

文章编号: 1672-3317(2023)10-0023-09

阴山北麓向日葵需水规律及水氮耦合效应研究

张婷婷¹, 段玉^{1*}, 张君¹, 安昊¹, 梁俊梅¹, 范霞², 韩振勇², 吴胜³

(1.内蒙古自治区农牧业科学院 资源环境与可持续发展研究所, 呼和浩特 010031;

2.呼和浩特市赛罕区农牧业技术推广中心, 呼和浩特 010020;

3.内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010020)

摘要: 【目的】明确向日葵需水规律, 提高水氮耦合效应。【方法】采用田间小区试验, 设定3个灌水量, 分别为雨养W0、补灌W1(67.5 mm)和常规灌溉W2(135 mm), 3个施氮水平, 分别为N0(不施氮)、推荐施氮N1(135 kg/hm²)、过量施氮N2(270 kg/hm²), 研究水氮耦合对向日葵产量、耗水量、水分利用效率、肥料利用率、水氮耦合效应的影响。【结果】随着灌水量的增加向日葵的产量、耗水量和氮肥利用率也增加, 随着施氮量的增加向日葵耗水量也增加, N1处理的产量和氮肥利用率显著高于N2处理; W2N1、W2N2、W1N1处理的籽实产量较高; 灌水量和施氮量对向日葵籽实产量和耗水量的交互效应显著。灌水量对向日葵籽实粗脂肪量影响较小, 施氮量增加向日葵籽实的粗脂肪量减少。灌水量增加籽实的不饱和脂肪酸比例增加, 优化施氮可增加籽实不饱和脂肪酸量。【结论】阴山北麓向日葵适宜的施肥灌水模式为补灌量159.2~177.1 mm, 施氮量166~218.3 kg/hm², 12叶一现蕾期是需水需肥关键期, 应保证该时期水肥供应。

关键词: 向日葵; 水氮耦合; 产量; 耗水规律; 水分利用效率; 氮肥利用效率

中图分类号: S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022624

OSID:



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 Tingting, DUAN Yu, ZHANG Jun, 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.

0 引言

【研究意义】向日葵是主要的油料作物, 2020年种植面积达90万hm², 总产量为238万t, 全球排名第五, 种植面积和总产占全球的3%和5%^[1]。内蒙古是我国向日葵的主要产区, 播种面积和产量约占全国的1/2。阴山北麓旱作区是内蒙古向日葵的新型产区, 年播种面积近15万hm²^[2]。该地区气候干旱, 年降水量不足400 mm, 且集中于7、8、9月, 加之没有过境河流, 主要采用抽取地下水灌溉^[3-4], 水资源短缺已成为限制该地区农业发展的主要因素^[5]。为追求高产, 种植户过量灌溉, 灌溉频率高, 灌水利用效率仅1 kg/m³左右, 灌溉用水利用率为40%~60%, 水资源浪费严重, 地下水严重超采^[6]。同时, 盲目追施氮肥现象也比较普遍, 氮肥利用率30%左右, 迫切需要明确向日葵的需水规律, 优化水肥资源合理配置,

使灌溉补水追肥与作物需水需肥相协调, 既节约水肥资源, 又能保证向日葵正常生长获得较高产量^[7]。实现水肥资源高效利用和环境友好的协同提升, 对于科学运用水肥资源, 保证产业的可持续发展意义重大。

【研究进展】水、肥是影响作物干物质积累关键因素^[8], 水分亏缺造成向日葵减产所导致的损失可能超过其他因素导致减产所造成的损失总和^[9]。氮素主要通过影响群体叶面积指数和光能转运效率来影响干物质积累过程^[10]。施肥可以促进作物对水分的吸收, 适量的肥料投入是提高水分利用效率的重要途径^[11-12]。灌溉也可以促进作物对肥料的吸收, 提高肥料利用效率^[13]。在一定的水肥范围内, 二者存在显著的交互效应, 水肥对产量有明显的正效应^[14-15]。灌溉处理向日葵的叶面积指数、地上生物量、花盘直径和产量均明显高于不灌溉处理^[16]。在不同区域、不同耕作和水肥条件的影响下, 施用氮肥的增产效果也有差异, 施氮的农学效率为2.57~26.00 kg/kg^[17-18]。水肥调控对作物生长发育有重要影响, 施用氮肥后向日葵的株高、根长、花盘直径、叶面积、叶绿素量、籽实和秸秆产量均较不施氮肥处理增加^[19-20]。苗期中度水分调控、成熟期轻度水分调控处理品质最优, 其粗

收稿日期: 2022-11-08 修回日期: 2023-05-25 网络出版日期: 2023-10-17

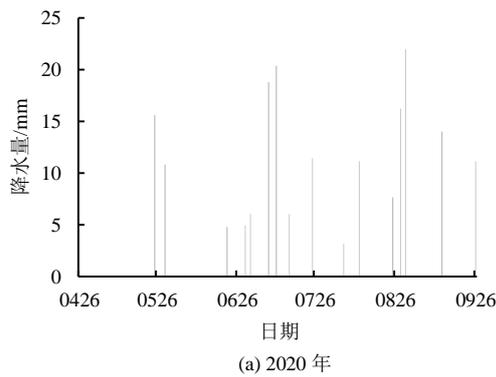
基金项目: 内蒙古自治区科技重大项目(2020ZD0005); 国家现代农业产业技术体系(CARS-14)

作者简介: 张婷婷(1989-), 女, 博士, 主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail: 913077139@qq.com

通信作者: 段玉(1963-), 男, 内蒙古人, 研究员, 主要从事植物营养与施肥的研究。E-mail: duanyu63@aliyun.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

脂肪量与粗蛋白量较充分灌溉处理分别显著增加^[21]。随着灌溉量的减少,籽实产量和含油量呈下降趋势,其中油酸量增加,棕榈酸、硬脂酸和亚油酸量减少^[22]。水肥管理受气候、土壤条件以及栽培管理的影响,不同区域不同水氮耦合效应差异较大。【切入点】目前有关阴山北麓向日葵需水规律、水氮耦合效应的研究还鲜见报道。【拟解决的关键问题】为此,在内蒙古武川县进行了不同灌水、施氮水平的田间试验,探索该地区不同水分和氮素用量下的水分需求规律、水氮利用效率、水氮耦合效应等,为该地区向日葵合理的水肥调控提供理论依据。



1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地属于阴山北麓旱作区,年平均降水量 350 mm 左右,大多集中在 7—9 月。多年平均水面蒸发量 1 200~1 800 mm,海拔 1 500 m 左右,年均气温为 2 ℃,年平均日照时间为 3 000 h,年均有效积温($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) 2 200 ℃,无霜期 105 d,属于典型的大陆性季风气候。2020 年和 2021 年生育期降水量分别为 184、165 mm,2020 年向日葵生育期降水量基本正常,但 7 月底—8 月初干旱严重,2021 年生育期降水量偏少,属于干旱年份,具体降水量见图 1。

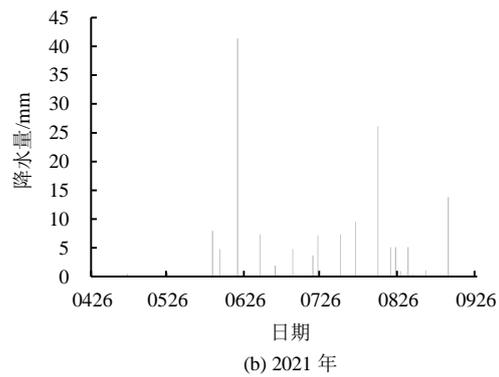


图 1 生育期降水量

Fig.1 Precipitation during the growth period

1.2 试验地概况

试验于 2020—2021 年在内蒙古自治区农牧业科学院武川旱作试验站进行,2020 年试验地块在试验站北滩,肥力相对较高,2021 年试验地块在试验站东,肥力相对较低,0~20 cm 土壤养分状况见表 1。

试验前测定了土壤体积质量及田间持水率等(表 2),试验地 0~100 cm 土壤体积质量为 1.35~1.86 g/cm³;田间持水率为 11.03%~30.86%;田间饱和含水率为 13.43%~35.27%。

表 1 供试土壤基本化学性状

Table 1 Basic chemical properties of the tested soil

| 年份 | pH 值 | 有机质量/(g kg ⁻¹) | 硝态氮量/(mg kg ⁻¹) | 铵态氮量/(mg kg ⁻¹) | 速效磷量/(mg kg ⁻¹) | 速效钾量/(mg kg ⁻¹) |
|------|------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 2020 | 8.2 | 13.2 | 10.8 | 3.0 | 13.2 | 120.5 |
| 2021 | 7.9 | 9.6 | 7.5 | 3.8 | 24.3 | 65.3 |

表 2 土壤体积质量及田间持水率和饱和含水率

Table 2 Soil bulk density and field water capacity and saturation moisture content

| 土层深度/cm | 2020 年 | | | | 2021 年 | | | |
|---------|------------------------------|---------|---------|------------------|------------------------------|---------|---------|--------------|
| | 土壤体积质量/(g cm ⁻³) | 田间持水率/% | 饱和含水率/% | 备注 | 土壤体积质量/(g cm ⁻³) | 田间持水率/% | 饱和含水率/% | 备注 |
| 0~10 | 1.38 | 30.86 | 35.27 | 0~20 cm 耕层, | 1.35 | 26.95 | 28.27 | 0~20 cm 耕层, |
| 10~20 | 1.69 | 21.11 | 22.16 | 有根毛,土壤疏松。 | 1.56 | 21.12 | 22.16 | 有根毛,土壤疏松。 |
| 20~30 | 1.73 | 18.51 | 20.39 | 20~40 cm 灰色黏土, | 1.73 | 20.43 | 20.59 | 20~40 cm |
| 30~40 | 1.60 | 21.38 | 24.41 | 较紧实。 | 1.86 | 20.58 | 21.31 | 灰色黏土,较紧实。 |
| 40~50 | 1.73 | 15.86 | 19.02 | 40~70 cm 土壤红色黏土, | 1.78 | 18.83 | 19.02 | 40~70 cm 土壤 |
| 50~60 | 1.76 | 16.04 | 18.62 | 较紧实。 | 1.77 | 17.03 | 18.12 | 灰白色黏土,较紧 |
| 60~70 | 1.73 | 16.14 | 18.60 | | 1.73 | 16.14 | 17.35 | 实。 |
| 70~80 | 1.71 | 11.03 | 13.66 | 70~80 cm 粗沙层 | 1.71 | 14.13 | 15.16 | 70~80 cm 粗沙层 |
| 80~90 | 1.83 | 11.92 | 15.65 | 80~100 cm 土壤灰绿色, | 1.82 | 11.92 | 13.43 | 80~100 cm |
| 90~100 | 1.50 | 25.06 | 28.40 | 黏土 | 1.78 | 25.06 | 25.55 | 土壤灰绿色,黏土 |

1.3 试验设计

供试作物为向日葵,2020年选用品种为SH361,2021年选用了生育期略短但当年大量种植的品种龙葵杂27。采用裂区试验设计,主处理为3个水分处理,分别为:雨养处理(不灌水W0);补灌W1处理,补水3次共67.5 mm,其中12叶期22.5 mm,现蕾期22.5 mm,盛花期22.5 mm;常规灌溉W2处理,按当地农民习惯灌水时间和灌水量,补水6次共135 mm,即10~12叶期2次,每次22.5 mm,现蕾一盛花期2次,每次22.5 mm,盛花期1次22.5 mm,终花期1次22.5 mm。副处理为3个施氮量,分别为不施氮(N0),推荐施氮量N1(135 kg/hm²(由向日葵养分专家系统确定^[23])),2倍推荐施氮量(N2,270 kg/hm²)。磷肥和钾肥分别为重过磷酸钙、氯化钾,P₂O₅和K₂O施用量按照养分专家系统推荐用量分别为70 kg/hm²和120 kg/hm²,其中磷肥全部作为基肥施用,钾肥的1/2作为种肥基肥,1/2在现蕾期追施。试验设计见表3。小区面积为4.8 m×7.5 m=36 m²,随机排列,每个处理3次重复。

试验采用膜下滴灌,平作覆膜种植,地膜宽度为

表4 向日葵灌水时间及灌水量

Table 4 Irrigation time and irrigation amount of sunflower

| 灌水时间 | 12叶期(0702) | 现蕾期(0722) | 盛花期(0806) | 终花期(0826) | 灌浆期(0917) | 合计 |
|---------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
| 补充灌溉/mm | 22.5 | 22.5 | 22.5 | 0 | 0 | 67.5 |
| 常规灌溉/mm | 45.0 | 45.0 | 22.5 | 22.5 | 0 | 135 |

1.4 计算方法

1.4.1 土壤样品

在向日葵播种后、12叶期(7月2日)、现蕾期(7月22日)、开花期(8月6日)、终花期(8月26日)、灌浆期(9月17日),分别取0~100 cm土层土壤,每10 cm为1层,采用烘干法测量土壤含水率。

土壤储水量(W , mm): $W=0.1 \times r \times v \times h$, (1)
式中: r 为土壤含水率(%); v 为土壤体积质量(g/cm³); h 为土层深度(cm);0.1为换算系数。

耗水量由水量平衡公式计算,由于试验地比较平坦,地下水埋深较深,当地大暴雨较少,不考虑地表径流和地下水补给等因素。

耗水量(ET , mm): $ET=I+R+\Delta W$, (2)
式中: I 为灌溉定额(mm); R 为生育期内降水量(mm); ΔW 为生育期湿润层(0~100 cm)土壤储水量变化(mm)。

水分利用效率(WUE , kg/m³)计算式为:

$$WUE=Y/ET, \quad (3)$$

式中: Y 为籽粒产量(kg/hm²); ET 为作物耗水量(mm)。

灌水生产效率是指单位体积灌溉水增加的作物

70 cm,厚度为0.01 mm,膜上种植2行,行距为40 cm,膜外行距为80 cm,株距为60 cm,种植密度为22 500株/hm²。每膜铺设1根滴灌带,滴灌带采用贴片式,滴头间距为30 cm,出水量为1.8 L/h。每个小区安装1个水表,计量小区用水量。试验设置的灌水时间和灌水量主要根据向日葵生育期和当地农民习惯确定,具体灌溉时间及灌水量见表4。为了保证出苗,播种后全部用微喷带喷灌1次,喷灌量20 mm。

表3 试验设计

Table 3 Experimental design

| 处理 | 补灌量/mm | 纯氮施用量/(kg hm ⁻²) |
|------|--------|------------------------------|
| W0N0 | 0 | 0 |
| W0N1 | 0 | 135 |
| W0N2 | 0 | 270 |
| W1N0 | 67.5 | 0 |
| W1N1 | 67.5 | 135 |
| W1N2 | 67.5 | 270 |
| W2N0 | 135 | 0 |
| W2N1 | 135 | 135 |
| W2N2 | 135 | 270 |

产量。

灌水生产效率(WUE_i , kg/m³)=(灌水处理产量-不灌水处理产量)/灌水量。 (4)

1.4.2 植株样品

收获时选取小区中间2膜4行向日葵进行测产,计算不同处理产量。每个处理取样3株,将茎秆、叶片、花盘和籽粒分开分别切碎,105℃下杀青30 min,然后在75℃下烘干至恒质量,测定茎秆、叶片、花盘和籽实的干质量,粉碎后测定各器官的含氮量,各器官的干质量乘以含氮量即为该器官的吸氮量,茎秆、叶片、花盘和籽实吸氮量之和为植株地上部吸氮量。

氮肥利用率(NUE , %)=(施氮区吸氮量-不施氮区吸氮量)/施氮量×100。 (5)

向日葵籽粒品质测定:粗脂肪量采用索氏抽取法测定。油酸、亚油酸、硬脂酸和棕榈酸采用气相色谱-质谱联用的方法,测定粗脂肪中混合脂肪酸的组成及含量。

1.5 数据分析

采用SPSS 25进行数据分析,并采用Duncan法进行多重比较,数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对向日葵耗水指标、产量和水分利用效率的影响

由表 5 可知,随着灌水量的增加向日葵的产量和耗水量也增加, W0、W1、W2 处理的 2 a 平均产量分别为 2 978.8、3 524.2、3 794.4 kg/hm²,且三者差

表 5 水氮耦合对向日葵总耗水量、产量、水分利用效率和灌水生产效率的影响

Table 5 Effects of water and nitrogen coupling on sunflower yield, total water consumption WUE and WUE_i

| 处理 | 籽粒产量/(kg hm ⁻²) | | 总耗水量/mm | | 水分利用效率/(kg m ⁻³) | | 灌水生产效率/(kg m ⁻³) | | |
|------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|---------|------------------------------|----------|--------|
| | 2020 年 | 2021 年 | 2020 年 | 2021 年 | 2020 年 | 2021 年 | 2020 年 | 2021 年 | |
| W0N0 | 2 813.8 f | 2 985.7 e | 235.7 f | 200.1 g | 1.19 a | 1.49 a | - | - | |
| W0N1 | 2 919.8 e | 3 206.1 d | 247.3 e | 215.3 f | 1.18 ab | 1.49 a | - | - | |
| W0N2 | 2 874.4 ef | 3 073.3 e | 254.6 e | 226.1 f | 1.13 b | 1.36 c | - | - | |
| W1N0 | 3 220.1 d | 3 502.7 c | 286.3 d | 249.2 e | 1.12 b | 1.41 b | 0.60 c | 0.77 abc | |
| W1N1 | 3 521.1 b | 3 801.9 b | 340.9 c | 275.7 d | 1.03 c | 1.38 bc | 0.89 a | 0.88 ab | |
| W1N2 | 3 391.6 c | 3 707.7 b | 343.3 c | 289.0 c | 0.99 cd | 1.28 d | 0.77 ab | 0.94 a | |
| W2N0 | 3 344.4 c | 3 817.2 b | 347.1 c | 307.8 b | 0.96 de | 1.24 d | 0.39 d | 0.62 c | |
| W2N1 | 3 689.6 a | 4 102.5 a | 396.2 b | 343.4 a | 0.93 de | 1.19 e | 0.57 c | 0.66 c | |
| W2N2 | 3 762.1 a | 4 050.4 a | 416.3 a | 351.8 a | 0.90 e | 1.15 e | 0.67 bc | 0.72 bc | |
| W0 | 2 869.3 c | 3 088.4 c | 245.9 c | 213.8 c | 1.17 a | 1.45 a | - | - | |
| W1 | 3 377.6 b | 3 670.8 b | 323.5 b | 271.3 b | 1.05 b | 1.36 b | 0.75 a | 0.86 a | |
| W2 | 3 598.7 a | 3 990.0 a | 386.5 a | 334.4 a | 0.93 c | 1.20 c | 0.54 b | 0.67 b | |
| N0 | 3 126.1 b | 3 435.2 c | 289.7 c | 252.3 c | 1.09 a | 1.38 a | 0.49 b | 0.69 b | |
| N1 | 3 376.8 a | 3 703.5 a | 328.1 b | 278.1 b | 1.05 b | 1.35 b | 0.73 a | 0.77 ab | |
| N2 | 3 342.7 a | 3 610.5 b | 338.1 a | 289.0 a | 1.01 c | 1.26 c | 0.71 a | 0.83 a | |
| W | 359.9** | 1 642.3** | 1 174.1** | 1 345.5** | 113.1** | 242.9** | 33.3** | 19.9** | |
| F 值 | N | 47.6** | 145.9** | 154.6** | 131.0** | 15.7** | 55.0** | 16.7** | 3.5 ns |
| | W×N | 8.6** | 4.1* | 17.4** | 4.1* | 1.7 ns | 2.7 ns | 2.7 ns | 0.3 ns |

注 同列数值后不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$), *表示在 $P<0.05$ 水平差异显著, **表示在 $P<0.01$ 水平差异显著, 下同。

施氮量显著影响向日葵产量, N0 处理 2 a 产量均值最低为 3 280.6 kg/hm², 生育期平均耗水量为 271.0 mm, 平均水分利用效率为 1.24 kg/m³; N1 处理产量最高为 3 540.2 kg/hm², 生育期平均耗水量为 303.1 mm, 平均水分利用效率为 1.20 kg/m³; N2 处理平均产量次之, 为 3 476.6 kg/hm², 生育期平均耗水量为 313.5 mm, 平均水分利用效率为 1.14 kg/m³。

2020 年以补灌量 (W) 和施氮量 (N) 作为自变量, 向日葵籽实产量 (Y) 作为依变量, 其回归方程为: $Y=2 802.8+562.56W+303.91N-143.58W^2-142.45N^2+89.30W\times N$, $R^2=0.992$, 实际值与回归拟合值显著相关。对回归方程分别求 W 和 N 的偏导数并令其为 0, 可计算获得最高产量的 W 值和 N 值。经计算, 得到最高产量灌溉量为 171.3 mm, 施氮量为 251.4 kg/hm²。

2021 年以补灌量 (W) 和施氮量 (N) 作为自变量, 向日葵籽实产量 (Y) 作为依变量, 其回归方程为: $Y=2 976.9+677.59W+412.61N-131.58W^2-180.69N^2+36.41W\times N$, $R^2=0.999$, 实际值与回归拟合值显著相

关。对回归方程分别求 W 和 N 的偏导数并令其为 0, 可计算获得最高产量的 W 值和 N 值。经计算, 得到最高产量灌溉量为 187.1 mm, 施氮量为 191.8 kg/hm²。

以补灌量 (W) 和施氮量 (N) 作为自变量, 2 a 向日葵籽实产量均值 (Y) 作为依变量, 其回归方程为: $Y=2 889.9+620.08W+358.26N-137.58W^2-161.57N^2+62.85W\times N$, $R^2=0.998$, 实际值与回归拟合值显著相关。对回归方程分别求 W 和 N 的偏导数并令其为 0, 可计算获得最高产量的 W 值和 N 值。经计算, 得到最高产量对应的灌溉量为 177.1 mm, 施氮量为 218.6 kg/hm², 若氮按照 5 元/kg, 灌水按照 3 元/mm 计算, 经济最佳灌水量为 159.2 mm, 施氮量为 166 kg/hm²。

2.2 水分管理对向日葵耗水量、耗水强度和耗水模数的影响

由表 6 可知, W0 处理的全生育期耗水量为 213.8~245.8 mm, 平均耗水量为 229.8 mm; 耗水强度为 2.06~2.49 mm/d, 平均耗水强度为 2.32 mm/d。W1 处理的全生育期耗水量为 271.3~323.6 mm, 平均耗水

量为 297.4 mm；耗水强度为 2.61~3.26 mm/d，平均耗水强度为 3.01 mm/d。W2 处理的全生育期耗水量为 334.4 mm，平均耗水强度为 3.69 mm/d。

表6 水分管理对向日葵耗水量、耗水强度和耗水模数的影响

| 年份 | 指标 | 处理 | 播种—12 叶期 | 12 叶—现蕾期 | 现蕾—开花期 | 开花—灌浆期 | 灌浆—成熟期 | 总和/均值* |
|------|----------------------------|----|----------|----------|---------|--------|--------|--------|
| 2020 | 耗水量/mm | W0 | 49.9 b | 65.8 c | 54.4 c | 55.8 c | 19.9 c | 245.8 |
| | | W1 | 65.2 a | 86.1 b | 67.3 b | 72.6 b | 32.4 b | 323.6 |
| | | W2 | 67.0 a | 98.7 a | 79.4 a | 93.7 a | 47.8 a | 386.5 |
| | 耗水强度/(mm d ⁻¹) | W0 | 1.8 b | 3.3 b | 3.6 b | 2.8 c | 0.9 c | 2.49 |
| | | W1 | 2.4 a | 4.3 a | 4.5 ab | 3.6 b | 1.5 b | 3.26 |
| | | W2 | 2.5 a | 4.9 a | 5.3 a | 4.7 a | 2.2 a | 3.91 |
| | 耗水模数/% | W0 | 20.3 a | 26.8 a | 22.1 a | 22.7 a | 8.1 a | 100 |
| | | W1 | 20.1 a | 26.6 a | 20.8 a | 22.4 a | 10.0 a | 100 |
| | | W2 | 17.3 a | 25.5 a | 20.6 a | 24.2 a | 12.4 a | 100 |
| 2021 | 耗水量/mm | W0 | 32.4 b | 120.5 c | 29.6 c | 17.6 c | 13.7 b | 213.8 |
| | | W1 | 42.7 a | 137.4 b | 49.0 b | 26.4 b | 15.7 b | 271.3 |
| | | W2 | 41.6 a | 152.6 a | 77.8 a | 39.7 a | 22.6 a | 334.4 |
| | 耗水强度/(mm d ⁻¹) | W0 | 1.20 a | 6.02 b | 1.97 c | 0.88 c | 0.62 b | 2.06 |
| | | W1 | 1.58 a | 6.87 ab | 3.27 b | 1.32 b | 0.71 b | 2.61 |
| | | W2 | 1.54 a | 7.63 a | 5.19 a | 1.99 a | 1.03 a | 3.22 |
| | 耗水模数/% | W0 | 15.2 a | 56.3 a | 13.8 c | 8.2 c | 6.4 c | 100 |
| | | W1 | 15.7 a | 50.7 ab | 18.1 b | 9.7 b | 5.8 b | 100 |
| | | W2 | 12.5 a | 45.6 b | 23.3 a | 11.9 a | 6.8 a | 100 |
| 平均 | 耗水量/mm | W0 | 41.2 b | 93.2 c | 42.0 c | 36.7 c | 16.8 c | 229.8 |
| | | W1 | 53.9 a | 111.8 b | 58.1 b | 49.5 b | 24.0 b | 297.4 |
| | | W2 | 54.3 a | 125.6 a | 78.6 a | 66.7 a | 35.2 a | 360.5 |
| | 耗水强度/(mm d ⁻¹) | W0 | 1.52 b | 4.66 c | 2.80 c | 1.84 c | 0.76 c | 2.32 |
| | | W1 | 2.00 a | 5.59 b | 3.88 b | 2.48 b | 1.09 b | 3.01 |
| | | W2 | 2.01 a | 6.28 a | 5.24 a | 3.33 a | 1.60 a | 3.69 |
| | 耗水模数/% | W0 | 17.7 a | 41.6 a | 18.0 b | 15.5 b | 7.2 b | 100 |
| | | W1 | 17.9 a | 38.6 b | 19.4 ab | 16.1 b | 7.9 b | 100 |
| | | W2 | 14.9 b | 35.6 c | 21.9 a | 18.1 a | 9.6 a | 100 |

注 耗水量和耗水模数是总和，耗水强度是均值。

由表 6 和图 2 可知，12 叶—现蕾期向日葵生长最快，也是向日葵需要水分养分最多时期，此时耗水量最大，W0、W1、W2 处理的耗水强度分别为 4.66、5.59、6.28 mm/d，耗水模数分别为 41.6%、38.6%、35.6%。

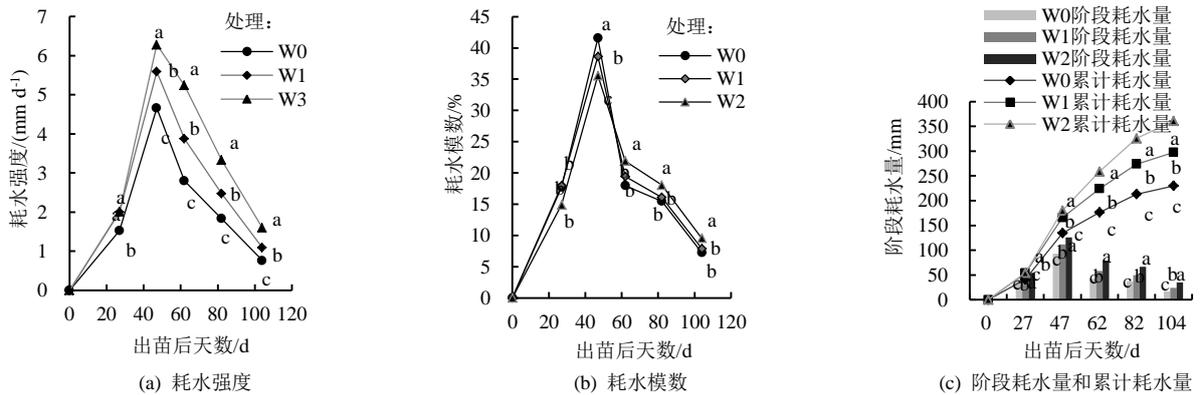


图2 水分管理对向日葵耗水量、耗水强度和耗水模数的影响

Fig.2 Effect of water management on water consumption, water consumption intensity and water consumption modulus of sunflower

2.3 施氮量对向日葵耗水量、耗水强度和耗水模数的影响

由表 7 可知，随着施氮量的增加向日葵耗水量也增加，N0 处理全生育期耗水量为 252.3~289.7 mm，平均耗水量为 271.0 mm；N1 处理全生育期耗水量为 278.1~328.1 mm，平均耗水量为 303.1 mm；N2 处理

全生育期耗水量为 289.0~338.1 mm，平均耗水量为 313.5 mm。耗水强度随施氮量增加而增加，N0、N1、N2 处理的全生育期平均耗水强度分别为 2.61、2.91、3.01 mm/d。12 叶—现蕾期是向日葵耗水量、耗水强度和耗水模数最大时期，N0、N1、N2 处理的耗水量分别为 102.7、113.3、114.6 mm，耗水强度分别为 5.13、

5.66、5.73 mm/d, 耗水模数分别为 37.9%、37.4%、36.6%。

2.4 水氮耦合对向日葵生物产量、氮素吸收和氮肥利用率的影

响

由表 8 可知, 随着灌水量增加向日葵秸秆产量

(茎秆、叶片、花盘之和) 也增加, 不同施氮量处理产量表现为 W2 处理>W1 处理>W0 处理, 且三者之间差异显著。施氮量对秸秆产量也有显著影响, 2020 年 N2 处理的秸秆产量最高, 但与 N1 处理差异不显著; 2021 年 N1 处理的秸秆产量最高。

表7 施氮量对向日葵耗水量、耗水强度和耗水模数的影响

Table 7 Effects of nitrogen rate on water consumption, water consumption intensity and water consumption modulus of sunflower

| 年份 | 指标 | 处理 | 播种—12 叶期 | 12 叶—现蕾期 | 现蕾—开花期 | 开花—灌浆期 | 灌浆—成熟期 | 总和/均值 |
|------|----------------------------|----|----------|----------|---------|---------|--------|-------|
| 2020 | 阶段耗水量/mm | N0 | 60.7 a | 76.8 a | 62.2 b | 63.6 c | 26.3 b | 289.7 |
| | | N1 | 60.8 a | 85.2 a | 67.6 ab | 78.2 b | 36.3 a | 328.1 |
| | | N2 | 60.5 a | 88.6 a | 71.4 a | 80.2 a | 37.4 a | 338.1 |
| | 耗水强度/(mm d ⁻¹) | N0 | 2.25 a | 3.84 b | 4.15 a | 3.18 c | 1.20 b | 2.79 |
| | | N1 | 2.25 a | 4.26 a | 4.51 a | 3.91 b | 1.65 a | 3.16 |
| | | N2 | 2.24 a | 4.43 a | 4.76 a | 4.01 a | 1.70 a | 3.25 |
| | 耗水模数/% | N0 | 20.9 a | 26.5 a | 21.5 a | 22.0 b | 9.1 b | 100 |
| | | N1 | 18.5 a | 26.0 a | 20.6 a | 23.8 a | 11.1 a | 100 |
| | | N2 | 17.9 a | 26.2 a | 21.1 a | 23.7 a | 11.1 a | 100 |
| 2021 | 阶段耗水量/mm | N0 | 39.8 a | 128.5 b | 46.5 b | 23.6 bc | 14.0 c | 252.3 |
| | | N1 | 37.7 a | 141.4 a | 54.3 a | 27.4 b | 17.4 b | 278.1 |
| | | N2 | 39.3 a | 140.7 a | 55.6 a | 32.9 a | 20.6 a | 289.0 |
| | 耗水强度/(mm d ⁻¹) | N0 | 1.47 a | 6.43 a | 3.10 b | 1.18 c | 0.64 c | 2.43 |
| | | N1 | 1.40 a | 7.07 a | 3.62 a | 1.37 b | 0.79 b | 2.67 |
| | | N2 | 1.46 a | 7.03 a | 3.70 a | 1.64 a | 0.94 a | 2.78 |
| | 耗水模数/% | N0 | 15.8 a | 50.9 a | 18.4 b | 9.3 b | 5.5 c | 100 |
| | | N1 | 13.5 a | 50.8 a | 19.5 a | 9.8 ab | 6.2 b | 100 |
| | | N2 | 13.6 a | 48.7 a | 19.2 a | 11.4 a | 7.1 a | 100 |
| 均值 | 阶段耗水量/mm | N0 | 50.2 a | 102.7 b | 54.4 b | 43.6 b | 20.2 c | 271.0 |
| | | N1 | 49.2 a | 113.3 a | 61.0 ab | 52.8 ab | 26.9 b | 303.1 |
| | | N2 | 49.9 a | 114.6 a | 63.5 a | 56.5 a | 29.0 a | 313.5 |
| | 耗水强度/(mm d ⁻¹) | N0 | 1.86 a | 5.13 b | 3.62 b | 2.18 b | 0.92 c | 2.61 |
| | | N1 | 1.82 a | 5.66 a | 4.06 ab | 2.64 ab | 1.22 b | 2.91 |
| | | N2 | 1.85 a | 5.73 a | 4.23 a | 2.83 a | 1.32 a | 3.01 |
| | 耗水模数/% | N0 | 18.5 a | 37.9 a | 20.1 a | 16.1 c | 7.4 c | 100 |
| | | N1 | 16.2 b | 37.4 a | 20.1 a | 17.4 b | 8.9 b | 100 |
| | | N2 | 15.9 b | 36.6 b | 20.2 a | 18.0 a | 9.2 a | 100 |

表8 水氮耦合对向日葵秸秆产量、地上部吸氮量和氮肥利用率的影响

Table 8 Effects of water and nitrogen coupling on sunflower straw yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency

| 处理 | 秸秆产量/(kg hm ⁻²) | | | 地上部吸氮量/(kg hm ⁻²) | | | 氮肥利用率/% | | |
|------|-----------------------------|------------|---------|-------------------------------|----------|-------|---------|--------|------|
| | 2020 年 | 2021 年 | 平均 | 2020 年 | 2021 年 | 平均 | 2020 年 | 2021 年 | 平均 |
| W0N0 | 6 393.1 d | 3 625.2 e | 5 009.1 | 106.2 h | 92.4 e | 99.3 | - | - | - |
| W0N1 | 7 145.6 cd | 4 668.2 de | 5 906.9 | 148.0 e | 131.1 c | 139.5 | 30.9 | 28.6 | 29.8 |
| W0N2 | 7 856.5 bc | 4 554.2 de | 6 205.4 | 155.3 e | 127.2 cd | 141.3 | 18.2 | 12.9 | 15.5 |
| W1N0 | 7 056.0 cd | 5 524.3 cd | 6 290.1 | 119.1 g | 116.1 d | 117.6 | - | - | - |
| W1N1 | 8 535.1 b | 7 009.5 b | 7 772.3 | 173.3 d | 168.5 b | 170.9 | 40.1 | 38.8 | 39.5 |
| W1N2 | 8 852.2 b | 5 538.2 cd | 7 195.2 | 185.9 c | 164.3 b | 175.1 | 24.7 | 17.8 | 21.3 |
| W2N0 | 8 858.1 b | 6 536.8 bc | 7 697.5 | 134.8 f | 130.2 e | 132.5 | - | - | - |
| W2N1 | 9 956.5 a | 8 509.5 a | 9 233.0 | 196.5 b | 196.5 a | 196.5 | 45.7 | 49.1 | 47.4 |
| W2N2 | 10 318.8 a | 7 550.1 ab | 8 934.4 | 213.5 a | 199.1 a | 206.3 | 29.1 | 25.5 | 27.3 |

水分管理对植株地上部吸氮量有显著影响, 随着灌水量的增加地上部吸氮量也增加, W1、W2 处理的地上部吸氮量较 W0 处理平均增加 22.0%和 40.8%。施氮量对地上部吸氮量也有显著影响, 随着施氮量的增加地上部吸氮量也增加。N1、N2 处理的地上部吸氮量较 N0 处理增加 45.5%和 49.6%。

随着灌水量增加氮肥利用率提高, 雨养处理 N1、N2 施氮量下的氮肥利用率分别为 29.8%和 15.5%, 补灌处理 N1、N2 施氮量下的氮肥利用率分别为 39.5%和 21.3%, 常规灌溉处理 N1、N2 施氮量下的氮肥利用率分别为 47.4%和 27.3%。过量施氮导致氮肥利用率降低。

2.5 水氮耦合对向日葵籽实粗脂肪量和脂肪组成的影响

向日葵是油料作物，脂肪量和脂肪酸组成是其主要营养指标。由表 9 可知，灌溉量对向日葵籽实的粗脂肪量影响较小，W0 处理粗脂肪量为 21.9%~25.8%；W1 处理粗脂肪量为 21.5%~26.5%，较 W0 处理增加 0.2%；W2 处理的粗脂肪量为 21.5%~26.1%。随着施氮量的增加向日葵籽实的粗脂肪量减少，N0 处理的粗脂肪量为 22.1%~26.7%；N1 处理的粗脂肪量为

22.0%~26.1%，较 N0 处理减少了 0.3%；N2 处理的粗脂肪量为 20.9%~25.5%，较 N0 处理减少了 1.2%，过量施氮粗脂肪量降低。

灌水量和施氮量对棕榈酸、硬脂酸、亚油酸量影响很小，各处理之间差异不大。随着灌水量的增加油酸量略有增加。优化水肥管理可以增加不饱和脂肪酸比例（油酸+亚油酸），改善水分条件可导致不饱和脂肪酸比例有所增加，主要是油酸量增加。

表9 水氮耦合对向日葵粗脂肪量和脂肪酸组成的影响

Table 9 Effects of water and nitrogen coupling on crude fat content and fatty acid composition of sunflower %

| 处理 | 2020 年 | | | | | 2021 年 | | | | |
|------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| | 粗脂肪量 | 棕榈酸 | 硬脂酸 | 油酸 | 亚油酸 | 粗脂肪量 | 棕榈酸 | 硬脂酸 | 油酸 | 亚油酸 |
| W0N0 | 22.5 a | 7.4 a | 0.5 a | 13.0 a | 79.0 a | 26.4 c | 6.7 a | 7.1 a | 16.1 a | 70.1 a |
| W0N1 | 21.8 d | 7.5 a | 0.5 a | 13.0 a | 79.0 a | 25.9 d | 6.6 a | 6.9 a | 16.1 a | 70.4 a |
| W0N2 | 21.4 e | 7.7 a | 0.5 a | 12.6 a | 79.2 a | 25.1 f | 6.6 a | 7.3 a | 16.1 a | 70.0 a |
| W1N0 | 22.0 c | 7.7 a | 0.4 a | 13.2 a | 78.7 a | 27.3 a | 6.6 a | 7.2 a | 16.7 a | 69.5 a |
| W1N1 | 22.2 b | 7.6 a | 0.3 a | 13.2 a | 78.9 a | 26.6 b | 6.4 a | 7.0 a | 16.2 a | 70.3 a |
| W1N2 | 20.4 g | 7.8 a | 0.6 a | 13.0 a | 78.6 a | 25.5 e | 6.5 a | 7.2 a | 15.9 a | 70.4 a |
| W2N0 | 21.8 d | 7.7 a | 0.5 a | 12.8 a | 79.0 a | 26.5 b | 6.4 a | 7.3 a | 16.6 a | 69.7 a |
| W2N1 | 22.0 c | 7.4 a | 0.4 a | 13.3 a | 78.9 a | 25.9 d | 6.4 a | 7.2 a | 16.4 a | 70.0 a |
| W2N2 | 20.8 f | 7.6 a | 0.4 a | 13.8 a | 78.1 a | 25.8 d | 6.3 a | 7.1 a | 16.4 a | 70.2 a |

3 讨论

3.1 水分管理对向日葵产量、耗水指标和水氮利用效率的影响

阴山北麓地区气候干旱，水资源严重缺乏，水是限制该地区作物生长和可持续发展的最主要因素^[16]。然而过量灌溉导致作物的水分利用效率降低^[26]。研究表明，雨养、补充灌溉和常规灌溉处理的向日葵产量差异极显著，随着补灌量的增加，灌水生产效率下降，补充灌溉的灌水生产效率更高。向日葵根系发达，吸收水分养分能力强，土壤含水率达到田间持水率的 60%~70% 就可以满足向日葵正常生长的水分需求，达到田间持水率的 80% 时，土壤水分过高不利于向日葵的正常生长^[27]。适时灌溉是保证向日葵高产的前提，裴福军等^[24]在白城地区研究表明，向日葵苗期、蕾期需水相对少些，而开花、灌浆期需水较多，此时段处于 8 月上旬，是白城地区向日葵需水关键期；云文丽等^[25]在河套灌区的研究表明，现蕾—开花期植株需水强度达到最大，是向日葵灌溉的关键期；杨松等^[26]研究表明，食用向日葵在出苗后 30 d、现蕾期、开花期、灌浆期浇水较为适宜。本研究表明，12 叶—现蕾期（7 月中下旬）向日葵耗水强度最高，是向日葵需水关键期，这可能与 2020、2021 年阴山北麓 7 月中下旬降水相对较少有关。

3.2 施氮量对向日葵产量、耗水指标和水氮利用效率的影响

施氮量不同向日葵的产量、耗水量和水分利用效率有较大差异^[27]，合理施用氮肥可以增加秸秆产量和生物产量，从而获得高产^[28]。本研究表明，优化施氮（N1）处理的秸秆产量和籽实产量均最高。施肥可以促进向日葵对水分的吸收，优化施肥可提高水分利用效率，此时水肥对产量和耗水量有明显的正效应^[13]。随着灌水量的增加施肥效应提高，严重缺水条件下，增施氮肥会造成减产，最佳施氮量因灌溉量的增加而增加，要根据灌水量调节施氮量，进而提高水肥利用效率，实现增产增效^[29]。

3.3 水氮管理对向日葵籽实粗脂肪量和脂肪酸组成的影响

本研究表明，灌溉处理对向日葵籽实粗脂肪量影响较小，灌水量增加向日葵籽实粗脂肪量表现为先增加后降低，但各灌水处理之间差异不显著。适时适量灌溉可以促进脂肪合成^[30]，水分条件的改善可使油酸量增加，从而增加不饱和脂肪酸的比例。严重的水分胁迫油酸、亚油酸、亚麻酸和棕榈酸量显著降低，降低不饱和脂肪酸的比例^[31]。水分亏缺是影响作物生长和产量的一种常见环境因子，采取适宜的水分管理措施，以减少油料作物中与干旱有关的问题^[32]。过量施氮对籽实脂肪积累不利，随着施氮量的增加向日葵籽实的粗脂肪量减少，优化施肥可以增加不饱和脂肪酸

量, 过量施氮对不饱和脂肪酸的合成不利^[33]。

4 结论

1) 阴山北麓向日葵适宜的施肥灌水模式为补灌量 159.2~177.1 mm, 施氮量 166~218.3 kg/hm², 12 叶—现蕾期是需水需肥关键期应保证水肥供应。

2) 随着灌水量增加向日葵秸秆产量显著增加, 优化施氮量处理的秸秆产量最高。植株吸氮量随着灌水量和施氮量的增加而增加。随着灌水量增加氮素利用率也增加, 随着施氮量增加氮肥利用效率降低。

3) 灌水量对向日葵籽实的粗脂肪量影响较小, 随着施氮量增加向日葵籽实的粗脂肪量降低, 适宜的水氮用量可以增加粗脂肪量和不饱和脂肪酸的比例。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 联合国粮农组织. 世界向日葵籽种植/产量 [DB]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/QC/visualize>, 2022-03-22.
- [2] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
Department of Rural Socio-economic Survey, National Bureau of Statistics. China Rural Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [3] 李为萍. 盐渍化灌区油葵品质对水-肥-盐耦合的动态响应效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
LI Weiping. Dynamic response of sunflower quality on the soil condition of water-fertilizer-salt coupling in the salinization district[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [4] 何玲, 何文寿, 任然, 等. 宁夏干旱带油用向日葵水肥耦合效应研究[J]. 节水灌溉, 2015(12): 16-20.
HE Ling, HE Wenshou, REN Ran, et al. Effect of water-fertilizer coupling on oilseed sunflower in the drought region of Ningxia[J]. Water Saving Irrigation, 2015(12): 16-20.
- [5] 王璐, 张恒嘉. 膜下滴灌对油葵产量及水分利用的影响研究概况[J]. 水利规划与设计, 2019(9): 83-86.
WANG Lu, ZHANG Hengjia. Effect of drip irrigation under film on oil sunflower yield and water utilization: A review[J]. Water Resources Planning and Design, 2019(9): 83-86.
- [6] 李萍, 魏晓妹. 气候变化对灌区农业需水量的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 81-85.
LI Ping, WEI Xiaomei. Impacts of climate change on agriculture water requirement in irrigation district[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(1): 81-85.
- [7] KEIPP K, HÜTSCH B W, SCHUBERT S. How does the harvest index affect water-use efficiency and nutrient-utilization efficiency of sunflowers (*Helianthus annuus* L.)?[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2019, 205(5): 519-532.
- [8] GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. Science, 2010, 327(5 967): 812-818.
- [9] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 渗透胁迫对小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1 261-1 264.
ZHAO Liying, DENG Xiping, SHAN Lun. Effects of osmotic stress on chlorophyll fluorescence parameters of wheat seedling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(7): 1 261-1 264.
- [10] ACRECHE M M, BRICEÑO-FÉLIX G, MARTÍN SÁNCHEZ J A, et al. Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat[J]. Field Crops Research, 2009, 110(2): 91-97.
- [11] 曹磊齐, 翟亚明, 朱成立, 等. 不同水氮条件下生物炭对夏玉米水氮耦合效应的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 72-79.
CAO Leiqi, ZHAI Yaming, ZHU Chengli, et al. The efficacy of biochar in improving crop yield is impacted by irrigation and nitrogen fertilization[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 72-79.
- [12] 任中生, 屈忠义, 李哲, 等. 水氮互作对河套灌区膜下滴灌玉米产量与水氮利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 149-155.
REN Zhongsheng, QU Zhongyi, LI Zhe, et al. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, water use efficiency and nitrogen use efficiency of mulched drip-irrigated maize in Hetao Irrigation District, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 149-155.
- [13] 谷晓博, 李援农, 黄鹏, 等. 水氮互作对冬油菜氮素吸收和土壤硝态氮分布的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(7): 1 283-1 293.
GU Xiaobo, LI Yuannong, HUANG Peng, et al. Effects of irrigation and nitrogen coupling on nitrogen absorption and soil nitrate content of winter oilseed rape[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(7): 1 283-1 293.
- [14] LI W L, LI W D, LI Z Z. Irrigation and fertilizer effects on water use and yield of spring wheat in semi-arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(1): 35-46.
- [15] GUO S L, ZHU H H, DANG T H, et al. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China[J]. Geoderma, 2012, 189/190: 442-450.
- [16] 张君. 阴山北麓马铃薯水氮耦合效应及合理利用机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
ZHANG Jun. The coupling effects of water and fertilizer and its rational utilization mechanism on potato in the Northern foot of Yinshan Mountain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [17] 姚佳宾, 李和平, 吴鑫淼, 等. 不同灌水下限对盆栽油葵生长、耗水及产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2018(5): 23-27.
YAO Jiabin, LI Heping, WU Xinmiao, et al. Effects of different irrigation lower limits on growth, water consumption and yield of potted sunflower[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(5): 23-27.
- [18] 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.
BAI Wei, YANG Sumei, YIN Haifeng, et al. Influence of N P K fertilizers on yield and benefit of confectionary sunflowers in Northwest of Hebei[J]. Crops, 2016(5): 131-134.
- [19] 段玉, 张君, 梁俊梅, 等. 采用 QUEFTS 建立向日葵推荐施肥模型养分特征参数[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7): 1 349-1 359.
DUAN Yu, ZHANG Jun, LIANG Junmei, et al. Using QUEFTS to calculate the parameters needed for fertilizer recommendation of sunflower[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(7): 1 349-1 359.
- [20] 黄明霞, 王靖, 唐建昭, 等. 基于 APSIM 模型分析播期和水氮耦合对油葵产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 134-143.
HUANG Mingxia, WANG Jing, TANG Jianzhao, et al. Analysis of interaction of sowing date, irrigation and nitrogen application on yield of oil sunflower based on APSIM model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 134-143.
- [21] 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 Lu, ZHANG Hengjia, BA Yuchun, et al. Effects of drip irrigation deficit adjustment under mulch on water consumption, photosynthetic characteristics, and quality of edible sunflower in Hexi oasis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 209-216.

- [22] LI Z Y, FONTANIER C, DUNN B L. Physiological response of potted sunflower (*Helianthus annuus* L.) to precision irrigation and fertilizer[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 270: 109-117.
- [23] 段玉, 范霞, 安昊, 等. 向日葵养分专家系统推荐施肥效应研究[J]. *中国油料作物学报*, 2021, 43(6): 1108-1114.
DUAN Yu, FAN Xia, AN Hao, et al. Effect study on sunflower nutrient expert system for fertilization recommendation[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2021, 43(6): 1108-1114.
- [24] 裴福军, 王兰云, 刘福新, 等. 白城地区向日葵需水规律的研究[J]. *吉林气象*, 1998, 5(3): 22-23.
- [25] 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 Wenli, LI Jianjun, HOU Qiong. Effect of soil moisture on the growth of sunflower[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(2): 186-190.
- [26] 杨松, 刘俊林, 淡建兵, 等. 河套灌区向日葵适宜浇水期探讨[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(S1): 123-125.
YANG Song, LIU Junlin, DAN Jianbing, et al. Discussion on suitable watering period of sunflower in Hetao Irrigation area[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(S1): 123-125.
- [27] LI Z Y, FONTANIER C, DUNN B L. Physiological response of potted sunflower (*Helianthus annuus* L.) to precision irrigation and fertilizer[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 270: 109-117.
- [28] 杨黎, 魏占民, 徐大为, 等. 膜下滴灌不同水氮组合对向日葵生长及水氮利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(3): 50-55.
YANG Li, WEI Zhanmin, XU Dawei, et al. Growth and water-nitrogen use efficiency of sunflower under mulched drip fertigation with different water-nitrogen ratios[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(3): 50-55.
- [29] 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.
- [30] 段佩利, 秦丽杰. 不同降水年型下长岭县向日葵需水规律研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(6): 135-139.
DUAN Peili, QIN Lijie. Study on water requirement of sunflower under different precipitation years in Changling County[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(6): 135-139.
- [31] JAMI M G, BAGHBANI-ARANI A, KARAMI BORZ-ABAD R, et al. Towards improving the vegetative and qualitative traits of sunflower using amending soil (zeolite and manure farmyard) under water deficit stress[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(18): 2227-2237.
- [32] EBRAHIMIAN E, SEYYEDI S M, BYBORDI A, et al. Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 218: 149-157.
- [33] 段玉. 向日葵最佳养分管理[M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2019.

Study on Water Demand and Coupling Effect of Water and Nitrogen on Sunflower in the North of Yinshan Mountain

ZHANG Tingting¹, DUAN Yu^{1*}, ZHANG Jun¹, AN Hao¹,
LIANG Junmei¹, FAN Xia², HAN Zhenyong², WU Sheng³

(1. Institute of Resources, Environment and Sustainable Development, Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 2. Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center of Saihan Bureau, Hohhot 010020, China; 3. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010020, China)

Abstract: **【Objective】** To clarify the water requirement law of sunflower and improve the coupling effect of water and nitrogen. **【Method】** A plot experiment was conducted to set three irrigation amounts, namely, rain-fed W0, supplementary W1 67.5 mm and conventional irrigation W2 135 mm, and three nitrogen application levels, namely, N0 (no nitrogen application), recommended nitrogen N1 135 kg/hm² and excess nitrogen N2 270 kg/hm², respectively. The effects of water and nitrogen coupling on yield, water consumption, water use efficiency, fertilizer utilization rate and water and nitrogen coupling effect of sunflower were studied. **【Result】** A plot experiment was conducted to set three irrigation amounts, namely, rain-fed W0, supplementary W1 67.5 mm and conventional irrigation W2 135 mm, and three nitrogen application levels, namely, N0 (no nitrogen application), recommended nitrogen N1 135 kg/hm² and excess nitrogen N2 270 kg/hm², respectively. The effects of water and nitrogen coupling on yield, water consumption, water use efficiency, fertilizer utilization rate and water and nitrogen coupling effect of sunflower were studied. **【Conclusion】** The suitable fertilization and irrigation mode for Sunflowers at the North Foot of Yinshan Mountain is the supplementary irrigation amount of 159.2~177.1 mm and the nitrogen rates of 166~218.3 kg/hm². The 12-leaf - opening stage is the key period of water and fertilizer demand, and the supply of water and fertilizer should be ensured.

Key words: sunflower; water-nitrogen coupling; yield; water consumption; WUE; NUE

责任编辑: 白芳芳