

文章编号: 1672-3317(2024)06-0043-09

# 不同灌水定额对2种油莎豆生长、产量及水分利用效率的影响

殷姿<sup>1,2</sup>, 王兴鹏<sup>1,2,3,4,5</sup>, 张磊<sup>1,2</sup>, 赵丰年<sup>1,2</sup>, 李明发<sup>6</sup>, 王洪博<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1.塔里木大学水利与建筑工程学院, 新疆阿拉尔 843300; 2.塔里木大学自治区教育厅普通高等学校现代农业重点实验室, 新疆阿拉尔 843300; 3.中国农业科学院西部农业研究中心, 新疆昌吉 831100; 4.塔里木大学塔里木绿洲农业教育部重点实验室, 新疆阿拉尔 843300; 5.农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室, 新疆石河子 832000; 6.新疆生产建设兵团第一师水文水资源管理中心, 新疆阿拉尔 843300)

**摘要:**【目的】探究新疆地区灌水定额对不同品种油莎豆生理生长、产量及水分利用效率的影响, 制定科学合理的灌溉制度。【方法】采用河南圆粒(HY)和内蒙古圆粒(NY)2个油莎豆品种, 设置W1(18 mm)、W2(27 mm)、W3(36 mm)和W4(45 mm)4个灌水定额, 分析土壤储水量、各生育期的株高、分蘖数、光合特性、产量、耗水量和水分利用效率变化。【结果】2个品种油莎豆土壤储水量和耗水量均随灌水定额增大而增加, W4处理储水量和耗水量较W1处理分别增加24.84%、60.57%(HY)和18.46%、55.61%(NY)。HY油莎豆株高、分蘖数、净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、叶片蒸腾速率( $Tr$ )和产量均随灌水定额增大呈显著增加趋势( $P < 0.05$ ), W4处理较W1处理分别增加24.60%、15.11%、28.14%、34.86%、40.49%和13.92%, 胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )随灌水定额增大呈减小趋势, W1处理较高。而NY油莎豆株高、分蘖数、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $Tr$ 和产量均随灌水定额增大呈先增加后减小趋势, W2处理较W1处理分别增加26.07%、20.26%、19.69%、38.38%、44.92%和20.83%,  $C_i$ 随灌水定额增大呈先减小后增大趋势, W2处理较低。不同处理油莎豆水分利用效率和灌溉水利用效率均随灌水定额增大呈减小趋势, W1处理显著优于其他处理。主成分分析表明, 净光合速率和水分利用效率可作为油莎豆水分和品种筛选的指标。【结论】河南圆粒灌水定额为45 mm, 内蒙古圆粒灌水定额为27 mm时更有利于油莎豆的生长, 提升产量和水分利用效率。

**关键词:** 油莎豆; 灌水定额和品种; 生长生理; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S565.9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023545

殷姿, 王兴鹏, 张磊, 等. 不同灌水定额对2种油莎豆生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(6): 43-51.

YIN Zi, WANG Xingpeng, ZHANG Lei, et al. The effect of irrigation amounts on growth, yield and water use efficiency of different varieties of tigernut[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(6): 43-51.

## 0 引言

【研究意义】我国是油料消费大国和进口大国, 目前国内食用植物油自给率不足40%<sup>[1]</sup>, 油料供给缺口较大, 且随着国民经济发展及人民生活水平提高, 油料作物需求量将进一步增大, 对外依存度也会不断攀升<sup>[2]</sup>。当前多国实施粮油作物出口禁令<sup>[3]</sup>, 导致我国油料进口能力受到严重制约。因此, 亟需培育和种植具有优质、高产、高抗特性以及普适性的成熟油料作物, 增强国家油料安全保障能力<sup>[4]</sup>。油莎豆(*Cyperus esculentus* L.)具有适应性广、生物量大、附加值高和综合利用价值大的特点<sup>[5-6]</sup>。富含不饱和脂肪酸、糖、淀粉、17种氨基酸以及钙、铁、锌、硒和维生素等, 含油量达20%~30%<sup>[7-8]</sup>。发展油莎豆种植产业, 对优化中国居民食品结构、提高中国食用植物油自给

率、降低大豆进口依存度具有重要的战略意义<sup>[9]</sup>。

【研究进展】作物品种、灌溉制度和地区气候等因素会显著影响油料作物生理生长特性<sup>[10-11]</sup>。研究表明, 在全球范围内大约70%~90%的淡水资源用于农业生产, 但全球许多国家和地区都面临淡水短缺的问题<sup>[12]</sup>。水分胁迫阻碍了作物生理过程(例如冠层覆盖扩张和气孔功能), 降低作物产量, 而土壤水分受灌溉、降水和蒸发等作用呈周期性变化, 灌溉及降水补充土壤水分, 蒸发作用则消耗土壤水分<sup>[13]</sup>。有研究表明, 基于FAO分段和二阶多项式函数描述 $K_c$ 在整个周期中的演变发现, 增加灌溉深度可以在一定程度上增加土壤根系区蓄水量<sup>[14]</sup>, 可节约用水近50%, 有效提高油莎豆生产的可持续性<sup>[15]</sup>。Pascual-Seva等<sup>[16]</sup>研究表明, 油莎豆每次灌水8.5 mm可以得到较高的水分利用效率, 而在水资源匮乏地区, 374.81 mm灌水量可以满足油莎豆的正常生长需要<sup>[17]</sup>。不同油莎豆品种在生长和产量方面会表现出较为明显的差异性, 一般情况下小粒型品种块茎较为集中, 特大粒型块茎大而数量少<sup>[18]</sup>。而杨敏等<sup>[19]</sup>认为, 圆粒品种分蘖数介于大粒品

收稿日期: 2023-11-25

修回日期: 2024-04-01

基金项目: 兵团财政科技计划项目(2021AA003)

作者简介: 殷姿(1999-), 女, 硕士, 主要从事干旱区灌溉排水理论与节水灌溉研究。E-mail: 2541038384@qq.com

通信作者: 王洪博(1995-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事灌溉排水理论与节水灌溉研究。E-mail: 18083915561@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

种和小粒品种之间,块茎的变异性小,分布较大粒品种集中,结豆率高,易于收获且产量高。在栽培措施一致的情况下,吉林大长粒和河北大圆粒2个品种的分蘖数适中、块茎单粒质量较大且能保持较高产量<sup>[20]</sup>。

【切入点】目前国内外对油莎豆的相关研究主要集中在形态特征、发育特点、生长习性、营养成分和栽培种植等方面<sup>[21-24]</sup>。灌溉作为补充作物水分需求的重要手段,在作物生长发育过程具有不可替代的作用,但粗放式灌溉方式及过量灌溉均会引起水资源浪费、土壤板结和盐渍化等问题,而科学合理的水管理措施是实现作物高产、生态环境可持续发展的重要保障<sup>[25-26]</sup>。南疆地区降水稀少、蒸发强烈、气候干旱,加之土壤次生盐渍化问题突出,已严重制约了南疆地区农业的可持续性发展<sup>[27]</sup>。然而,油莎豆的农田用水管理措施和适宜品种<sup>[28]</sup>相关研究较少且不统一。【拟解决的关键问题】本文研究了河南圆粒和内蒙古圆粒油莎豆生长、水分利用效率以及产量等指标对灌水量的响应特

征,进而制定不同品种油莎豆科学合理的灌溉制度,可有效协调作物水分供需关系,以期为促进南疆地区油莎豆高产稳产,实现水资源的高效利用,为推动油莎豆产业持续稳定发展提供技术支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本试验于 2022 年在新疆阿拉尔市现代农业院士专家工作站野外试验基地(81°17'56.52"E, 40°32'36.90"N, 海拔 1 014 m)内进行。试验区属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,夏季高温,冬季寒冷,春季多风,昼夜温差大。试验区年降水量在 50 mm 左右,地表蒸发强烈,年蒸发量在 2 000 mm 左右,平均相对湿度 47%~60%。土壤质地为砂壤土,土壤透气性良好。0~80 cm 土壤平均体积质量为 1.58 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为 23.8% (质量含水率),土壤电导率为 1 953 μS/cm,地下水埋深在 3 m 以下。2022 年油莎豆生育期气象数据由试验站 HOBO 气象监测仪获取,如图 1 所示。

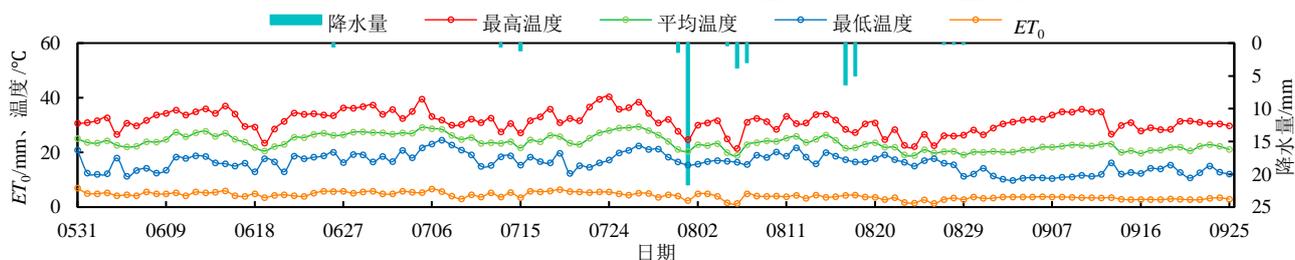


图 1  $ET_0$ 、降水量、平均温度、最高温及最低温度

Fig.1  $ET_0$ , rainfall, average temperature, maximum temperature and minimum temperature

### 1.2 试验设计

采用裂区试验,以灌水量为主区,品种为副区,根据丁雅等研究<sup>[29]</sup>并结合当地种植和灌溉习惯,设置 W1 (18 mm)、W2 (27 mm)、W3 (36 mm) 和 W4 (45 mm) 4 个灌水定额(表 1),河南圆粒(HY)和内蒙古圆粒(NY) 2 个品种,共 8 个处理,每个处理重复 3 次,小区规格为 3.3 m×2.0 m (长×宽)。油

莎豆 5 月 30 日播种,6 月 25 日为分蘖期,7 月 25 日为结荚期,8 月 25 日为成熟期,9 月 30 日全面收获。采用膜下滴灌栽培模式,株距为 10 cm,每穴 2 粒。滴灌带布置方式为 3 带 6 行,宽行距为 66 cm,窄行距为 10 cm,种植模式如图 2 所示。每次随水滴肥料尿素 2 334.5 kg/hm<sup>2</sup>、磷酸一铵 1 334 kg/hm<sup>2</sup>、硫酸钾 667 kg/hm<sup>2</sup> 和复合肥 2 001 kg/hm<sup>2</sup>。

表 1 试验设计和灌水日期

Tab.1 Experimental design and date of irrigation

处理	灌水定额/mm	灌溉时间									
W1	18										
W2	27	0623	0701	0707	0709	0717	0728	0813	0821	0829	0906
W3	36										
W4	45										

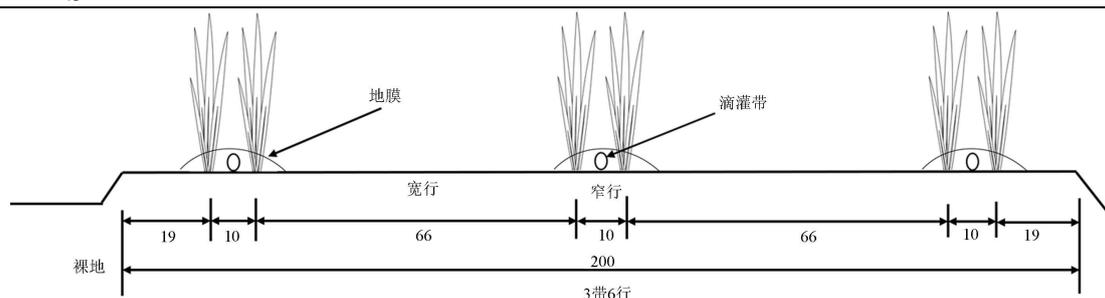


图 2 油莎豆种植模式及滴灌带布置示意图(单位: cm)

Fig.2 Planting pattern and layout diagram of drip irrigation belt of *C. esculentus*

1.3 测定项目及方法

1) 土壤储水量

在油莎豆的分蘖、结粒以及成熟期时，在窄行的中心位置，用土钻取土测定 10、20、40、60 cm 和 80 cm 土壤的质量含水率，按照公式(1)计算土壤储水量<sup>[30]</sup>。

$$W=10\theta h, \quad (1)$$

式中： $W$  为土壤储水量 (mm)； $\theta$  为土壤质量含水率 (%)； $h$  为土层深度 (cm)。

2) 植株生长生理指标

自苗期开始，在每个小区随机标记 3 穴长势均匀的油莎豆样株，从地表至最高叶叶尖，每 7 d 用钢尺 (1 mm) 测量一次株高；从分蘖期开始，在每个小区随机标记 5 穴油莎豆样株，每 15 d 记录一次油莎豆分蘖的株数。

3) 光合特性

选择晴朗无风日，在每个生育阶段，选择与生长指标测定同一植株，用 Li-6400xt 便携式光合仪于 10:00—14:00 测定无破损的冠层顶层主鳞茎叶片 (完全裸露叶片) 蒸腾速率 ( $Tr$ )、净光合速率 ( $Pn$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 及胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ )。

4) 产量、水分利用效率和灌溉水利用效率

成熟后于每个测坑小区，收获全部油莎豆，自然风干 7 d 后测定产量。水分利用效率  $WUE_{ET}$  和灌溉水利用效率  $WUE_i$  分别按照公式 (2) 和公式 (3) 计算。

$$WUE_{ET}=Y/ET, \quad (2)$$

$$WUE_i=Y/I, \quad (3)$$

式中： $Y$  为油莎豆产量 ( $kg/hm^2$ )； $ET$  为油莎豆全生育期耗水量 ( $m^3/hm^2$ )； $I$  为生育期内对油莎豆的灌溉水量 ( $m^3/hm^2$ )。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2021 进行数据分析，利用 Origin 2022 软件作图，用 SPSS 25 软件进行主成分分析及隶属函数分析，将原来 10 个生理指标简化为新的相互独立的综合指标 (即主成分)，根据各主成分的贡献率分别求其隶属函数值和权重，据此计算各指标的综合评价价值  $D$ ，评价油莎豆各品种的最佳灌水定额，综合指标的权重  $W_i$ 、隶属函数值  $\mu(X_i)$  及综合评价价值 ( $D$ ) 的计算公式<sup>[31]</sup>如公式 (4) — 公式 (7) 所示。

$$\text{正隶属函数 } \mu=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}), \quad (4)$$

$$\text{反隶属函数 } \mu=1-(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \quad (5)$$

$$W_i=\sum_{i=1}^n|C_i|, \quad (6)$$

$$D=\sum_{i=1}^n[\mu(X_i)\times W_i], \quad (7)$$

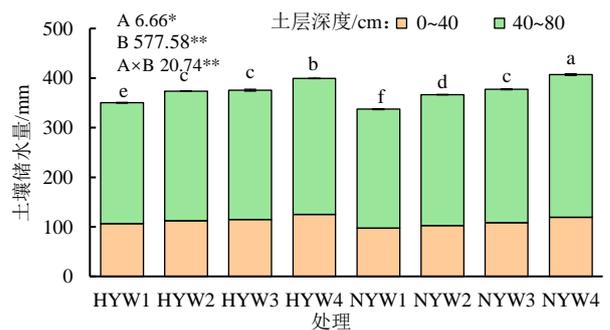
式中： $n$  为指标数量； $\mu(X_i)$  和  $W_i$  分别为第  $i$  个指标的隶属函数值和权重； $C_i$  为各指标第  $i$  个综合指标的方差贡献率； $X_i$  表示综合指标中的第  $i$  个值； $X_{\min}$  表示每个主成分中综合指标的最小值； $X_{\max}$  表示每个主成分中综合指标的最大值。

分中综合指标的最大值。

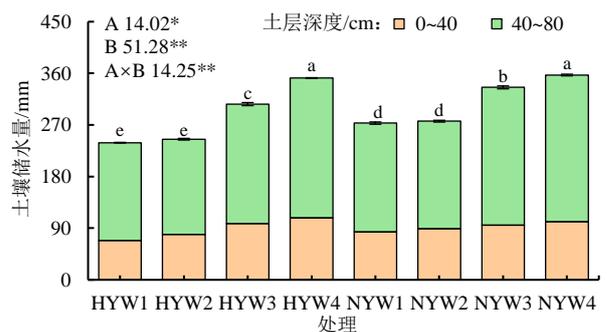
2 结果与分析

2.1 不同灌水定额对土壤储水量变化的影响

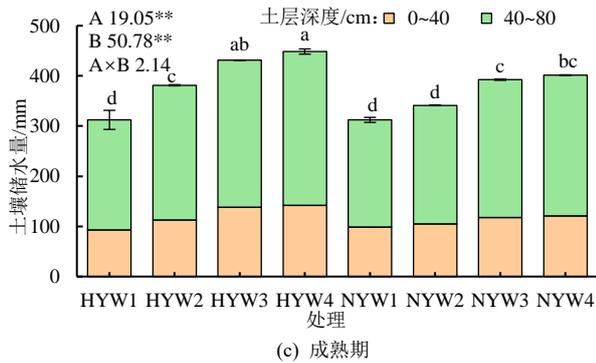
不同处理油莎豆土壤储水量变化如图 3 所示，由图 3 可知，灌溉因素和品种因素显著影响分蘖期、结粒期和成熟期油莎豆的土壤储水量 ( $P<0.05$ )，在分蘖期和结粒期，灌溉因素对土壤储水量的影响与品种因素对土壤储水量的影响之间存在显著关系，而成熟期灌水因素和品种因素互相独立。0~80 cm 土壤储水量随生育期的推进呈先减小后增加趋势，结粒期比分蘖期和成熟期分别减小 20.17% 和 20.07%。同时，储水量随土层深度的增大呈增加趋势，且 0~40 cm 土壤储水量波动幅度较大，40~80 cm 土壤储水量波动幅度较小。河南圆粒 (HY) 和内蒙古圆粒 (NY) 油莎豆土壤储水量均随灌水定额增大呈显著增加趋势 ( $P<0.05$ )，分蘖期，HYW4 处理较 HYW1 处理增加 12.26%，NYW4 处理较 NYW1 处理增加 17.14%；结粒期，HYW4 处理较 HYW1 处理增加 32.05%，NYW4 处理较 NYW1 处理增加 23.48%；成熟期，HYW4 处理较 HYW1 处理增加 30.37%，NYW4 处理较 NYW1 处理增加 22.23%。相同灌水定额，分蘖期 HYW1 处理和 HYW2 处理土壤储水量较 NYW1 处理和 NYW2 处理均增加 3.68% 和 1.91%，而 HYW3 处理和 HYW4 处理较 NYW3 和 NYW4 处理分别减小 0.45% 和 1.95%，结粒期 HY 油莎豆较 NY 油莎豆减小 1.46%~12.49%，成熟期 HY 油莎豆较 NY 油莎豆增加 0.02%~10.56%。



(a) 分蘖期



(b) 结粒期



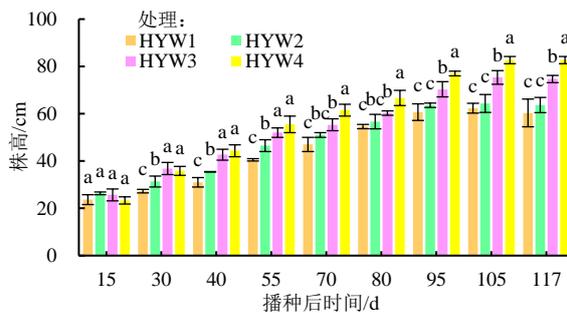
注 W1—W4 为不同灌水处理 (18—45 mm); HY 为河南圆粒; NY 为内蒙古圆粒; A 为品种; B 为灌水水平; 同一时期标以不同小写字母的值处理间在 0.05 水平差异显著, 不同处理下同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著; \*表示差异显著 ( $P < 0.05$ ); \*\*表示差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 下同。

图 3 土壤储水量变化

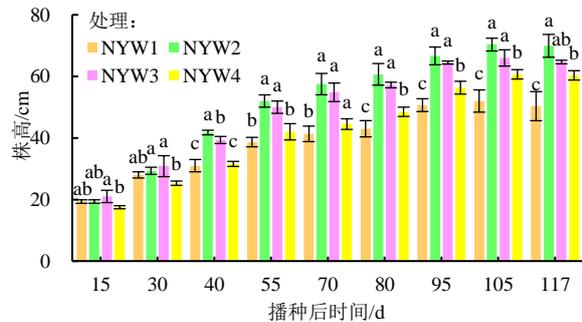
Fig.3 Change in soil water storage volume

## 2.2 不同灌水定额对油莎豆株高及分蘖数的影响

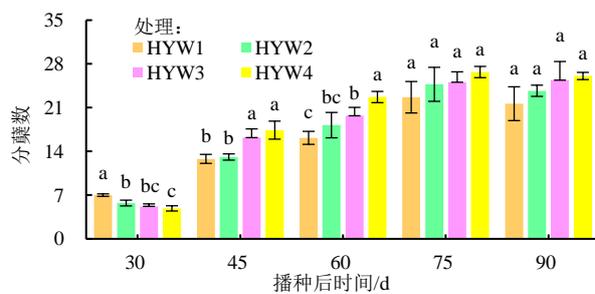
图 4 为油莎豆株高及分蘖数的动态变化, 由图 4 可知, 油莎豆不同处理株高及分蘖数均随生育期的推进呈先增加后逐渐趋于稳定的趋势, 油莎豆株高第一



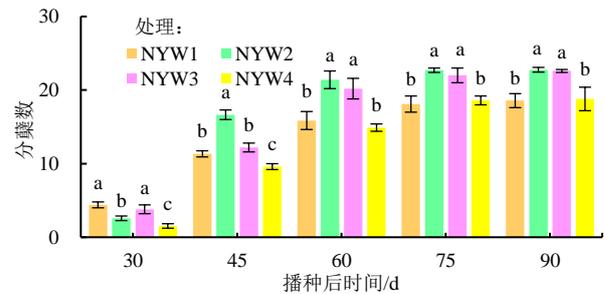
(a) 河南圆粒株高



(b) 内蒙古圆粒株高



(c) 河南圆粒分蘖数



(d) 内蒙古圆粒分蘖数

图 4 油莎豆株高、分蘖数的动态变化

Fig.4 Dynamics of plant height and tiller under of *C.esculentus*

表 2 灌溉定额和品种对油莎豆株高和分蘖数指标的 F 值检验

Tab.2 F-value test of plant height and tiller index of *C.esculentus* by irrigation quota and variety

F 值检验	株高	分蘖数
A	68.15**	35.83**
B	37.63**	4.26*
A×B	28.28**	3.19

## 2.3 不同灌水定额对油莎豆光合特性的影响

表 3 为不同处理对油莎豆光合特性的影响, 由表 3 可知, 灌溉因素和灌溉因素与品种因素的交互作用显著影响分蘖期和结粒期油莎豆净光合速率 ( $P_n$ )、

个快速增长期为播种后 30~55 d, 第二个快速增长期为播种后 80~105 d, 而油莎豆分蘖数快速增长期为播种后 48~58 d, 株高和分蘖数分别于播种后 105 d 和 75 d 前后达到峰值。由表 2 可知, 品种因素极显著影响油莎豆的株高和分蘖数, 灌溉因素显著影响油莎豆的分蘖, 灌溉因素极显著影响油莎豆的株高, 不同灌水定额对株高的影响会随品种的改变而改变, 不同品种也会显著影响不同灌水定额对株高的影响。河南圆粒 (HY) 油莎豆株高和分蘖数均随灌水定额的增大呈增加趋势, 在播种 105 d 和 75 d 后, HYW4 处理显著优于 HYW1 处理 ( $P < 0.05$ ), 株高和分蘖数分别增加 24.60%和 15.11%。内蒙古圆粒 (NY) 油莎豆株高和分蘖数均随灌水定额的增大呈先增加后减小的趋势, 在播种 105 d 和 75 d 后, NYW2 处理显著优于 NYW1 处理, 株高和分蘖数分别增加 26.07%和 20.26%。灌水定额相同时, HY 油莎豆株高和分蘖数均高于 NY, 分别增加 12.53%和 17.92%。

气孔导度 ( $G_s$ )、叶片蒸腾速率 ( $Tr$ ) 和胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ), 而灌溉因素显著影响成熟期  $P_n$ 、 $Tr$  和  $C_i$ , 而灌溉因素对  $P_n$  的影响与品种因素对  $P_n$  的影响之间存在显著关系。品种因素显著影响分蘖期油莎豆  $C_i$  和成熟期  $P_n$ , 而显著影响油莎豆结粒期  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $Tr$  和  $C_i$ 。不同处理油莎豆  $P_n$ 、 $G_s$  和  $Tr$  均随生育期推进呈先增大后减小趋势, 结粒期较分蘖期和成熟期分别增加 30.80%、18.10%、11.74% (分蘖期) 和 22.09%、18.68%、16.64% (成熟期), 而  $C_i$  随生育期的推进呈不断减小的趋势,  $C_i$  在成熟期最小。河南圆粒 (HY)

油莎豆  $P_n$ 、 $G_s$  和  $Tr$  均随灌水定额增大呈增加趋势，HYW4 处理显著优于 HYW1 处理 ( $P<0.05$ )， $P_n$ 、 $G_s$  和  $Tr$  分别增加 28.14%、34.86%和 40.49%。 $C_i$  随灌水定额增大呈减小趋势，HYW4 处理较 HYW1 处理显著减小 38.82%。而内蒙古圆粒(NY)油莎豆  $P_n$ 、

$G_s$  和  $Tr$  均随灌水定额增大呈先增加后减小趋势，NYW2 处理显著优于 NYW1 处理 ( $P<0.05$ )， $P_n$ 、 $G_s$  和  $Tr$  分别增加 19.69%、38.38%和 44.92%。 $C_i$  随灌水定额增大呈先减小后增大趋势，NYW2 处理较 NYW1 处理显著减小 29.08%。

表 3 不同处理对油莎豆光合特性的影响

Tab.3 Effects of different treatments on photosynthetic characteristics of *C.esculentus*

处理	分蘖期				结粒期				成熟期				
	$P_n$	$G_s$	$C_i$	$Tr$	$P_n$	$G_s$	$C_i$	$Tr$	$P_n$	$G_s$	$C_i$	$Tr$	
河南圆粒 (HY)	W1	5.55 c	0.21 bc	283.34 a	2.17 cd	8.96 d	0.22 d	280.46 a	2.87 cd	8.21 bc	0.26 bc	254.61 a	1.92 c
	W2	8.26 a	0.25 abc	254.63 ab	2.93 bc	10.03 cd	0.30 bc	247.56 a	3.22 bc	9.15 b	0.24 bc	192.12 bc	2.34 bc
	W3	8.27 a	0.30 a	249.93 bcd	3.49 ab	11.23 bc	0.36 ad	201.17 ab	3.67 ab	9.36 b	0.31 ad	165.95 cd	3.32 ab
	W4	8.33 a	0.31 a	185.87 cd	3.72 ab	12.96 a	0.40 a	184.80 bc	4.08 a	10.34 a	0.35 a	130.047 d	3.89 a
内蒙古圆粒 (NY)	W1	7.53 b	0.18 d	266.94 bc	1.85 d	8.90 d	0.22 c	266.09 ab	2.34 d	7.52 e	0.11 c	246.37 ab	1.81 c
	W2	8.33 a	0.27 bc	184.29 e	3.89 a	13.0 a	0.31 a	184.26 d	3.97 bc	8.50 c	0.24 abc	184.22 cd	3.04 abc
	W3	7.74 b	0.26 bc	196.51 e	2.39 bc	12.49 ab	0.29 ab	186.71 d	2.86 d	8.36 cd	0.28 bc	159.39 cd	2.58 bc
	W4	7.54 b	0.19 cd	221.77 d	2.14 cd	11.40 bc	0.26 c	219.22 c	2.55 cd	7.88 de	0.20 bc	208.37 abc	2.41 bc
A	5.76	3.32	53.90**	4.37	5.00*	9.6**	67.83**	34.12**	103.31**	3.63	1.13	2.41	
F	B	106.54**	8.91**	16.33**	10.88**	22.06**	13.67**	12.87**	4.21*	7.25**	2.99	9.32**	4.65*
A×B		67.72**	6.44*	7.12**	7.85**	7.83*	5.326**	8.46**	4.89*	8.28**	2.56	2.68	3.15

注  $P_n$ : 净光合速率/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ ;  $G_s$ : 气孔导度/ $(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ ;  $Tr$ : 叶片蒸腾速率/ $(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ ;  $C_i$ : 胞间  $\text{CO}_2$  浓度/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$ 。

2.4 不同灌水定额对油莎豆产量、耗水量、水分利用效率和灌溉水利用效率的影响

图 5 为不同处理油莎豆产量、耗水量、水分利用效率和灌溉水利用效率变化，由图 5 可知，灌溉因素极显著影响油莎豆的产量、耗水量、水分利用效率和灌溉水利用效率 ( $P<0.01$ )，品种因素极显著影响产量、水分利用效率和灌溉水利用效率，灌溉因素显著影响产量、水分利用效率和灌溉水利用效率的影响与品种因素对产量、水分利用效率和灌溉水利用效率 ( $P<0.05$ )。河南圆粒 (HY) 油莎豆产量和耗水量随灌水定额增大呈增加趋势，HYW4 处理产量和耗水量较 HYW1 处理分别增加 13.92%和 60.57%。内蒙古圆

粒 (NY) 油莎豆产量随灌水定额增大呈先增加后减小趋势，NYW2 处理显著优于 NYW1 处理和 NYW4 处理，分别增加 20.83%和 8.52%，而油莎豆耗水量随灌水定额增加呈增加趋势，NYW4 处理较 NYW1 处理显著增加 55.61%。油莎豆水分利用效率和灌溉水利用效率均随灌水定额增加呈减小趋势，HYW4 处理较 HYW1 处理分别减小 54.73%和 53.53%，NYW4 处理较 NYW1 处理分别减小 48.71%和 53.78%。灌水定额相同时，HY 油莎豆产量、水分利用效率和灌溉水利用效率均显著高于 NY，分别增加 13.36%、17.63%和 13.53%。

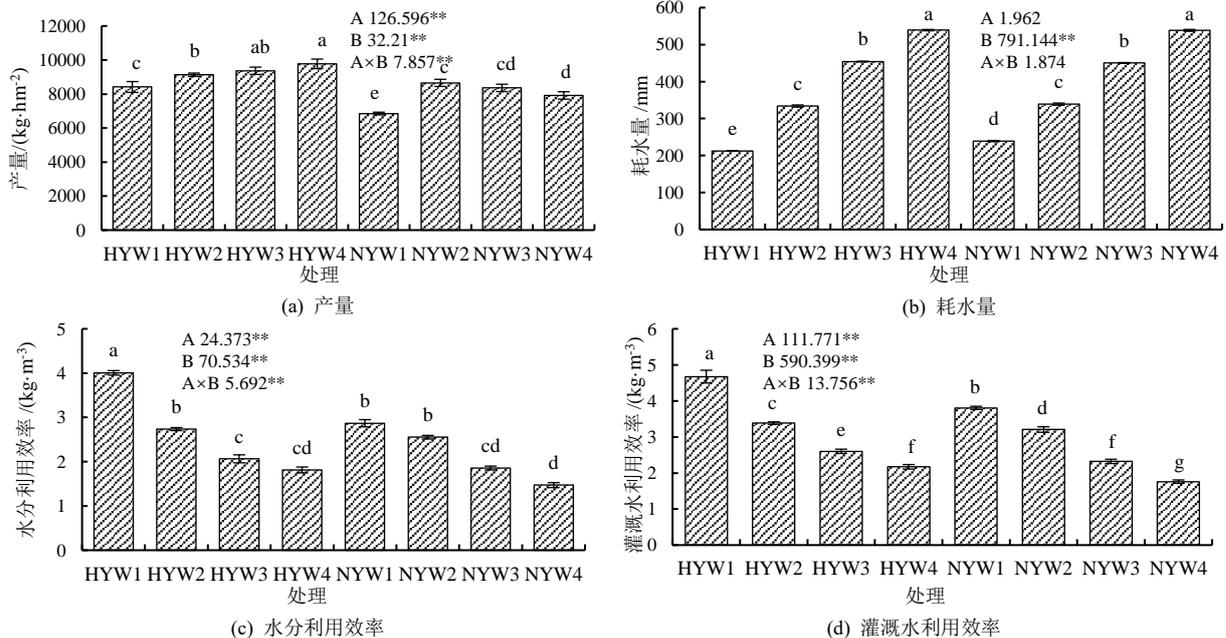


图 5 不同灌水定额对油莎豆产量、耗水量、水分利用效率和灌溉水利用效率的影响

Fig.5 Effects of different irrigation quota on yield water use efficiency and irrigation water use efficiency

## 2.5 基于隶属函数法的综合评价

表 4 为各主成分的特征向量和贡献率,由表 4 可知,根据特征值大于 1 的原则,共提取 2 个主成分,主成分 1 和主成分 2 的贡献率分别为 71.11% 和 23.17%,表明主成分 1 和主成分 2 代表了原来 10 个单项指标 94.28% 的变化。其中,第 1 主成分净光合速率特征向量最大为 0.14,第 2 主成分水分利用效率

表 4 各主成分的特征向量和贡献率

Tab.4 Eigenvalues and contribution rates of principal components

性状	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	贡献率/%	累计贡献率/%
主成分 1	0.13	0.10	0.14	0.13	-0.13	0.13	0.12	0.11	-0.09	-0.10	71.11	71.11
主成分 2	0.14	0.28	-0.05	0.13	0.10	0.13	0.21	-0.23	0.32	0.30	23.17	94.28

注  $K_1$ : 株高;  $K_2$ : 分蘖;  $K_3$ : 净光合速率;  $K_4$ : 气孔导度;  $K_5$ : 胞间  $CO_2$  浓度;  $K_6$ : 植物蒸腾速率;  $K_7$ : 产量;  $K_8$ : 耗水量;  $K_9$ : 水分利用效率;  $K_{10}$ : 灌溉水利用效率。

表 5 不同油莎豆品种各指标隶属数值及综合评价

Tab.5 Membership values and comprehensive evaluation of each index of different soybean varieties

品种	处理	$F_1$	$F_2$	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$D$	排名
河南圆粒 (HY)	W1	-0.22	0.68	0.11	1	0.33	7
	W2	0.30	0.41	0.47	0.75	0.54	4
	W3	0.12	0.21	0.75	0.66	0.73	2
	W4	0.22	0.32	1	0.64	0.91	1
内蒙古圆粒 (NY)	W1	-0.22	-0.44	0	0.38	0.09	8
	W2	0.02	0.35	0.62	0.65	0.62	3
	W3	0.01	-0.39	0.58	0.31	0.52	5
	W4	0.04	-1.13	0.44	0	0.33	6
$W_i$				75.43	24.57		

注  $F_1$ ~ $F_2$  为综合指标 1~2,  $\mu(X_1)$ ~ $\mu(X_2)$  为隶属函数值 1~2,  $D$  为综合评价值,  $W_i$  为综合指标权重。

## 3 讨论

灌水量是作物灌溉制度的重要参数,合理灌溉不仅可以节约水资源和提高水资源利用率,同时能够满足作物生长发育所需水分,达到提高作物产量的目的<sup>[32]</sup>。本研究表明,油莎豆 0~80 cm 土壤储水量和耗水量均随灌水定额增大呈增加趋势,说明土壤含水率受灌水定额的影响较大,较大的灌水定额比较小灌水定额能更好地弥补蒸发损失,满足油莎豆耗水。0~40 cm 土壤储水量波动幅度较大,40~80 cm 土壤储水量波动幅度较小,这是因为油莎豆根系属于须根系,多分布于土壤浅层区,蒸发蒸腾和灌溉等因素对浅层土壤水分影响较大所致。此外,各处理土层储水量在结粒期时最小,这是因为油莎豆块茎形成期处于营养生长与生殖生长并进阶段<sup>[33]</sup>,油莎豆需水量增加导致土壤储水量减小。

油莎豆叶片长度可作为株高,是衡量群体质量重要指标<sup>[34-35]</sup>,分蘖是油莎豆发育过程中形成的一种分支,其数量可以表现出群体长势情况<sup>[36]</sup>。分蘖和株高形成受到了各方面因素的综合影响,其中包括环境(光照、温度和水分)和品种特性。本研究结果显示,品种因素对油莎豆株高和分蘖数有极显著影响,河南

特征向量最大为 0.32,可作为油莎豆水分和品种筛选的依据。表 5 显示了油莎豆各处理的综合指标、隶属函数值、综合评价和排序。河南圆粒(HY)综合评价值的变化范围 0.33~0.91, HYW4 处理综合评价最高为 0.91, 内蒙古圆粒(NY)综合评价值的变化范围 0.08~0.62, NYW2 处理综合评价最高为 0.62。

圆粒(HY)株高和分蘖数随灌水定额增大而增加,而内蒙古圆粒(NY)株高和分蘖数随灌水定额增大呈先增大后减小趋势,这是因为适当提高灌水量可以有效缓解作物干旱胁迫,促进作物生长发育,但因品种特性不同,油莎豆最适宜的灌水定额有所不同, NY 油莎豆对水分胁迫的适应能力较差,使得冠层结构、株高和分蘖数发生改变。这一研究结果与 Chauhan 等<sup>[37]</sup>通过水胁迫对水稻的研究相一致。

光合作用是作物生物量积累的重要过程之一<sup>[38]</sup>,株高和分蘖对群体空间调节,会改变叶片光照条件,进而影响群体叶片光合功能<sup>[39]</sup>。水是光合作用的重要底物,水分变化直接影响光合作用的强度,光合速率、蒸腾速率等均随之变化<sup>[40]</sup>。本研究表明,油莎豆各处理的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和叶片蒸腾速率( $T_r$ )表现为结粒期>成熟期>分蘖期,分析可知在结粒期和成熟期油莎豆生长旺盛,油莎豆对光合产物的积累较多,而胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )表现为分蘖期>结粒期>成熟期,这是因为成熟期天气干旱,光照强度高,日照时间长,从而引起气孔关闭,导致胞间  $CO_2$  浓度增加<sup>[41]</sup>。河南圆粒(HY)  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  随灌水定额增大而增加,而  $C_i$  表现相反,这可能是因为适度水分胁迫有利于植株根系的生长、叶片叶绿素的形成和适宜群体结构体系的构建,进而促进了叶片的光合作用<sup>[42]</sup>。内蒙古圆粒(NY)  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  表现为 NYW2 处理>NYW3 处理>NYW4 处理>NYW1 处理,  $C_i$  表现为 NYW1 处理>NYW4 处理>NYW3 处理>NYW2 处理,这表明内蒙古圆粒叶片的生理生化机能更易受到水分胁迫的影响,使植物的气孔导度减小,改变  $CO_2$  和  $H_2O$  在叶片内部和外部的流通,进而对光合速率会产生直接影响<sup>[43]</sup>。

作物产量及水分利用特性与灌水量的对应关系是衡量种植模式和灌水方案是否可行的重要依据<sup>[44]</sup>。本研究表明,灌水定额对油莎豆产量、水分利用效率和

灌溉水利用效率有显著影响( $P<0.05$ ),河南圆粒(HY)产量随灌水定额增大而增加, HYW4 处理产量最高, 其产量达到  $9\ 774.54\ \text{kg}/\text{hm}^2$ , 而内蒙古圆粒(NY)随灌水定额的增大呈先增后减小趋势, 在 NYW2 处理产量最高为  $8\ 655.9\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。说明灌溉对油莎豆产量的影响亦受品种影响, HY 油莎豆较高的灌溉定额有利于产量形成, 而 NY 所需灌水量较小, 过量水分胁迫会对植物光合作用和根部营养吸收产生影响, 致使其生长受到抑制, 产量下降<sup>[45]</sup>。水分利用效率和灌溉水利用效率均随灌水定额增大而减小, 这是因为土壤过于湿润, 改变根部通透性状况和氧分布, 进而阻碍根系发育和对养分和水分的吸收能力<sup>[46]</sup>, 大量水分因土壤蒸发而无法被植株利用。此外, 本研究表明品种与灌水对产量、水利用效率和灌溉水利用效率有显著影响, 水分对产量的影响高于品种间差异。基于隶属函数的综合评价进一步验证了河南圆粒配套  $45\ \text{mm}$  灌水定额, 内蒙古圆粒配套  $27\ \text{mm}$  灌水定额有利于油莎豆生长, 进而提升产量和水分利用效率。由于施肥措施对作物生理生长及产量也会产生影响, 为促进南疆地区油莎豆产业持续稳定发展, 后期需进一步开展试验分析施肥差异对油莎豆种植效果造成的影响。

#### 4 结论

1) 河南圆粒(HY)和内蒙古圆粒(NY)油莎豆  $0\sim 80\ \text{cm}$  土壤储水量和耗水量均随灌水定额增大而增加, 其中土壤储水量随生育期的推进呈先减小后增加趋势, 且随着土层深度的增加, 土壤储水量的波动幅度减小。此外, 灌溉因素对油莎豆土壤储水量和耗水量均具有显著影响, 而品种因素只对油莎豆土壤储水量影响显著。

2) 河南圆粒(HY)油莎豆株高、分蘖数、净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )和叶片蒸腾速率( $T_r$ )均随灌水定额的增大呈增加趋势, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )随灌水定额增大呈减小趋势; 内蒙古圆粒(NY)油莎豆株高、分蘖数、 $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  均随灌水定额的增大, 先增加后减小,  $C_i$  随灌水定额增大, 先减小后增大, 且品种因素和灌溉因素均显著影响油莎豆株高、分蘖数、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  和  $C_i$ 。

3) 河南圆粒(HY)油莎豆产量随灌水定额增大呈增加趋势, 灌水定额为  $45\ \text{mm}$  时, 油莎豆产量可以达到  $9\ 774.54\ \text{kg}/\text{hm}^2$ , 内蒙古圆粒(NY)油莎豆产量随灌水定额增大呈先增加后减小趋势, 灌水定额为  $27\ \text{mm}$  时, 油莎豆产量可以达到  $8\ 655.9\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。两品种油莎豆的水分利用效率和灌溉水利用效率均随灌水定额增加而减小, 相同灌水定额, HY 油莎豆产量、水分利用效率和灌溉水利用效率均显著高于 NY, 分

别增加  $13.36\%$ 、 $17.63\%$  和  $13.53\%$ 。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

#### 参考文献:

- [1] 杨杰, 史展菲, 鲁海龙. 食用油精炼加工厂的碳排放核算及碳减排分析[J]. 中国油脂, 2023, 48(6): 79-84, 90.  
YANG Jie, SHI Zhanfei, LU Hailong. Carbon emission calculation and carbon emission reduction analysis of edible oil refinery[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(6): 79-84, 90.
- [2] 严茂林, 葛玮玮, 张翔, 等. 我国油料产业形势分析与对策[J]. 中国油脂, 2023, 48(6): 8-18.  
YAN Maolin, GE Weiwei, ZHANG Xiang, et al. Situation analysis and development countermeasures of China's oilseed industry[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(6): 8-18.
- [3] 严茂林, 周晓亮, 刘自搏, 等. 我国油料增产格局及贡献因素研究[J]. 中国油脂, 2024, 49(4): 1-8.  
YAN Maolin, ZHOU Xiaoliang, LIU Zibo, et al. Pattern and contributing factors of increasing production of oilseed in China[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(4): 1-8.
- [4] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). OECD-FAO Agricultural Outlook 2021—2030[M]. Paris, France: OECD Publishing, 2021.
- [5] 阳振乐. 油莎豆的特性及其研究进展[J]. 北方园艺, 2017(17): 192-201.  
YANG Zhenle. Characteristics and research progress of *Cyperus esculentus*[J]. Northern Horticulture, 2017(17): 192-201.
- [6] 丑义宣, 李柯洁, 闵琰, 等. 油莎豆的营养成分、生物活性及其应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(15): 222-230.  
CHOU Yixuan, LI Kejie, MIN Yan, et al. Research progress in nutritional composition, biological and application of *Cyperus esculentus*[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(15): 222-230.
- [7] 瞿萍梅, 程治英, 龙春林, 等. 生物柴油植物“油莎豆”的发展前景[J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 106-109.  
QU Pingmei, CHENG Zhiying, LONG Chunlin, et al. Development potentials of chufa for biodiesel production[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(1): 106-109.
- [8] MANEK R V, BUILDERS P F, KOLLING W M, et al. Physicochemical and binder properties of starch obtained from *Cyperus esculentus*[J]. AAPS PharmSciTech, 2012, 13(2): 379-388.
- [9] 王志成, 李双寿, 梁雄, 等. 中国油莎豆产业发展现状与前景展望[J]. 科技和产业, 2022, 22(1): 62-67.  
WANG Zhicheng, LI Shuangshou, LIANG Xiong, et al. Development status and prospect of *Cyperus esculentus* industry in China[J]. Science Technology and Industry, 2022, 22(1): 62-67.
- [10] 许玲, LIU Hui, YAN Guijun, 等. 油料作物育种的分子工具和技术创新[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2023, 49(4): 445-453.  
XU Ling, LIU Hui, YAN Guijun, et al. Molecular tools and technological innovation in oil crop breeding[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2023, 49(4): 445-453.
- [11] PASCUAL-SEVA N, SAN BAUTISTA A, LOPEZ-GALARZA S, et al. Furrow-irrigated chufa crops in Valencia (Spain). I: Productive response to two irrigation strategies[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2013, 11(1): 258.
- [12] LI F W, YU D, ZHAO Y. Irrigation scheduling optimization for cotton based on the AquaCrop model[J]. Water Resources Management, 2019, 33(1): 39-55.
- [13] 王洪博, 赵栗, 高阳, 等. 南疆无膜滴灌棉田灌溉模式及耗水规律研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 153-160.  
WANG Hongbo, ZHAO Li, GAO Yang, et al. Study on irrigation mode and water consumption of cotton drip irrigation without film in South Xinjiang[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(10): 153-160.
- [14] LI Y, HUANG G H, CHEN Z J, et al. Effects of irrigation and fertilization on grain yield, water and nitrogen dynamics and their use efficiency of spring wheat farmland in an arid agricultural watershed of Northwest

- China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 260: 107-277.
- [15] PASCUAL-SEVAN, PASCUAL B. Determination of crop coefficient for chufa crop (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) for sustainable irrigation scheduling[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144-975.
- [16] PASCUAL-SEVA N, SAN BAUTISTA A, LÓPEZ-GALARZA S, et al. Influence of different drip irrigation strategies on irrigation water use efficiency on chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) crop[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 406-413.
- [17] 朱俊岭, 师茜, 王小红, 等. 不同水分处理条件对油莎豆叶片生理指标及块茎品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(6): 1 276-1 280. ZHU Junling, SHI Qian, WANG Xiaohong, et al. Effects of different moisture on leaf physiological regulation substances content and quality of *Cyperus esculentus* L[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(6): 1 276-1 280.
- [18] 沈庆雷. 油莎豆高产优质栽培初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010. SHEN Qinglei. A preliminary studies on high yield and quality cultivation in chufa[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010.
- [19] 杨敏, 田丽萍, 薛琳. 不同油莎豆品种在新疆干旱气候区的产量表现与品质差异[J]. *中国油料作物学报*, 2013, 35(4): 451-454. YANG Min, TIAN Liping, XUE Lin. Quality and production potential of different chufa varieties in arid climate region of Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2013, 35(4): 451-454.
- [20] 厉广辉, 王兴军, 张斌, 等. 不同油莎豆品种在山东种植的产量与品质研究[J]. *山东农业科学*, 2021, 53(3): 61-64. LI Guanghui, WANG Xingjun, ZHANG Bin, et al. Study on yield and quality of different chufa varieties in Shandong Province[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(3): 61-64.
- [21] 王润润, 郑旭, 郝冬梅, 等. 种植密度和化学调控对绿洲农田油莎豆农艺性状及产量的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2022, 40(6): 705-712. WANG Runrun, ZHENG Xu, HAO Dongmei, et al. Effects of planting density and chemical regulation on agronomic traits and yield of *Cyperus esculentus* L[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2022, 40(6): 705-712.
- [22] 李突变, 张凤华, 徐接亮, 等. 刈割对油莎豆碳氮积累以及产量和品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(5): 165-172. LI Bianbian, ZHANG Fenghua, XU Jieliang, et al. Effects of clipping on carbon and nitrogen accumulation, yield and quality of *Cyperus esculentus* L[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(5): 165-172.
- [23] SÁNCHEZ-ZAPATA E, FERNÁNDEZ-LÓPEZ J, ANGEL PÉREZ-ALVAREZ J. Tiger nut (*Cyperus esculentus*) commercialization: Health aspects, composition, properties, and food applications[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2012, 11(4): 366-377.
- [24] PASCUAL B, MAROTO J V, LÓPEZ-GALARZA S, et al. Chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.): An unconventional crop. studies related to applications and cultivation[J]. *Economic Botany*, 2000, 54(4): 439-448.
- [25] 郭祥林, 高佩玲, 吴畏, 等. 微咸水灌溉下不同生物炭对盐碱土水盐运移的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(8): 98-105. GUO Xianglin, GAO Peiling, WU Wei, et al. Impact of biochar amendment and brackish water irrigation on water and salt movement in saline-alkaline soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(8): 98-105.
- [26] 陈柯, 刘文欣, 冯棣, 等. 设施滴灌土壤水分调控对水果萝卜生长和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(12): 22-27. CHEN Ke, LIU Wenxin, FENG Di, et al. Effects of soil water regulation on growth and yield of fruit radish under drip irrigation in greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(12): 22-27.
- [27] 艾先涛, 李雪源, 王俊铎, 等. 新疆棉花植棉比较效益分析[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(12): 2 183-2 190. AI Xiantao, LI Xueyuan, WANG Junduo, et al. Innovation of science & technology, and Ascension of planting cotton comparative benefit in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(12): 2 183-2 190.
- [28] 叶岩, 张君, 张健, 等. 油莎豆块茎萌发特性研究[J]. *中国油料作物学报*, 2023, 45(1): 191-197. YE Yan, ZHANG Jun, ZHANG Jian, et al. Germination characteristics of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.)[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2023, 45(1): 191-197.
- [29] 丁雅, 杨建明, 李利, 等. 新疆盆地亏缺灌溉和覆膜对油莎豆生物量及产量的影响[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(3): 883-892. DING Ya, YANG Jianming, LI Li, et al. Effects of deficit irrigation and film mulching on biomass and production of *Cyperus esculentus* in the Southern Xinjiang Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(3): 883-892.
- [30] 余高, 陈芬, 谢英荷, 等. 有机无机复合保水材料对玉米苗期土壤水分及幼苗生长的影响[J]. *河南农业科学*, 2019, 48(10): 23-29. YU Gao, CHEN Fen, XIE Yinghe, et al. Effects of organic-inorganic superabsorbent polymer composites on soil moisture and growth of maize at seedling stage[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(10): 23-29.
- [31] 杨其享, 刘立强, 秦伟, 等. 新疆野杏种群结构特征与健康评价[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(1): 9-17. YANG Qixiang, LIU Liqiang, QIN Wei, et al. Population structure characteristics and health evaluation of *Armeniaca vulgaris* Lam.[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(1): 9-17.
- [32] 师晶晶, 兰慧青, 张向前, 等. 滴灌量对耐密宜机收玉米干物质积累分配及产量形成的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(9): 1-8. SHI Jingjing, LAN Huiqing, ZHANG Xiangqian, et al. Influence of drip irrigation on dry matter distribution and yield formation of the grains of densely planted maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(9): 1-8.
- [33] 刘微. 不同时期叶面施硒对油莎豆干草、青贮品质及硒空间转化的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022. LIU Wei. Effects of foliar selenium application in different periods on hay and silage quality and spatial transformation of selenium in *Cyperus esculentus*[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.
- [34] 李晓兰, 李瑞辉, 尹慧来, 等. 氮磷钾配施对半干旱风沙区油莎豆产量构成因素的影响[J]. *农业与技术*, 2021, 41(21): 13-17. LI Xiaolan, LI Ruihui, YIN Hui Lai, et al. Effects of nitrogen phosphorus potassium application on yield components of *Cyperus esculentus* in semi-arid wind-sand area[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(21): 13-17.
- [35] 张修业, 古丽尼尕尔·艾依斯热洪, 万江春, 等. 夏季刈割对油莎豆产量及品质的影响[J]. *天津农业科学*, 2021, 27(4): 14-18. ZHANG Xiuye, GULINIJAR·AISIRESHEHONG, WAN Jiangchun, et al. Effects of summer mowing on *Cyperus esculentus* biomass and nutrient quality[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2021, 27(4): 14-18.
- [36] 李晓兰, 李瑞辉, 王韶婉, 等. 不同来源油莎豆品种的农艺性状和产量构成因素比较分析[J]. *农业与技术*, 2022, 42(12): 10-14. LI Xiaolan, LI Ruihui, WANG Shaowan, et al. Comparison of agronomic traits and yield components of different sources of *Cyperus esculentus* varieties[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(12): 10-14.
- [37] CHAUHAN J S, MOYA T B, SINGH R K, et al. Influence of soil moisture stress during reproductive stage on physiological parameters and grain yield in upland rice[J]. *Oryza*, 1999, 36(2): 130-135.
- [38] 安文明, 师庆东, 张毓涛, 等. 克拉玛依人工林俄罗斯杨(*Populus russkii*)与新疆杨(*P. alba* var. *pyramidalis*)光合特性分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(9): 67-72. AN Wenming, SHI Qingdong, ZHANG Yutao, et al. Comparison of photosynthesis feature between *Populus russkii* and *P. alba* var. *pyramidalis* in the Karamay plantation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(9): 67-72.
- [39] 钟鹏, 苗丽丽, 刘杰, 等. 种植密度和方式对油莎豆块茎生长期光合特性和产量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2021, 43(6): 1 099-1 107. ZHONG Peng, MIAO Lili, LIU Jie, et al. Effects of densities and planting mode on photosynthetic characteristics and yield of *Cyperus esculentus* during tuber growth stage[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2021, 43(6): 1 099-1 107.
- [40] 安浩军, 李晓静, 翟晓玲, 等. 限水条件下不同类型冬小麦品种产量及光合特性的变化[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(10): 119-125. AN Haojun, LI Xiaojing, ZHAI Xiaoling, et al. Changes of yield and photosynthetic characteristics of different winter wheat varieties under water restriction[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(10): 119-125.
- [41] 谢锐, 董琦, 任永峰, 等. 油莎豆不同生育时期叶片光合特性变化规律分析[J]. *北方农业学报*, 2021, 49(6): 51-57. XIE Rui, DONG Qi, REN Yongfeng, et al. Analysis on changes in photosynthetic characteristics in leaves of *Cyperus esculentus* at different

- growth stages[J]. Journal of Northern Agriculture, 2021, 49(6): 51-57.
- [42] 王唯道, 刘小军, 田永超, 等. 不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7 053-7 060.  
WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7 053-7 060.
- [43] 胡德勇, 廖健程, 陈哲, 等. 控制灌溉增氧对超级稻生理生化特性及水分利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(5): 500-505, 516.  
HU Deyong, LIAO Jiancheng, CHEN Zhe, et al. Effects of controlled irrigation and oxygenation on physiological and biochemical characteristics and water use efficiency of super rice[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(5): 500-505, 516.
- [44] 汪顺生, 王康三, 孟鹏涛, 等. 不同灌水方式根层土壤水分动态及耗水规律试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(6): 9-13, 18.  
WANG Shunsheng, WANG Kangsan, MENG Pengtao, et al. Experimental research on the rules of water consumption and soil water dynamics about root layer of different irrigation methods[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(6): 9-13, 18.
- [45] 康书瑜, 庞春花, 张永清, 等. 干旱胁迫下外源水杨酸对藜麦生理效应及产量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(12): 151-157.  
KANG Shuyu, PANG Chunhua, ZHANG Yongqing, et al. Effects of spraying salicylic acid on drought-resistance and yield of quinoa[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(12): 151-157.
- [46] 刘秀花, 卢杰, 齐燕, 等. 水氮耦合对作物氮素吸收利用与迁移转化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 1-12.  
LIU Xiuhua, LU Jie, QI Yan, et al. The effects of water-nitrogen coupling on uptake and transformation of nitrogen in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 1-12.

## The effect of irrigation amounts on growth, yield and water use efficiency of different varieties of tigernut

YIN Zi<sup>1,2</sup>, WANG Xingpeng<sup>1,2,3,4,5</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, ZHAO Fengnian<sup>1,2</sup>, LI Mingfa<sup>6</sup>, WANG Hongbo<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. College of Water Hydraulic and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China; 2. Modern Agricultural Engineering Key Laboratory at Universities of Education Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Tarim University, Alaer 843300, China; 3. Western Agricultural Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, China; 4. Key Laboratory of Tarim Oasis Agriculture, Ministry of Education, Tarim University, Alaer 843300, China; 5. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832000, China; 6. Hydrology and Water Resources Management Center of the First Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Alaer 843300, China)

**Abstract:** 【Objective】 Tiger nut is a cash crop in southern Xinjiang and its production relies on irrigation. This paper presents the results of an experimental study on the effect of irrigation amounts on physiological traits, yield, and water use efficiency of different varieties of tiger nuts. 【Method】 The experiment studied two varieties: the Henan Round Grain (HY) and the Inner Mongolia Round Grain (NY), each irrigated by 18 mm (W1), 27 mm (W2), 36 mm (W3), and 45 mm (W4) of water, respectively. In each treatment, we measured the changes in soil water storage, plant height, tiller numbers, photosynthetic traits, yield, water consumption, and water use efficiency of the plants at different growing stages. 【Result】 Soil water storage and water consumption of both varieties increased with irrigation amount. Compared to W1, W4 increased average soil water storage and water consumption of the plants by 24.84% and 60.57% for the HY, and 18.46% and 55.61% for the NY, respectively. The plant height, tiller numbers, net photosynthesis ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), transpiration rate ( $Tr$ ) and the yield of HY increased with irrigation amount ( $P < 0.05$ ), peaking in W2 with increases of 24.60%, 15.11%, 28.14%, 34.86%, 40.49% and 13.92% compared to W1. Intercellular carbon content ( $C_i$ ) decreased with increasing irrigation amount. With the increase in irrigation amount, the plant height, tiller numbers,  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $Tr$ , and the yield of NY all increased first followed by a decline; their associated values in W2 were 26.07%, 20.26%, 19.69%, 38.38%, 44.92% and 20.83% higher than those in W1. On average,  $C_i$  decreased with irrigation amount, being lowest in W2. Water use efficiency and irrigation water use efficiency of both varieties decreased with irrigation amount. Principal component analysis showed the net photosynthetic rate and water use efficiency can be used as indicators for variety selection. 【Conclusion】 The optimal irrigation amounts for the varieties HY and NY are 45 mm and 27 mm respectively, which can promote healthy growth, improve yields, and enhance water use efficiency of the plants.

**Key words:** *Cyperus esculentus* L; irrigation quota and variety; growth physiology; yield; water use efficiency

责任编辑: 赵宇龙