文章编号:1000-7601(2025)06-0150-12 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.15

疏勒河流域食用向日葵适宜调亏灌溉模式研究

郑 健[1,2],高 奎[1,2],郭亚军[3]

(1.兰州理工大学土木与水利工程学院,甘肃 兰州 730050; 2.甘肃省太阳能与生物质互补多联供系统重点实验室,甘肃 兰州 730050; 3.甘肃省疏勒河流域水资源利用中心,甘肃 玉门 735211)

摘 要:为探求调亏灌溉技术在疏勒河流域特色经济作物中应用的适宜性,以食用向日葵为研究对象,开展水肥一体化调亏灌溉试验,在苗期和成熟期设置 3 个灌溉水平(充分灌溉:80%~85% θ_f;轻度水分亏缺:70%~75% θ_f;中度水分亏缺:55%~60% θ_f;θ_f 为田间持水量),分析食用向日葵生长和产量品质的变化,并采用主成分分析与隶属函数相结合的方法对食用向日葵进行综合评价。结果表明:各处理食用向日葵干物质积累量呈现出“S”型变化规律;随着水分亏缺程度的提高,食用向日葵地上干物质积累量的降幅越明显,适度水分亏缺能促进根系干物质的积累;全生育期内各阶段的水分亏缺均会降低叶面积指数;苗期轻度水分亏缺与充分灌溉和苗期中度水分亏缺相比,能提高产量、灌溉水利用效率和品质;成熟期轻度水分亏缺与全生育充分灌溉相比,产量下降 2.6 %,但灌溉水利用效率和粗蛋白含量分别提高 0.5%和 6.6%;苗期和成熟期轻度水分亏缺处理在产量、灌溉水利用效率和粗蛋白含量方面均优于成熟期中度水分亏缺处理。综合评价表明,苗期和成熟期采用轻度水分亏缺可作为疏勒河流域食用向日葵的适宜调亏灌溉模式。

关键词:食用向日葵;调亏灌溉;水肥一体化;综合评价;疏勒河流域

中图分类号:S565.5;S274.1 **文献标志码**:A

Research on suitable regulated deficit irrigation mode for edible sunflower in the Shule River Basin

ZHENG Jian[1,2], GAO Kui[1,2], GUO Yajun[3]

(1. *School of Civil and Hydraulic Engineering*, *Lanzhou University of Technology*, *Lanzhou*, *Gansu* 730050, *China*;
2. *Key Laboratory of Multi-supply System with Solar Energy and Biomass*, *Gansu Province*, *Lanzhou*, *Gansu* 730050, *China*;
3. *Shule River Basin Water Resources Utilization Center of Gansu Province*, *Yumen*, *Gansu* 735211, *China*)

Abstract: To investigate the suitability of regulated deficit irrigation (RDI) technology for characteristic economic crops in the Shule River Basin, an integrated water-fertilizer RDI experiment was conducted using edible sunflower (*Helianthus annuus* L.) as the subject of study. Three irrigation levels were established during both seedling and maturity stages: full irrigation (80%~85% θ_f), mild water deficit (70%~75% θ_f), and moderate water deficit (55%~60% θ_f), where θ_f denotes field capacity. The effects of different treatments on the growth, yield, and quality of edible sunflowers were systematically analyzed. A comprehensive evaluation was conducted using a combined approach of principal component analysis and membership function methods. The results showed that dry matter accumulation in edible sunflowers followed a characteristic “S-shaped” growth curve across all treatments. The reduction in aerial dry matter accumulation became more pronounced with increasing water deficit intensity, whereas moderate water deficit significantly enhanced root dry matter accumulation. Leaf area index was consistently reduced by water deficit at all growth stages. Compared to full irrigation (CK) and moderate water deficit during the seedling stage, mild water deficit at the seedling stage improved yield, irrigation water use efficiency, and quality parameters. Mild water deficit at the maturity stage resulted in a 2.6% yield reduction compared to CK but increased

收稿日期:2025-03-13 **修回日期**:2025-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52469011);2024 年水利科学试验研究及技术推广计划(甘水建管发[2024]78 号)(24GSLK052, 24GSLK053)

作者简介:郑健(1981-),男,甘肃会宁人,教授,主要从事农业水土工程研究。E-mail:zhj16822@126.com

irrigation water use efficiency and crude protein content by 0.5% and 6.6%, respectively. The treatment combining mild water deficit at both seedling and maturity stages outperformed moderate water deficit at the maturity stage in terms of yield, irrigation water use efficiency, and crude protein content. Comprehensive evaluation indicated that implementing mild water deficit during both seedling and maturity stages is recommended as the optimal regulated deficit irrigation strategy for edible sunflower cultivation in the Shule River Basin.

Keywords: edible sunflower; regulated deficit irrigation; integrated water-fertilizer management; comprehensive evaluation; Shule River Basin

疏勒河流域位于河西走廊西端,是甘肃省三大内陆河流域之一,属于大陆性荒漠气候,多年平均降水量 47~63 mm、年蒸发量 897~3 042 mm[1]。根据 2022 年《甘肃省水资源公报》,疏勒河流域用水需求较多年平均用水量增加 3.30%,而水资源总量下降 55.32%,水资源供需不平衡[2]。其中农业灌溉用水占比高达 85%以上,较高的农业灌溉用水量和较低的水资源利用效率加剧了流域水资源的供给压力[3-4]。发展节水农业、提高农业水资源利用效率是解决流域水资源困境最有效的方式之一。

调亏灌溉是指通过对土壤水分供应进行调节,进而对作物地上部生长产生影响,适度的调亏灌溉能够改变光合产物的初始分布,具有降低生长冗余、促进光合产物转运至生殖器官、提高作物经济效益、提高水肥利用率的作用[5]。向日葵因为植株高大、枝叶繁茂、根系发达可以防风固沙、改善土壤环境,兼具生态效益与经济效益,成为疏勒河流域特色的经济作物之一[6-7]。张婷婷等[8]在黏土条件下采用一膜一管两行种植模式,在年均降水量 350 mm 的区域中研究了向日葵的需水规律及水氮耦合效应,发现苗期~现蕾期是向日葵需水需肥的关键时期。季文涛[9]在壤土条件下采用一膜一管两行种植模式,在年均降水量 140~220 mm 的区域中研究了春汇与夏浇灌溉模式对向日葵水分利用效率的影响,发现春汇灌水量 120 mm 结合生育期膜下滴灌 90 mm 为最优灌溉组合。王璐等[10]在中壤土条件下采用一膜一管两行种植模式,在年均降水量 183~285 mm 的河西绿洲地区研究了膜下滴灌调亏对食用向日葵耗水特征、光合特性及品质的影响,发现苗期和成熟期的适宜水分调亏有助于提高食用向日葵籽粒中的粗脂肪和粗蛋白含量。然而也有研究表明,调亏灌溉技术受气候、土壤类型和种植模式的影响,研究结果存在较大差异[11]。疏勒河流域食用向日葵种植土壤主要为砂壤土,种植模式采用一膜两管四行,其种植区气候条件多处于极干旱环境,目前该流域有关食用向日葵调亏灌溉的研究还鲜见报道。

基于此,本研究以疏勒河流域食用向日葵为研究对象,探求种植土壤为砂壤土、一膜两管四行种植模式下,调亏灌溉对疏勒河流域食用向日葵生长和产量品质的影响,并采用主成分分析(PCA)和隶属函数(MF)相结合的方法,建立食用向日葵生长发育、产量和品质的综合评价指标体系,筛选出适宜的调亏灌溉方案,旨为疏勒河流域食用向日葵水肥一体化滴灌溉制度优化和农业水资源高效管理利用提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

本研究试验田位于疏勒河流域昌马灌区南干所(96°59′E,40°15′N),如图 1 所示(见 157 页)。试验区为大陆性荒漠气候,年均温度 10.26℃,日照时数 2 248 h,年均降水量 63 mm,蒸发量 2 103 mm,无霜期 221 d,全年以西风和西北风为主,最大风速 17 m·s^{-1}[12],试验地土壤类型为砂壤土,土壤理化性质列于表 1。

表 1　土壤理化性质

Table 1　Soil physicochemical properties

土层深度 Soil depth /cm	土壤机械组成/% Soil mechanical composition		土壤容重 Soil bulk density /(g·cm^{-3})	田间持水量 Field capacity /(cm^3·cm^{-3})	pH	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	全氮 Total nitrogen /(g·kg^{-1})
	0.002~0.05 mm	0.05~2 mm					
0~20	45.3	54.7	1.36	27.9	8.13	12.37	0.68
20~40	43.4	56.6	1.49	30.7	8.05	11.30	0.62
40~60	47.3	52.7	1.58	37.8	8.19	9.82	0.54

1.2 试验材料与种植方式

试验品种为食用向日葵‘三瑞9号’,采用水肥一体化膜下滴灌,一膜两管四行种植模式,种植行距为40 cm×30 cm,滴灌带间距为20 cm、流量2.0 L·h^{-1}。种植时在试验小区四周设置埋深为60 cm的防渗膜,防止传统灌溉模式灌溉水的横向入渗。试验开始各处理与传统种植管理模式一致,施入足量复合肥(硫酸钾、谷乐丰,云峰一铵)300 kg·hm^{-2}作为基肥,并在食用向日葵现蕾期施入尿素120 kg·hm^{-2}(含氮量46%)、磷酸一铵60 kg·hm^{-2}和硝酸钾30 kg·hm^{-2},开花期施入尿素135 kg·hm^{-2}、硝酸钾75 kg·hm^{-2}、水溶肥料120 kg·hm^{-2}。

1.3 试验设计

本试验于2024年5月2日—8月23日进行,共计113 d,采用双因素随机区组试验设计,将食用向日葵的生长过程划分为四个生育阶段:苗期(5月2日—6月16日)、现蕾期(6月17日—7月5日)、开花期(7月6日—7月20日)、成熟期(7月21日—8月23日)。各生育期对应的计划湿润层深度分别为40、60、60、60 cm。考虑食用向日葵开花期、现蕾期为灌溉关键期,且过度缺水会导致食用向日葵产量大幅降低[13],在苗期和成熟期设置充分灌溉(80%~85%)θ_f、轻度水分亏缺(70%~75%)θ_f和中度水分亏缺(55%~60%)θ_f三个水分亏缺水平,现蕾期和开花期不做水分亏缺处理。故本试验包含了8个调亏灌溉处理(T1~T8)并以全生育充分灌溉作为对照(CK),共计9个处理,每个处理3个重复,共计27个试验小区,每个试验小区的面积为9 m^2(5 m×1.8 m),具体试验方案见表2。

表2 试验设计方案

Table 2 Experimental design

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	现蕾期 Budding stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturation stage
CK	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f
T1	55%~60% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	55%~60% θ_f
T2	55%~60% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	70%~75% θ_f
T3	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	55%~60% θ_f
T4	55%~60% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f
T5	70%~75% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	70%~75% θ_f
T6	70%~75% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f
T7	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	70%~75% θ_f
T8	70%~75% θ_f	80%~85% θ_f	80%~85% θ_f	55%~60% θ_f

注:表中所示为土壤含水率设计上、下限(土壤含水率占田间持水率的百分数)。

Note: The table shows the design upper and lower limits of soil moisture content (soil moisture content as a percentage of field capacity).

1.4 测定指标及方法

1.4.1 土壤含水率和食用向日葵生长指标测定 土壤含水率:通过多层土壤动态监测系统对不同水分条件下的0~60 cm土层土壤含水率和温度进行连续观测,采用烘干法校核土壤动态监测系统,灌水量可通过水表(精度0.001 m^3)确定。

植株株高、茎粗及盘径[14]:食用向日葵进入苗期后,从各处理中选取具有代表性的食用向日葵3株,每7 d采用钢卷尺测定株高(精度1 mm)、采用游标卡尺测定茎粗(精度0.01 mm),植株进入开花期后,每2 d采用钢卷尺测定盘径(精度1 mm)。

叶面积:在食用向日葵每个生育期末进行破坏性取样,采集完整叶片,将叶片整齐平铺于A3纸上并用透明玻璃覆盖,采用数码相机拍摄,然后将照片导入AutoCAD 2024软件中计算食用向日葵叶面积[15]。按照公式(1)计算叶面积指数(LAI):

$$LAI = \frac{a \times S}{A} \tag{1}$$

式中,LAI为食用向日葵叶面积指数;a为单位面积株数;S为单株叶面积(m^2);A为单位土地面积(m^2)。

干物质质量:在食用向日葵各个生育期末期,对其进行破坏取样,每个处理中随机挑选出3株食用向日葵作为样品[16],将取样的食用向日葵从茎基处剪下,然后分离植株地上各部分(茎、叶、盘),在0~40 cm土层中采集食用向日葵根部,清洗、擦干测量鲜重,最后将地上各部分和根系分别单独放于信封内,先在105℃烘箱中干燥30 min,再在75℃下烘干至恒重。

1.4.2 产量和品质 从每个处理中随机选出3株生长状况一致的食用向日葵进行脱粒处理,然后将籽粒摊开晾晒,待籽粒风干后测定单盘重量、籽粒产量、百粒重和空秕率等指标,根据单盘籽粒数及百粒重计算公顷产量。食用向日葵中籽粒的粗蛋白含量通过凯氏定氮法进行测定,粗脂肪含量采用索氏抽提法进行测定[17]。

1.4.3 水分利用效率和灌溉水利用效率 食用向日葵生长季耗水量[18](ET)计算如下:

$$ET = P + U + I + \Delta W - D - R \tag{2}$$

式中,P为食用向日葵生育期内的有效降水量(mm);U为地下水补给量(mm);I为食用向日葵生育期总灌水量(mm);R为地表径流量(mm);D为深层渗漏量(mm);ΔW为食用向日葵种植和收获时段0~60 cm土层土壤储水量的变化值(mm)。本试验中,土壤含水量始终低于田间持水量,地下水埋深大于20 m。故上式简化为:

$$ET = P + I + \Delta W \tag{3}$$

水分利用效率(*WUE*)和灌溉水利用效率(*IWUE*)[19]:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \tag{4}$$

$$IWUE = \frac{Y}{I} \tag{5}$$

式中,*WUE* 为食用向日葵生育期水分利用效率(kg·m^{-3});*IWUE* 为食用向日葵生育期灌溉水利用效率(kg·m^{-3});*Y* 为食用向日葵的产量(kg·hm^{-2});*ET* 为食用向日葵生育期耗水量(mm);*I* 为食用向日葵生育期灌水量(mm)。

1.4.4　综合评价　主成分分析法(PCA)可以将评估指标降维形成一套新的、彼此独立的综合性指标[20-21];隶属函数法(MF)是基于模糊数学原则对隶属度函数进行综合评价[22]。本研究将 PCA 与 MF 相结合构建食用向日葵生长发育、产量和品质的综合评价体系[23],确定试验中食用向日葵最优的调亏灌溉模式。建立评价体系的具体步骤如下:

(1)提取主成分并计算得分:

$$F_i = U_{1i}X_1 + U_{2i}X_2 + \cdots + U_{pi}X_p \tag{6}$$

式中,F_i 为第 i 个主成分得分;P 为评价指标的个数;X_p 为标准化的评价指标;U_{pi} 为得分系数。

(2)计算隶属函数值:

$$u(x_i) = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{7}$$

式中,$u(x_i)$ 为第 i 个指标的隶属函数值;x_i 为第 i 个指标的实际测量结果;$x_{\max}$ 为第 i 个指标的最大值;$x_{\min}$ 为第 i 个指标的最小值。

(3)确定权重:

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i} \tag{8}$$

式中,W_i 为权重;P_i 为第 i 个综合指标的贡献率。

(4)计算综合评价值(D):

$$D = \sum_{i=1}^{n} [u(x_i) \times W_i] \tag{9}$$

1.5　数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2024 进行处理和计算,采用 SPSS 26 进行主成分分析,利用 GraphPad Prism 10 软件进行绘图。

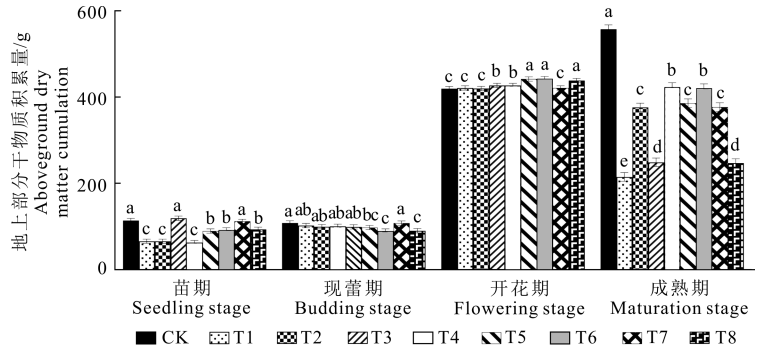
2　结果与分析

2.1　调亏灌溉对食用向日葵干物质量的影响

2.1.1　地上部分干物质　食用向日葵地上部包括茎、叶、盘,其干物质积累量在各生育阶段的变化如图 2 所示。整个生育期食用向日葵地上干物质累积速率呈现“S”型变化规律,苗期和现蕾期食用向日葵植株生长缓慢,干物质积累较慢,在开花期和成熟期食用向日葵逐渐由营养生长转化为生殖生长,干物质积累加快;在整个生育期内,食用向日葵地上干物质量均不断增加,成熟期达到最大值,地上干物质积累量呈先增加后减少趋势。

苗期采用轻度水分亏缺的处理(T5、T6、T8)与 CK 相比,地上部分干物质积累量分别减少 21.7%、19.3%、17.9%,而采用中度水分亏缺的处理(T1、T2、T4)与 CK 相比,地上部分干物质积累量分别减少 42.3%、42.3%、45.0%,说明苗期进行水分亏缺处理会对地上干物质积累量产生较大影响;现蕾期充分灌溉下,苗期采用轻度水分亏缺的处理(T5、T6、T8)地上干物质积累量与 CK 相比仍表现出显著性差异,分别减少 10.0%、17.2%、16.7%,而苗期采用中度水分亏缺的处理(T1、T2、T4)地上干物质积累量与 CK 相比,分别减少 5.5%、8.1%、8.2%,可以看出随着现蕾期的复水,在苗期进行中度水分亏缺比轻度水分亏缺处理的地上干物质积累量大;开花期充分灌溉下,苗期采用轻度水分亏缺的处理(T5、T6、T8)与 CK 相比,地上干物质积累量分别增加 5.3%、5.5%、4.4%,而苗期采用中度水分亏缺的处理(T1、T2、T4)与 CK 相比,地上部分干物质积累量分别增加 0.4%、0.1%、1.7%,表明在苗期经历水分亏缺的植株,在现蕾期和开花期经过复水后,其地上干物质积累能够实现完全的补偿性恢复;成熟期中所有水分亏缺处理与 CK 相比,地上干物质积累量均显著减少,在成熟期采用轻度水分亏缺的处理(T2、T5、T7)与 CK 相比,地上干物质积累量分别减少 32.6%、30.8%、32.4%,成熟期采用中度水分亏缺的处理(T1、T3、T8)与 CK 相比,地上干物质积累量分别减少 61.5%、55.4%、55.7%,在成熟期进行充分灌溉的处理(T4、T6)与 CK 相比,地上干物质积累量分别减少 24.1%、24.5%,表明成熟期水分亏缺对食用向日葵地上干物质积累量的影响最为显著,中度和轻度水分亏缺都会减少地上干物质积累量,T1 和 T3 处理的减少幅度(61.5%和 55.4%)明显高于其他处理,成熟期中度水分亏缺(T1、T3、T8)对干物质积累的影响普遍大于成熟期轻度水分亏缺(T2、T5、T7),说明成熟期水分亏缺的程度越重则对食用向日葵生长的抑制作用越强。

2.1.2　根系干物质　食用向日葵根系干物质积累量在各生育阶段的变化如图 3 所示。苗期采用轻度水分亏缺的处理(T5、T6、T8)与 CK 相比,根系干物



注:不同小写字母表示不同处理在 5%水平下差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters indicate the significant difference at the 5% level. The same below.

图 2 不同处理各生育期的地上干物质累积量

Fig.2 Aboveground dry matter accumulation across growth stages under different treatments

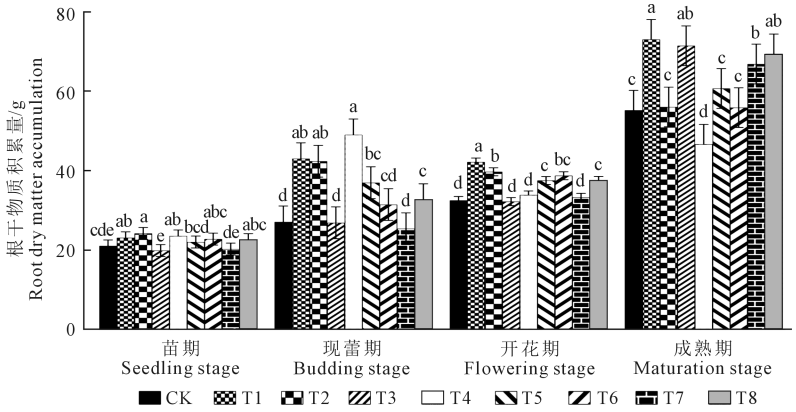


图 3 不同处理各生育期的根系干物质累积量

Fig.3 Root dry matter accumulation across growth stages under different treatments

质积累量分别增加 18.4%、20.9%、19.0%,而采用中度水分亏缺的处理(T1、T2、T4)与 CK 相比,根系干物质积累量分别增加 22.8%、22.0%、22.2%,表明苗期经历轻度和中度水分亏缺均能增加食用向日葵根系的干物质积累量;现蕾期充分灌溉下,苗期采用轻度水分亏缺的处理(T5、T6、T8)与 CK 相比,根系干物质积累量分别减少 10.4%、12.4%、10.0%,而苗期采用中度水分亏缺的处理(T1、T2、T4)与 CK 相比,根系干物质积累量分别减少 14.8%、15.4%、15.5%;开花期充分灌溉下,苗期采用轻度水分亏缺的处理(T5、T6、T8)与 CK 相比,根系干物质积累量分别减少 15.3%、11.6%、15.3%,而苗期采用中度水分亏缺的处理(T1、T2、T4)与 CK 相比,分别减少 47.1%、42.4%、45.0%,表明食用向日葵在苗期进行水分亏缺,即使在后续的现蕾期和开花期进行充分灌溉,其根系干物质积累量与 CK 相比依旧表现出显著的下降趋势;成熟期所有水分亏缺处理与 CK 相比,根系干物质积累量均有所提升,在成熟期采用轻度水分亏缺的处理(T2、T5、T7)与 CK 相比,根系干物质积累量分别增加 18.1%、19.3%、17.3%,采用中度水分亏缺的处理(T1、T3、T8)与 CK 相比,根系干物质积累量分别增加 38.6%、41.1%、38.5%,而成熟期进行充分灌溉的处理(T4 和 T6)与 CK 相比,根系干物质积累量分别减少和增加了 2.7%,表明适度水分亏缺可以促进食用向日葵根系的生长,提高根系干物质积累,增强作物对土壤水分的有效利用。

2.2 调亏灌溉对食用向日葵叶面积指数的影响

如图 4 所示,不同处理条件下食用向日葵在其生育期内叶面积指数均表现为上升趋势,但与 CK 相比,各处理的叶面积指数均有所下降。苗期采用轻度水分亏缺的处理(T5、T6、T8)与 CK 相比,叶面积指数分别减少 40.9%、42.4%、33.5%,而采用中度水分亏缺的处理(T1、T2、T4)与 CK 相比,叶面积指数分别减少 55.5%、62.4%、67.8%,表明苗期水分亏缺显著降低了食用向日葵的叶面积指数;现蕾期充分灌溉下,苗期采用轻度水分亏缺的处理(T5、T6、T8)与 CK 相比,叶面积指数分别减少 32.9%、31.1%、39.3%,而苗期采用中度水分亏缺的处理(T1、T2、T4)与 CK 相比,叶面积指数分别减少 49.0%、43.4%、48.3%;开花期充分灌溉下,苗期采用

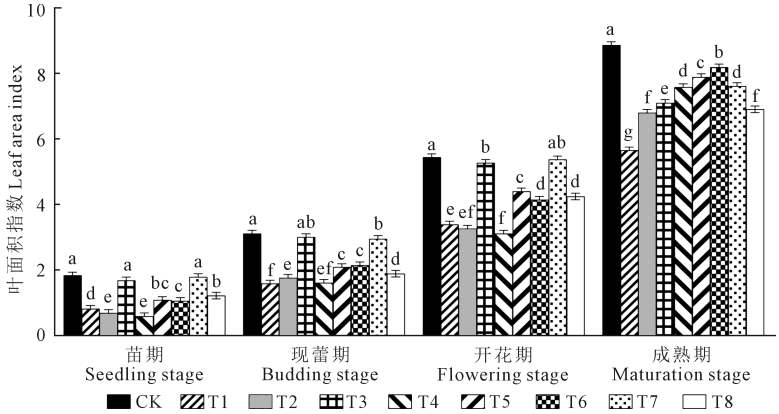


图 4　不同处理各生育期的叶面积指数

Fig.4　Leaf area index across growth stages under different treatments

轻度水分亏缺的处理(T5、T6、T8)与 CK 相比,叶面积指数分别减少 19.2%、23.9%、22.1%,而苗期采用中度水分亏缺的处理(T1、T2、T4)与 CK 相比,叶面积指数分别减少 37.7%、40.1%、42.8%,表明在苗期经历水分亏缺的植株,在现蕾期和开花期经过复水后,其叶面积指数不能实现完全的补偿性恢复;成熟期所有水分亏缺处理与 CK 相比,叶面积指数均显著降低,其中成熟期采用轻度水分亏缺的处理(T2、T5、T7)与 CK 相比,叶面积指数分别减少 23.3%、11.0%、14.1%,而成熟期采用中度水分亏缺的处理(T1、T3、T8)与 CK 相比,叶面积指数分别减少 36.2%、19.9%、22.1%,成熟期进行充分灌溉的处理(T4、T6)与 CK 相比,叶面积指数分别减少了 14.5%、7.6%,表明中度水分亏缺处理的叶面积指数减少幅度普遍高于轻度水分亏缺处理,水分亏缺程度越重,植物恢复生长的能力越弱,苗期经历水分亏缺植株的叶面积指数无法完全恢复到 CK 的水平,水分亏缺对植物生长具有持续性和不可逆性。

2.3　调亏灌溉对食用向日葵产量和灌溉水利用效率的影响

不同水分亏缺处理对食用向日葵产量和灌溉水利用效率(*IWUE*)的影响如图 5 所示。成熟期充分灌溉、苗期水分亏缺的 T6(轻度)和 T4(中度)处理与 CK 相比,T6 处理产量增加 0.4%、*IWUE* 增加 2.0%,T4 处理产量减少 12%、*IWUE* 减少9.2%,说明苗期轻度水分亏缺可能对作物产量有一定的促进作用且提高了灌溉水利用效率,而中度水分亏缺则对产量和 *IWUE* 有显著的负面影响;苗期充分灌溉、成熟期水分亏缺的 T7(轻度)和 T3(中度)处理与 CK 相比,T7 处理产量下降 2.6%、*IWUE* 增加 0.5%,T3 处理产量减少 7.1%、*IWUE* 减少 1.0%,表明成熟期水分亏缺程度的增加会导致产量更大幅度的降低,而成熟期轻度水分亏缺可以提高灌溉水利用效率,中度水分亏缺则降低灌溉水利用效率;苗期轻度水分亏缺、成熟期水分亏缺的 T5(轻度)和 T8(中度)处理与 T6 相比,T5 处理产量减少 1.03%、*IWUE* 增加 2.2%,T8 处理产量减少 16.57%、*IWUE* 减少 11.0%,表明在苗期轻度水分亏缺的情况下,成熟期中度水分亏缺对产量和 *IWUE* 的负面影响更大;苗期中度水分亏缺,成熟期水分亏缺的 T1(轻度)和 T2(中度)处理与 T4 处理相比,T1 处理产量减少 1.51%、*IWUE* 增加 3.1%;T2 处理产量减少 0.17%、*IWUE* 增加 5.2%,表明在苗期和成熟期均采用中度水分亏缺对作物产量和 *IWUE* 的降低更显著。

2.4　调亏灌溉对食用向日葵品质的影响

从图 6 可以看出,成熟期充分灌溉、苗期水分亏缺的 T6(轻度)和 T4(中度)处理与 CK 相比,T6 处理粗蛋白含量增加 10.0%、粗脂肪含量增加5.1%,T4 处理粗蛋白含量增加 6.5%、粗脂肪含量增加 1.5%,说明苗期轻度、中度水分亏缺都能增加粗蛋白含量和粗脂肪含量,但水分亏缺程度的增加会导致粗蛋白含量和粗脂肪含量下降;苗期充分灌溉、成熟期水分亏缺的 T7(轻度)和 T3(中度)处理与 CK 相比,T7 处理粗蛋白含量增加 6.6%、粗脂肪含量增加 3.8%,T3 处理粗蛋白含量减少8.0%、粗脂肪含量减少 4.5%,表明成熟期轻度水分亏缺可以提高粗蛋白含量和粗脂肪含量,而中度水分亏缺则降低粗蛋白含量、粗脂肪含量;苗期轻度水分亏缺、成熟期水分亏缺的 T5(轻度)和 T8(中度)处理与 T6 处理相比,T5 处理粗蛋白含量增加6.1%、粗脂肪含量增加 1.4%,T8 处理粗蛋白含量减少 21.2%、粗脂肪含量减少 14.3%,表明在苗期轻度水分亏缺的情况下,成

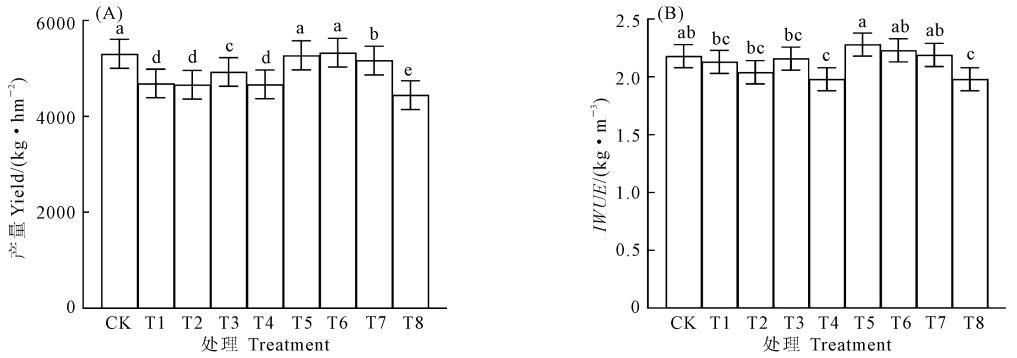


图 5 不同处理的产量和灌溉水利用效率

Fig.5 Yield and irrigation water use efficiency under different treatments

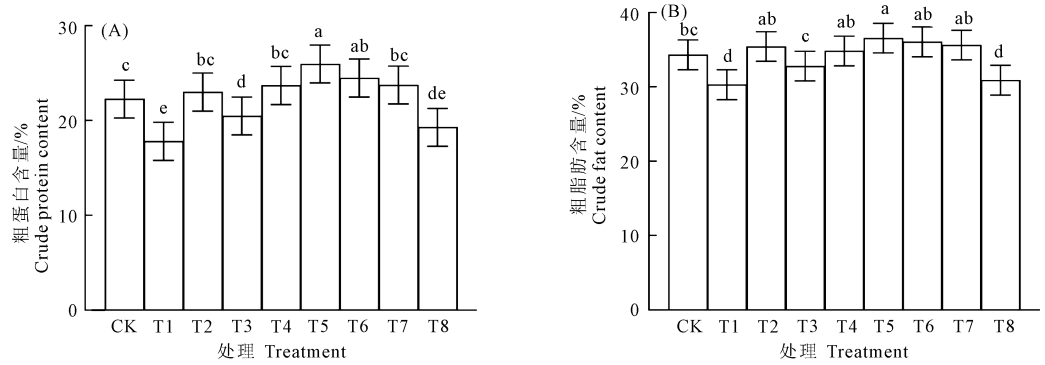


图 6 不同处理粗蛋白含量和粗脂肪含量变化

Fig.6 Changes in crude protein and crude fat content under different treatments

熟期中度水分亏缺对粗蛋白含量和粗脂肪含量的负面影响更大;苗期中度水分亏缺、成熟期水分亏缺的 T1(轻度)和 T2(中度)处理与 T4 处理相比,T1 处理粗蛋白含量减少 24.9%、粗脂肪含量减少 13.1%,T2 处理粗蛋白含量减少 3.0%、粗脂肪含量增加 1.7%,表明在食用向日葵苗期进行中度水分亏缺的情况下,在成熟期进行中度水分亏缺对粗蛋白含量和粗脂肪含量的负面影响更显著。适当的水分亏缺处理能够增加食用向日葵的粗蛋白含量和粗脂肪含量,在食用向日葵的苗期实施轻度和中度水分亏缺有助于增加其粗蛋白含量和粗脂肪含量,在成熟期进行轻度水分亏缺能够提升粗蛋白含量和粗脂肪含量,而中度水分亏缺则会降低粗蛋白和粗脂肪含量。

2.5 食用向日葵调亏灌溉策略的综合评价

2.5.1 综合评价指标相关性分析 本研究选取盘粒数、百粒重、空秕率、产量、叶面积指数、干物质量、*WUE*、*IWUE*、盘径、株高、茎粗、粗蛋白含量和粗脂肪含量 13 个变量作为评价指标,对不同水分亏缺处理进行综合评价。建立评价体系之前,对所有评价指标进行相关性分析(图 7)。结果表明,产量与盘粒数、株高、*WUE*、*IWUE*、株高呈极显著正相关关系($P<0.01$),产量与百粒重、叶面积指数、干物质量、盘径、茎粗、粗蛋白含量、粗脂肪含量呈显著正相关关系($P<0.05$);*WUE* 与盘粒数、百粒重、产量、*IWUE*、株高呈极显著正相关关系($P<0.01$),*WUE* 与叶面积指数、干物质量、盘径、粗蛋白含量、粗脂肪含量呈显著正相关关系($P<0.05$);株高与空秕率呈极显著负相关关系($P<0.01$)。可以看出大部分指标之间的相关性绝对值在 0.5 以上,表明不同指标间具有较高的关联度,所反映的信息也有交叉重叠[24]。基于此,通过主成分分析,将各指标之间的相关性转化为一套新的、彼此独立的综合性指标,为最佳调亏灌溉模式的评价提供数据支撑。

2.5.2 综合评价 调亏灌溉对食用向日葵的影响是多方面的,仅依赖单一指标或局部特性可能导致决策片面化,因此通过对食用向日葵生长生理指标、产量构成要素、水分利用效率和品质多维度指标而进行综合评价,可科学量化不同灌溉策略的优劣,为节水农业提供可靠依据。采用 PCA 对 13 项评价指标进行处理,依据特征值>1 的筛选标准[25],成功提取了三个主成分,这三个成分的累计方差贡献率达到了 90.205%,说明所选取的主成分具有较强的信息代表性。从表 3 可知,可知利用前三个主成分进行调亏灌溉多指标评价是可行的,可用 3 个新的综合指标 PC 来替代 13 个指标对食用向日葵进行分析,计算结果如表 4 所示。

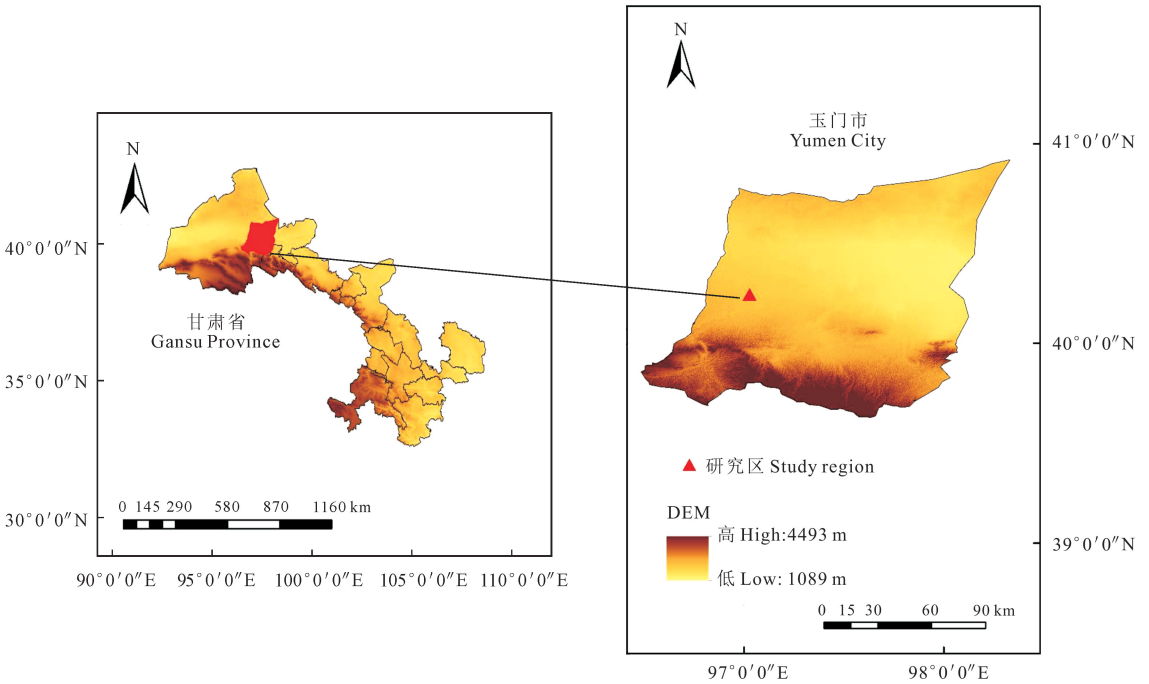
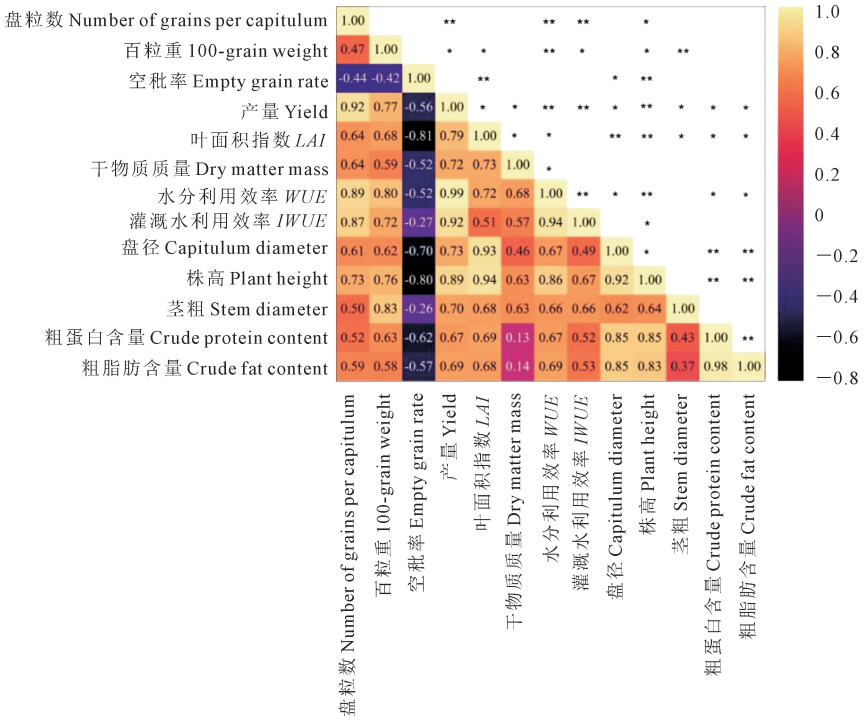


图 1　研究区位置图

Fig.1　Location map of the study area



注：＊和＊＊分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的显著性差异。

Note: Values marked with ＊ and ＊＊ represent significance at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

图 7　综合评价相关性分析

Fig.7　Correlation analysis in comprehensive evaluation

表3 特征值和方差贡献率

Table 3 Eigenvalue and variance contribution rate

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulated contribution rate
PC1	9.067	69.744	69.744
PC2	1.612	12.397	82.142
PC3	1.048	8.063	90.205

利用公式(6)计算出提取的主成分的得分值,将评分值视为相互独立的综合指标,通过公式(7)计算每个处理的隶属函数值 $u(x_i)$,利用公式(8)确定各综合指标的权重 W_i,PC1、PC2、PC3 权重分别为0.77、0.14、0.09。利用公式(9)确定每个亏缺灌溉处理的综合评分值 D,根据各自的 D 值对处理进行排序,D 值越高表示灌溉效果越好。从表5可以看出,在所有亏缺灌溉处理中,T5的排名最高,D 值为1.03;其次是T6,D 值为1.01;CK排名第三,D 值为0.97;而T1的排名最低,D 值为0.19。故T5处理可作为疏勒河食用向日葵推荐调亏灌溉策略。

表4 特征向量与载荷矩阵

Table 4 Eigenvector and factor loading matrix

指标 Indicator	PC1		PC2		PC3	
	特征向量 Eigenvector	荷载 Loading	特征向量 Eigenvector	荷载 Loading	特征向量 Eigenvector	荷载 Loading
盘粒数 Number of grains per capitulum	0.267	0.819	0.286	0.257	0.210	0.191
百粒重 100-grain weight	0.267	0.819	0.193	0.174	0.055	0.050
空秕率 Empty grain rate	−0.225	−0.689	0.426	0.383	0.523	0.476
产量 Yield	0.313	0.959	0.239	0.215	0.123	0.112
叶面积指数 *LAI*	0.295	0.904	−0.161	−0.145	−0.410	−0.373
干物质质量 Dry matter mass	0.222	0.682	0.559	0.503	−0.548	−0.498
水分利用效率 *WUE*	0.305	0.936	0.251	0.226	0.214	0.195
灌溉水利用效率 *IWUE*	0.263	0.806	0.470	0.423	0.416	0.378
盘径 Capitulum diameter	0.286	0.877	−0.398	−0.358	−0.121	−0.110
株高 Plant height	0.317	0.974	−0.208	−0.187	−0.110	−0.100
茎粗 Stem diameter	0.239	0.734	0.390	0.351	−0.088	−0.080
粗蛋白含量 Crude protein content	0.260	0.797	−0.587	−0.528	0.293	0.266
粗脂肪含量 Crude fat content	0.259	0.794	−0.560	−0.504	0.352	0.320

表5 不同水分亏缺处理的主成分得分、隶属函数值和综合得分

Table 5 Principal component scores, membership function values, and comprehensive evaluation scores under different water deficit treatments

处理 Treatment	PC1	PC2	PC3	$u(1)$	$u(2)$	$u(3)$	D	位次 Ranking
CK	3.250	1.049	−1.986	0.994	0.822	0.000	0.97	3
T1	−4.387	2.031	0.430	0.000	1.000	0.758	0.19	9
T2	−1.890	−2.275	1.046	0.325	0.218	0.952	0.40	7
T3	−0.876	1.486	0.508	0.457	0.901	0.783	0.58	5
T4	−1.080	−3.476	−0.931	0.430	0.000	0.331	0.41	6
T5	3.249	−0.285	1.200	0.994	0.579	1.000	1.03	1
T6	3.298	0.155	−0.029	1.000	0.659	0.614	1.01	2
T7	1.657	0.701	1.065	0.786	0.759	0.958	0.87	4
T8	−3.221	0.615	−1.304	0.152	0.743	0.214	0.24	8

3 讨 论

3.1 干物质积累量、叶面积指数、产量、*IWUE* 和品质的响应

调亏灌溉能够改善作物的生长状况、干物质积累分配和品质[26],并且在作物的不同生育阶段适当的干旱胁迫可显著提高作物水分利用率[27]。本研究表明,水分亏缺对食用向日葵的干物质积累量产生显著影响,苗期进行水分亏缺处理的植株在现蕾期复水后,中度水分亏缺处理的地上干物质积累量大于轻度水分亏缺处理,初步分析是苗期进行水分亏缺会激发食用向日葵的补偿性生长[28-29],使得食用向日葵在复水后通过提高光合效率和地上部分的养分配置来促进地上干物质的积累[30-31],而轻度水分亏缺可能对补偿生长的刺激不如中度水分亏缺[32],导致地上干物质积累量恢复不如中度水分亏缺处理。在成熟期,轻度和中度水分亏缺均会降低食用向日葵干物质积累量,可能是成熟期水分亏缺会降低植株光合速率并减少碳水化合物合成[33],从而导致干物质积累量显著减少。苗期不同程度的水分亏缺都能提高食用向日葵根系的干物质积累量,这可能是因为适度的水分亏缺能够促进其根系的生长和对水分的需求[34-35],从而增加根系干物质积累量。本研究发现,苗期水分亏缺显著降低了食用向日葵的叶面积指数,在经历水分亏缺的植株中,尽管在现蕾期和开花期经过复水,但其叶面积指数无法实现完全的补偿性恢复,中度水分亏缺处理比轻度水分亏缺处理的叶面积指数降幅更大,说明水分亏缺程度越重,植物恢复生长的能力越弱,这可能是因为水分亏缺导致叶片细胞膨压下降,进

而影响叶片的展开和扩张,长期的水分亏缺还会引起叶片细胞结构的损伤[36-37]。

本研究发现,苗期进行轻度水分亏缺能使食用向日葵的产量有所增加,水分利用效率显著高于 CK,这与 Karam 等[38]的研究结论相似,初步分析可能是水分亏缺刺激了食用向日葵营养生长向生殖生长的再分配和植物的抗干旱胁迫机制[39],从而产量有所增加。本研究表明,成熟期水分亏缺程度的增加会导致产量更大幅度的减少,在苗期轻度水分亏缺的情况下,成熟期中度水分亏缺对产量和 *IWUE* 的负面影响更大,这与 Kiani 等[40]的研究结论相一致,这可能是因为成熟期水分亏缺影响了籽粒的发育和灌浆,从而导致产量降低;成熟期轻度水分亏缺可以提高 *IWUE*,而中度水分亏缺则降低 *IWUE*,初步分析是因为轻度水分亏缺条件下,植物通过提高水分利用效率来适应水分胁迫,而中度水分亏缺超出了植物的适应范围,导致 *IWUE* 降低[41]。本研究发现,在食用向日葵的苗期和成熟期进行中度水分亏缺会导致食用向日葵的产量明显降低,这与王璐[42]在张掖地区的研究不同,其原因可能是研究区土壤质地不同且玉门地区植株生育期内降水较少,造成中度水分亏缺时其产量显著降低。适当的调亏灌溉措施能够提升作物品质,促进蛋白质的合成和脂肪的积累[43]。本研究发现,适当的水分亏缺处理能够增加食用向日葵的粗蛋白含量和粗脂肪含量,在苗期实施轻度至中度水分亏缺有助于提高其营养成分含量,而在成熟期,轻度水分亏缺能提升粗蛋白含量和粗脂肪含量,中度水分亏缺则会使其含量降低,这与董昕[44]的研究结果相同,这可能是因为适度的水分亏缺会引发植物对干旱胁迫的响应,将光合产物转运至贮存器官,减少养分的过量消耗,并优先累积氮素和油脂类物质,进而促进籽粒粗蛋白和粗脂肪的合成;成熟期过度缺水会加速叶片衰老并减少光合产物供给,进而影响蛋白质和脂肪等物质的合成,造成粗蛋白含量和粗脂肪含量的下降[45-46]。

3.2　综合评价

试验研究过程中,针对样本数量和评价指标较多的情况,采用主成分分析和隶属函数方法可以通过对样本和指标进行降维来进行综合评价[47]。主成分分析可以将大量的关联变量合并为少量的主成分,既可解释多数变化,又可简化数据结构,使其内部的模式与联系更容易辨识;其次,利用主成分分析法识别出影响数据变异性最大的变量,并将其赋权给各指标,使其成为一种客观的统计学手段,降低了人为因素的影响[48-49]。与此同时,隶属函数法通过给每一项评价指标赋予隶属度,把定性评价转变成定量评价,达到对不同指标进行全面评价的目的,同时提出一种量化的评价准则体系,以降低纯主观评估的不确定性[50]。因此,本研究在进行综合评判时,考虑到各指标间的尺度、重要程度等因素的影响,将主成分分析与隶属函数方法有机地结合起来,既能提高研究的科学性、客观性和系统性,又能保证评估结果的可信度,同时也能为复杂数据集的综合评估提供一种有效的分析手段。本研究通过综合评价法,得出 T5 处理为最佳灌溉处理模式、其次为 T6 处理、最差为 T1 处理。因此,T5 处理(苗期、成熟期轻度水分亏缺)可实现稳产、提质和节水,可作为适合疏勒河流域的食用向日葵水肥一体化调亏灌溉的最佳方案。

4　结　论

1)食用向日葵干物质积累量呈现出“S”型变化规律;苗期水分亏缺程度越高,地上部分干物质积累量的降低越明显;现蕾期和开花期中,轻度水分亏缺后的复水处理能够实现地上部分干物质积累的补偿性恢复;苗期轻度或中度水分亏缺均能提升食用向日葵根系干物质量;成熟期适度水分亏缺能促进根系干物质的积累;全生育期内各阶段的水分亏缺会降低叶面积指数。

2)苗期轻度水分亏缺能够提高食用向日葵产量,苗期中度水分亏缺与成熟期的轻度、中度水分亏缺均会导致产量下降,轻度水分亏缺能够增加灌溉水利用效率,而中度水分亏缺则使其降低;苗期轻度和中度水分亏缺均能促进粗蛋白含量和粗脂肪含量的上升,而成熟期轻度水分亏缺能够提升其含量,中度水分亏缺则会导致其含量下降。

3)综合评价表明,苗期和成熟期采用轻度水分亏缺的 T5 处理可作为疏勒河流域食用向日葵的调亏灌溉的推荐方案。

参 考 文 献:

[1] 刘建军. 疏勒河灌区农业用地表水资源刚性约束指标优化管理研究[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(11): 14-18, 23.
LIU J J. Optimization and management study of rigid constraints on surface water resources for agricultural land in Shule river irrigation area [J]. Water Resources Research and Development, 2023, 9(11): 14-18, 23.

[2] 周敏. 基于 SSP-RCP 情景的疏勒河流域水资源多目标协同优化配置研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
ZHOU M. Research on multi objective collaborative optimization configuration of water resources in Shule river basin based on SSP-RCP scenario [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024.

[3] 盛彩红. 疏勒河流域典型作物需水量及作物系数研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
SHENG C H. Research on typical crop water requirements and crop coefficient in Shule river basin[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

[4] 杨静, 周冬梅, 马静, 等. 疏勒河流域农业水土资源时空匹配特征分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 982-992.
YANG J, ZHOU D M, MA J, et al. Spatial and temporal matching characteristics of agricultural land and water resources in the Shule river basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 982-992.

[5] 郭相平, 康绍忠. 调亏灌溉-节水灌溉的新思路[J]. 西北水资源与水工程, 1998, 9(4): 22-26.
GUO X P, KANG S Z. Regulated deficit irrigation-a new thought of water-saving irrigation [J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 1998, 9(4): 22-26.

[6] 席晓飞, 王莹, 王学强, 等. 酒泉市向日葵产业发展存在的问题与对策[J]. 农业科技与信息, 2018, (21): 32-34.
XI X F, WANG Y, WANG X Q, et al. Problems and countermeasures in the development of sunflower industry in Jiuquan city[J]. Information of Agricultural Science and Technology, 2018, (21): 32-34.

[7] 李城德, 尤艳蓉, 周德录, 等. 食用向日葵新品种三瑞5号的特征特性及栽培技术[J]. 现代农业科技, 2021, (1): 35-36, 41.
LI C D, YOU Y R, ZHOU D L, et al. Characteristics and cultivation techniques of the new edible sunflower variety Sanrui[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021, (1): 35-36, 41.

[8] 张婷婷, 段玉, 张君, 等. 阴山北麓向日葵需水规律及水氮耦合效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 23-31.
ZHANG T T, DUAN Y, ZHANG J, et al. Study on water demand and coupling effect of water and nitrogen on sunflower in the north of Yinshan mountain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 23-31.

[9] 季文涛. 春汇与夏浇灌溉模式对盐渍化土壤水盐运移及向日葵水分利用效率的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
JI W T. The effects of spring and summer irrigation modes on water and salt transport in saline soil and water use efficiency of sunflowers[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[10] 王璐, 张恒嘉, 巴玉春, 等. 河西绿洲膜下滴灌调亏对食用向日葵耗水特征、光合特性及品质的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 209-216.
WANG L, ZHANG H J, BA Y C, et al. Effects of drip irrigation under film on water consumption characteristics, photosynthetic characteristics, and quality of edible sunflowers in Hexi oasis [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 209-216.

[11] 李百凤, 冯浩, 吴普特. 作物非充分灌溉适宜土壤水分下限指标研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(3): 227-231.
LI B F, FENG H, WU P T. Studies on optimum low limits of soil moisture index for deficit irrigation of crops[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(3): 227-231.

[12] 王明辉, 徐宝山, 任晓文. 干旱区夏玉米畦灌灌水技术参数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 113-116.
WANG M H, XU B S, REN X W. Border irrigation technical parameters for corn in arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 113-116.

[13] 云文丽, 李建军, 侯琼. 土壤水分对向日葵生长状况的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014,32 (2): 186-190.
YUN W L, LI J J, HOU Q. Effect of soil moisture on the growth of sunflower[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32 (2): 186-190.

[14] 陈谢田. 河西绿洲冷凉灌区膜下滴灌食用向日葵水分调控效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
CHEN X T. Study on the water control effect of drip irrigation under film for edible sunflowers in the cold cooling irrigation area of Hexi oasis [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.

[15] 齐兴赟. 番茄水/沼液一体化间接地下滴灌亏缺灌溉模式研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
QI X Y. Research on the deficit irrigation mode of tomato water/biogas slurry integrated indirect subsurface drip irrigation [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.

[16] 郑健, 蔡焕杰, 王燕, 等. 不同供水条件对温室小型西瓜苗期根区土壤水分、温度及生理指标的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 35-41, 47.
ZHENG J, CAI H J, WANG Y, et al. Effect of different water supply conditions on soil water content, soil temperature and physiological characteristics of mini-watermelon at the seedling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(3): 35-41, 47.

[17] 王秀荣, 廖红, 严小龙. 应用近红外光谱分析法测定大豆种子蛋白质和脂肪含量的研究[J]. 大豆科学, 2005, 24(3): 199-201.
WANG X R, LIAO H, YAN X L. Study on analyzing soybean protein and oil contents by neat-infrared spectroscopy[J]. Soybean Science, 2005, 24(3): 199-201.

[18] CHEN X T, ZHANG H J, YU S C, et al. Optimizing irrigation and nitrogen application strategies to improve sunflower yield and resource use efficiency in a cold and arid oasis region of Northwest China[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1429548.

[19] 周晨莉, 张恒嘉, 巴玉春, 等. 调亏灌溉对膜下滴灌菘蓝生长发育和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 193-200.
ZHOU C L, ZHANG H J, BA Y C, et al. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of *Isatis Indigotica* under mulched drip irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 193-200.

[20] GAO B Y, LU Y J, SHENG Y, et al. Differentiating organic and conventional sage by chromatographic and mass spectrometry flow injection fingerprints combined with principal component analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(12): 2957-2963.

[21] CHUN M H, KIM E K, LEE K R, et al. Quality control of *Schizonepeta tenuifolia* briq by solid-phase microextraction gas chromatography/mass spectrometry and principal component analysis[J]. Microchemical Journal, 2010, 95(1): 25-31.

[22] 杨文娜, 任嘉欣, 李忠意, 等. 主成分分析法和模糊综合评价法判断喀斯特土壤的肥力水平[J]. 西南农业学报, 2019, 32(6): 1307-1313.
YANG W N, REN J X, LI Z Y, et al. Soil fertility in karst regions with analysis of principal component and fuzzy synthetic evaluation [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32 (6): 1307-1313.

[23] CHEN X T, ZHANG H J, TENG A G, et al. Photosynthetic characteristics, yield and quality of sunflower response to deficit irrigation in a cold and arid environment [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1280347.

[24] 黄鑫浩, 许洪扬, 缪武, 等. 基于主成分分析和隶属函数法筛选低镉高产辣椒品种[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(5): 44-53.
HUANG X H, XU H Y, MIAO W, et al. Screening the pepper varieties with low cadmium accumulation and high-yield characteristics using principal component analysis and membership function method [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2024, 50(5): 44-53.

[25] 曹晓兰, 邓梦洁, 崔国贤. 高光谱结合主成分分析的苎麻品种识别

[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(6): 1905-1908.
CAO X L, DENG M J, CUI G X. Identifying ramie variety by combining the hyperspectral technology with the principal component analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(6): 1905-1908.

[26] GARCÍA-TEJERO I, JIMÉNEZ-BOCANEGRA J A, MARTÍNEZ G, et al. Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard [*Citrus sinensis* (L.) *Osbeck*, cv. salustiano][J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5): 614-622.

[27] REES W G, STAMMLER F M, DANKS F S, et al. Vulnerability of European reindeer husbandry to global change[J]. Climatic Change, 2008, 87(1/2): 199-217.

[28] TURNER N C, BEGG J E. Plant-water relations and adaptation to stress[J]. Plant and Soil, 1981, 58(1): 97-131.

[29] TURNER N C. Plant water relations and irrigation management[J]. Agricultural Water Management, 1990, 17(1/3): 59-73.

[30] BLUM A. Genomics for drought resistance-getting down to earth[J]. Functional Plant Biology: FPB, 2014, 41(11): 1191-1198.

[31] MARDEN M, LAMBIE S, ROWAN D. Root system attributes of 12 juvenile indigenous early colonising shrub and tree species with potential for mitigating erosion in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2018, 48(1): 1-19.

[32] JIANG Z Y, ZHOU Y L, GAO S, et al. Stronger effects of accumulated soil moisture deficit on gross primary productivity and light use efficiency than lagged soil moisture deficit for cropland and forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 361: 110317.

[33] 邢英英, 张富仓, 王秀康. 不同生育期水分亏缺灌溉和氮营养对玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 1-6, 11.
XING Y Y, ZHANG F C, WANG X K. Effects of water deficit irrigation at different growth stages and nitrogen nutrition on the growth of maize [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 1-6, 11.

[34] FAN J C, LU X J, GU S H, et al. Improving nutrient and water use efficiencies using water-drip irrigation and fertilization technology in Northeast China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106352.

[35] 陈鹏狮, 纪瑞鹏, 谢艳兵, 等. 东北春玉米不同发育期干旱胁迫对根系生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 156-163.
CHEN P S, JI R P, XIE Y B, et al. Effects of drought stresses during key growth periods on root growth of spring maize in Northeast China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 156-163.

[36] ELANSARY H O, SALEM M Z M. Morphological and physiological responses and drought resistance enhancement of ornamental shrubs by trinexapac-ethyl application[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 189: 1-11.

[37] JIA W S, ZHANG J H. Stomatal movements and long-distance signaling in plants[J]. Plant Signaling & Behavior, 2008, 3(10): 772-777.

[38] KARAM F, LAHOUD R, MASAAD R, et al. Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(3): 213-223.

[39] 王静, 康林玉, 刘周斌, 等. 干旱对植物影响的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2017, (7): 123-126, 130.
WANG J, KANG L Y, LIU Z B, et al. Research progress on the impact of drought on plant[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017, (7): 123-126, 130.

[40] KIANI M, GHEYSARI M, MOSTAFAZADEH-FARD B, et al. Effect of the interaction of water and nitrogen on sunflower under drip irrigation in an arid region[J]. Agricultural Water Management, 2016, 171: 162-172.

[41] ZHANG J X, WANG A A, XIA G M, et al. Continuous regulated deficit irrigation enhances peanut water use efficiency and drought resistance[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 106997.

[42] 王璐. 水分调亏对河西绿洲冷凉灌区食用向日葵光合特性、产量及品质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
WANG L. The impact of water deficit regulation on the photosynthetic characteristics, yield, and quality of edible sunflowers in the cold irrigation area of Hexi oasis [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.

[43] 夏桂敏, 罗秀兰, 聂修平, 等. 不同生育期水分亏缺耦合施氮量对花生光合特性和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 67-75.
XIA G M, LUO X L, NIE X P, et al. Effects of water deficit in different growth stages coupling with nitrogen application rates on photosynthetic traits and quality of peanuts[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(21): 67-75.

[44] 董昕. 水氮调控对膜下滴灌食用向日葵生长发育及土壤水氮分布的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
DONG X. The effect of water and nitrogen regulation on the growth and development of edible sunflowers and soil water and nitrogen distribution under subsurface drip irrigation[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022.

[45] SABER H S, MOHAMED I E. Nutrient utilization indices of NPK and drought management in groundnut under sandy soil conditions[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2019, 50(15): 1821-1828.

[46] 杨黎, 魏占民, 徐大为. 向日葵各器官干物质和吸氮量的积累与分配规律[J]. 节水灌溉, 2019, (2): 22-28.
YANG L, WEI Z M, XU D W. The accumulation and distribution of dry matter and nitrogen absorption in sunflower organs[J]. Water Saving Irrigation, 2019, (2): 22-28.

[47] 王鹏, 李芳弟, 郭天顺, 等. 基于主成分分析、相关性分析和隶属函数法对 22 个马铃薯品种的综合评价[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(7): 78-87.
WANG P, LI F D, GUO T S, et al. Comprehensive evaluation of 22 potato varieties based on principal component analysis, correlation analysis and membership function method[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(7): 78-87.

[48] DONG M, QIN L, XUE J, et al. Simultaneous quantification of free amino acids and 5′-nucleotides in shiitake mushrooms by stable isotope labeling-LC-MS/MS analysis[J]. Food Chemistry, 2018, 268: 57-65.

[49] SUN L P, LIU Q M, BAO C J, et al. Comparison of free total amino acid compositions and their functional classifications in 13 wild edible mushrooms[J]. Molecules, 2017, 22(3): 350.

[50] 韩艳红, 杨海棠, 胡延岭, 等. 基于隶属函数法对大粒高油花生品种品质的综合评价[J]. 花生学报, 2024, 53(3): 68-72.
HAN Y H, YANG H T, HU Y L, et al. Comprehensive evaluation of the quality of large-kernel and high-oil peanut varieties by membership function method[J]. Journal of Peanut Science, 2024, 53(3): 68-72.