	0.910
	叶片数	0.099	0.359	0.578	0.255	0.878
	茎粗	0.160	0.533	0.094	1.002	0.979

表6 不同苗后时间食葵生长指标权重系数

Tab. 6 Weight coefficient of sunflower growth indicators at different post-seedling times

苗后时间/d	株高	茎粗	叶片数	盘径
27	0.652	0.168	0.180	
37	0.203	0.226	0.571	
47	0.350	0.127	0.276	0.246
57	0.322	0.185	0.292	0.201
67	0.348	0.085	0.250	0.317
77	0.368	0.159	0.293	0.180
87	0.231	0.271	0.178	0.319
97	0.214	0.232	0.321	0.234

#### 2.3.3 加权综合评价

利用线性加权综合模型进行第1次加权综合<sup>[22]</sup>,得到各苗后时间的不同灌水定额方案评价数值,见表7。

表7 不同苗后时间下对不同灌水定额方案的评价值  
Tab.7 Evaluation values for different irrigation quota schemes at different times

处理	苗后时间/d							
	27	37	47	57	67	77	87	97
W1	0.726	0.224	0.246	0.287	0.281	0.287	0.087	0.223
W2	0.310	0.220	0.208	0.261	0.248	0.369	0.387	0.530
W3	0.521	0.421	0.577	0.587	0.466	0.448	0.445	0.521
W4	0.472	1.000	0.990	0.923	0.853	0.878	0.666	0.824
W5	0.329	0.441	0.517	0.581	0.534	0.417	0.619	0.732

### 2.3.4 时间权向量求解

通过咨询相关专家得知本试验条件下取“时间度” $\lambda = 0.1$ ,在遗传算法的基础上,通过式(3)非线性规划方程求得食葵全生育期中8个苗后时间对应的权重向量系数,并构成时间权向量  $W_b = (0.010, 0.021, 0.012, 0.001, 0.028, 0.022, 0.313, 0.549)^T$ 。在总迭代次数30000的计算条件下,适应度曲线在1000次计算结果后,适应度保持不变,该时间权向量具有高效度。

### 2.3.5 二次加权评价

在第一次综合评价基础上,利用TOWGA算子,通过式(2)求得5种不同灌水定额评价价值,W1、W2、W3、W4和W5处理评价价值分别为0.170、0.451、0.492、0.778和0.669。

在近期数据极其重要条件下( $\lambda = 0.1$ ),基于食葵生长指标,以节水增产为目的,运用TOWGA算子对5种不同灌溉制度提高产量和水分利用效率的能力排序。由评价结果看出,5种不同灌水定额评价价值由大到小依次为:W4处理、W5处理、W3处理、W2处理、W1处理。排序结果表明,不同灌水定额下食葵生长状况可以分为3组,第1组包括W4处理和W5处理,该组处理下食葵植株综合长势优于其他处理,具有提高作物水分利用效率和产量的潜能;第2组包括W3处理和W2处理,该组处理下食葵植株综合长势处于中等水平,促进作物水分利用效率和食葵产量增加的能力有限;第3组为W1处理,该组处理食葵植株生长状况处于劣势,无高产潜能。

## 3 讨论

食葵生长指标对不同灌水定额响应不同,与低灌水定额相比,食葵生长指标对高灌水定额响应积极。植株茎粗反映根系群生长状况<sup>[23]</sup>,在全生育期W5处理食葵茎粗均小于W4处理,表明与W4处理相比,W5处理食葵根系群欠发达,抗倒伏能力较弱。凌一波等<sup>[24]</sup>研究表明,向日葵株高和茎粗增长

速度随着灌溉定额增加而增大,且在苗期至花期最大,本研究与此结论一致。凌一波等<sup>[24]</sup>还发现,当灌溉定额从3600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>增加至5400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,向日葵株高和茎粗逐渐增大,即株高和茎粗随着灌水定额增加而增大。本研究与此结论类似,但存在不同之处,本研究认为当灌水定额继续增大,食葵株高和茎粗不再增大,并出现减小态势。孔东等<sup>[25]</sup>研究表明,不同水盐条件对向日葵株高和茎粗等生长指标影响不同,高水盐施加量具有明显延迟向日葵营养生长的作用。本研究与此结论类似,本文认为高灌水定额下食葵营养生长阶段时间跨度较低灌水定额大。孔东等<sup>[25]</sup>研究还发现由于高施盐量抑制向日葵生殖生长导致减产,本文结论与该结论类似。本研究认为高灌水定额影响食葵生殖生长,该影响的作用可能主要体现在以下两方面:①延长食葵营养生长阶段,从而延长营养生长至生殖生长过渡阶段,而非抑制生殖生长。在过渡和生殖生长阶段,W5处理食葵株高、叶片数、盘径和茎粗无明显减小趋势,株高、叶片数和盘径仍表现出增长态势。在各处理收获日期相同的条件下,W5处理食葵生殖生长阶段较短,形成食葵籽粒生长或灌浆不充分现象,导致产量降低。②抑制食葵生殖生长。在过渡和生殖生长阶段,W5处理下食葵生长指标继续增大,加剧营养生长与生殖生长养分竞争产生的消极影响,抑制生殖生长,使得W5处理出仁率最低,导致产量降低。

前人研究表明,综合评价模型能适用于大田试验分析,并能较好地解决大田作物节水增产相关问题<sup>[26-27]</sup>。汪顺生等<sup>[28]</sup>研究表明,在冬小麦产量及其构成等静态数据基础上,利用模糊综合评价方法对不同种植模式进行评价,评价结果与大田试验结果一致。本研究在食葵株高和盘径等动态数据的基础上,利用时序动态评价模型对不同灌水定额下增产潜能进行评价预测。利用时序动态评价模型得出W4处理评价价值最大的结论的同时,说明了不同苗后时间食葵主要变化的生长指标。在5个处理中,W4处理最适合作为食葵实际灌溉制度(另文说明),此评价预测结果与大田试验结果一致,同时说明该模型能适用于大田试验评价分析。

本文围绕食葵生长指标对植株长势和节水增产进行了探讨,文中涉及到的问题需要进一步研究。将来研究方向需集中于待解决的问题:在不同灌水定额食葵植株各器官干物质质量基础上,结合生长指标,对不同灌水定额食葵植株营养生长和生殖生长量化分析,确定不同灌水定额下食葵营养生长生物量与生殖生长生物量占总生物量比例,探讨不同



灌水定额对食葵产量的影响,为指导北疆食葵实际灌溉和类似研究提供科学依据。

## 4 结论

(1)不同灌水定额显著影响食葵生长指标。随着灌水定额的增加,食葵株高、叶片数、盘径和茎粗逐渐增大,300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额限制食葵植株生长,525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>和600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下食葵生长指标增长效果明显。与盘径和茎粗相比,高灌水定额更有利于促进食葵株高和叶片数增长。

(2)食葵生长指标和产量存在正向关系,即适宜灌水定额下长势较优的食葵植株具有高产潜能。

600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下增大食葵营养生长时间跨度,不利于食葵增产。在营养生长阶段,食葵株高、叶片数、盘径和茎粗随着食葵耗水量增加而增大。与低灌水定额相比,高灌水定额下食葵耗水量较高,且株高和茎粗缩减量较大。

(3)评价结果表明,时序动态评价模型适用于大田试验评价分析,可为基于动静态指标的大田试验综合分析提供参考。预测结果显示,300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下食葵提高产量和水分利用效率的潜能较小,525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额下食葵综合长势最优,具备高产量和高水分利用效率的潜能大。选择525 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌水定额可以满足实际食葵种植节水增产的要求。

## 参 考 文 献

- [1] 王丹,赵艳平,孟瑞霞,等. 向日葵筒状小花和瘦果性状与欧洲葵螟宿主选择的关系[J]. 植物保护学报, 2014, 41(3):298-304.  
WANG Dan, ZHAO Yanping, MENG Ruixia, et al. The relationship between tubular floret and achene traits of sunflower and host selection of European sunflower moth [J]. Journal of Plant Protection, 2014, 41(3): 298-304. (in Chinese)
- [2] 刘清,师建芳,赵威,等. 向日葵副产物资源的综合利用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊2):336-340.  
LIU Qing, SHI Jianfang, ZHAO Wei, et al. Comprehensive utilization of sunflower by-product resources [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp. 2): 336-340. (in Chinese)
- [3] DAVIES F T, PURYEAR J D, NEWTON R J, et al. Mycorrhizal fungi enhance accumulation and tolerance of chromium in sunflower (*Helianthus annuus*) [J]. Journal of Plant Physiology, 2001, 158(6):777-786.
- [4] 李素萍. 食用型向日葵杂种优势及配合力研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2006.  
LI Suping. Study on heterosis and combining ability of edible sunflower [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [5] 丁变红,吴新明. 食用型向日葵优质高产栽培技术措施[J]. 新疆农垦科技, 2017, 40(10):16-18.  
DING Bianhong, WU Xinming. High-quality and high-yield cultivation techniques for edible sunflower [J]. Xinjiang Agricultural Reclamation Science and Technology, 2017, 40(10): 16-18. (in Chinese)
- [6] XIONG Heigang, MAO Jing. Analysis on carrying capacity of agricultural water resources based on fuzzy comprehensive evaluation in Qitai of Xinjiang[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(4):38-42.
- [7] 薛铸,史海滨,郭云,等. 盐渍化土壤水肥耦合对向日葵苗期生长影响的试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3):91-94.  
XUE Zhu, SHI Haibin, GUO Yun, et al. Experiments on the effects of water-fertilizer coupling on sunflower seedling growth in saline soil [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 91-94. (in Chinese)
- [8] 薛铸. 盐渍化土壤向日葵水肥综合效应初步研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2007.  
XUE Zhu. Preliminary study on comprehensive effects of water and fertilizer on sunflower in saline soil [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [9] 田德龙,史海滨,闫建文,等. 含盐土壤水肥耦合对向日葵生理生态因子影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(2):90-94.  
TIAN Delong, SHI Haibin, YAN Jianwen, et al. Effects of water and fertilizer coupling on physiological and ecological factors of sunflower in saline soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(2): 90-94. (in Chinese)
- [10] 田德龙. 河套灌区盐分胁迫下水肥耦合效应响应机理及模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011.  
TIAN Delong. Response mechanism and simulation of water-fertilizer coupling effect under salt stress in Hetao irrigation area [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [11] 郭富强,史海滨,杨树青,等. 盐渍化灌区不同水肥条件向日葵氮磷利用率及淋失规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5):39-43.  
GUO Fuqiang, SHI Haibin, YANG Shuqing, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiency and leaching law of sunflower under different water and fertilizer conditions in saline irrigation area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 39-43. (in Chinese)
- [12] 曾文治. 向日葵水、氮、盐耦合效应及其模拟[D]. 武汉:武汉大学, 2015.  
ZENG Wenzhi. Coupling effect of water, nitrogen and salt on sunflower and its simulation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. (in Chinese)
- [13] 王金满,杨培岭,张建国,等. 脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9):33-37.  
WANG Jinman, YANG Peiling, ZHANG Jianguo, et al. Salt response of sunflower seedling in soil improvement by desulfurization gypsum [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 33-37. (in Chinese)

- [14] 王振华, 杨培岭, 郑旭荣, 等. 新疆现行灌溉制度下膜下滴灌棉田土壤盐分分布变化[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8):149-159.  
WANG Zhenhua, YANG Peiling, ZHENG Xurong, et al. Changes of soil salinity distribution in cotton field under mulch drip irrigation under current irrigation system in Xinjiang [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):149-159. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140824&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140824&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.024. (in Chinese)
- [15] 康洁, 张维江, 李娟, 等. TRIME-T3 管式 TDR 土壤水分测定系统在宁夏泾源地区的标定研究[J]. 宁夏工程技术, 2015, 14(2):146-148.  
KANG Jie, ZHANG Weijiang, LI Juan, et al. Study on calibration of TRIME-T3 tubular TDR soil moisture measurement system in Jingyuan area of Ningxia [J]. Ningxia Engineering Technology, 2015, 14(2):146-148. (in Chinese)
- [16] 聂卫波, 马孝义, 幸定武, 等. 基于水量平衡原理的畦灌水流推进简化解析模型研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1):82-85.  
NIE Weibo, MA Xiaoyi, XING Dingwu, et al. Simplified analytical model of border irrigation water advance based on water balance principle [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1):82-85. (in Chinese)
- [17] 杨星, 黄俊友, 何勇, 等. 江苏沿海地区防洪排涝工程潮型的优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(4):312-318.  
YANG Xing, HUANG Junyou, HE Yong, et al. Optimum design of tide pattern for flood control and drainage works in Jiangsu coastal areas [J]. Journal of Irrigation and Drainage Machinery Engineering, 2014, 32(4):312-318. (in Chinese)
- [18] WANG S, WANG C, LIU Y, et al. Anomalous vertebral artery in craniovertebral junction with occipitalization of the atlas[J]. Spine, 2009, 34(26):2838-2842.
- [19] 郭亚军, 姚远, 易平涛. 一种动态综合评价方法及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(10):154-158.  
GUO Yajun, YAO Yuan, YI Pingtao. A dynamic comprehensive evaluation method and its application [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2007, 27(10):154-158. (in Chinese)
- [20] 王庆杰, 岳春芳, 李艺珍. 基于 MAGA-PPC 模型的水资源配置方案综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 8(3):28-33.  
WANG Qingjie, YUE Chunfang, LI Yizhen. Comprehensive evaluation of water resources allocation schemes based on MAGA-PPC model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 8(3):28-33. (in Chinese)
- [21] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. 统计与决策, 2015(2):12-15.  
ZHU Xi'an, WEI Guodong. Discussions on the excellent standards of dimensionless method in entropy method [J]. Statistics and Decision-making, 2015(2):12-15. (in Chinese)
- [22] 孙海洋, 李延喜, 陈克兢. 中国装备制造业发展绩效实证研究——基于 2003—2010 年面板数据[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2013, 34(3):36-41.  
SUN Haiyang, LI Yanxi, CHEN Kejing. Empirical study on the development performance of china's equipment manufacturing industry based on panel data from 2003 to 2010 [J]. Journal of Dalian University of Technology (Social Science Edition), 2013, 34(3):36-41. (in Chinese)
- [23] 张川, 张亨年, 闫浩芳, 等. 微喷灌结合滴灌对温室高温环境和作物生长生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20):83-89.  
ZHANG Chuan, ZHANG Hengnian, YAN Haofang, et al. Effects of micro-sprinkler irrigation combined with drip irrigation on high temperature environment and physiological characteristics of crop growth in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(20):83-89. (in Chinese)
- [24] 凌一波, 魏慧, 王斌杰. 灌溉次数对向日葵叶片水分状况及植株生长的影响[J]. 甘肃农业科技, 2018(8):64-67.  
LING Yibo, WEI Hui, WANG Binjie. Effects of irrigation times on leaf water status and plant growth of sunflower [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2018(8):64-67. (in Chinese)
- [25] 孔东, 史海滨, 陈亚新, 等. 水盐胁迫对向日葵幼苗生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(5):32-35.  
KONG Dong, SHI Haibin, CHEN Yaxin, et al. Effects of water and salt stress on the growth and development of sunflower seedlings [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(5):32-35. (in Chinese)
- [26] 徐剑, 赵经华, 马英杰, 等. 打瓜生长指标和产量对不同灌水定额的响应[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(9):18-23.  
XU Jian, ZHAO Jinghua, MA Yingjie, et al. Response of growth index and yield of melon to different irrigation quotas [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(9):18-23. (in Chinese)
- [27] 韩丙芳, 田军仓, 李应海, 等. 宁夏灌区不同水肥处理对膜上灌玉米性状影响的模糊评判[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(4):29-32.  
HAN Bingfang, TIAN Juncang, LI Yinghai, et al. Fuzzy evaluation of the effects of different water and fertilizer treatment on the characters of film irrigated maize in Ningxia irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(4):29-32. (in Chinese)
- [28] 汪顺生, 刘东鑫, 孟鹏涛, 等. 不同种植模式冬小麦产量与耗水量的模糊综合评判[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1):161-166.  
WANG Shunsheng, LIU Dongxin, MENG Pengtao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of winter wheat yield and water consumption under different planting modes [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1):161-166. (in Chinese)