

水氮调控对向日葵生长、水肥利用效率和土壤水盐分布的影响

何锐^{1,2}, 佟长福^{1,2*}, 王军¹, 秦子元¹, 甄致新², 郭淑豪², 王虎³, 李小利³

(1.水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 3.乌审旗水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017300)

摘要:【目的】为鄂尔多斯达拉特旗黄河南岸盐碱化灌区黄河水滴灌工程提出合理的水肥施用制度。【方法】采用田间膜下滴灌试验, 设置 3 个灌溉定额, 分别为: 高水 W1 (1 500 m³/hm²)、中水 W2 (1 200 m³/hm²) 和低水 W3 (900 m³/hm²); 田间施氮采用尿素, 设置 2 种尿素用量, 分别为: 高肥 N1 (187.5 kg/hm²)、低肥 N2 (150 kg/hm²)。以当地灌水量和施肥量作为对照组 CK。研究不同水肥处理对向日葵生长指标、产量、土壤盐分、土壤水分的影响。并且采用熵值法对产量、灌溉水分利用效率、偏肥生产率、0~40 cm 土层平均电导率和果实率共 5 项指标计算权重, 对各个处理进行综合评估。【结果】各个处理之间向日葵生长性状指标差异性不大, 但均比 CK 处理更具有优势。高水的 2 个处理产量显著高于其他处理。在向日葵整个生育期内, W1N2 处理 0~40 cm 土层电导率值最低, 为 341.9 μS/cm, W2N1 水肥条件下土壤电导率值最高, 为 449.7 μS/cm。生育期始末 W1N1、W1N2、W2N1、W2N2、W3N1、W3N2 处理和 CK 的电导率增幅分别为 62.2%、29.4%、58.9%、52.9%、83.9%、56.3%和 54.0%。对于 60~100 cm 土层含水率, 高水处理与中水处理不具有显著性差异, 高水与中水处理相较于低水处理均具有显著性差异。高水处理水源入渗方式接近于均匀入渗。不同灌溉定额形成的湿润区深度也不相同, 灌水定额越大, 湿润区位置越深, 湿润范围越大。采用熵值法对各个处理进行综合评估, 结果最优的为 W1N2 处理, 结果最劣的为 CK 处理。【结论】土壤返盐程度随着灌溉定额的增加而减弱, 但过高的灌溉定额会降低作物活性, 从而抑制作物生长。从各处理综合评估结果来看, 鄂尔多斯达拉特旗黄河南岸灌区向日葵水肥最优施用方案为: 灌溉定额 1 500 m³/hm², 尿素 (含氮 46%) 150 kg/hm²。生育期内, 灌水 5~6 次, 施肥 2~3 次, 肥随水施入田间。

关键词: 土壤水盐; 土壤水氮; 灌溉制度; 膜下滴灌; 熵值法

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023257

OSID: 

何锐, 佟长福, 王军, 等. 水氮调控对向日葵生长、水肥利用效率和土壤水盐分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 73-81.

HE Rui, TONG Changfu, WANG Jun, et al. Effects of Water and Nitrogen Regulation on Growth, Water-fertilizer Use Efficiency and Soil Water-salt Distribution in Sunflower[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 73-81.

0 引言

【研究意义】我国盐碱地分布范围广泛, 其面积达 9 913 万 hm², 占我国国土面积的 1/10。尤其在我国西北一带, 年降水量少, 土壤水分蒸发量大, 对农业种植产生巨大影响^[1]。因此, 推行“节水灌溉+灌溉洗盐”是我国当前干旱及半干旱盐碱地区缓解缺水和盐碱双重问题的重要举措^[2]。内蒙古自治区黄河南岸灌区是我国典型的半干旱盐碱化灌区之

一, 该灌区大多采用漫灌、畦灌等方式, 使地下水位上升, 同时不当的施肥导致了土壤污染和氮磷流失^[3-4]。向日葵是当地农牧民广泛种植的作物之一, 多用黄河水畦灌, 造成水资源大量浪费的同时, 还使得地下水位上升, 盐分进入到土壤中, 随着时间推移, 灌区盐碱化程度加重^[5]。因此, 有必要在黄河南岸盐碱化灌区开展滴灌条件下水氮调控对向日葵的生长、产量和土壤水盐分布的影响研究。【研究进展】近年来, 滴灌技术在我国广泛应用^[6], 与漫灌、畦灌、沟灌等传统灌溉方式相比, 滴灌具有高效节水^[7]、减少水土流失、降低病虫害传播的风险等优点^[8]。在作物生育期内, 合理的水肥用量制定需要依据土壤理化性质、作物生长情况及产量等多种因素确定^[9]。鲁耀泽等^[10]研究发现不同水肥调控对向日葵产量和水分生产率均有显著影响。郭富强等^[11]通过研究发现常规施用水氮和节水节氮 20%的

收稿日期: 2023-06-09

修回日期: 2023-12-05

项目基金: 科技兴蒙行动重点专项 (2021EEDSCXSFQZD011); 鄂尔多斯市科技重大专项项目 (2021ZD 社 17-18); 鄂尔多斯市水利科技项目 (ESZCWS-D-F-210003)

作者简介: 何锐 (1999-), 男, 四川绵阳人。硕士研究生, 主要从事水资源管理与高效利用研究。E-mail: hehe66524@gmail.com

通信作者: 佟长福 (1979-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人。博士, 正高级工程师, 主要从事节水灌溉和水资源研究。E-mail: tcf110110@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

情况下向日葵的产量、生物量等无显著差异。薛铸等^[12]认为向日葵根系在适度的水盐胁迫下会略微下扎,以吸收更多水分和养分;水分是影响向日葵生长的主导因素,其次为盐分和肥力。董昕^[13]通过不同水氮组合处理研究发现水氮交互作用对向日葵的生长指标、籽粒产量及品质均有显著影响。吴胜等^[14]认为合理的灌水施氮通过提高向日葵茎叶器官的干物质积累量,促进花后叶片光合作用的生产,进而提高产量。曾文治等^[15]通过设计土壤不同表层盐分和施氮量得出其对向日葵的出苗及生长的影响。马韬^[16]通过在河套灌区对向日葵进行盐氮耦合处理,得出了向日葵叶面积指数、籽粒产量和氮素之间的响应关系。冯梁^[17]通过对河套灌区向日葵水氮调控并且使用熵权 TOPSIS 法对向日葵的多项指标计算进行综合评价得出该地区适宜于向日葵的最优水肥施用制度。

【切入点】滴灌技术在农业水资源可持续发展方面具有重要作用,其主要应用范围多在地下水灌区,在沿黄灌区应用研究较少。关于内蒙古自治区鄂尔多斯黄河南岸灌区盐碱地节水灌溉对向日葵生长情况及土壤水盐量动态的研究报道较少。因此,

有必要在该地区对滴灌向日葵开展试验研究,以全面了解该环境下作物生长发育状况、土壤水盐分布规律和水肥利用效率。【拟解决的关键问题】本文以膜下滴灌向日葵为研究对象,通过不同水氮灌溉研究不同水肥条件对向日葵生长、产量和土壤水分、盐分的影响;采用熵值法分析各个水肥方案优劣,得出最优水肥方案。以期为内蒙古自治区黄河南岸地区滴灌向日葵水肥管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗东海心村(40°29'32"N, 109°53'10"E),属于温带半干旱大陆性气候,昼夜温差大,雨热同期。多年平均气温 6.2 ℃,年均降水量 348.3 mm,主要降水分布在 7—9 月,占全年降水量的 70%左右;多年平均蒸发量为 2 506.3 mm,约为降水量的 7 倍;地下水埋深在 1.4~1.7 m 之间。试验区向日葵整个生育期降水量为 201.8 mm,日降水量及参考作物蒸散量见图 1。试验区 0~100 cm 土壤基本理化性质见表 1。

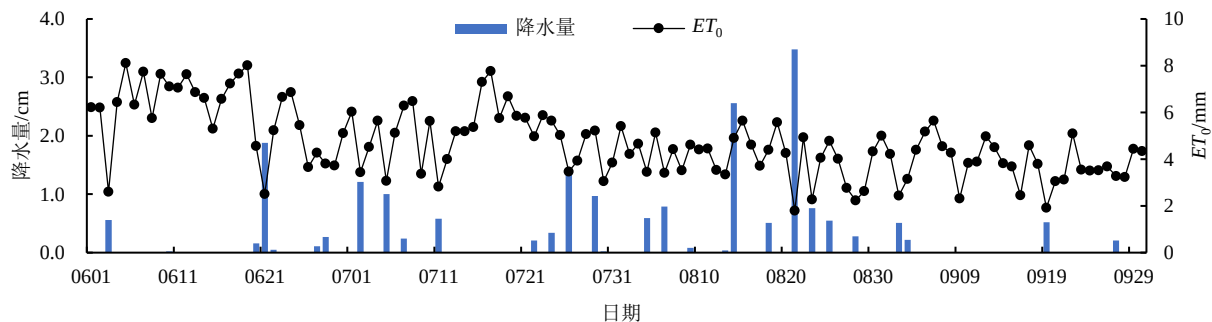


图 1 向日葵生育期内降水量及参考作物蒸散量

Fig.1 Rainfall and evapotranspiration of the reference crop during the reproductive period of sunflower

表 1 供试土壤 0~100 cm 基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the test soil at 0~100 cm

土层深度/cm	土壤质地	体积质量/(g·cm ⁻³)	有机质量/(g·kg ⁻¹)	硝态氮量/(mg·kg ⁻¹)	铵态氮量/(mg·kg ⁻¹)	电导率/(μS·cm ⁻¹)
0~20	壤土	1.441	12.1	6.2	3.5	337
20~40	壤土	1.446	12.4	6.8	3.6	399
40~60	壤土	1.428	13.2	7.4	3.1	466
60~80	壤土	1.42	11.8	6.6	2.8	469
80~100	沙壤土	1.396	11.0	5.3	3.0	527

1.2 试验设计

试验采用完全组合设计,设置水、氮 2 个因素。其中,灌水定额设置 3 个水平:高水 300 m³/hm² (W1)、中水 240 m³/hm² (W2)、低水 180 m³/hm² (W3);所施氮肥采用尿素(含氮量 46%),施氮设计 2 个水平:高肥 187.5 kg/hm² (N1)、低肥 150 kg/hm² (N2)。以当地灌溉定额(1 800 m³/hm²)和追肥量(187.5 kg/hm²)为对照(CK),肥随水同时施入田间。试验灌溉方式为膜下滴灌,共设置 7 个

处理,3 次重复,共 21 个小区,各小区长 10 m,宽 6 m。为避免试验小区的边行效应,在小区东西两侧各设 1 m 宽,南北各设 0.4 m 的保护带,在试验区两端设置宽度为 2.5 m 的保护区,各处理耕作与施肥等措施一致。播种前各处理施 525 kg/hm² 复合肥(N15%, P15%, K15%)。向日葵于 2022 年 5 月 29 日播种,10 月 1 日收获。供试品种为“金裕 63”,采用一膜一带两行种植方式,滴灌带铺设间距 135 cm,地膜宽 70 cm,宽行距 90 cm、窄行 45 cm,种植示意

图见图2，播种量控制在每公顷30 000株左右。

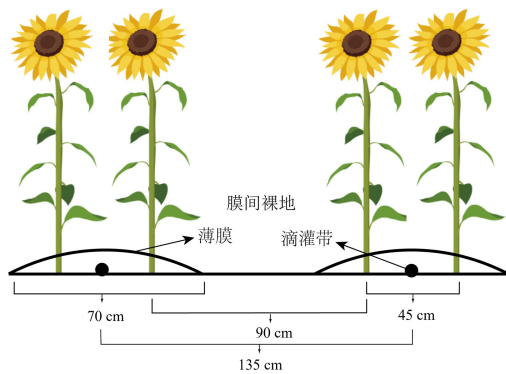


图2 种植示意图

Fig.2 Planting schematic

试验灌水采用黄河水滴灌方式，通过泵前低压渗透微过滤系统从渠道取水并过滤，经输水管道进入试验小区，田间滴灌带为内镶贴片式滴灌带，管径16 mm，流量1.60 L/h，滴头间距30 cm。试验中每次灌水量和施肥量均相同，施肥方式为将氮肥放入各小区施肥罐中，再随灌溉水施入田间。施肥时间为向日葵拔节期和灌浆期。灌溉施肥用量及时间见表2。

表2 灌溉施肥设计

Table 2 Irrigation and fertilization design

处理	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)			施肥量/(kg·hm ⁻²)		
	春灌	灌溉定额	灌水日期	基肥	追肥	施肥日期
W1N1	1 350	1 500	0615/0710/0725/ 0810/0825	525	187.5	
W1N2	1 350	1 500	0615/0710/0725/ 0810/0825	525	150.0	
W2N1	1 350	1 200	0615/0710/0725/ 0810/0825	525	187.5	
W2N2	1 350	1 200	0615/0710/0725/ 0810/0825	525	150.0	0710/ 0810
W3N1	1 350	900	0615/0710/0725/ 0810/0825	525	187.5	
W3N2	1 350	900	0615/0710/0725/ 0810/0825	525	150.0	
CK	1 350	1 800	0710/0725/0810	525	187.5	

1.3 测定指标与方法

1.3.1 株高、茎粗测定

在向日葵的生育期，即苗期、现蕾期、开花期、灌浆期和成熟期进行观测。在每个小区随机选择3株生长状况良好的植株进行测量。株高采用卷尺（精度0.1 cm），茎粗采用游标卡尺（精度0.02 mm）进行测量。

1.3.2 产量

在向日葵收获时，每个不同处理随机选择具有代表性的5株测量其盘径，随后进行脱粒、风干，统计其带壳百粒质量、去壳百粒质量，统计产量并折合为每公顷产量。

$$\alpha = \frac{\eta}{\phi} \times 100\%, \quad (1)$$

式中： α 为果实率（%）； η 为去壳籽质量（g）； ϕ 为带壳籽质量（g）。

1.3.3 土壤墒情测定

土壤质量含水率采用烘干法进行测定。使用直径为3 cm土钻在作物各生育期采集0~100 cm土层的土样，采样位置为距离滴头约40 cm处，每20 cm为一层。取样后将土样放入铝盒中进行称质量，再放入烘箱中，在105℃下烘干，直至质量恒定不变后测量土壤含水率。取样时间为灌前1天和灌后2天，降水进行加测。

1.3.4 土壤盐分测定

取样方式与土壤含水率测定方式相同，取样后放入塑封袋中，在实验室中进行自然风干、碾碎，并用2 mm直径筛网进行过筛。按照水土比5:1配置溶液，静置8 h，采用DDS-307A电导率仪进行测量。土壤全盐量和电导率关系式见式（2）。土壤盐分由所测电导率进行反映^[18]。

$$y = 5.1949x + 0.0685 \quad R^2 = 0.998, \quad (2)$$

式中： y 为土壤全盐量（g/kg）； x 为 $EC_{1:5}$ （ds/m）。

1.3.5 灌溉水肥利用效率

灌溉水分利用效率（ $IWUE$ ）式^[19]为：

$$IWUE = \frac{Y}{I}, \quad (3)$$

式中： $IWUE$ 为灌溉水分利用效率（kg/m³）； Y 为向日葵的产量（kg/hm²）； I 为生育期灌水量（m³/hm²）。

偏肥生产率（ PFP ）计算式^[20]为

$$PFP = \frac{Y}{F}, \quad (4)$$

式中： PFP 为偏肥生产率（kg/kg）； F 为各处理施肥量（kg/hm²）。

1.3.6 熵值法分析

熵值法是依据原始数据进行客观分析的综合评价方法之一。采用熵值法分析7种处理的5项指标，即产量、灌溉水分利用效率、偏肥生产率、果实率、0~40 cm电导率均值。具体算法如下：

1) 对于正向指标无量纲化：

$$X'_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{M_j - m_j}, \quad (5)$$

2) 对于逆向指标无量纲化：

$$X'_{ij} = \frac{M_j - x_{ij}}{M_j - m_j}, \quad (6)$$

设选取 n 组数据作为样本、设计 m 个评价指标， X_{ij} 表示第 i 个数据的第 j 个评价指标值（ $i=1, 2, 3, \dots, n$ ； $j=1, 2, 3, \dots, m$ ）。以0~40 cm土层电

导率均值、产量、果实率、偏肥生产率、灌溉水分利用效率共 5 项指标进行无量纲化处理。

3) 计算第 i 个数据第 j 个指标的贡献度:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad (7)$$

4) 计算第 j 项指标的熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad 0 \leq e_j \leq 1, \quad (8)$$

5) 确定各指标的权重:

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^m (1-e_j)}, \quad (9)$$

6) 基于熵值法的综合得分计算式:

$$G = \sum_{j=1}^m w_j \times P_{ij}. \quad (10)$$

1.4 数据分析

使用 SPSS 27.0 对高水、中水和低水深层土壤质量、含水率、各处理向日葵生长生理指标和产量进行显著性分析、采用 Execl 2016 计算熵值及权重, 使用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果分析

2.1 不同处理对向日葵生长指标的影响

不同水肥处理下向日葵株高、茎粗和盘径的变化情况见图 3—图 5 (图 5 中不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著)。不同的水肥条件对向日葵株高、茎粗和盘径存在不同的影响, 苗期和拔节期各水肥处理株高无显著性差异, 进入现蕾期, 各处理间出现差异。W3N1 处理的株高比其他处理的株高具有明显的优势, 株高最高, 较 CK 增加 15.02%, W1N1、W1N2、W2N1、W2N2 处理和 W3N2 处理的株高均高于 CK, 分别增加了 3.49%、5.44%、4.35%、3.96%、8.06%。纵观整个生育期, 向日葵生育前期株高变化幅度大, 生长迅速, 尤其在苗期和现蕾期, 株高的增长速度最快。向日葵进入成熟后期后, 株高变化速度缓慢, 增长幅度小。向日葵进入成熟中后期, 花盘果实趋于成熟, 花盘重量增大导致各处理株高均有不同程度的下降。各水肥处理对比 CK 来讲, 进入开花期, 各处理的株高均高于 CK, 且 CK 的增长速度比其他处理缓慢。茎粗的增长变化幅度在生育期前中期大, 在成熟期趋于稳定。在苗期-拔节期, 茎粗开始出现差异, 低水的 2 种处理与其他处理出现显著性差异。各个处理不同生育阶段平均茎粗 W2N1 处理为最优, 对比 CK 增加了 8.6%。W1N1 处理茎粗最小, 较 CK 减少了 0.9%。W1N2、W2N2、W3N1 处理和 W3N2 处理茎粗分别比 CK 增加了 1.45%、8.6%、8.1%、5.3%。各处理的向日葵在成熟后期由于植株生理性能下降, 吸收

水分能力减弱从而导致茎粗在成熟后期会有不同程度的减小。通过对各处理花盘盘径进行显著性分析发现不同灌水处理之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。W3N2 处理盘径最小, 较 CK 减小了 10.1%。W1N2 处理的盘径最大, 较 CK 增大了 10.9%。

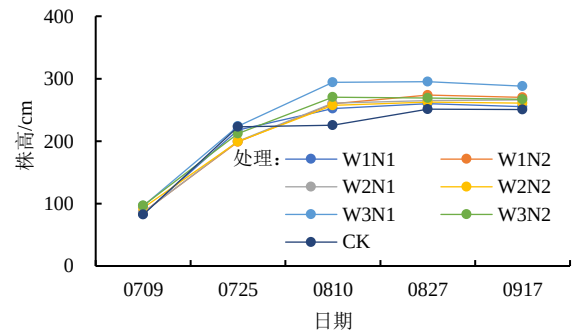


图3 不同方案株高对比

Fig.3 Comparison of plant height in different schemes

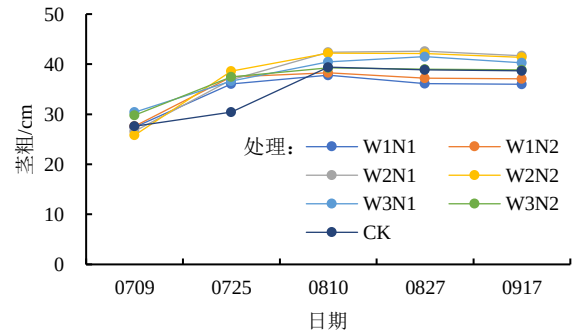


图4 不同方案茎粗对比

Fig.4 Comparison of stem thickness of different schemes

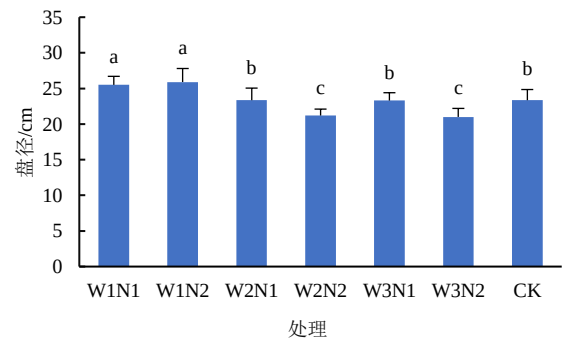


图5 不同方案盘径对比

Fig.5 Comparison of disk diameters of different schemes

2.2 不同处理对向日葵产量的影响

作物产量是衡量水肥调控措施优劣的重要指标。不同水肥条件下的产量见表 3。不同水肥条件处理与 CK 相比较, W1N1 处理和 W1N2 处理均大于 CK; W2N1、W3N1 处理和 W3N2 处理间不具有显著性差异, 但均小于 CK, W2N2 处理显著小于其他处理。W1N1 处理产量最高, 较 CK 增长了 15.2%。W2N2 处理产量较 CK 减少了 3.5%。从百粒果实率来看, CK 比率最大, 其次为 W3N2 处理, 最小为高水的 2 个处理, 为 49.2%。

表 3 水氮调控对向日葵产量及组成要素的影响

Table 3 Effect of different moisture and nitrogen on yield and composition of sunflower								
处理	百粒带壳质量/g	标准差	百粒去壳质量/g	标准差	果实率/%	标准差	产量/(kg·hm ⁻²)	标准差
W1N1	24.39a	1.60	11.92a	0.67	48.9e	0.05	5 122a	82.47
W1N2	22.83b	1.04	11.18c	0.96	49.0e	0.02	4 794b	13.10
W2N1	20.84d	1.00	11.84a	0.13	56.8a	0.02	4 376d	21.23
W2N2	19.59e	0.41	10.27e	0.60	52.4c	0.02	4 290e	90.63
W3N1	22.27c	0.23	11.45b	0.02	51.4d	0.01	4 343d	87.37
W3N2	22.93b	1.17	10.92d	0.08	47.4f	0.02	4 334d	70.22
CK	20.86d	0.34	11.55b	0.04	55.4b	0.01	4 447c	59.60

注 表中同列不同小写字母表示处理之间具有显著性差异。

2.3 不同处理条件下土壤水分分布规律

向日葵生育期内土壤水分分布及运移情况见图 6。各个土层的土壤含水率在不同水肥条件下均出现波动性变化，各处理间土层含水率变化情况类似。土层的平均含水率出现先增大后减小再增大的趋势，这是因为土壤含水率与灌水量有着明显的正相关关系。苗期各处理的差异较小，这是因为前期气温不高，蒸发量低；现蕾期后，随着气温升高，蒸发量大，各处理土壤水分的时空分布出现差异。滴灌有流量小、灌溉时间长的特点，在水分的下渗过程中能够有效的在向日葵主要根系深度形成湿润区，从而提高水分的利用效率。由图 6 可知，高水处理能将湿润区保持在较深的土层，中水和 CK 的稳定湿润区在 60~80 cm 处形成；低水处理水分多集中于土

层 20~50 cm 处。向日葵主要根系多集中于 0~60 cm，所以能保证向日葵根系所在的土层含有使得向日葵正常生长的水分即为较优处理。在 0~60 cm 中土壤平均含水率最高的为 W1N2 处理，为 20.24%；最低的为 W3N1 处理，含水率为 17.65%。

经过分析发现：高水处理 60~100 cm 土层含水率与中水处理同层土壤含水率不具有显著性差异 ($P>0.05$)，与低水处理 60~100 cm 土层含水率具有显著性差异 ($P=0.026<0.05$)。中水处理与低水处理 60~100 cm 土层土壤含水率具有显著性差异 ($P=0.035<0.05$)。高水和中水灌溉定额能满足向日葵的生育期需水并且能够靠灌水淋洗作用将盐分淋洗至向日葵非主要根系区；而低水灌溉会在向日葵生育期内出现返盐现象。

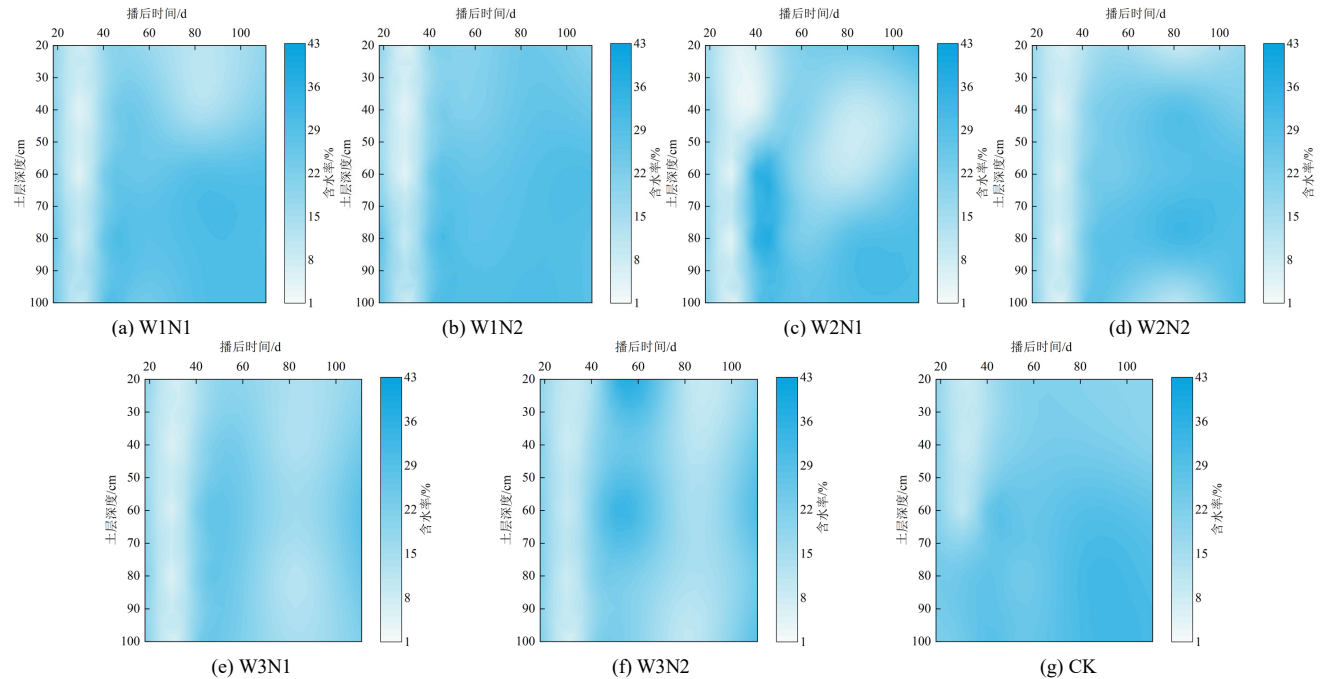


图 6 不同处理生育期内土壤水分分布

Fig.6 Comparison of soil water distribution in sunflower growth period under different schemes

2.4 不同处理条件下土壤盐分分布规律

不同水肥条件下生育期内土壤盐分分布情况见图 7。不同处理整个生育期内土壤盐分分布规律基本相似，土壤浅层 (0~40 cm) W1N2 处理呈现出最低的平均电导率，仅为 341.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。相比于 CK，W1N2 处理土壤电导率降低了 19.2%。而 W2N1 处理

在整个生育期内土壤盐分最高，平均值达到 449.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，相较于 CK，增加了 6.3%。生长初期，由于播种前的淋洗作用，土壤盐分大多分布在 100 cm 土层以下。播种约 40 d 后，随着气温升高，土壤水分蒸发量增大，盐分被带至土壤 30~60 cm 处。由于滴头流量较小，冲洗作用弱，不能将盐分带入较深的

土层中。因此,在生育期进行滴灌后,土壤盐分大多被淋洗至 20~80 cm 的土层中。根据 3 种不同灌水定额来看,高水的 2 种处理能将盐分淋洗至较深层,因此,在 0~100 cm 土层中,2 种处理土壤含盐量较低。而中水和低水的 4 种处理,灌水定额较低,所以 10~60 cm 土层深度的盐分较大,不能将盐分带离至深层土壤中。根据同一灌水定额,不同的施肥水平来看,低肥 N2 处理比高肥 N1 处理土壤含盐量较低,这是因为当施肥量增加时,灌溉水的溶盐率将降低,

部分盐分会滞留在土壤浅层。随着土壤水分的蒸发,这些盐分会逐渐移动至土壤表层,导致表聚现象的出现。施肥量的增加,土壤的电导率也随着增大。在向日葵的生育期始末,各个处理的土壤电导率值均有不同程度的增长。W1N1、W1N2、W2N1、W2N2、W3N1、W3N2 处理和 CK 增幅分别为 62.2%、29.4%、58.9%、52.9%、83.9%、56.3%和 54.0%。低肥处理电导率值增幅均比高肥处理要小,采用低肥处理更有利于土壤的盐分控制和管理。

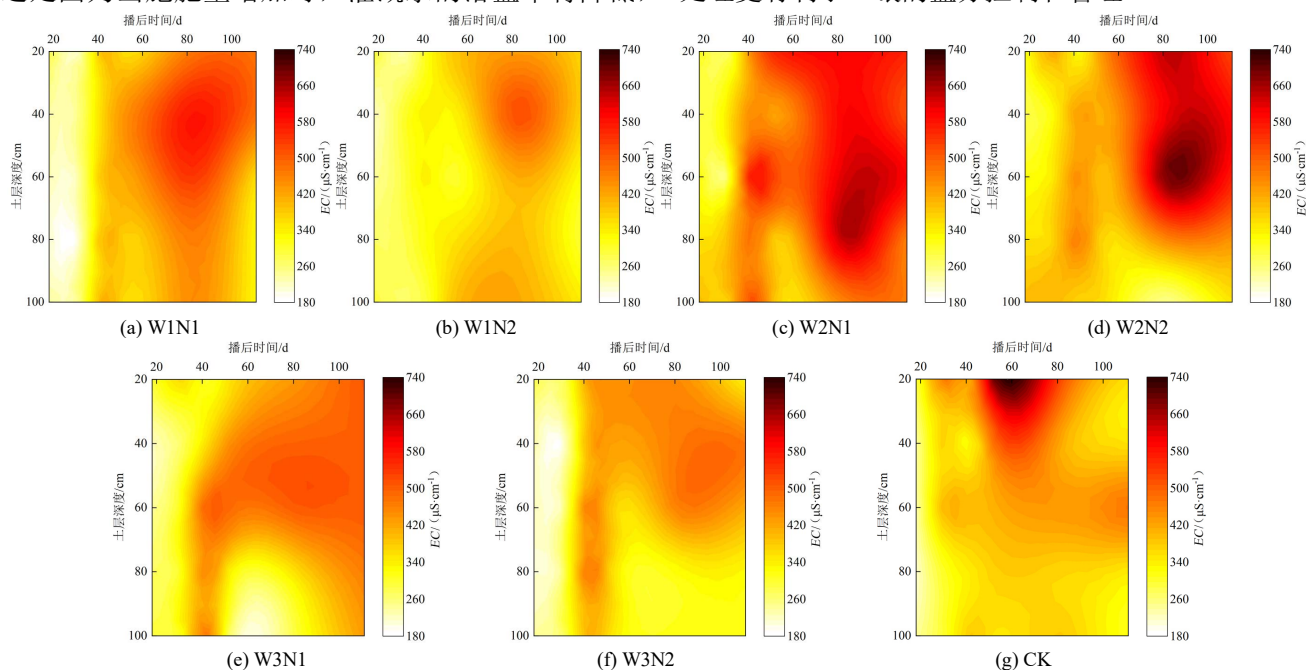


图 7 不同处理生育期内土壤盐分分布

Fig.7 Comparison of soil salt distribution in sunflower growth period under different schemes

2.5 基于熵值法的水肥用量综合评价

对 7 个处理的 5 项指标采用熵值法进行赋权,计算各个处理的综合得分,从而获得最优水肥方案。各处理初始指标值及处理结果值见表 4—表 7。在不同处理条件下,灌溉水利用效率 (IWUE) 和偏肥生产率 (PFP) 呈现明显的差异。结果表明, W3N1 处理展现出最高的灌溉水利用效率,达到 4.826,而 CK 则表现出最低的灌溉水利用效率,仅为 2.471。此外,在偏肥生产率方面, W1N2 处理取得了最高值,达到 31.96,而 W3N1 处理则显示出最低的偏肥生产率,仅为 23.163。对于果实率, W2N1 处理显示出最高值,达到 56.8%,而 W3N2 处理则表现出最低的果实率,仅为 47.4%。各指标经过无量纲化后可提供更可靠的数据分析基础,进而计算熵值求出权重。

从熵值法计算的权重值来看 (表 6),产量的权重占比最大,其次为偏肥生产率,较为符合理论权重分配,评价结果可靠,可以作为评价各处理优劣的评价方法。从综合得分情况看来, W1N2 综合得分最高,为最优水肥处理, CK 得分最低,水肥方案不宜推广。

表 4 不同水肥处理下向日葵水肥利用率、产量、浅层土壤电导率

Table 4 Utilization rate of water and fertilizer, yield and shallow soil conductivity of sunflower in different schemes

处理	Y/ (kg·hm ⁻²)	IWUE/ (kg·m ⁻³)	PFP/ (kg·kg ⁻¹)	G/%	T/ (μS·cm ⁻¹)
W1N1	5 122	3.415	27.317	48.9	404.600
W1N2	4 794	3.196	31.960	49.0	341.917
W2N1	4 376	3.647	23.339	56.8	449.667
W2N2	4 290	3.575	28.600	52.4	441.917
W3N1	4 343	4.826	23.163	51.4	379.500
W3N2	4 334	4.816	28.893	47.4	370.067
CK	4 447	2.471	23.717	55.4	416.917

注 G 为果实率, T 为 0~40 cm 土层平均电导率。

表 5 各指标无量纲化处理后结果

Table 5 Results of each index after dimensionless processing

处理	Y	IWUE	PFP	G	T
W1N1	1.000	0.401	0.472	0.136	0.418
W1N2	0.606	0.308	1.000	0.147	1.000
W2N1	0.103	0.499	0.020	1.000	0.000
W2N2	0.000	0.469	0.618	0.522	0.072
W3N1	0.064	1.000	0.000	0.413	0.651
W3N2	0.053	0.996	0.651	0.000	0.739
CK	0.189	0.000	0.063	0.843	0.304

表 6 各指标计算结果

Table 6 Calculation results of each index

指标	熵值	权重值
$Y/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	0.662	0.311
$IWUE/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	0.869	0.120
$PFP/(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$	0.749	0.231
$\alpha/\%$	0.810	0.175
$\beta/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	0.824	0.162

表 7 各处理综合得分

Table 7 Comprehensive scores of each scheme

处理	综合得分
W1N1	0.560
W1N2	0.645
W2N1	0.272
W2N2	0.302
W3N1	0.318
W3N2	0.407
CK	0.270

3 讨论

由于不同的水肥条件对土壤盐分、水分等有着直接的影响进而影响作物产量^[21]，所以本研究在不同水肥条件下，通过对各处理的土壤盐分、水分和作物生长及产量的测定，采用熵值法对产量、果实率、偏肥生产率、灌溉水分利用效率、浅层土壤浸出液平均电导率进行赋权，计算出各个处理综合得分，探寻最优水肥处理，进而提出适宜于当地向日葵的水肥施用制度。通过不同处理试验结果发现，生育期内，灌溉水量和灌溉次数的适当增加会使向日葵的生理指标有所增长，这与徐昭等^[22]的研究结果相吻合。本试验 CK 中的水肥施用主要集中在向日葵的拔节期和灌浆期，导致了向日葵在生长期内需水和供水时间以及用量之间的不匹配，并且由于 CK 灌水定额较大，土壤的水分含量相对较高，而向日葵属于耐旱作物，土壤水分含量较大时会导致其根系受到缺氧的影响，这在一定程度上抑制了向日葵的生长。因此 CK 的向日葵在苗期的茎粗小于其他 6 个处理，但株高持平于其他处理，原因可能在向日葵苗期，水分及营养的补给主要用于植株的拔高。本试验结果表明，向日葵的产量和灌溉水分利用效率随着施氮量的减少而降低，说明过低的氮肥施用不利于向日葵对水分的吸收利用，进而造成减产。本研究中灌溉水分利用效率最高的为 W3N1 处理，在适宜的水肥条件下能有效的减少水资源浪费的同时还能提高作物的水分利用效率。偏肥生产率最高的为 W1N2 处理，原因可能为施肥时间在向日葵的现蕾期和灌浆期，在这两个时期向日葵需水、需氮量增大，因此 W1N2 处理的偏肥生产率最高，这与辛懋鑫^[23]的研究结果相似。

此外，本研究结果还表明，高水低肥处理可以

将土壤中的盐分带离向日葵主要根系处，并且在生育期内返盐情况不明显。高水高肥处理在生育初期可以将土壤盐分淋洗至较深土层，但是在现蕾期和开花期随着气温升高，腾发量增加，田间耗水增多，加之高肥处理，使得土壤水分溶盐率降低，从而不能将土壤盐分带至深层，进而在生育中后期，易出现返盐现象^[24-26]。高水高肥和高水低肥 2 个处理产量间不具有显著性关系，这与冯浩源等^[27]通过试验发现高水高氮和高水低氮处理在丰、枯水年间产量差异不具有统计学意义的结果相吻合。同等灌水量情况下，施肥量较低的处理土壤含盐量比施肥量较高的处理土壤含盐量低，这与李成^[28]的研究结果相符。每次灌水后，灌溉水会带走大量盐分向深层运移，高水灌溉后的土壤盐分都会显著低于其他处理，因此适当增加灌水量不仅可以满足作物生长需求，还可以将大量盐分带离至作物非主要根系区，防止盐分过高抑制作物增产、增效^[29]。

随着灌水量的增大，各处理的湿润深度和湿润体的大小也不相同。高水处理条件下，湿润深度大于 90 cm 土层，中水处理下的湿润深度处于膜下 60~80 cm，低水处理湿润位置最深约在土层 20~50 cm 处，这与部分研究^[29-30]结果一致。向日葵的根系发达，根须较多，高水处理形成的湿润体较大，湿润范围较广，因此能更好的满足向日葵在生育期的需水。通过对不同处理采用熵值法进行综合评估结果可以看出，W1N2 处理评估结果最好，且各项指标赋权值较为符合理论实际，因此分析结果可以作为最优水肥方案参考。综上，灌溉定额为 1 500 m³/hm²，尿素施用量为 150 kg/hm² 时既能保证产量，又能增加氮肥的吸收。本项试验灌水均为生育期不同时期平均分配灌水，未考虑向日葵现蕾期和开花期快速生长，耗水量大且该时期腾发量大的影响。在今后试验中应结合向日葵不同时期生长所需水量、营养对其进行时间上的非平均灌溉。其次本试验中考虑了土壤盐分在作物生育期的分布情况，但未涉及到播种前和收获后土壤水盐动态分析，时间跨度相对较短，仅覆盖了特定的生长季节。短期试验可能无法完全揭示不同水肥处理对其生长和土壤水盐含量的长期影响。在未来的研究中，我们将考虑进行更长时间的监测和观察，以获得更全面和准确的结果。

4 结论

1) 灌溉定额为 1 500 m³/hm² 和施肥量为 150 kg/hm² 的水肥处理方案在向日葵的生长和土壤水盐状况方面表现最优，被确定为最佳的水肥方案。该方案能够有效提供向日葵生育期所需的水分和养分，

并且在控制土壤盐分积累方面表现较优。

2) 当灌溉定额为 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 时, 土壤水分入渗方式接近于均匀入渗。高水和中水的灌溉定额能满足向日葵生育期需水并且抑制土壤返盐现象的发生; 低水处理会在向日葵主要根系处出现返盐现象, 在土壤表层发生盐渍化。

3) 高、中、低水处理最大湿润深度分别在土层 80~100、60~80、20~50 cm 处。高水和中水处理能满足向日葵生育期内根系吸水, 低水处理的湿润深度不利于向日葵根系往土壤深层下扎, 影响作物产量。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 赵作章, 陈劲松, 彭尔瑞, 等. 土壤盐渍化及治理研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2023(6): 202-208.
ZHAO Zuozhang, CHEN Jinsong, PENG Errui, et al. Research progress on soil salinization and management[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(6): 202-208.
- [2] 郭凯, 封晓辉, 伍靖伟, 等. 盐碱地肥沃耕层构建水肥盐综合调控机理与技术研究进展[J/OL]. 土壤学报: 1-9[2023-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230327.1340.002.html>.
- [3] KATERJI N, MASTRORILLI M, LAHMER F Z, et al. Emergence rate as a potential indicator of crop salt-tolerance[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 38: 1-9.
- [4] 郝芳华, 欧阳威, 李鹏, 等. 河套灌区不同灌季土壤氮素时空分布特征分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 845-852.
HAO Fanghua, OUYANG Wei, LI Peng, et al. Temporal and spatial variability of nitrogen in soil in the Wulate irrigation district of the Hetao irrigation area in Inner Mongolia[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(5): 845-852.
- [5] 曹雪松, 郑和祥, 苗平, 等. 引黄滴灌条件下水氮互作对玉米耗水特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(3): 33-39.
CAO Xuesong, ZHENG Hexiang, MIAO Ping, et al. The effect of drip fertigation with Yellow River water on water consumption and yield of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(3): 33-39.
- [6] 李宝春. 农田水利工程中高效节水灌溉技术的应用及优化策略[J]. 现代农业科技, 2023(4): 131-133, 144.
- [7] 顾小丽. 玉山县七一灌区水资源合理利用与保护研究[J]. 山西水利, 2022, 38(7): 44-46.
- [8] ABDELKHALIK A, PASCUAL-SEVA N, NÁJERA I, et al. Yield response of seedless watermelon to different drip irrigation strategies under Mediterranean conditions[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 99-110.
- [9] 李久生, 栗岩峰, 王军, 等. 微灌在中国: 历史、现状和未来[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 372-381.
LI Jiusheng, LI Yanfeng, WANG Jun, et al. Microirrigation in China: History, current situation and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 372-381.
- [10] 鲁耀泽, 夏玉红, 乌兰其其格, 等. 不同水肥模式对盐渍化农田向日葵生长及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2021(7): 36-40, 45.
LU Yaoze, XIA Yuhong, WU Lanqiqige, et al. Effects of different water and fertilizer modes on the growth and yield of sunflower in salinized soil[J]. Water Saving Irrigation, 2021(7): 36-40, 45.
- [11] 郭富强, 史海滨, 杨树青, 等. 盐渍化灌区不同水肥条件向日葵氮磷利用率及淋失规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 39-43.
GUO Fuqiang, SHI Haibin, YANG Shuqing, et al. Nitrogen and phosphorus utilization of sunflower and loss under different water and fertilizer conditions in salinization of irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 39-43.
- [12] 薛铸, 史海滨, 郭云, 等. 盐渍化土壤水肥耦合对向日葵苗期生长影响的试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 91-94.
XUE Zhu, SHI Haibin, GUO Yun, et al. Effects of coupling of soil water and fertilizer on the growth of sunflower during its seeding period in saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 91-94.
- [13] 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 Xin. Effects of water and nitrogen regulation on edible sunflower growth and soil water and nitrogen distribution under mulched drip irrigation[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022.
- [14] 吴胜, 段玉, 张婷婷, 等. 食葵干物质积累、转运和产量的关系以及对水氮互作的响应[J/OL]. 作物杂志: 1-11[2023-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.s.20230228.1518.008.html>.
- [15] 曾文治. 向日葵水、氮、盐耦合效应及其模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
ZENG Wenzhi. Research and simulation for the coupling effects of water, nitrogen, and salt on sunflower[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [16] 马韬. 河套灌区向日葵一盐一氮响应机制及生长模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
MA Tao. Study on sunflower response to salt - nitrogen stress and crop growth modelling in Hetao Irrigation District[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [17] 冯梁. 排水条件及水氮调控对向日葵产量品质与土壤改良效果的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
FENG Liang. Effects of drainage conditions combined with regulation of water and nitrogen on yield and quality of sunflower and soil improvement[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [18] 蔡阿兴, 陈章英, 蒋正琦, 等. 我国不同盐渍地区盐分含量与电导率的关系[J]. 土壤, 1997, 29(1): 54-57.
- [19] GINDABA J, ROZANOV A, NEGASH L. Response of seedlings of two *Eucalyptus* and three deciduous tree species from Ethiopia to severe water stress[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 201(1): 119-129.
- [20] KUSLU Y, SAHIN U, KIZILOGLU F M, et al. Fruit yield and quality, and irrigation water use efficiency of summer squash drip-irrigated with different irrigation quantities in a semi-arid agricultural area[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(11): 2 518-2 526.
- [21] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 1-17.
SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao irrigation district: Current state and future prospect[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 1-17.
- [22] 徐昭, 史海滨, 李仙岳, 等. 水氮限量供给对盐渍化农田玉米光能利用与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 281-291.
XU Zhao, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Effect of limited irrigation and nitrogen rate on radiation utilization efficiency and yield of maize in salinization farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 281-291.
- [23] 辛懋鑫. 盐渍化灌区控释肥施用农田水氮耦合效应及灌溉施肥制度优化[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
XIN Maoxin. Coupling effect of water and nitrogen on controlled release fertilizer application and optimization of irrigation and fertilization system in salinized irrigated area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [24] 张锡洲, 王永东, 余海英, 等. 不同形态氮肥对设施土壤盐分含量和离子组成的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 16-20, 50.
ZHANG Xizhou, WANG Yongdong, YU Haiying, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on salt content and ion composition in

- greenhouse soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 16-20, 50.
- [25] 杜超, 李军, 王刚, 等. 河套灌区中度盐碱地高垄覆膜滴灌对向日葵生长及水分利用的影响[J/OL]. 作物杂志: 1-7[2023-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.s.20230228.1504.006.html>.
- [26] 曹明海. 不同粉垄深度和灌水量对棉田水盐调控技术研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
- CAO Minghai. Water and salt adjustment of cotton field with different powder ridge depth and irrigation water quantity research on control technology[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.
- [27] 冯浩原, 尹光华, 马宁宁, 等. 不同降水年型地下滴灌追氮对玉米产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(12): 1 250-1 256.
- FENG Haoyuan, YIN Guanghua, MA Ningning, et al. Effect of subsurface drip irrigation and nitrogen supplement on maize yield in different precipitation years[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(12): 1 250-1 256.
- [28] 李成. 灌水量和施肥量对河套灌区垄膜沟灌土壤水肥盐运移的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- LI Cheng. Effects of irrigation and fertilization on soil water, fertilizer and salt under ridge with plastic mulch-furrow irrigation in the Hetao Irrigation District[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [29] MENG W J, XING J L, NIU M, et al. Optimizing fertigation schemes based on root distribution[J]. Agricultural Water Management, 2023, 275: 107 994.
- [30] 廖振棋, 范军亮, 裴青宝, 等. 不同灌水量和灌水器埋深下单坑灌渗红壤水分入渗特性及其模拟[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 110-118, 146.
- LIAO Zhenqi, FAN Junliang, PEI Qingbao, et al. Impact of burying depth of emitters in pit irrigation on water infiltration in red soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 110-118, 146.

Effects of Water and Nitrogen Regulation on Growth, Water-fertilizer Use Efficiency and Soil Water-salt Distribution in Sunflower

HE Rui^{1,2}, TONG Changfu^{1,2*}, WANG Jun¹, QIN Ziyuan¹, ZHEN Zhixin², GUO Shuhao², WANG Hu³, LI Xiaoli³

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, MWR, Hohhot 010020, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

3. Water Utilities Development Center of Wushen Banner, Ordos 017300, China)

Abstract: 【Objective】The aim of this paper is to propose a reasonable water and fertilizer application system for the Yellow River water drip irrigation project in the salinized irrigation area on the South bank of the Yellow River in Ordos Dalat Banner. 【Method】The field drip irrigation experiment was carried out, and three irrigation quotas were set : high water W1 (1 500 m³/hm²), medium water W2 (1 200 m³/hm²) and low water W3 (900 m³/hm²). Two fertilization levels: high fertilizer N1 (187.5 kg/hm²), low fertilizer N2 (150 kg/hm²). The local irrigation and fertilization were used as the control group CK. The effects of different water and fertilizer treatments on sunflower growth index, yield, soil salinity and soil moisture content were studied. The entropy method was used to calculate the weight of five indexes, including yield, water productivity, partial fertilizer productivity, average conductivity of 0 ~ 40 cm soil layer and fruit rate. The optimal water and fertilizer scheme was obtained by comprehensive evaluation of each treatment. 【Result】There was little variability in sunflower growth trait indexes among treatments, but all were more favorable than the CK treatment. The yields of the two treatments with high water were significantly higher than the other treatments. Throughout the reproductive period of sunflower, W1N2 treatment had the lowest value of electrical conductivity in the 0-40 cm soil layer, 341.9 μS/cm, and W2N1 had the highest value of soil electrical conductivity under water and fertilizer conditions, 449.7 μS/cm. The increase in electrical conductivity at the beginning and end of the reproductive period in W1N1, W1N2, W2N1, W2N2, W3N1, W3N2, and CK was 62.2%, respectively, 29.4%, 58.9%, 52.9%, 83.9%, 56.3%, and 54.0%, respectively. For the water content of the 60-100 cm soil layer, there was no significant difference between the high water treatment and the medium water treatment, and there was a significant difference between both the high water and medium water treatments compared to the low water treatment. Water infiltration in the high water treatment was close to uniform infiltration. The depth of the wetted area formed by different irrigation quotas is also different, the larger the irrigation quota, the deeper the location of the wetted area and the larger the wetted range. The entropy value method was used to comprehensively evaluate each treatment, and the optimal result was the W1N2 treatment, and the worst result was the CK treatment. 【Conclusion】The degree of soil salinity return decreased with the increase of irrigation quota, but too high irrigation quota would reduce crop activity and thus inhibit crop growth. The results of the comprehensive assessment of treatments showed that the irrigation quota for sunflower in the irrigation area on the South bank of the Yellow River in Darat Banner, Ordos, was about 1 500 m³/hm², and the application of urea (46% nitrogen) was about 150 kg/hm². During the reproductive period, water was irrigated 5-6 times and fertilizer was applied 2-3 times, and fertilizer was applied to the field with water.

Key words: soil water and salinity; soil water and nitrogen; irrigation schedule; mulch drip irrigation; entropy method

责任编辑: 赵宇龙