

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.032

不同施氮量下盐渍农田向日葵冠层生长与辐射利用规律

马韬¹ 曾文治² 伍靖伟² 丁继辉¹ 俞双恩¹ 黄介生²

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 为了探讨盐渍农田作物冠层的生长特性及其对光能的吸收利用规律,选择盐渍化地区主要经济作物向日葵为研究对象,于2015年和2016年在内蒙古河套灌区进行了大田试验。根据0~60 cm深度土壤初始饱和浸提液电导率,设置3个盐分水平:轻度(S0: 0~3 dS/m)、中度(S1: 3~6 dS/m)和重度盐分胁迫(S2: 大于6 dS/m),设置N0、N1、N2、N3共4个施氮量水平,施氮量分别为45、90、135、180 kg/hm²,其中2015年试验施加N0和N2水平,2016年施加N1和N3水平。对向日葵在不同盐氮水平下的叶面积动态生长过程、消光系数、辐射截获与利用效率等指标进行监测。结果表明,盐分胁迫会抑制向日葵群体叶面积指数(CLAI)在苗期和蕾期的增长,且在N3施氮量下的影响更为明显,S1和S2水平的CLAI比S0水平分别下降了48.3%和64.4%。S1水平对冠层发展造成的影响会在营养生长停止前得到缓解,而S2水平下的向日葵在进入成熟期后才能进行一定的补偿性生长。各处理的日间光能截获率(f_{PAR})和辐射利用效率(RUE)均表现出从苗期开始持续上升至蕾期中后期,于花期达到峰值,在成熟期出现下降的规律,其中,S0N3处理的 f_{PAR} 及其累积光合有效辐射量(IPAR)在全生育期内均高于其他处理,两年试验中的最大RUE出现在S1N3处理,达到2.26 g/MJ。分析得出,本试验所用向日葵品种的消光系数为0.729。结合修正的Logistic方程及单株最大叶面积指数与有效氮肥施用量(ENA)间的线性相关关系,建立了描述不同盐氮水平下向日葵单株LAI随归一化发展指数动态变化过程的模型。研究表明,在S1水平下,增施氮肥(N2和N3)可减轻盐分胁迫效应,促进叶片生长和光能截获,提升RUE和籽粒产量的累积;在S2水平下,增施氮肥不仅不能促进冠层发展和产量累积,而且还会降低其进入成熟期前的RUE。本研究可为在不同盐渍化水平的农田中合理施用氮肥、定量预测作物冠层发展水平提供依据。

关键词: 向日葵; 盐分胁迫; 施氮量; 冠层生长; 叶面积指数; 辐射利用效率

中图分类号: S565.5; S287 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0292-12

OSID: 

Sunflower Canopy Development, Radiation Absorption and Use Efficiency at Different Nitrogen Application Rates in Saline Fields

MA Tao¹ ZENG Wenzhi² WU Jingwei² DING Jihui¹ YU Shuang'en¹ HUANG Jiesheng²

(1. College of Agricultural Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to study the characteristics of sunflower canopy development and its absorption and use of radiation in saline fields, two years of field experiments were conducted in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia in 2015 and 2016. Three salinity levels were set according to the average EC_e of 0~60 cm depth: mild (S0: 0~3 dS/m), moderate (S1: 3~6 dS/m) and severe (S2: >6 dS/m); the nitrogen application rates were set at four levels, referred as N0, N1, N2 and N3, which were 45 kg/hm², 90 kg/hm², 135 kg/hm² and 180 kg/hm², respectively. The dynamics of LAI, extinction coefficient, light interception and radiation use efficiency (RUE) of sunflower were measured under different salinity and nitrogen levels. The results showed that salt stress obviously inhibited the increase of CLAI at seedling and bud stages, and its effect were more severe under N3 treatment, which decreased the CLAI

收稿日期: 2020-09-15 修回日期: 2020-10-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403304)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200201006)和国家自然科学基金项目(51879196, 51879074)

作者简介: 马韬(1991—),男,讲师,博士,主要从事农业水土工程研究,E-mail: matao@hhu.edu.cn

通信作者: 曾文治(1989—),男,副教授,博士,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: zengwenzhi1989@whu.edu.cn

at S1 and S2 levels by 48.3% and 64.6%, respectively, compared with S0. However, the effect of S1 level on canopy development could be alleviated before the end of vegetative growth, whereas the compensatory growth of sunflower occurred after entering mature stage at S2 level. The daily fraction of light interception (f_{PAR}) and RUE of each treatment were increased constantly from seedling to bud stage, and reached the peak value in flowering stage, and then decreased in mature stage. Among them, the f_{PAR} and the cumulative intercepted PAR of SON3 treatment were higher than those of the other treatments during the crop cycle, but the maximum RUE appeared in S1N3, which reached 2.26 g/MJ in the same year. The research result also showed that the extinction coefficient of sunflower in this experiment was 0.729. By combining the modified Logistic equation with the linear correlation between LAI_{max} and the effective nitrogen application rate (ENA), a model describing the dynamics of LAI with normalized developmental index under different salinity and nitrogen levels was established. These results proved that applying N2 and N3 rate at S1 level could alleviate salt stress, promote leaf growth and light interception, and increase RUE and seed yield accumulation. However, at S2 level, the N2 and N3 rate had no benefit on canopy development and yield accumulation, but could even reduce the RUE before mature stage. The conclusion helped determining the reasonable rates of nitrogen fertilizer under different saline conditions.

Key words: sunflower; salt stress; nitrogen application rate; canopy development; leaf area index; radiation use efficiency

0 引言

土壤盐渍化是干旱半干旱地区粮食减产、土地资源退化的主要影响因素^[1-2]。我国盐渍土总面积超过 3 600 万 hm^2 , 其中耕地面积约 930 万 hm^2 , 占全国耕地总面积的 7%, 广泛分布在西北、华北、东北以及沿海等主要粮食产区^[3]。适量施用氮肥可以促进作物产量的提高。但是, 在受土壤盐渍化危害的地区, 土壤中存在的盐分会改变氮素的转化过程, 从而影响作物对氮素的吸收和利用^[4-5]; 另一方面, 氮肥本身也是一种盐分, 过量施氮会加剧土壤盐渍化, 造成作物进一步减产, 并且影响生态环境^[6-7]。因此, 研究盐氮耦合胁迫条件下的作物生长过程对我国农业可持续发展与粮食安全具有重要意义。

光合作用产物是形成作物产量的物质基础, 而进行光合作用的器官主要是叶片, 驱动光合作用的主要动力则来自于叶片吸收的光能^[8]。已有研究普遍认为, 叶片吸收的光合有效辐射量除受太阳辐射变化影响外, 还受冠层结构因素的影响^[9-11], 如叶面积指数、叶片的形状和大小、叶片空间分布、冠层光能截获率、消光系数等。因此, 在一定环境条件下, 冠层叶片的生长发育状况是影响作物群体对光能的利用效率、并决定其最终产量的核心因素。对向日葵^[6,9]、大豆^[12]、玉米^[13]和番茄^[14]等作物的研究均已表明, 盐分胁迫会明显抑制作物叶面积指数的增长, 并降低冠层的光能截获率。但目前尚未见盐分胁迫对向日葵辐射利用效率 (RUE) 影响的研究报道, 针对其他作物的相关研究结果也存在差别。例如, WANG 等^[12]在大田和温室的试验研究中均发

现, 盐分胁迫会显著降低大豆 RUE, 下降程度分别达到 40% 和 35%; 而 RAZZAGHI 等^[15]对藜麦的研究显示, 盐分胁迫不会对其 RUE 产生显著的影响。

氮素作为形成叶绿素和各类酶的关键成分, 参与了光合作用的各个环节, 故对作物冠层叶片生长和干物质累积过程具有重要的影响作用^[16]。在非盐渍农田中对向日葵、冬小麦、水稻和玉米等作物的研究均显示^[17-20], 氮素亏缺会导致作物的叶面积指数、截获的光合有效辐射量和 RUE 显著下降; 同时, 已有研究表明, 适当增施氮肥可以促进盐渍农田作物的冠层生长发育和产量形成过程^[21-23]。但是, 目前研究较少关注盐氮耦合胁迫条件下作物冠层对光合有效辐射的截获和利用效率, 还无法预测不同盐分和氮素水平下作物叶面积指数的增长过程。

为了探讨盐渍农田作物冠层的生长特性及其对光能吸收利用的规律, 本文选择在盐渍化地区广泛种植的主要经济作物向日葵为研究对象, 在内蒙古河套灌区的盐渍农田中进行两年大田试验, 对向日葵在不同盐分和施氮量水平下的叶面积动态生长过程和消光系数、辐射截获与利用效率等指标进行研究, 旨在定量描述盐渍农田向日葵的冠层变化规律, 为盐渍化地区氮肥的合理施用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大田试验在内蒙古河套灌区 (40°19' ~ 41°18'N, 106°20' ~ 109°19'E) 义长试验站永联基地进行。该地区年降水量为 139 ~ 222 mm, 且集中在 6—8 月间, 年蒸发量为 2 200 ~ 2 400 mm, 蒸降比在 10 以

上。强烈的蒸发使得地下水以及土壤水不断地向上运移,最终导致土壤水分蒸发后,所携带的盐分在土壤表层聚集。因此河套灌区的土壤盐碱化问题非常严重,在当地进行此类研究十分必要。永联试验基地内灌溉和排水条件较好,地下水常年平均埋深为2.21 m左右,灌溉期埋深为0.6 m左右,在河套灌区具有良好的代表性。

1.2 试验设计

2015年和2016年大田试验均在长7.5 m、宽3.5 m的小区内进行,每个小区内敷设3条地膜,膜宽80 cm,膜间距30 cm。采用双因素随机区组设计,每年的试验均设置3个盐分水平和2个施氮量水平,共6个试验小区。于播种前5 d在试验基地内进行分层土壤取样和盐分含量化验,利用电导率仪测定土水比1:5土壤浸提液电导率($EC_{1:5}$, dS/m),然后根据 $EC_e = 7.4EC_{1:5}$ 的经验公式^[24]将其转换为饱和土壤浸提液电导率(EC_e , dS/m)。两年试验均根据播种前0~60 cm土壤深度范围内分层测定结果加权平均后得到的根区土壤初始饱和浸提液电导率($EC_{e,0-60\text{cm}}$)(表1),将各小区分成3种不同程度盐渍化水平的处理,即:轻度S0($0\text{ dS/m} < EC_e < 3\text{ dS/m}$)、中度S1($3\text{ dS/m} \leq EC_e < 6\text{ dS/m}$)和重度S2($EC_e \geq 6\text{ dS/m}$)。盐分处理通过在试验基地内选择盐渍化程度符合以上要求的天然田块实现,每个盐分水平下选择一个田块,于其中建立两个紧邻的试验小区。

各试验小区播种前盐分含量在两年内的变化属同一分级区间,故两年的试验在相同盐分水平的小区内进行,每年施加不同水平的氮肥。如表1所示,2015年试验施氮量设置为N0(基肥施加 45 kg/hm^2 氮肥且不追肥)和N2(基肥施加 45 kg/hm^2 氮肥且追施 90 kg/hm^2)两个水平;2016年试验的施氮量水平设置为N1(基肥施加 90 kg/hm^2 氮肥且不追肥)和N3(基肥施加 90 kg/hm^2 氮肥且追施 90 kg/hm^2)两个

表1 2015年和2016年大田试验各处理盐分水平、施氮量水平及有效氮肥施用量

Tab.1 Soil salinity levels, nitrogen application rates and effective nitrogen applications of different treatments in field experiments in 2015 and 2016

年份	处理	$EC_{e,0-60\text{cm}} /$ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	一阶动力学 反应系数	施氮量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	有效氮肥 施用量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
2015	S0N0	1.878	0.047 2	45	2.125
	S0N2	1.723	0.047 4	135	6.405
	S1N0	5.017	0.042 8	45	1.924
	S1N2	5.898	0.041 5	135	5.609
	S2N0	8.157	0.038 5	45	1.734
	S2N2	9.035	0.037 4	135	5.047
2016	S0N1	2.613	0.046 2	90	4.154
	S0N3	2.227	0.046 7	180	8.408
	S1N1	4.731	0.043 2	90	3.884
	S1N3	5.515	0.042 1	180	7.573
	S2N1	6.847	0.040 3	90	3.624
	S2N3	7.158	0.039 8	180	7.173

水平。

各小区供试土壤的分层平均基础理化性质如表2所示。在完成地膜覆盖后,分别于2015年5月4日和2016年5月9日进行灌溉,各处理灌溉深度均为30 cm。待试验田块内土壤水分状况适宜播种后,分别于2015年5月28日和2016年6月5日在地膜上进行穴播,每穴3粒,播种向日葵品种选用食葵(GL601)。于播种后第10天进行间苗,间苗后每穴留苗1株。每条地膜播种两行,播种密度为 $42\ 800\text{ 株/hm}^2$,行距50 cm,株距50 cm。基肥在覆膜时同步施加,采用磷酸二铵(含N 18%)和尿素(含N 46%)按1:1的比例混合施加。两年试验的追肥均以尿素的形式在播种后第20天施加。其余的大田耕作措施,如防虫、除草等均与当地农户保持一致。

表2 大田试验土壤基础理化性质

Tab.2 Basic physical and chemical properties of soils in field experiment

土壤深度/ cm	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤颗粒质量分数/%			土壤 土质	有机质质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH值
		0~0.002 mm	0.002~0.05 mm	>0.05 mm				
0~10	1.35	10.28	71.67	18.05	粉壤土	14.64	0.59	7.79
10~20	1.38	7.85	72.29	19.86	粉壤土	15.14	0.61	7.93
20~30	1.44	6.85	78.88	14.28	粉壤土	10.74	0.59	8.00
30~40	1.55	20.20	61.34	18.46	粉壤土	10.60	0.55	8.05
40~60	1.61	16.51	77.82	5.67	粉壤土	12.86	0.55	8.10
60~80	1.59	10.36	66.31	23.33	粉壤土	11.47	0.63	8.07
80~100	1.52	11.89	33.05	55.06	沙壤土	10.24	0.59	8.08

1.3 观测内容及方法

1.3.1 气象数据

本文的气象数据来源于永联试验基地内安装的

自动气象观测站(RR-9170型,北京雨根科技有限公司)。2015年和2016年试验期间的逐日降雨量,日最高、最低气温和太阳辐射量如图1所示。

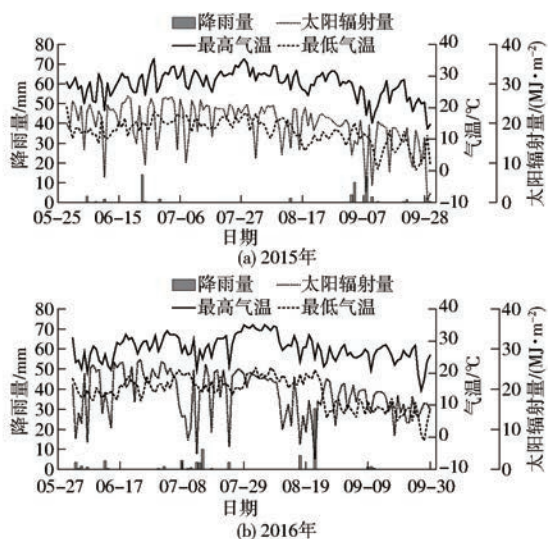


图 1 2015 年和 2016 年试验期间气象数据

Fig. 1 Meteorological data during field experiments in 2015 and 2016

1.3.2 叶面积指数

(1) 单株叶面积指数

在每个试验小区中选定 3 株长势基本一致的向日葵对其叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 进行连续定株观测。其中, 2015 年试验在 6 月 11 日—9 月 11 日间进行了 8 次观测, 2016 年试验在 6 月 28 日—9 月 18 日间进行了 11 次观测。观测方法为利用卷尺分别测量每株向日葵所有叶片的最大长度 L 和最大宽度 S , 根据陈建忠^[25] 提出的转换系数计算其叶片面积 ($0.6564LS$), 并将其转换为 LAI。

(2) 群体叶面积指数

2016 年大田试验中, 分别于播种后第 53、71、106 天 (Days after sowing, DAS) 通过冠层分析仪 (CI-110 型, 美国 CID 公司), 对各小区向日葵的连续冠层结构进行 3 次观测, 获取向日葵冠层图像、冠层叶面积指数 (Canopy leaf area index, CLAI) 和冠层透光率 (Transmission coefficient, TC)。为保证一致性, 每次观测在各小区的相同位置, 于离地 10 cm 高度处进行。

1.3.3 光合有效辐射量

在观测向日葵 LAI 的同一天, 选取同一小区前中后 3 个位置, 使用光量子传感器 (Li-190SA 型和 Li-191SA 型, 美国 Li-COR 公司) 测量光合有效辐射量。测量时间为 11:00—13:00, 每隔 30 min 进行一次, 共进行 4 次, 每次读取冠层上方和下方的光合有效辐射量。其中, 使用 Li-191SA 型线性光量子传感器, 在离地面高度 30 cm 处测量冠层下方数值; 使用 Li-190SA 型点状光量子传感器, 在高于第一片完全展开叶 10 cm 处测量冠层上方数值。

1.3.4 干物质质量和籽粒产量

在两年大田试验中分别进行 4 次植株生物量取样。其中, 2015 年取样分别在播种后第 23、56、73、106 天进行; 2016 年分别在播种后第 28、52、66、106 天进行。每次测量时, 在各试验小区中选取 3 株长势可以代表该小区向日葵平均长势水平的植株, 于根系与茎秆分界处截断, 挖取大部分植株根系, 将地上部分和根系 70℃ 干燥至恒定质量测定其干物质质量。收获时, 在每个小区内随机挑选 10 株成熟的向日葵, 提取其花盘上全部生籽粒, 干燥测定其籽粒产量。

1.4 观测指标及分析

1.4.1 归一化发展指数

相同品种作物的生育期在不同年份也随着播期、水分养分状况、气象条件等因素的不同而变化, 故进行统一研究必须使用统一的时间尺度。本研究采用活动积温来对生育期进行归一化处理。根据实际观测, 向日葵在花期结束时 LAI 达到全生育期的最大值, 故以花期结束日为界, 将整个生育期分为两个阶段, 播种日—花期结束日为第 1 阶段, 积温用 A_{T_1} 表示, 花期结束日—成熟期结束日为第 2 阶段, 积温用 A_{T_2} 表示, 计算公式为

$$D_j = \begin{cases} \frac{\sum_{l=1}^j T_l}{A_{T_1}} & (0 < j \leq p) \\ 1 + \frac{\sum_{l=p}^j T_l}{A_{T_2}} & (p < j \leq q) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $A_{T_1} = \sum_{l=1}^p T_l$ $A_{T_2} = \sum_{l=p}^q T_l$
式中 p, q ——向日葵生育期第 1 阶段和第 2 阶段的天数

T_l ——播种天数为 l 时活动温度, 若日平均气温大于等于 10℃, 则 T_l 为当日平均气温; 若日平均气温小于 10℃, 则 T_l 为 0

D_j ——积温归一化后的播种后第 j 天向日葵归一化发展指数, 第 1 阶段取值范围为 0~1.0, 第 2 阶段取值范围为 1.0~2.0

1.4.2 相对叶面积指数动态变化函数

为了对不同年份不同处理的向日葵 LAI 动态变化进行统一研究, 本文参照林忠辉等^[26] 提出的夏玉米 LAI 增长模型的研究方法, 首先对 LAI 测量结果进行归一化处理, 即

$$RLAI_j = \frac{LAI_j}{LAI_{max}} \quad (2)$$

式中 $RLAI_j$ ——播种后第 j 天的相对叶面积指数, 最大值为 1

LAI_{max} ——向日葵整个生育期内的最大单株叶面积指数, cm^2/cm^2

以 $RLAI_j$ 为因变量, D_j 为自变量, 向日葵的相对叶面积指数动态变化函数可以采用修正的 Logistic 方程形式^[27], 即

$$RLAI_j = \frac{1}{1 + e^{a_0 + a_1 D_j + a_2 D_j^2}} \quad (3)$$

式中 a_0, a_1, a_2 ——经验参数

1.4.3 光能截获率

正午光能截获率计算式为

$$f_{PARn} = 1 - \frac{I_s}{I_0} \quad (4)$$

式中 I_0, I_s ——冠层上方和下方的光合有效辐射量, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

日间光能截获率 f_{PAR} 可以通过 f_{PARn} 由 CHARLES-EDWARDS 等^[28] 提出的转换方法得到, 即

$$f_{PAR} = \frac{2f_{PARn}}{1 + f_{PARn}} \quad (5)$$

根据 MONTEITH 等^[29] 提出的方法, 每日进入冠层的光合有效辐射 (Photosynthetically active radiation, PAR, MJ/m^2) 估算式为

$$PAR = 0.5R_g \quad (6)$$

式中 R_g ——每日的太阳辐射量, MJ/m^2 , 由气象资料直接得到

将 PAR 与 f_{PAR} 相乘, 可以得到每日冠层的光合有效辐射截获量 (Intercepted photosynthetically active radiation, IPAR) 为

$$I_{PAR} = f_{PAR} PAR \quad (7)$$

1.4.4 消光系数

消光系数 k 是反映作物群体光辐射特征的重要指标。其表示单位 LAI 引起的群体相对照度的变化, 大小主要与植物的株型有关^[30], 故本文不考虑其在不同盐氮处理间的差异。根据 MONSI^[31] 对冠层消光系数的研究, k 与 f_{PAR} 和 LAI 之间的关系式为

$$f_{PAR} = 1 - e^{-kLAI} \quad (8)$$

$$k = -\frac{\ln(1 - f_{PAR})}{LAI} \quad (9)$$

1.4.5 辐射利用效率

作物的辐射利用效率 (Radiation use efficiency, RUE) 定义为利用截获的单位光合有效辐射量 (IPAR) 通过光合作用所产生的干物质量, 计算公式

为

$$RUE = \frac{\Delta b}{\Delta I_{PAR}} \quad (10)$$

式中 Δb ——作物在某时段内通过光合作用所产生的干物质量, g/m^2

ΔI_{PAR} ——作物冠层在某时段内的光合有效辐射截获量, MJ/m^2

1.4.6 有效氮肥施用量

为了将作物生长指标与盐分、施氮量水平建立关系, 首先应建立可以同时考虑盐分水平、施氮量及其耦合效应的指标。根据曾文治^[32] 的研究成果, 盐渍化农田有效氮肥施用量 ENA (Effective nitrogen application, kg/hm^2) 可表示为

$$ENA = \alpha N \quad (11)$$

其中 $\alpha = 0.089e^{-S/59.101} - 0.039$

式中 α ——尿素水解为铵态氮过程的一阶动力学反应系数

S ——播种前土壤盐分含量, 即表 1 中的 $EC_{e, 0-60 \text{ cm}}$, dS/m

N ——各小区全生育期内氮肥施用量, kg/hm^2

计算所得两年试验各处理 ENA 如表 1 所示。

1.5 数据处理方法

采用 Excel 2016 处理数据; 采用 SPSS 20.0 统计分析软件对试验数据进行方差分析; 采用 Origin 2017 软件作图。此外, 采用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 两项指标对盐渍农田向日葵 LAI 预测模型的模拟效果进行评价, R^2 越大, RMSE 越小, 表明模拟效果越好。

2 结果与分析

2.1 盐渍农田向日葵叶面积的动态变化

2.1.1 连续冠层发展规律

2016 年大田试验中观测得到的各处理冠层图像、冠层叶面积指数 (CLAI) 和冠层透光率 (TC) 如图 2 所示。结果显示, 在蕾期中期, 盐分胁迫明显抑制向日葵叶片的生长。N1 施氮量下, S1 和 S2 盐分水平的 CLAI 分别相对于 S0 处理下降了 39.3% 和 65.6%; N3 施氮量下, S1 和 S2 水平的 CLAI 分别相对于 S0 处理下降了 48.3% 和 64.4%。在花期结束时, S0 和 S1 水平的 CLAI 达到全生育期内的最大值, 并且 S1 水平下的 CLAI 水平与 S0 处理的差距逐渐缩小, S1N1 和 S1N3 的 CLAI 上升至分别高于同时期 S0N1 处理 1.7% 和 7.0% 的水平。在成熟期, S0 和 S1 水平的向日葵叶片出现了大幅衰老, 其中 S0 水平的衰老程度较 S1 处理更为严重。但是, S2N1 和 S2N3 的 CLAI 在该阶段内却分别上升了

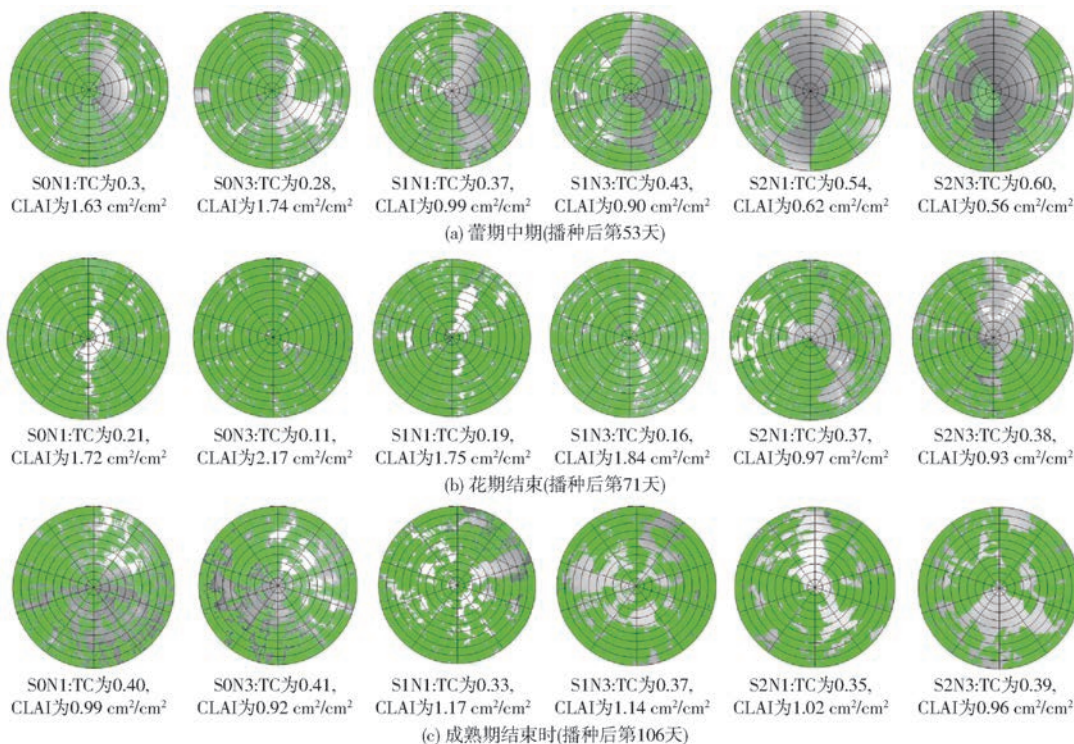


图 2 2016 年大田试验向日葵冠层图像、冠层透光率和群体叶面积指数

Fig. 2 Sunflower canopy images, transmission coefficient and canopy leaf area index in 2016

5.2% 和 3.2%, 并且 S2N3 的 CLAI 在全生育期内均小于 S2N1。

对于 TC, 其在不同生育阶段的变化趋势与 CLAI 完全相反, 随着生育期的推进先减小后增大, 最小值出现在花期结束时的 S0N3 处理小区中, 仅为 0.11, 说明有接近 90% 的直射光线无法透过冠层到达地面。

2.1.2 单株相对叶面积指数增长规律

2015 年和 2016 年大田试验不同处理向日葵 RLAI 随归一化发展指数的动态变化如图 3 所示。其变化趋势均为先缓慢上升, 在 D_j 为 0.4 之后快速上升, 当 D_j 为 1.0 时 RLAI 达到 1, 之后因为叶片的衰老, 在 D_j 为 1.0 ~ 2.0 的区间内快速下降。采用式(3)中修正的 Logistic 方程对全部数据进行拟合

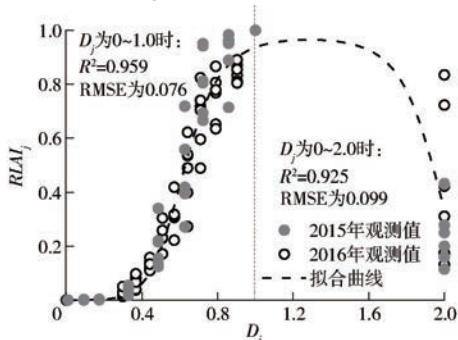


图 3 2015 年和 2016 年大田试验向日葵单株相对叶面积指数随归一化发展指数的动态变化

Fig. 3 Dynamics of relative leaf area index with normalized developmental index from 2015 and 2016

后, 拟合曲线如图 3 中虚线所示, 拟合方程为

$$RLAI_j = \frac{1}{1 + e^{9.449 - 19.900D_j + 7.756D_j^2}} \quad (12)$$

该曲线在全生育期内对动态变化的 RLAI 拟合效果 $R^2 = 0.925$, RMSE 为 0.099; 若不考虑成熟期叶片的衰老阶段 (D_j 为 1.0 ~ 2.0) 的拟合结果, 只考虑 D_j 为 0 ~ 1.0 的叶片生长阶段的拟合效果, R^2 可以达到 0.959, RMSE 下降至 0.076, 说明该拟合函数对盐渍农田向日葵 RLAI 的拟合效果较好, 可以预测 RLAI 的动态变化。

2.1.3 单株叶面积指数预测模型

2015 年和 2016 年大田试验不同处理向日葵的 LAI_{max} 分别如图 4a、4b 所示。总体而言, 两年试验中 LAI_{max} 均随着盐分水平的上升而下降。但是, 在 S1 盐分水平下, N2 和 N3 施氮量对盐分胁迫的抑制有缓解作用, 其 LAI_{max} 明显高于相应的 N0 和 N1 处理; 而在 S2 水平下, N2 和 N3 处理的 LAI_{max} 略低于相应的 N0 和 N1 处理。

综合两年的试验数据, 以不同处理的 ENA 为横坐标(表 1), 以相应的 LAI_{max} 为纵坐标, 对两者的相关性进行分析。图 4c 中, 向日葵的 LAI_{max} 与 ENA 之间具有良好的线性相关关系。其中, 在 S0 和 S1 盐分水平下, LAI_{max} 与 ENA 呈线性正相关关系, $R^2 = 0.792$; 在 S2 水平下, 呈线性负相关关系, $R^2 = 0.861$ 。因此, 本文结合式(12)和图 4c 中的线性关系, 得到盐渍农田向日葵单株 LAI 随积温控制生育

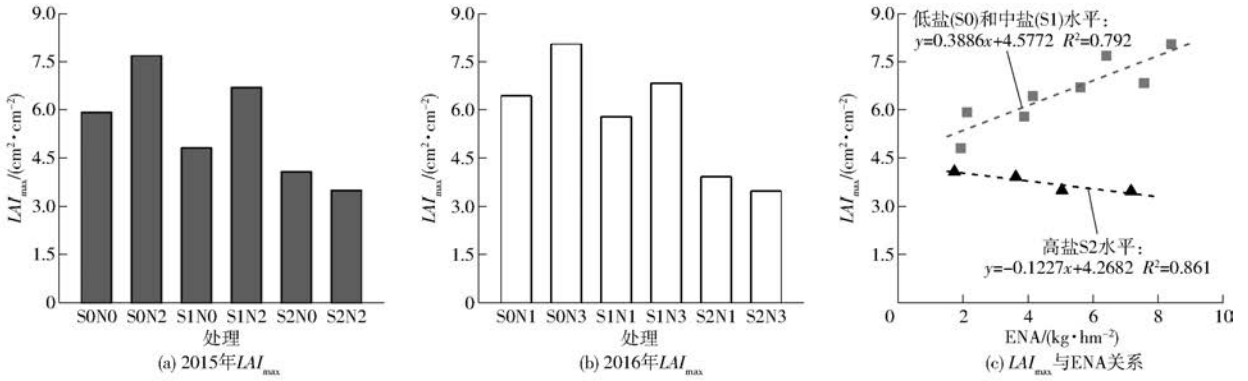


图4 大田试验向日葵全生育期最大单株叶面积指数及其在不同盐分水平下与有效氮肥施用量相关关系

Fig.4 Maximum leaf area index during crop cycle and its correlation with effective nitrogen applications under different soil salinity levels

阶段的变化模型为

$$LAI_j = LAI_{max} RLAI_j = \begin{cases} \frac{0.3886ENA + 4.5772}{1 + e^{9.449 - 19.900D_j + 7.756D_j^2}} & (0 < S \leq 6 \text{ dS/m}) \\ \frac{-0.1227ENA + 4.2682}{1 + e^{9.449 - 19.900D_j + 7.756D_j^2}} & (S > 6 \text{ dS/m}) \end{cases} \quad (13)$$

在使用该模型时,首先要根据播种前土壤初始盐分含量($EC_{e0-60\text{cm}}$)对盐分水平的区间进行判断,然后通过式(1)计算积温和生育阶段 D_j ,通过式(11)计算 ENA,最后选择合适的函数形式对播种后第 j 日的 LAI_j 进行预测。

2.2 盐渍农田向日葵冠层光能截获率和消光系数

2015年和2016年向日葵 LAI 的增长趋势较为接近,故两年试验中冠层辐射截获能力的变化特征也较为相似。因2016年试验对向日葵光合有效辐射量的观测较为密集,故本文以该年数据为代表对不同观测时刻的日间光能截获率进行计算,结果如图5a所示。图中各处理的 f_{PAR} 从苗期开始持续上升至蕾期中期(DAS为50d),在接近1.0之后保持不变,然后随着叶片的衰老,在进入成熟期后略有下降,最下降至0.887(S2N3)。此外,在观测初期, S2盐分水平下的 f_{PAR} 与 S0和S1水平有较大的差距,但随着生育期的推进,这种差距越来越小,在S0和S1水平下的 f_{PAR} 达到1.0后的第5天, S2水平下的 f_{PAR} 也达到了相同水平。图5b为通过式(4)~(7)求得的逐日累积光合有效辐射截获量(I_{PAR})。其中,SON3处理的逐日累积 I_{PAR} 在全生育期内均高于其他所有处理。由于在生育初期 S2水平下的 f_{PAR} 较小,故其逐日累积 I_{PAR} 在全生育期内均小于 S0和S1水平。

2015年和2016年大田试验中所用向日葵品种、种植密度、间距等均一致,故可综合两年试验的 LAI 和 f_{PAR} 数据,通过式(9)对本试验所采用向日葵

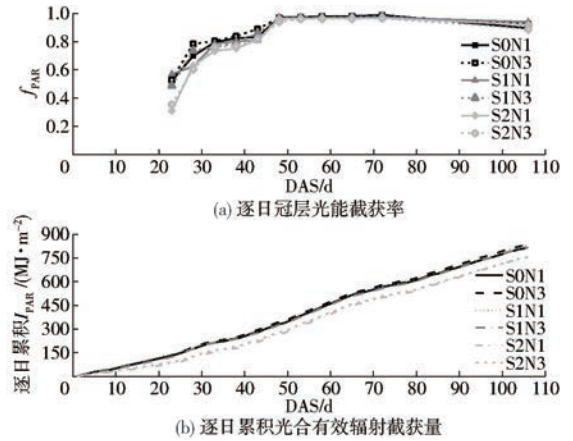


图5 2016年大田试验向日葵对光合有效辐射的截获结果

Fig.5 Sunflower interception of photosynthetically active radiation in 2016

品种的 k 进行计算。如图6所示,冠层日间未截获光能比例的自然对数($\ln(1 - f_{PAR})$)与 LAI 截距为0的线性回归方程斜率为-0.729,故本试验所采用向日葵品种的 k 为0.729。

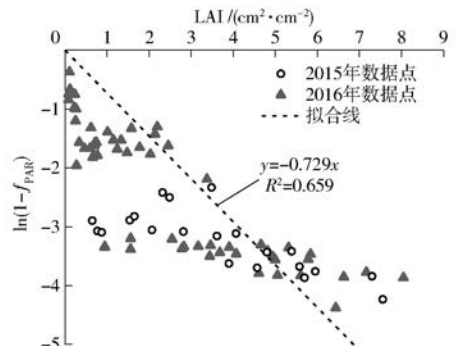


图6 2015年和2016年大田试验冠层日间未截获光能比例的自然对数与单株叶面积指数的线性回归关系

Fig.6 Linear regression between natural logarithm of non-intercepted light and leaf area index

2.3 盐渍农田向日葵辐射利用效率

由图7可知,在不同生育阶段向日葵辐射利用

效率 (RUE) 的变化范围较大。从总体变化趋势上看,从苗期至花期,向日葵 RUE 不断上升,两年 RUE 的最大值均出现在第 3 个观测阶段,其中 2015 年最大 RUE 为 1.38 g/MJ,2016 年为 2.26 g/MJ;进入成熟期后,随着营养生长的完全停止,RUE 出现了明显下降。比较不同盐氮处理下的 RUE 变化情况可知,在苗期和蕾期,不同施氮量水平下 S0 盐分处理的 RUE 均明显高于相应的 S1 和 S2 处理。但是,在两年的第 3 个观测阶段(2015 年 DAS 为 56~73 d,2016 年 DAS 为 52~66 d),除 N0 水平外,不同施氮量水平下 S1 处理的 RUE 均能达到或超过相同时期 S0 处理的水平。此外,从苗期至花期,在 S0 和 S1 处理下,增施氮肥的 N2 和 N3 处理 RUE 均高于同年相应的 N0 和 N1 处理,S2 处理下的规律则相反。但在成熟期,S2N2 和 S2N3 的 RUE 分别比施氮量较低的 S2N0 和 S2N1 处理增加了 49.4% 和 5.8%,说明这两类处理下的向日葵干物质累积量差距在成熟期内缩小。

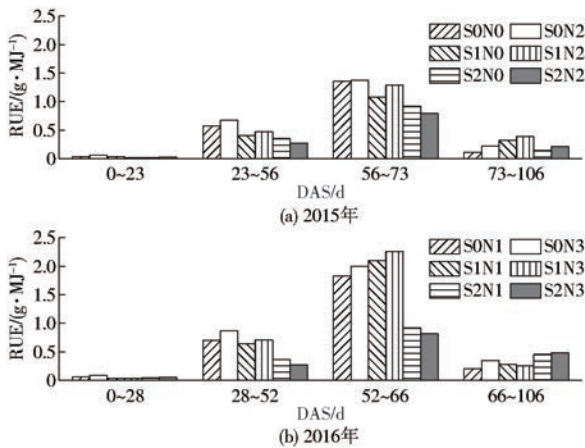


图 7 不同观测阶段向日葵辐射利用效率

Fig. 7 Sunflower radiation use efficiency at different observation stages

2.4 盐渍农田向日葵籽粒产量

向日葵的籽粒产量是其成熟阶段辐射利用与转化过程的最重要产物,也是最终评价其所受胁迫程度的关键指标。如图 8 (图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$))所示,两年试验中的向日葵籽粒产量在不同施氮量下均随盐分水平的增加而逐渐下降。具体而言,在 N0、N1、N2、N3 这 4 个施氮水平下,土壤盐分水平由 S0 升高至 S2 使得向日葵籽粒产量分别下降了 40.1%、52.2%、38.4% 和 50.2%。由图 8 可知,只有 S0N2 和 S0N3 处理的籽粒产量显著高于同年其他盐分水平的处理。并且,两年试验中所有 S1 和 S2 水平的籽粒产量,不论施氮量水平如何,彼此间均没有显著差异。

在氮肥的增产效应方面,在 S0 盐分水平下,施

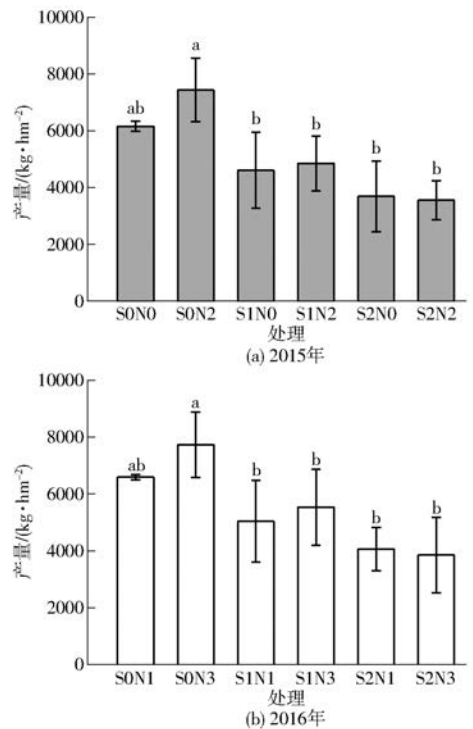


图 8 大田试验不同处理向日葵籽粒产量

Fig. 8 Sunflower seed yield of field experiments in 2015 and 2016

氮量由 N0 增加至 N2 使向日葵籽粒产量增加了 20.7%,由 N1 增加至 N3 的增产幅度为 17.38%。在 S1 水平下,施氮量由 N0 增加至 N2 时籽粒产量仅提高了 5.31%,由 N1 增加至 N3,提高了 9.83%。因此,S0 水平下对向日葵增施氮肥的增产效应明显高于 S1 水平。此外,在 S2 水平下,施氮量的增加不仅没有增产作用,反而会使籽粒产量出现小幅下降。

3 讨论

植物的光合作用和蒸腾作用主要通过叶片进行,因而对叶片生长状况的研究尤为重要。叶面积指数即是定量描述植物群体生长状况、表征植被光能利用状况和冠层结构的一个重要指标^[10]。本文分别通过对向日葵冠层叶面积指数 (CLAI) 和单株叶面积指数 (LAI) 的研究发现,S1 盐分水平在生育前期对向日葵叶片生长造成的影响,会在营养生长停止前随着耐盐性的提升得到缓解,这一现象分别在 STEDUTO 等^[33] 和朱延凯等^[34] 对向日葵和棉花的研究中也有报道。此外,本研究发现,在 S1 水平下增施氮肥 (N3) 可以明显缓解盐分胁迫效应,促进叶片生长,但是该效应从蕾期中期以后才开始显现。刘国欢等^[23] 对冬小麦的研究中同样发现,适宜的土壤施氮量可以在生长中后期缓解盐分胁迫对株高、叶面积及千粒质量的影响,其中对叶面积增长的缓解作用较为显著。这是因为,生育初期作物的耐盐

性较弱^[1],在 S1 水平的土壤中增施氮肥会进一步加剧盐分胁迫程度^[4],造成根系吸水困难,导致作物营养生长缓慢^[22];但是,随着生育阶段的推进,作物会通过无机和有机渗透调节、诱导抗盐基因表达和优先将同化物供给根系生长等适应机制不断提升其耐盐能力^[35],故在进入生育中后期后,适当增加氮素供给可以有效促进作物的营养生长和生殖生长,使其最大程度趋近正常水平^[7]。

本研究中,S2 盐分水平下向日葵叶片在成熟期内仍能进行一定的生长,该现象说明 S2 水平下向日葵会在成熟期内进行一定的补偿生长以弥补前期同化过程受到的限制。类似的补偿生长现象在对遭受水分胁迫的作物^[36]和遭受高盐度胁迫的水生动物的研究中均有发现^[37],可视为生命有机体对逆境胁迫的一种适应策略。但是,在 S2 水平下,S2N3 处理的 CLAI 在全生育期内均小于 S2N1,同时 N2 和 N3 施氮量处理的 LAI_{max} 均略低于相应的 N0 和 N1 处理,说明在该水平下增施氮肥效果不佳。这是因为,在 S2 水平下,虽然向日葵的耐盐性在不断提升,但仍无法适应土壤环境中较高的盐分浓度,此时增施的氮肥只会增加土壤中的盐分含量,进一步加剧盐分胁迫对向日葵叶片生长的抑制作用^[6, 23]。

掌握作物 LAI 的动态变化规律,是揭示作物产量形成和确定高产群体调控指标的重要内容^[38]。因此,为了模拟 LAI 的变化规律,国内外一些学者建立了多种 LAI 预测模型,包括有理方程^[39]、修正的 Gaussian 模型^[40]及修正的 Logistic 方程^[26]等。其中,修正的 Logistic 方程具有较强的生态学意义,已被众多学者广泛应用于对夏玉米、冬小麦和水稻等主要粮食作物 LAI 动态变化规律的模拟^[41]。然而,当前此类模型还主要关注的是作物 LAI 与发育天数或有效积温之间的定量关系,其对各类影响叶片生长过程的胁迫因素的考虑还较为欠缺。贾彪等^[42]利用有理方程建立了棉花 CLAI 与辐热积(TEP)之间的动态变化关系,并且明确了不同施氮量水平与模型中特征参数的调控关系。但是,目前尚未有能够考虑不同盐分胁迫条件及盐氮耦合胁迫作用对 LAI 动态变化过程影响效应的预测模型。本文结合先前对盐渍农田氮肥施用效应的研究成果^[32],采用有效氮肥施用量(ENA)来表示盐分、氮素及其耦合效应对作物生长造成的影响,并在不同盐分水平下将其与向日葵全生育内的 LAI_{max} 建立线性相关关系,从而在利用修正的 Logistic 方程对向日葵 RLAI 变化规律进行描述的基础上,实现了对不同盐氮水平下向日葵 LAI 增长过程的预测。该模拟方法可以应用于其他盐渍农田作物,但由于模型中的各项参

数对于不同作物类型具有特殊性,故在后续的研究中将收集更多的田间观测数据,以对不同作物类型的相关参数进行确定。

消光系数 k 反映了单位面积叶片对太阳辐射的消减状况。在不考虑垂直分布、种植密度和植株间距等差异的情况下,为方便研究,一般将同一品种作物的消光系数 k 取为同一值^[43-44]。在前人对向日葵 k 的研究报道中,出现了不同的结果。例如,在 ORGAZ 等^[45]和 GIMENEZ 等^[46]对阿根廷科尔多瓦地区所种植向日葵品种的研究中,分别得到 k 为 0.86 和 0.95;在 GAROFALO 等^[11]对意大利南部地区向日葵品种的研究中,得到的 k 为 0.82;而徐昭^[9]在河套灌区采用大小行播种,种植密度达到 54 647 株/hm² 条件下的研究结果显示,向日葵的 k 在 0.78 ~ 0.95 区间内。本文研究所得到的 k 略小于其他研究所得结果,其原因可能是品种差异和种植密度较小等因素所导致。本文所确定的 k 可为在盐渍化地区的向日葵农田中进行光合辐射、蒸散发及遥感反演研究时取定相关参数值提供依据。

辐射利用效率(RUE)反映了作物通过叶片截获到达冠层的光合有效辐射,并通过光合作用将其转化为干物质的效率^[47]。本文对向日葵的研究表明,盐分胁迫在苗期和蕾期内降低了向日葵的 RUE,但从蕾期后期开始,这种限制作用在 S1 水平下逐渐减弱。这是因为,盐分胁迫在向日葵苗期和蕾期阶段会大幅降低叶片的净光合速率和气孔导度^[21],从而导致同化物生成效率的下降。同时,STEDUTO 等^[33]在向日葵对盐分胁迫适应特征的研究中表明,在逐渐适应中度盐分胁迫后,向日葵会通过调控叶片生长速率以增加辐射截获,同时保障叶片气孔导度和 CO₂ 交换能力,逐步提升其对碳素的同化能力,从而减轻盐分胁迫的影响程度。但值得注意的是,虽然 S1 水平下的向日葵 RUE 在生育后期可以达到或超过相应的 S0 水平,但是盐分胁迫对向日葵籽粒产量的限制程度仍明显高于其对干物质累积过程的限制,这一现象的原因还有待进一步研究。同时,本研究的两年试验也证明,在当年基础上追施 90 kg/hm² 氮肥可以在 S0 和 S1 水平下提升向日葵的 RUE,加速耐盐性的提升,并最终促进籽粒产量的形成。但是,在 S2 水平下,施氮量的增加不仅没有增产作用,反而会降低向日葵进入成熟期以前的 RUE。此外,图 7b 中 S2 水平下由花期至成熟期(DAS 为 66 ~ 106 d)的 RUE 高于其他所有处理,这也证明前期遭受重度盐分胁迫的向日葵在成熟期内仍会进行一定的补偿生长。

4 结论

(1) 盐分胁迫会抑制向日葵冠层在苗期和蕾期内的生长,但中度盐分水平(S1)在生育前期对向日葵冠层发展造成的影响会在营养生长停止前得到缓解,而重度盐分水平(S2)下向日葵仅能在成熟期内进行一定的补偿性叶片生长,以弥补前期同化过程受到的限制。

(2) 本文研究的向日葵品种的消光系数为 0.729。盐分胁迫在苗期和蕾期内降低了向日葵的 RUE,从蕾期后期开始,RUE 受到的限制作用在 S1 水平下逐渐减弱。盐分胁迫对向日葵籽粒产量的限制程度仍明显高于其对干物质累积过程的限制,在 N0、N1、N2、N3 这 4 个施氮量水平下,土壤盐分水平

由轻度(S0)升高至重度(S2)时,向日葵籽粒产量分别下降了 40.1%、52.2%、38.4% 和 50.2%。

(3) 在 S1 水平下,增施氮肥(N2、N3)可以缓解盐分胁迫效应、促进叶片生长和光能截获,提升辐射利用效率(RUE)和籽粒产量的累积;但在 S2 水平下,增施氮肥对向日葵冠层发展和产量累积均没有益处,反而会降低其进入成熟期之前的 RUE。

(4) 采用修正的 Logistic 方程可以较好地反映盐渍农田向日葵单株相对叶面积指数随积温控制的归一化发展指数的变化关系,向日葵单株最大叶面积指数与有效氮肥施用量之间具有良好的线性相关关系,鉴于此,本文建立了盐渍农田向日葵单株 LAI 随积温控制的归一化发展指数变化的预测模型。

参 考 文 献

- [1] MUNNS R, GILLIHAM M. Salinity tolerance of crops-what is the cost? [J]. *New Phytologist*, 2015, 208(3): 668–673.
- [2] CHARTRES C J, NOBLE A. Sustainable intensification: overcoming land and water constraints on food production [J]. *Food Security*, 2015, 7(2): 235–245.
- [3] 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点 [J]. *地理学报*, 2012, 67(9): 1233–1245.
LI Jianguo, PU Lijie, ZHU Ming, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1233–1245. (in Chinese)
- [4] 陶健宇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 河套灌区土壤盐分对化肥氮素转化过程的影响研究 [J]. *土壤*, 2020, 52(5): 1–9.
TAO Jianyu, YANG Jingsong, YAO Rongjiang, et al. Effects of soil salinity on nitrogen transformation in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, China [J]. *Soils*, 2020, 52(5): 1–9. (in Chinese)
- [5] ZENG W, XU C, WU J, et al. Effect of salinity on soil respiration and nitrogen dynamics [J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2013, 20(3): 519–30.
- [6] 曾文治, 徐驰, 黄介生, 等. 土壤盐分与施氮量交互作用对葵花生长的影响 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 86–94.
ZENG Wenzhi, XU Chi, HUANG Jiasheng, et al. Interactive effect of salinity and nitrogen application on sunflower growth [J]. *Transactions of the CASE*, 2014, 30(3): 86–94. (in Chinese)
- [7] 张继峰, 王振华, 张金珠, 等. 滴灌下氮盐交互对加工番茄荧光特性及产量品质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53(5): 990–1003.
ZHANG Jifeng, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu, et al. The influences of different nitrogen and salt levels interactions on fluorescence characteristics, yield and quality of processed tomato under drip irrigation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(5): 990–1003. (in Chinese)
- [8] 郭江, 肖凯, 郭新宇, 等. 玉米冠层结构、光分布和光合作用研究综述 [J]. *玉米科学*, 2005, 13(2): 55–59.
GUO Jiang, XIAO Kai, GUO Xinyu, et al. Review on maize canopy structure, light distributing and canopy photosynthesis [J]. *Journal of Maize Science*, 2005, 13(2): 55–59. (in Chinese)
- [9] 徐昭. 水肥调控对盐渍化灌区向日葵冠层结构和光合性能的影响研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
XU Zhao. The impact of water and fertilizer regulation on sunflower canopy structure and photosynthetic characteristics in salinization irrigation district [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [10] 王希群, 马履一, 贾奎奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 537–541.
WANG Xiqun, MA Lüyi, JIA Zhongkui, et al. Research and application advances in leaf area index (LAI) [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 537–541. (in Chinese)
- [11] GAROFALO P, RINALDI M. Leaf gas exchange and radiation use efficiency of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in response to different deficit irrigation strategies: from solar radiation to plant growth analysis [J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 64: 88–97.
- [12] WANG D, SHANNON M, GRIEVE C. Salinity reduces radiation absorption and use efficiency in soybean [J]. *Field Crops Research*, 2001, 69(3): 267–277.
- [13] 闫建文. 盐渍化土壤玉米水氮迁移规律及高效利用研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
YAN Jianwen. Study on the water and nitrogen migration regularity and efficient utilization of maize in the salinity soil [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [14] DE PASCALE S, MAGGIO A, ORSINI F, et al. Growth response and radiation use efficiency in tomato exposed to short-term and long-term salinized soils [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 189: 139–149.
- [15] RAZZAGHI F, AHMADI S H, JACOBSEN S E, et al. Effects of salinity and soil-drying on radiation use efficiency, water productivity and yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2012, 198(3):

- 173 – 184.
- [16] CECHIN I, FUMIS T D F. Effect of nitrogen supply on growth and photosynthesis of sunflower plants grown in the greenhouse [J]. *Plant Science*, 2004, 166(5): 1379 – 1385.
- [17] JOEL G, GAMON A, FIELD B, et al. Production efficiency in sunflower: the role of water and nitrogen stress [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(2): 176 – 188.
- [18] CAVIGLIA O P, SADRAS V O. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat [J]. *Field Crops Research*, 2001, 69(3): 259 – 266.
- [19] LI D, TANG Q, ZHANG Y, et al. Effect of nitrogen regimes on grain yield, nitrogen utilization, radiation use efficiency, and sheath blight disease intensity in super hybrid rice [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(1): 134 – 143.
- [20] 高阳, 申孝军, 杨林林, 等. 不同水氮处理对玉米-大豆间作群体内作物光能截获、竞争和利用的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 815 – 822.
- GAO Yang, SHEN Xiaojun, YANG Linlin, et al. Effects of water and nitrogen on interception, competition and utilization of radiation in a maize – soybean intercropping system [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 815 – 822. (in Chinese)
- [21] ZENG W, XU C, WU J, et al. Impacts of salinity and nitrogen on the photosynthetic rate and growth of sunflowers (*Helianthus annuus* L.) [J]. *Pedosphere*, 2014, 24(5): 635 – 644.
- [22] MA T, ZENG W, LI Q, et al. Shoot and root biomass allocation of sunflower varying with soil salinity and nitrogen applications [J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(6): 2545 – 2555.
- [23] 刘国欢, 周蓓蓓, 侯亚玲, 等. 施氮对缓解冬小麦盐分胁迫的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(增刊1): 36 – 40.
- LIU Guohuan, ZHOU Beibei, HOU Yaling, et al. Effects of nitrogen on winter wheat growth under different salt stress [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(Supp.1): 36 – 40. (in Chinese)
- [24] HACHICHA M, MANSOUR M, REJEB S, et al. Applied research for the utilization of brackish/saline water in center of Tunisia: water use, salinity evolution and crop response [C]//The Proceedings of International Salinity Forum, USDA – ARS Salinity Lab, Riverside, USA, 2005.
- [25] 陈建忠. 向日葵叶面积调整系数 [J]. *中国油料*, 1984(1): 72 – 75.
- CHEN Jianzhong. The adjustment coefficient of sunflower leaf area [J]. *Chinese Oil Plants*, 1984(1): 72 – 75. (in Chinese)
- [26] 林忠辉, 项月琴, 莫兴国, 等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 74 – 77.
- LIN Zhonghui, XIANG Yueqin, MO Xingguo, et al. Normalized leaf area index model for summer maize [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(4): 74 – 77. (in Chinese)
- [27] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程 [J]. *农业气象*, 1986(1): 14 – 19.
- WANG Xinli. How to use Logistic equation reasonably in dynamic simulation of crop dry matter accumulation [J]. *Agrometeorology*, 1986(1): 14 – 19. (in Chinese)
- [28] CHARLES-EDWARDS D, LAWN R. Light interception by grain legume row crops [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1984, 7(4): 247 – 251.
- [29] MONTEITH J, UNSWORTH M. Principles of environmental physics [M]. Third edition. London: Academic Press, 2007.
- [30] 徐正进, 陈温福, 张龙步, 等. 水稻不同穗型群体冠层光分布的比较研究 [J]. *中国农业科学*, 1990, 23(4): 10 – 16.
- XU Zhengjin, CHEN Wenfu, ZHANG Longbu, et al. Comparative study on light distribution in rice canopies with different panicle types [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23(4): 10 – 16. (in Chinese)
- [31] MONSI M. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion [J]. *Japanese Journal of Botany*, 1953, 14: 22 – 52.
- [32] 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. (in Chinese)
- [33] STEDUTO P, ALBRIZIO R, GIORIO P, et al. Gas-exchange response and stomatal and non-stomatal limitations to carbon assimilation of sunflower under salinity [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2000, 44(3): 243 – 255.
- [34] 朱延凯, 王振华, 李文昊. 不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 298 – 305.
- ZHU Yankai, WANG Zhenhua, LI Wenhao. Effects of different salt stress on physiological growth and yield of cotton under drip irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 298 – 305. (in Chinese)
- [35] GONG Z, XIONG L, SHI H, et al. Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency [J]. *Science China Life Sciences*, 2020, 63(5): 635 – 674.
- [36] NIU J, ZHANG S, LIU S, et al. The compensation effects of physiology and yield in cotton after drought stress [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 224(1): 30 – 48.
- [37] WU C, GOMEZMESTRE I, KAM Y. Irreversibility of a bad start: early exposure to osmotic stress limits growth and adaptive developmental plasticity [J]. *Oecologia*, 2012, 169(1): 15 – 22.
- [38] 张宾, 赵明, 董志强, 等. 作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验 [J]. *作物学报*, 2007, 33(4): 612 – 619.
- ZHANG Bin, ZHAO Ming, DONG Zhiqiang, et al. Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 612 – 619. (in Chinese)
- [39] 李向岭, 赵明, 李从锋, 等. 玉米叶面积系数动态特征及其积温模型的建立 [J]. *作物学报*, 2011, 37(2): 321 – 330.
- LI Xiangling, ZHAO Ming, LI Congfeng, et al. Dynamic characteristics of leaf area index in maize and its model establishment based on accumulated temperature [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2): 321 – 330. (in Chinese)
- [40] 王瑞军, 李世清, 王全九, 等. 半干旱农田生态系统春玉米叶面积及叶生物量模拟的比较研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 139 – 144.

- WANG Ruijun, LI Shiqing, WANG Quanjiu, et al. Evaluation of simulation models of spring-maize leaf area and biomass in semiarid agro-ecosystems [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(1): 139–144. (in Chinese)
- [41] 王全九, 刘云鹤, 苏李君. 基于单参数 Logistic 的典型作物相对叶面积指数模型研究 [J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 210–219.
WANG Quanjiu, LIU Yunhe, SU Lijun. Relative leaf area index of typical crops based on single parameter Logistic model [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(7): 210–219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200724&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.024. (in Chinese)
- [42] 贾彪, 钱瑾, 马富裕. 氮素对膜下滴灌棉花叶面积指数的影响 [J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 79–87.
JIA Biao, QIAN Jin, MA Fuyu. Simulating effects of nitrogen on leaf area index of cotton under mulched drip irrigation [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 79–87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150213&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.013. (in Chinese)
- [43] FLENET F, KINIRY J R, BOARD J E, et al. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower [J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88(2): 185–190.
- [44] 赵会杰, 邹琦, 郭天财, 等. 密度和追肥时期对重穗型冬小麦品种 L906 群体辐射和光合特性的调控效应 [J]. *作物学报*, 2002, 28(2): 270–277.
ZHAO Huijie, ZOU Qi, GUO Tiancai, et al. Regulating effects of density and top-dressing time of nitrogen on characteristics of radiation transmission and photosynthesis in canopy of massive-spike winter wheat variety L906 [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(2): 270–277. (in Chinese)
- [45] ORGAZ F, VILLALOBOS F, GIMENEZ C, et al. Radiation use efficiency of sunflower genotypes [C]//The Proceedings of the 13th International Sunflower Conference, Pisa, Italy, 1992.
- [46] GIMENEZ C, CONNOR D, RUEDA F. Canopy development, photosynthesis and radiation-use efficiency in sunflower in response to nitrogen [J]. *Field Crops Research*, 1994, 38(1): 15–27.
- [47] 李华龙, 窦子荷, 蒋腾聪, 等. 水分胁迫对冬小麦冠层辐射截获率和利用效率的影响 [J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 226–237.
LI Hualong, DOU Zihé, JIANG Tengcong, et al. Influences of soil water stress on solar radiation interception and use efficiency of winter wheat canopy [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 226–237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180927&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.027. (in Chinese)

(上接第 245 页)

- [21] 姜红花, 王鹏飞, 张昭, 等. 基于卷积网络和哈希码的玉米田间杂草快速识别方法 [J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 30–38.
JIANG Honghua, WANG Pengfei, ZHANG Zhao, et al. Fast identification of field weeds based on deep convolutional network and binary Hash code [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 30–38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181104&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.004. (in Chinese)
- [22] 孙俊, 何小飞, 谭文军, 等. 空洞卷积结合全局池化的卷积神经网络识别作物幼苗与杂草 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(11): 159–165.
SUN Jun, HE Xiaofei, TAN Wenjun, et al. Recognition of crop seedling and weed recognition based on dilated convolution and global pooling in CNN [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(11): 159–165. (in Chinese)
- [23] 孙哲, 张春龙, 葛鲁镇, 等. 基于 Faster R-CNN 的田间西兰花幼苗图像检测方法 [J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 216–221.
SUN Zhe, ZHANG Chunlong, GE Luzhen, et al. Image detection method for broccoli seedlings in field based on Faster R-CNN [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 216–221. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190723&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.023. (in Chinese)
- [24] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector [C]//European Conference on Computer Vision, 2016: 21–37.
- [25] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster RCNN: towards real time object detection with region proposal networks [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137–1149.
- [26] HOWARD A G, ZHU M, CHEN B, et al. MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications [EB/OL]. [2017–04–17]. <https://arxiv.org/abs/1704.04861>.
- [27] HU J, LI S, ALBANIE S, et al. Squeeze-and-excitation networks [EB/OL]. [2017–09–05]. <https://arxiv.org/abs/1709.01507>.
- [28] ZEILER M D, KRISHNAN D, TAYLOR G W, et al. Deconvolutional networks [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 2528–2535.