

# 灌水定额对食葵耗水特征和产量的影响

赵经华<sup>1</sup>,徐 剑<sup>2</sup>,马 亮<sup>1</sup>,马英杰<sup>1</sup>

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2.新疆水利水电勘测设计研究院,新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**为研究不同灌水定额对食葵产量及其构成因素的影响并探究其耗水规律,筛选适宜的灌溉制度,设定5个不同的灌水定额,分别为300、375、450、525、600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,研究了不同灌水定额对食葵产量及其构成因素和耗水指标影响的同时,为弥补大田试验分析直观性不足,在生长、果实品质、产量和耗水等指标的基础上,利用MAGA-PPC模型综合且客观评价了田间试验结果。研究表明:不同灌水定额影响食葵耗水规律,食葵耗水量、耗水强度、耗水模数和作物系数随着灌水定额增加而增大,525~600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>灌水定额下耗水量、耗水强度、耗水模数和作物系数最大。在现蕾期和成熟初期,525~600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>灌水定额对食葵耗水量、耗水强度和作物系数影响更大。300 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>灌水定额下食葵耗水量先呈现出减少趋势现象。食葵盘径、产量和水分利用效率随着灌水定额的增加而增大,525 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>灌水定额下产量最大(4 781.86 kg·hm<sup>-2</sup>),且水分利用效率较大(14.37 kg·mm<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>),525 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>灌水定额更适合当地食葵农田灌溉。MAGA-PPC模型评价结果表明,525 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>灌水定额有利于北疆地区食葵节水增产。综上所述,建议保证食葵现蕾期和成熟初期给水量充足,选用525 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>灌水定额。

**关键词:**食葵;灌水定额;耗水量;作物系数;投影寻踪聚类

**中图分类号:**S274.1;S565.5 **文献标志码:**A

## Effects of different irrigation quotas on water consumption and yield of sunflower

ZHAO Jinghua<sup>1</sup>, XU Jian<sup>2</sup>, MA Liang<sup>1</sup>, MA Yingjie<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Xinjiang Scientific Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** In order to study the effects of different irrigation quotas on the yield and the yield composition of sunflower and to select the optimum irrigation system, 5 different irrigation quotas, 300, 375, 450, 525, and 600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> were used. The effects of different irrigation quotas on the yield, its composition, and water consumption index of sunflower were studied. In order to make up for the lack of intuitiveness analysis of the field experiment, the MAGA-PPC model was used to comprehensively and objectively evaluate field trial results based on the indicators of growth, fruit quality, yield, and water consumption. The results showed that different irrigation quotas did affect the water consumption of sunflower. The water consumption, water consumption intensity, water consumption modulus, and crop coefficient of edible sunflower increased with increase in irrigation quota. Water consumption, water consumption intensity, water consumption modulus and water consumption was the most at 525~600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>. At the bud stage and early maturity, the irrigation quota of 525~600 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> had even greater influence on the water consumption, water consumption intensity, and crop coefficient of the sunflower. The water consumption of the sunflower under 300 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> was decreased first and then reached a relatively stable level. The diameter, yield, and water use efficiency of the sunflower increased with increasing irrigation quota. The yield and water use efficiency were the highest under 525 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> irrigation quota. Yield and water use efficiency were 4781.86 kg·hm<sup>-2</sup> and 14.37 kg·mm<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>, respectively. The 525 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> irrigation quota resulted in the highest yield indicating it is more suitable for local sunflower production. The evaluation results of MAGA-PPC model showed that

the  $525 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  irrigation quota was conducive to increase sunflower production for water saving in the northern Xinjiang region. To sum up, it is recommended to ensure that the water supply is sufficient at the bud stage and early maturity of the sunflower, and the  $525 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  irrigation quota is used.

**Keywords:** confectionary sunflower; irrigation quota; water consumption; crop coefficient; projection pursuit-clustering

向日葵 (*Helianthus* L.) 属菊科向日葵属栽培种<sup>[1]</sup>, 原产北美洲, 依据向日葵功能可划分为油料向日葵 (*Helianthus tuberosus* L.) 和食用向日葵 (*Helianthus annuus* L., 简称食葵) 两种。向日葵营养丰富, 具有蛋白质、果糖和无氮浸出物<sup>[2]</sup>, 其可作为榨油原料、休闲食品、保健食品和饲料等。作为我国重要经济作物之一, 食葵具有抗旱耐碱和强适应性<sup>[3]</sup>。新疆光热资源充足, 具有利于食葵生长的地理优势。食葵种植成本低且经济效益高, 新疆食葵种植面积逐年增加, 常年种植面积 20 万  $\text{hm}^2$  左右, 仅次于全国食葵种植面积最大的内蒙古自治区<sup>[4-5]</sup>。目前对食葵多品种比较、机械化收获、病虫害防治等方面的研究居多<sup>[6]</sup>, 为提高食葵产量而提出新农艺和新栽培技术也有相关报道<sup>[7]</sup>, 但在食葵耗水规律和产量构成方面报道较少。新疆地处亚欧大陆腹地, 具有水资源少且分配不均、降雨量低而年蒸发量高特点, 且农业水资源利用效率低, 严重阻碍新疆农业经济和农业生态发展<sup>[8-9]</sup>。北疆食葵种植农艺措施更新相对较慢, 在农业种植生产中节水效果有待改善<sup>[10]</sup>, 故研究食葵耗水规律和灌溉制度, 对北疆推进节水灌溉农业具有重要意义。我们在大田试验的基础上, 通过设定 5 种不同灌水定额, 分析不同灌水定额下食葵耗水规律和作物系数变化规律及其对产量和产量构成的影响, 讨论食葵耗水规律和生长指标与产量构成的关系, 并结合投影寻踪聚类模型, 确定适合当地食葵种植的灌溉制度, 以期为阿勒泰地区食葵节水灌溉的发展提供理

论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2017 年 5—8 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 m。试验区土质为砾石沙土, 0~30 cm 土层含有少量砾石, 30~60 cm 土层多为大砾石土。经测定试验地 0~60 cm 土层土壤容重为  $1.81 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 田间持水量为 21.2%, 土壤养分全氮 0.027%, 速效氮  $19.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $9.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $92.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2017 年食葵生育期内气温  $\geq 15^{\circ}\text{C}$  的活动积温为  $2\ 502^{\circ}\text{C}$ 。水源来自哈拉霍英干渠, 水质 pH 值为 8.10, 试验期间气象数据见表 1。

### 1.2 试验设计

食葵品种为 JN361, 生育期为 115~118 d 左右, 属于中晚熟品种。选用内镶贴片式滴灌带灌溉, 毛管直径 16 mm, 壁厚 0.2 mm, 滴头间距 300 mm, 滴头流量  $2.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

经在阿勒泰实地调研, 以当地食葵灌溉制度为试验设计依据。食葵试验设 5 个不同灌水定额, 分别为 300 (W1)、375 (W2)、450 (W3)、525 (W4)、 $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  (W5), 食葵灌溉方案如表 2 所示, 每个处理 3 个重复。每个小区  $0.021 \text{ hm}^2$ , 共  $0.32 \text{ hm}^2$ 。小区布置以 W1 至 W5 灌水定额的大小顺序方式排列。采用 1 膜 1 管 2 行、40 cm+80 cm 宽窄行种植方式, 灌溉周期为 7 d。

表 1 2017 年试验站基本气象资料

Table 1 Basic meteorological data of the test station in 2017

时段 Time	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$ Maximum air temperature	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$ Average air temperature	最高风速 Maximum wind speed $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	平均风速 Average wind speed $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	总降雨量 Precipitation $/\text{mm}$	有效降雨 Effective rainfall $/\text{mm}$
5月 May						
下旬 Late	33.42	20.30	13.09	3.34	24.0	23.6
6月						
上旬 Early	32.36	21.63	11.08	2.74	16.8	14.1
中旬 Mid	37.18	25.68	14.09	1.78	2.6	0.0
下旬 Late	36.20	25.76	8.56	2.17	4.4	0.0
7月						
上旬 Early	37.32	25.12	9.06	1.80	3.4	0.0
中旬 Mid	33.29	24.58	6.54	1.41	0.0	0.0
下旬 Late	39.29	26.39	5.54	0.85	0.0	0.0
8月						
上旬 Early	33.39	23.25	6.54	1.32	10.8	0.0
中旬 Mid	35.48	20.93	8.05	1.02	11.8	6.2
下旬 Late	28.52	18.43	5.03	1.00	0.0	0.0
9月 Sept.						
上旬 Early	22.13	17.68	6.02	0.80	0.0	0.0

表 2 2017 年阿勒泰试验站食葵灌溉处理

Table 2 Sunflower irrigation treatments at Altay Experimental Station in 2017

灌溉处理 Treatment	灌水定额 Irrigation quotas/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )							灌溉定额 Irrigation quota /( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )
	07-03	07-11	07-18	07-24	07-30	08-07	08-15	
W1	300	300	300	300	300	300	300	2100
W2	375	375	375	375	375	375	375	2625
W3	450	450	450	450	450	450	450	3150
W4	525	525	525	525	525	525	525	3675
W5	600	600	600	600	600	600	600	4200
灌水周期 Irrigation cycle/d		8	7	6	6	7	7	

5月18日播种,5月21日灌苗水,底肥施磷酸二铵  $195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,钾肥  $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。6月7日中耕,6月10日间苗。在苗期食葵出现萎蔫现象,在成熟期为保证产量,分别在6月13日和8月22日各补水一次,各处理补水量为相应灌水定额的30%。其他农艺措施与当地一致。

### 1.3 指标测定

利用 TRIME—HD2(德国)仪器获得土壤含水率数据。参照康洁<sup>[11]</sup>测量方法,每个处理设2个 Trime 探测管,间隔 20 cm。在垂直方向上,每隔 10 cm 设 1 个测点,共 6 个测点。灌水前后、雨后加测。Trime 管布置如图 1 所示。

采用水量平衡原理<sup>[12]</sup>计算作物全生育期耗水量  $ET$ :

$$ET = W_T + P_0 + K + M - (W_i - W_0) \quad (1)$$

式中,  $W_T$  为计划湿润层增加的储水量(mm);当次降雨量大于 5 mm,记为有效降雨量  $P_0$ ;土壤计划湿润层为 600 mm;经水位取样检测结果表明,该地区地下水埋深为 6 m,因此不计地下水补给( $K=0$ ); $M$  为时段灌水量(mm); $W_i$ 和 $W_0$ 分别为时段末与时段初土壤计划湿润层储水量(mm)。

利用 Penman-Monteith 公式计算参考作物腾发量  $ET_0$ ;作物系数( $K_c$ )用各个生育期实际耗水量与参考作物腾发量比值表示;采用同倍比放大法<sup>[13]</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,每小区重复 3 次;利用产量与耗水量计算作物

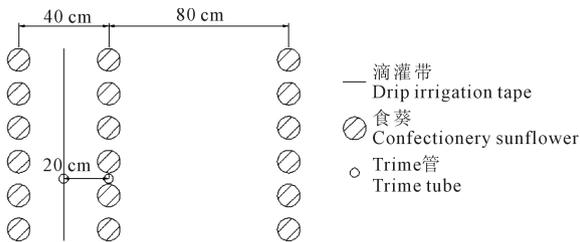


图 1 2017 年食葵试验田 Trime 探测管布置图

Fig.1 Trime tube layout of the sunflower field in 2017

水分利用效率(WUE)。数据处理软件 Excel 2016(微软公司)和 SPSS 22.0(美国 IBM 公司)。

### 1.4 研究方法

投影寻踪聚类(PCC)由 Friedman 等<sup>[14]</sup>提出,该模型能处理高维且非线性数据,能有效解决方案优劣评价和等级划分等问题,计算步骤如下:

(1) 数据预处理。设指标评价体系为  $\{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}$ ,  $x_{ij}$  为  $W_i$  灌水定额下第  $j$  个指标。将指标数据归一化,正向指标  $X_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 。异向指标  $X_{ij} = (1/x_{ij}) / \sum_{i=1}^n 1/x_{ij}$ ,其中  $i = 1, 2, 3, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, m$ 。

(2) 数据聚类分析。设投影方向向量为  $a_j$ ,则  $W_i$  灌溉制度方案的一维投影特征值为:

$$A_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, m$$

由特征值  $A_i$  构成评价矩阵  $A, A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ 。利用投影极限值  $A_i$  的标准差  $s(a)$  和类内密度  $d(a)$  寻找最优投影方向<sup>[15-16]</sup>。

$$r_{ik} = |A_i - A_k| \quad (2)$$

$$f = u(R - r_{ik}) \quad (3)$$

$$s(a) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

$$d(a) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (R - r_{ik}) f \quad (5)$$

式中,  $s(a)$  为最大投影值  $A_i$  的标准差;  $d(a)$  为类内密度,  $r_{ik}$  为两种灌水方案投影值的距离,  $f$  为单位阶跃函数,当  $R > r_{ik}, f = 1$ ,反之  $f = 0$ 。  $R$  为密度窗宽半径<sup>[17]</sup>,取值选用  $\max(r_{ik})/5 \leq R \leq \max(r_{ik})/3$ 。

$$Q(a) = s(a) d(a) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \max Q(a) \\ \text{s.t. } \|a\| = \sum_{i=1}^n a_i^2 = 1 \quad -1 \leq a_i \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

利用最大投影值  $A_i$  标准差和类内密度求得投影指标函数值  $Q(a)$ ,最终取最大投影指标函数值。计算软件 MATLAB 8.0(美国 MathWorks 公司)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水定额对食葵旬耗水量的影响

不同灌水定额对食葵旬耗水量变化规律影响不同(图2),随着时间延后,食葵耗水量表现为先增大后减小的变化规律。6月上旬至7月上旬(出苗期~现蕾期),食葵旬耗水量快速增大。7月上旬,W1、W2、W3、W4和W5旬耗水量分别增长至原来的7.2倍、3.5倍、2.7倍、3.8倍、5.4倍,其中W5旬耗水量最大,各处理旬耗水量幅值为21mm;7月上旬至下旬(现蕾期~初花期),各处理旬耗水量缓慢增大,并在7月下旬达到第一峰值。其中W3旬耗水量最大,增长率90%,W3旬耗水量比W1大21%;8月上旬(盛花期),各处理旬耗水量均减小,且处于谷值,其中W5旬耗水量最大,各处理间旬耗水量幅值为9.7mm;8月上旬至中旬,W3、W4和W5旬耗水量均增大,分别增大46%、62%和22%,W1和W2旬耗水量基本不变。8月中旬(成熟初期),各处理旬耗水量达到第二峰值,W4旬耗水量

最大,W1和W2最小,各处理旬耗水量幅值为20mm;8月中下旬(成熟中期)各处理开始减小,其中W5旬耗水量最大,W1最小。以上分析表明,食葵旬耗水量随着灌水定额增大而增大,当灌水定额继续增大,食葵旬耗水量增长趋势减缓;低灌水定额( $300\sim 375\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ )下食葵耗水量呈现出减少趋势现象;从幅值分析可得,现蕾期和成熟初期各处理旬耗水量差异最大,与其他生育阶段相比,在现蕾期和成熟初期高灌水定额( $525\sim 600\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ )对食葵旬耗水量影响更大。

### 2.2 食葵全生育期 $ET_0$ 变化规律

在2017年5月18日至9月5日,利用HOBO小型气象站,对气温、湿度和风速(2m处)等农业气象指标进行观测及数据采集,通过Penman公式计算出该时段参考作物腾发量 $ET_0$ ,降雨量及 $ET_0$ 见图3,各生育阶段参考作物腾发量及降雨量值见表3。从图3可得,随着时间推移试验站参考作物腾发量逐渐减小,当出现降雨时,日参考作物腾发量均减小,食葵生育末期(生育期最后10d)参考作物腾发量

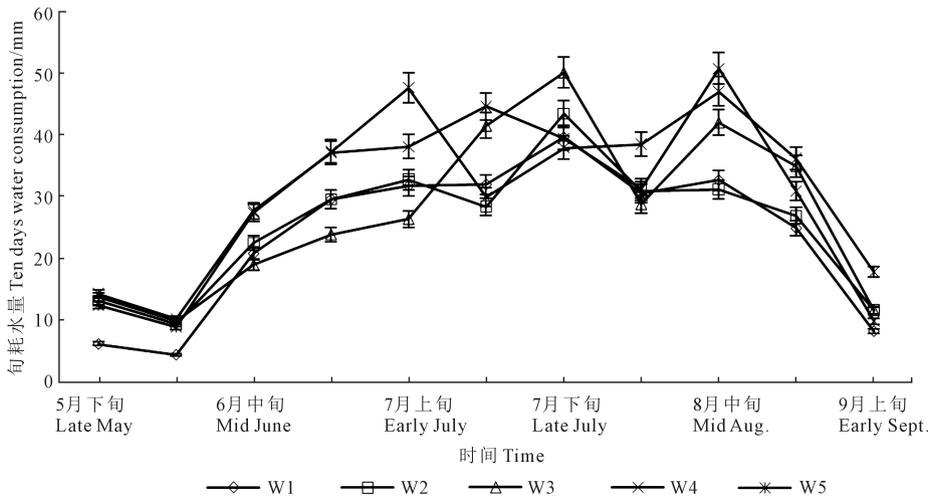


图2 不同灌水定额对食葵旬耗水量的影响

Fig.2 Effect of different irrigation quotas on water consumption in the sunflower

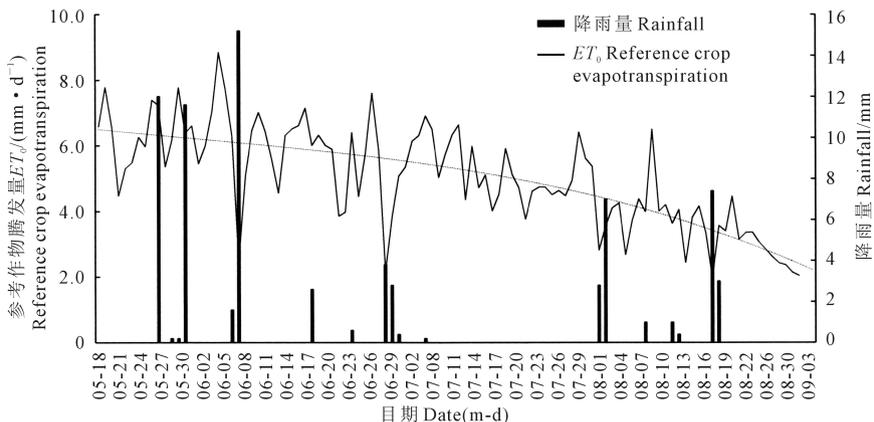


图3 2017年观测时段内的降雨量及 $ET_0$ 值

Fig.3 Rainfall and  $ET_0$  values during the 2017 observation period

表 3 食葵各生育阶段降雨量与参考作物腾发量累积值

Table 3 Cumulative value of rainfall and reference crop evapotranspiration at each growth stage of sunflower

生育阶段 Fertility stage	出苗期 Seedling stage	苗期 Seedling stage	现蕾期 Flower buds stage	花期 Flowering	成熟期 Maturity	总计 Total
日期 Date (m-d)	05-18~05-26	05-27~07-02	07-03~07-19	07-20~08-09	08-10~09-04	110
降雨量 Precipitation/mm	0.00	51.00	0.20	10.80	11.80	73.80
参考作物腾发量/mm Reference crop evapotranspiration	55.83	218.45	94.77	94.67	83.57	547.29

仅占生育初期的 44.6%。结合食葵旬耗水量和图 3 可以看出,出苗期至苗期,食葵旬耗水量逐渐增大且参考作物腾发量处于较高水平,这可能是引起食葵萎蔫的原因之一。

### 2.3 不同灌水定额对食葵耗水强度、耗水模数和作物系数的影响

不同灌水定额对食葵各生育阶段耗水强度影响不同(表 4),不同灌水定额下食葵耗水强度表现为“单峰”变化规律。苗期至现蕾期,各处理耗水强度快速增大,W1、W2、W3、W4 和 W5 耗水强度分别增长了 6.0 倍、2.6 倍、2.9 倍、3.4 倍和 3.7 倍。在现蕾期,W4 耗水强度最大,W2 最小,W4 耗水强度较 W2 增大 41%;现蕾期至花期,W1、W2 和 W3 耗水强度缓慢增加,增长量分别占现蕾期的 6%、19%和 9%。W4 和 W5 耗水强度逐渐减小,减少量分别占现蕾期的 21%和 11%。在花期,W3 耗水强度最大,W1 最小,W3 耗水强度较 W1 增大 13%;花期至成熟期,各处理耗水强度均减小,W1、W2、W3、W4 和 W5 耗水强度减小量分别占花期 35%、36%、22%、8%和 6%。在成熟期 W5 耗水强度最大,W1 最小,W5 耗水强度较 W1 增大 52%。其中,在现蕾期 W4 和 W5 耗水强度达到最大值,在花期 W1、W2 和 W3 达到最大值。综上所述,各处理内食葵耗水强度随着灌水定额增加而增大;各处理间现蕾期和成熟期高灌水定额对食葵耗水强度差异较大。

不同灌水定额对食葵各生育阶段耗水模数影响不同,食葵耗水模数表现为先增加再减小后增加态势。出苗期至苗期,各处理食葵耗水模数快速增大,W1、W2、W3、W4 和 W5 耗水模数分别增大了 22.61%、22.78%、17.76%、23.28%和 22.79%。在苗期,W4 耗水模数最大,W3 最小,W4 耗水模数较 W3 增大 26%;苗期至现蕾期,各处理耗水模数均略微减小,灌水定额由低到高其耗水模数分别减少 3.25%、7.60%、1.37%、4.64%和 5.40%。在现蕾期,W4 耗水模数最大,W2 最小,W4 耗水模数较 W2 增大 17%;现蕾期至成熟期,W3、W4 和 W5 耗水模数均缓慢增大,分别增大了 11.4%、7.54 和 11.07%。

在花期,W1 和 W2 耗水模数达到最大值,且随后减小。在成熟期,W5 耗水模数最大,W2 最小,W5 耗水模数较 W2 增大 18.8%。综上所述,较高灌水定额有利于食葵耗水模数增大,低灌水定额下食葵耗水量模数先呈现出减少趋势现象,与 2.1 节分析一致。

与不同灌水定额下食葵耗水模数变化规律类似,不同灌水定额下食葵作物系数整体呈“阶梯”状增大态势。苗期至现蕾期,各处理作物系数快速增大,W1、W2、W3、W4 和 W5 作物系数分别增大 2.0 倍、1.63 倍、2.2 倍、1.9 倍和 1.8 倍,W4 作物系数最大,W2 最小,当灌水定额从 30 mm 增加至 52.5 mm,作物系数增大 41%;现蕾期至花期,W1、W2 和 W3 作物系数缓慢增加,分别增加 29%、49%和 36%,W4 和 W5 作物系数基本不变。在花期,当灌水定额从 30 mm 增加至 60 mm,作物系数增大 12%;花期至成熟期,W1 和 W2 作物系数基本不变,W3、W4 和 W5 作物系数均增大,分别增大 32%、56%和 59%。在成熟期,当灌水定额从 30 mm 增加至 60 mm,作物系数增大 52%。在成熟期各处理作物系数达到最大值。综上所述,食葵作物系数在成熟期达到最大值;作物系数随着灌水定额的增大而增大,当灌水定额继续增大,灌水定额对作物系数的增大效应减弱;与其他生育阶段相比,不同灌水定额对现蕾期和成熟期食葵作物系数影响最大。

### 2.4 不同灌水定额对食葵产量构成、产量和水分利用效率的影响

不同灌水定额影响食葵产量及其构成(表 5)。在 5 个处理中,W5 盘径和百粒质量均最大,W4 次之,W1 最小。W5 盘径和百粒质量分别较 W1 大 25%和 33%,且较 W1 盘径和百粒质量差异显著。不同灌水定额下食葵出仁率呈抛物线变化,W2 出仁率最高,W1 和 W5 出仁率最低,且 W2 出仁率较 W1 和 W5 差异显著。水分利用效率(WUE)与出仁率变化规律类似,其中 W3 水分利用效率最大,W2 和 W4 次之,W1 最小,W3 水分利用效率较 W2 和 W4 无显著差异,较 W1 差异显著。与 W1 相比,W3 水

表4 不同灌水定额对食葵耗水指标的影响  
Table 4 Effect of different irrigation quotas on water consumption index of sunflower

生育阶段 Fertility stage	灌溉处理 Irrigation treatment	耗水量/mm Water consumption	耗水模数/% Water consumption modulus	耗水强度/(mm·d <sup>-1</sup> ) Water consumption intensity	作物系数 K <sub>c</sub> Crop coefficient
出苗期 Seedling stage	W1	3.929	1.51	0.56	0.070
	W2	8.412	3.01	1.20	0.151
	W3	8.827	2.93	1.26	0.158
	W4	9.138	2.72	1.31	0.164
	W5	7.996	2.35	1.14	0.143
出苗 Seedling stage	W1	62.779	24.12	1.70	0.287
	W2	71.984	25.79	1.95	0.330
	W3	62.262	20.69	1.68	0.285
	W4	87.404	26.00	2.36	0.400
	W5	85.488	25.14	2.31	0.391
现蕾期 Flower buds stage	W1	54.312	20.87	3.39	0.573
	W2	50.762	18.19	3.17	0.536
	W3	58.146	19.32	3.63	0.614
	W4	71.806	21.36	4.49	0.758
	W5	67.133	19.74	4.20	0.708
花期 Flowering	W1	70.260	27.00	3.51	0.742
	W2	75.510	27.06	3.78	0.798
	W3	79.271	26.34	3.96	0.837
	W4	70.699	21.03	3.53	0.747
	W5	74.699	21.96	3.73	0.789
成熟期 Maturity	W1	68.978	26.50	2.30	0.825
	W2	72.402	25.94	2.41	0.866
	W3	92.439	30.72	3.08	1.106
	W4	97.173	28.90	3.24	1.163
	W5	104.782	30.81	3.49	1.254
全生育期 Whole growth period	W1	260.258	-	2.29	0.500
	W2	279.069	-	2.50	0.536
	W3	300.944	-	2.72	0.600
	W4	336.220	-	2.99	0.646
	W5	340.098	-	2.98	0.657

分利用效率增长 46%。在 5 个处理中, W4 单盘干籽粒质量和产量最大, W5 次之, W1 最小。与 W1 相比, W4 产量增长 77%, 且较 W1 差异显著。综上所述, 食葵盘径、单盘干籽粒质量、百粒质量、出仁率、产量和水分利用效率随着灌水定额的增加而增大, 适宜的灌水定额有利于产量和水分利用效率的增大, 当灌水定额持续增加单盘干籽粒质量、出仁率、产量和水分利用效率均降低。较低灌水定额有利于食葵出仁率增大。

在 5 个处理中, W3 水分利用效率最高, W4 第三, W5 第四, 三个处理间水分利用效率无显著差异。W4 产量最高, W5 第二, W3 次之, 且 W4 产量与 W3 差异显著, 与 W5 无显著差异。W3 和 W5 产量无显著差异。W4 盘径、单盘干籽粒质量和百粒质量均高于 W3。W5 各项产量构成指标与 W4 无显著差异, 但 W4 单盘干籽粒质量、出仁率、产量和水分利用效率均高于 W5。综上分析, 选用 W4 作为实际食葵灌溉方案更合适。从产量或水分利用效

率单方面分析, W3 和 W5 各有优势, 不易确定二者的相对优劣。

## 2.5 基于 PPC 模型对食葵产量、产量构成和耗水指标的综合评价

前文从各指标分析不同灌水定额对食葵产量和耗水规律的影响, 得出 W4 灌溉制度更适合当地食葵种植的结论, 但此结论直观性不足, 且未从全局角度出发综合说明 5 种灌溉制度的相对优劣。从生长指标、果实品质指标、增产指标、节水指标等方面评价 5 种灌溉制度具有必要性。

综合评价模型有欧式贴近度、模糊综合评价模型、理想解法<sup>[18-20]</sup>等, 该类模型能在不同指标基础上对目标进行综合评价, 并能给出唯一评价值。权重的确定是综合评价模型的重要环节, 运用不同的指标权重将产生多种评价结果, 权重的优劣确定评价结果导向<sup>[21]</sup>。赋权方法主要分为主观赋权(专家预测法、AHP 法等)和客观赋权(熵值法、变异系数等)<sup>[22]</sup>。本文选用投影寻踪聚类(PCC)寻找评价指

标最优投影方向向量,使用最优投影方向向量做综合评价能有效避开求权重带来的误差,提高评价结果准确度。

归一化处理食葵产量构成、产量和耗水指标,指标均为正向指标,归一化值见表 6。

局部最优解决定最优投影方向,姜和王<sup>[17,23]</sup>研究表明多智能体遗传算法(MAGA)在多次迭代下能得到局部最优解。本文在多智能体遗传算法的基础上利用投影寻踪聚类获得最优投影方向向量和评价结果。经 MAGA-PPC 模型计算,目标函数值  $Q(a) = 16.92$ ,最优投影方向向量  $a = (0.2395, 0.5490, 0.2499, 0.0498, 0.5520, 0.2724, 0.3048, 0.2854)$ 。最终评价矩阵  $A = (0.3873, 0.4910, 0.5430, 0.5667, 0.5593)$ 。

最优投影方向向量表明不同灌水定额下指标的相对重要程度,对于 5 种灌溉制度的评价,重要程度排序为:产量>干籽粒质量>水分利用效率>作物系数。这说明:基于 2017 年食葵试验数据,产量对评价灌溉制度的优劣最重要,产量重要程度优于水分利用效率。从最优投影方向还可以看出,为获得更优的食葵灌溉制度,提高食葵产量、干籽粒质量、水分利用效率和作物系数是关键。

评价结果显示,5 种灌溉制度评价价值由高到低顺序为  $W4 > W5 > W3 > W2 > W1$ ,其中对  $W4$  评价最高。这说明:与其他处理相比, $W4$  更有利于北疆地

区食葵节水增产,与 2.4 节分析结果一致。同时也表明  $W5$  优于  $W3$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 不同灌水定额对食葵产量指标和耗水指标的影响

不同灌水定额下作物耗水量不同,与低灌水定额相比,高灌水定额促进向日葵耗水量增大。田德龙<sup>[24]</sup>研究表明,在相同灌溉次数下 96 mm 灌水定额向日葵耗水量较 57.6 mm 灌水定额的高 23%。本文研究与此结论类似。成熟期是食葵生长发育的最后阶段,研究表明在成熟期向日葵耗水量和作物系数均降低<sup>[25-26]</sup>。表 4 表明,食葵耗水量、耗水模数和作物系数在成熟期仍处于最高水平,造成此现象的原因是:本文将食葵灌浆期、乳熟期和完熟期<sup>[27,24]</sup>归一为成熟期,使得成熟期时间跨度较花期长,成熟期耗水量、耗水模数和作物系数累积较大。由不同灌水定额对食葵旬耗水量影响(图 2)可以看出,在 8 月下旬后各处理旬耗水量均快速降低,由此推得该时段食葵耗水量、耗水模数和作物系数减小,与贾有余和朱丽研究一致<sup>[25-26]</sup>。范雅君<sup>[28]</sup>认为在花期至成熟初期向日葵耗水强度最大,高灌水定额耗水强度较低灌水定额大,且在花期不同灌水定额间耗水强度无明显差异,本研究与此结论一致。

表 5 不同灌水定额对产量和水分利用效率的影响

Table 5 Effect of different irrigation quotas on yield and water use efficiency

灌溉处理 Irrigation treatment	盘径/cm Diameter of the disk	单盘干籽粒质量/g Dry grain quality	百粒质量/g 100 capsules	出仁率/% Nut productivity	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Yield	水分利用效率 WUE /(kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
W1	19.7c	101.48d	21.10c	43.75bc	2707.49d	10.54b
W2	21.5b	151.28c	23.95b	48.99ab	4036.15c	14.48a
W3	23.5ab	169.86b	26.25a	47.75ab	4531.86b	15.44a
W4	24.3a	179.23a	27.20a	47.45a	4781.86a	14.37a
W5	24.7a	174.01ab	28.10a	43.25c	4642.59ab	13.68ab

注:同一列不同字母表示在 0.05 水平差异显著。

Notes: Different lowercase letters within a column represent a significant difference ( $P < 0.05$ ).

表 6 不同灌水定额下食葵评价指标标准化

Table 6 Standardization of evaluation indexes of sunflower under different irrigation quotas

灌溉处理 Irrigation treatment	盘径 Diameter of the disk	干籽粒质量 Dry grain quality	百粒质量 100 capsules	出仁率 Nut productivity	产量 Yield	耗水量 Water consumption	水分利用率效 WUE	作物系数 Crop coefficient
W1	0.173	0.131	0.167	0.189	0.131	0.173	0.154	0.170
W2	0.189	0.195	0.189	0.212	0.195	0.184	0.211	0.182
W3	0.207	0.219	0.207	0.207	0.219	0.199	0.225	0.204
W4	0.214	0.231	0.215	0.205	0.231	0.220	0.210	0.220
W5	0.217	0.224	0.222	0.187	0.224	0.225	0.200	0.223

本试验研究表明,与高灌水定额相比,低灌水定额食葵耗水量减少趋势比高灌水定额的耗水量减少趋势先出现。此结论与范雅君<sup>[28]</sup>不同。造成此现象的原因可能是:灌浆期和乳熟期是食葵耗水高峰期(本文灌浆期和乳熟期分别在8月中旬和8月下旬左右,详见图2)。由表5可得,30 mm 灌水定额下食葵盘径小、出仁率低,出现“盘小空壳多”现象,表明30 mm 灌水定额下食葵籽粒总数少、空壳籽粒占比大,需要灌浆的籽粒占比小,故造成低灌水定额下食葵耗水量先呈现出减少趋势的现象。

### 3.2 不同灌水定额下食葵耗水量与生长指标的关系

由不同灌水定额对食葵盘径的影响(图4)可得,7月中旬至下旬,各处理盘径快速增长,该阶段各处理耗水量处于第一峰值。8月上旬,盘径缓慢增长,W1、W2、W3和W4食葵耗水量均减小。分析表明食葵耗水规律与食葵生长指标密切相关,食葵盘径和耗水量存在正相关,W5食葵盘径最大,出仁率最低,产量较低,造成此现象的原因可能是:在8月,W1、W2、W3、W4和W5盘径分别增长6%、27%、24%、23%和45%,W5食葵盘径增长速度最快,且增量较大(图4),表明在籽粒灌浆和花盘生长共存阶段,W5以花盘增大为代表的营养生长占主导,导致W5食葵“长盘不长籽”;由于各处理食葵同地同时种植,故排除授粉不均造成W5出仁率低的可能。与其他处理相比,在盛花期W5食葵耗水量不减反增,可能是盘径增长占主导,使得营养生长耗水量增加造成。

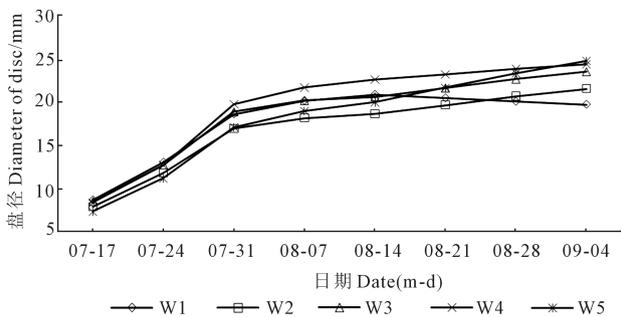


图4 不同灌水定额对食葵盘径的影响

Fig.4 Effect of different irrigation quotas on the diameter of the sunflower

### 3.3 评价指标的确定

综合评价结果综合性和真实性的高低取决于基础评价指标种类的丰欠程度<sup>[29]</sup>。为实现评价具有综合性的目标,将生长指标、果实品质指标、增产指标、节水指标、气象环境指标作为基础评价指标。

评价的目的是评定上述指标相对重要程度和确定5种灌溉制度节水增产效能的高低。不同灌水定额下食葵产量能直接体现当地食葵增长情况,故将产量作为增产指标。在研究灌溉制度节水效能方面,作物水分利用效率高程度能直接反映灌溉制度高效用水情况<sup>[30]</sup>。作物耗水量是节水灌溉研究中调整灌水定额的主要依据,且耗水量受作物特性、土壤条件和气象条件综合影响<sup>[31]</sup>。将作物水分利用效率和耗水量作为节水指标能够反映当地食葵种植的节水状况。花盘大小能在一定程度上反映食葵植株生长的优良状况,较大的花盘表明该食葵植株营养生长良好。为了直接体现不同灌水定额下食葵生长状况,故将食葵盘径作为评价生长指标。食葵果实和种子统称籽粒,食葵籽粒品质优则食葵果实和种子品质高<sup>[32]</sup>。将单盘干籽粒质量、百粒质量和出仁率作为综合评价指标,对不同灌水定额下食葵果实品质而言代表意义。作物系数是由作物耗水量和相应气象数据综合构成,对于同种作物,当作物耗水量一致,作物系数变化规律反映了不同种植区气象变化规律。故将作物系数作为评价气象环境指标,对当地食葵全生育期气象状况具有一定的代表性。

## 4 结论

(1)不同灌水定额下食葵耗水量、耗水强度、耗水模数和作物系数随着灌水定额增加而增大,当灌水定额继续增加到 $525 \sim 600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,耗水量、耗水强度、耗水模数和作物系数增大效应减弱。与其他生育阶段相比,在现蕾期和成熟初期, $525 \sim 600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水定额对食葵耗水量、耗水强度和作物系数影响更大。 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水定额促使食葵耗水量提前稳定并减小。食葵盘径、产量和水分利用效率随着灌水定额的增加而增大,适宜的灌水定额有利于产量和水分利用效率的增大,当灌水定额持续增加,产量和水分利用效率降低。

(2) $375 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水定额有利于食葵出仁率增大。 $525 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水定额产量和水分利用效率最大,选用 $525 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水定额对大田食葵具有较好的节水增产效果。通过基于多智能体遗传算法对不同灌水定额下食葵产量和耗水的投影寻踪聚类评价,得出, $525 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水定额综合评价价值最高, $525 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 灌水定额有利于北疆地区食葵节水增产,评价结果与大田分析一致。

## 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寄主选择的关系[J]. 植物保护学报, 2014, 41(3):298-304.
- [2] 马惠茹, 赵智香, 陈艳君. 内蒙古河套地区向日葵饲料资源生产情况及开发利用现状[J]. 中国畜牧兽医, 2014, 41(3):251-254.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 柳延涛, 段维, 刘胜利, 等. 北疆冷凉地区向日葵宽窄行栽培技术[J]. 种子科技, 2018, (1):36-37.
- [6] 周勤, 李智强, 李国萍, 等. 福海县良种场食葵列当防治技术研究[J]. 现代农业科技, 2017, (19):97-98.
- [7] 韩长杰, 刘宇, 朱兴亮, 等. 往复拨杆式食葵盘收获台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018,40(3):125-128.
- [8] 吴健柏. 新疆水利信息化建设措施及其应用研究[J]. 信息系统工程, 2018, (6):125-126.
- [9] 谢文宝, 陈彤, 刘国勇. 新疆农业水资源利用与经济增长脱钩关系及效应分解[J]. 节水灌溉, 2018, (4):69-72+77.
- [10] 汪宝军. 浅谈新疆农业水资源利用效率及农户灌溉经济效益[J]. 湖北农机化, 2017(5):45-46.
- [11] 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.
- [12] 陈凯丽, 赵经华, 黄红建, 等. 不同滴灌灌水定额对小麦的耗水特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3):65-68.
- [13] 艾鹏睿, 赵经华, 马英杰, 等. 不同灌水定额下北疆地区滴灌打瓜耗水规律的研究[J]. 节水灌溉, 2016, (11):39-43.
- [14] 赵小勇, 付强, 邢贞相, 等. 投影寻踪模型的改进及其在生态农业建设综合评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5):222-225.
- [15] Zhang Chi, Dong Sihui. A new water quality assessment model based on projection pursuit technique [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(9):S154-S157.
- [16] 梁跃强, 林辰, 宫伟东, 等. 投影寻踪聚类方法在煤与瓦斯突出危险性预测中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(1):46-50.
- [17] 楼文高, 乔龙. 投影寻踪分类建模理论的新探索与实证研究[J]. 数理统计与管理, 2015, 34(1):47-58.
- [18] 郭文献, 夏自强, 王鸿翔, 等. 基于模糊物元模型的水资源合理配置方案综合评价[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5):75-78.
- [19] 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.
- [20] 俞双恩, 汤树海. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7):128-136.
- [21] 余建星. 水资源优化配置方案综合评价的模糊熵模型[J]. 水利学报, 2009, 40(6):729-735.
- [22] 贾鹏, 张丽娜, 吴凤平. 基于格序理论的水资源配置方案综合评价[J]. 资源科学, 2013, 35(11):2232-2238.
- [23] 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, 29(3):105-110.
- [24] 田德龙, 郑和祥, 李熙婷. 微润灌溉对向日葵生长的影响研究[J]. 节水灌溉, 2016(9):94-97.
- [25] 贾有余, 妥德宝, 李振华, 等. 河套地区不同土壤类型食用向日葵耗水规律的研究[J]. 北方农业学报, 2011(4):40-41.
- [26] 朱丽, 史海滨, 王宁, 等. 小麦间作向日葵耗水量与优化灌溉制度研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(4):64-67+71.
- [27] 张作为, 史海滨, 李祯, 等. 不同生育时期非充分灌溉对间作物产量构成因子及收获指数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4):31-37.
- [28] 范雅君. 河套灌区玉米和向日葵膜下滴灌优化灌溉制度分析研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2014.
- [29] 李浩鑫, 邵东国, 尹希, 等. 基于主成分分析和 Copula 函数的灌溉用水效率评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11):96-102.
- [30] 张乐, 尹娟, 王怀博, 等. 不同灌水处理对玉米生长特性及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2):24-29.
- [31] 何俊仕, 边晓东, 付玉娟, 等. 西辽河平原主要作物耗水量及耗水规律研究[J]. 节水灌溉, 2012(11):1-4.
- [32] 白苇, 杨素梅, 尹海峰, 等. 冀西北地区施用氮磷钾肥对食葵产量和经济效益的影响[J]. 作物杂志, 2016(5):131-134.