

盐氮效应对棉花氮素分配、转运和利用效率的影响

余天源, 何新林, 衡 通

(石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003)

摘要: 探究盐氮效应对棉花氮素动态积累、运转及利用效率的影响机制。以棉花“新陆中 68 号”为材料, 设置土壤盐分含量为 S1(2.5~3 g/kg)、S2(5~6 g/kg)和 S3(8~9 g/kg), 施氮量分别 N1(105 kg/hm²)、N2(210 kg/hm²)、N3(315 kg/hm²)处理进行田间小区试验。通过 Logistic 生长函数模型对各器官生物量氮素累积进行拟合, 以 V_m (最高累积速率)和 Δt (持续时间)为 2 个动态特征指标分析盐氮对棉花生物量氮素快速累积时间和速率的影响。结果表明, 营养器官(根、茎、叶)生物量 S1N3 处理最大, 棉铃生物量 S1N2 处理最大, S3 条件下棉铃生物量表现为 N3>N2>N1。各营养器官积氮量 S2 处理均达到较大, 在 S1 和 S2 中茎积氮量为 N2>N3>N1。在 S2 和 S3 中叶积氮量为 N3>N2>N1, 棉铃积氮量为 S1>S2>S3 和 N3>N2>N1, 根积氮量 N3>N2>N1。N1S3 处理各营养器官生物量积氮量 Δt 最小, V_m 最大。盐分显著抑制棉花各器官生物量和氮素积累量及 V_m ($P<0.5$)。施氮量与土壤盐分存在明显的互作效应。氮肥在盐分 S1 和 S2 中 N2 和在盐分 S3 中氮肥 N3 最利于生殖器官生物量积累及 V_m 。盐分越高, 氮素运转率越低。施氮量促进氮素运转率。各器官积氮量累积和营养器官氮分布使作物氮分布更均衡, 导致产量的最优。S1N2 产量最大达到 6 683 kg/hm²。氮肥在盐分 S1 和 S2 中 N1 氮利用效率最优, 盐分 S3 中氮肥 N2 最利于氮利用效率。因此在盐分<6 g/kg 土壤施用氮肥 105 kg/hm²或 210 kg/hm², 最利于棉花生产和效益。盐分在 8~9 g/kg 土壤应施用氮肥 315 kg/hm²。研究结果为合理利用盐碱土和施肥管理提供科学依据。

关键词: 棉花生长; 含盐量; 氮素植株分布; 氮素转运

中图分类号: S562

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0315-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.042

Effects of Salt and Nitrogen Synergism on Nitrogen Distribution, Transport and Use Efficiency in Cotton

YU Tianyuan, HE Xinlin, HENG Tong

(School of Water Conservancy and Construction Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003)

Abstract: The objective of this study was to explore the effects of salt and nitrogen on the dynamic accumulation, transport and use efficiency of nitrogen in cotton. Taking cotton Xinluzhong 68 as material, afield plot experiment was carried out under three soil salt contents of S1 (2.5~3 g/kg), S2 (5~6 g/kg) and S3 (8~9 g/kg), respectively, also with three nitrogen levels of N1 (105 kg/hm²), N2 (210 kg/hm²) and N3 (315 kg/hm²), respectively. The results showed that the biomass of vegetative organs (root, stem and leaf) under S1N3 was the largest, while the biomass of cotton boll under S1N2 was the largest, and the biomass of cotton boll was N3>N2>N1 under S3 condition. In S1 and S2, nitrogen accumulation in stem was N2>N3>N1. In S2 and S3, N3>N2>N1. Nitrogen accumulation of cotton boll was S1>S2>S3, N3>N2>N1. Root nitrogen accumulation was N3>N2>N1. Logistic growth function model was used to fit the accumulation of biomass nitrogen in each organ, $R^2>0.9$. The maximum cumulative rate V_m and duration Δt were two dynamic characteristics. In N1S3 treatment, Δt was the smallest and V_m was the largest. Salt significantly inhibited the biomass, nitrogen accumulation and V_m in cotton organs. There was an obvious interaction between nitrogen application and soil salinity. The results showed that N2 in S1 and S2, and N3 in S3 were the best for biomass accumulation and V_m of reproductive organs. The higher the salinity, the lower the nitrogen

收稿日期: 2020-09-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(U1803244)

第一作者: 余天源(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事绿洲农业资源高效利用研究。E-mail: 1811318765@qq.com

通信作者: 何新林(1966—), 男, 教授, 主要从事绿洲农业资源高效利用和人文水资源研究。E-mail: helinxin2002@163.com

transfer rate. The amount of nitrogen applied promoted the nitrogen transfer rate. The maximum yield of S1N2 was 6 683 kg/hm². The accumulation of nitrogen accumulation in various organs and the distribution of nitrogen in vegetative organs madethe distribution of crop nitrogen more balanced, resulting in the optimal yield. The nitrogen use efficiency of N1 was the best in S1 and S2, and N2 was the best in S3. Therefore, applying 105 or 210 kg/hm² nitrogen fertilizer in soil with salinity less than 6 g/kg is most beneficial to cotton production and benefit. 315 kg/hm² of nitrogen fertilizer should be applied when the soil salinity is 8~9 g/kg. These findings could provide scientific basis for rational utilization of saline alkali soil and fertilization management.

Keywords: cotton growth; salt content; nitrogen plant distribution; nitrogen transport

氮素是作物生长发育必需元素,是合成作物体内物质的基础,影响生长发育和产量^[1]。研究棉花对氮素的吸收和累积及其向棉铃的运输特性,是提高棉花产量、改善棉花品质、提高氮素利用效率的基础^[2]。棉花吸收的氮素在各器官中的分配也随着不同生育时期生长中心的转移而变化^[3];施用氮肥是调控棉花氮素营养的有效手段,增施氮肥促进棉花碳、氮物质积累与运转。研究棉花的氮素吸收利用机理一直是重要课题。

新疆分布 2×10⁷ hm² 盐碱地,约占新疆土地面积的 1/8、平原地区面积的 1/4^[4]。盐碱土的土壤水势低引起植物生理干旱,并对植物造成离子毒害,从而影响植物正常的营养吸收,阻碍其生长^[1-5]。水氮耦合研究已经取得长足进展。张燕等^[6]研究认为,灌溉水量显著影响棉花生长和籽棉产量;同时灌溉水量降低 60% ET₀时抑制棉花对氮素的吸收,却显著增加氮累积量和氮肥利用率;李正鹏等^[7]研究表明,灌水通过延长冬小麦高生长的时间来增大株高,施氮量通过调节生长积温变量增大株高;宋兴虎等^[8]研究指出,增加氮肥用量可以增加棉花产量,而用量过大会导致产量下降,主要原因是生殖器官所占的比例下降。水氮耦合研究已经取得长足进展,但随着水资源

三条红线的施行,土地灌溉定额受到严格控制。在规定的灌溉定额下,盐分及盐氮效应对棉花的氮素吸收与利用状况研究较少。

本文通过小区试验中不同盐分含量条件下生物量、氮素积累特征和棉花产量,研究盐氮协同对棉花生长发育过程中氮素吸收、运转和利用的影响,为合理利用盐碱土和施肥管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2019 年 4—10 月在新疆石河子市试验场二连石河子大学节水灌溉实验站(44°18'N,86°02'E)进行。气候条件属于中温带干旱区气候,年平均日照时间 2 865 h,无霜期 170 d,年平均气温 6.8 ℃,年平均降水量 200 mm,年平均蒸发量 1 718 mm。试验在低盐分(S1)、中盐分(S2)和高盐分含量(S3)的试验土壤进行,含盐量分别为 2.5~3,5~6,8~9 g/kg。试验田土壤为砂壤土,低盐分和高盐分含量试验土壤 0—60 cm 土层有机质含量分别为 15.2,15.4,15.6 g/kg,测坑地势平坦,土壤肥沃,土质均为砂质壤土(表 1),S1、S2 和 S3 土壤酸碱度分别为 7.93,8.25 和 9.25。地下水埋深在 8~10 m,2018—2019 年度棉花生长期降雨量为 170.9 mm。

表 1 试验区 0—60 cm 土壤粒径组成及酸碱度

土壤种类	颗粒组成/%			土壤质地	土壤 pH
	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.02 mm)	砂粒(0.02~2 mm)		
S0	7.13	32.15	60.72	砂质壤土	7.33
S1	7.05	32.09	60.86	砂质壤土	7.93
S2	8.86	38.85	52.29	砂质壤土	8.25
S3	10.57	31.79	57.64	砂质壤土	9.25

1.2 试验设计

研究作物选择棉花(*Gossypium hirsutum* L.)“新陆中 68 号”,覆膜种植,采用“一膜二管四行”棉花播种模式。地膜宽度 1.5 m,滴灌带间距 90 cm。试验采用土壤含盐量、施肥量两因素三水平的随机区组设计。土壤含盐量三水平为上述试验区测坑土壤 S1、S2、S3。施肥量三水平:105,210,315 kg/hm²以

N 计,分别标记为 N1、N2、N3。共 9 个处理,每个处理 3 次重复。磷肥和钾肥所有处理各施入 78.59 kg/hm²和 62.23 kg/hm²。各小区已经在 2019 年 5—11 月进行灌溉,全生育期灌溉次数为 11 次,灌水定额、灌溉次数结合李明思等^[9]和吴立峰等^[10]相关研究定制,并根据石河子及周边农场近年分配水方案进行调整。灌溉定额为 4 500 m³/hm²,灌水次数以及 3 种

肥料的滴施次数、时间和比例见表 2。施肥种类分别为尿素、磷酸二氨、硫酸钾。其余耕作措施如除草、防虫等与当地农业耕种经验一致。

表 2 棉花各生育期灌水施肥次数与比例

项目	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期	全生育期
开始日期	5 月 10 日	6 月 18 日	7 月 10 日	9 月 6 日	
灌水次数	2	3	5	1	11
施肥次数	2	3	5	0	10
灌水比例/%	8	33	51	8	100
N 施肥比例/%	12.5	37.5	50	0	100
PK 施肥比例/%	10	30	60	0	100

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株取样及生物量测量 在棉花苗期(5 月 20 日)、蕾期(6 月 28 日)、花铃期(8 月 21 日)和吐絮期(9 月 10 日)每个小区随机取 5 株长势均匀的植株,按根、茎、叶和棉铃通过作物剪开,放入上海精宏 DHG-9030A 电热恒温鼓风干燥箱在 105 ℃条件下杀青 30 min,再在 85 ℃恒温条件下烘干后称重。

1.3.2 植株氮素测量 通过凯氏定氮法测量上述采集的根、茎、叶片和棉铃样品的全氮含量^[11]。

1.3.3 土壤盐分含量测定 利用电导率仪(DDS-307)测定土壤电导率(μS/cm)。通过校准公式计算土壤含盐量。

1.3.4 相关指标计算方式 各器官氮分布率=各器官积氮量/植株积氮量

氮素运转率=(花铃期氮素积累量-吐絮期氮

素积累量)/花铃期氮素积累量×100%
氮肥利用效率(nitrogen utilization efficiency for production, NUEg, g/g)=棉籽产量/植株氮素积累总量

棉花各器官生物量和养分累积量增长动态变化符合 Logistic 生长模型^[8,12]。通过 Origin 拟合棉花生物量积累 Logistic 方程,方程函数为:

$$y=\frac{k}{1+e^{b-ax}}$$

(1)

式中:t 为棉花出苗后天数(d);a、b、k 为相关参数。
起始时间(t_1)、终止时间(t_2)、最大相对生长速率(v_m)等特征值通过对公式求导可得。

1.4 数据处理

采用 Excel 365 对作物各指标进行统计并用 IBM SPSS 26.0 软件对相关指标关于盐分和氮素二因素进行方差分析,LSD 和 S-N-K 法进行多重比较。最后通过 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理棉花进程差异

由表 3 可知,不同土壤盐分对棉花生长发育进程显著($P<0.01$)影响。随着盐分含量增加,棉花苗期、蕾期推迟,高盐与低盐处理相比,蕾期推迟 5~8 天。吐絮期提前,高盐与低盐处理相比,蕾期推迟 4~6 天。施氮量的增加促进棉花发育,在 S2 和 S3 蕾期提前 2~3 天,开花提前 1~2 天,吐絮期无显著影响。

表 3 棉花不同生育阶段初始日期

单位:月-日

处理	S1N1	S1N2	S1N3	S2N1	S2N2	S2N3	S3N1	S3N2	S3N3
出苗日期	05-04	05-04	05-04	05-05	05-05	05-05	05-05	05-06	05-05
现蕾日期	06-16	06-16	06-15	06-20	06-17	06-17	06-22	06-21	06-20
开花日期	07-15	07-15	07-15	07-18	07-17	07-17	07-18	07-17	07-16
吐絮日期	09-05	09-05	09-06	09-04	09-05	09-05	09-02	09-03	09-03

2.2 不同处理根、茎、叶片和铃的生物量

棉花茎、叶、棉铃的生物量受土壤盐分($P<0.01$)和施氮量($P<0.05$)以及两者交互作用($P<0.05$)影响显著。而棉花根生物量仅受土壤盐分的影响显著($P<0.01$)。从实测数据(图 1)可知,棉花收获时,各器官生物量表现为 $S1>S2>S3$,叶生物量表现为 $N3>N2>N1$;S1 和 S2 条件下棉铃生物量表现为 $N2>N3>N1$,S3 条件下棉铃生物量表现为 $N3>N2>N1$,施氮量对根生物量无显著影响

用 Logistic 生长函数模型对各处理各器官生物量累积进行拟合,对其分析(表 4)表明,茎的生物量快速生长周期为出苗后 57~79 天。其中,S2 和 S3 较 S1, t_0 平均增大 2.33,1.67 天, Δt 增大 1~2,1~3 天, V_m 下降 19.4%和 49.2%。N3 较 N1, t_0 减小 1~3 天, Δt

减小 2~4 天, V_m 增大 31.55%~67.55%,说明盐分和施氮量是促进茎快速生育的提前,抑制茎生物量快速增长,且氮肥增大效果均随盐分的增大而增大。

由表 4 可知,叶片生物量快速生长周期为出苗后 64~90 天。其中 S2 和 S3 较 S1, Δt 增大 2~6,0~1 天, V_m 下降 19.4%和 49.2%。在各盐分处理中 S1N1、S2N2 和 S3N3 的 Δt 较小,在 S1 和 S2 中,N2 和 N3 较 N1, V_m 增大 9.49%~10.5%和 28.57%~28.90%。在 S3 下,各处理无明显差异。表明盐分抑制叶生物量快速增长,施氮量只在中低盐分下有利于叶生物量的快速增长。

由表 4 可知,蕾—花—铃生物量快速生长周期为出苗后 82~112 天。S2 和 S3 较 S1, Δt 分别增大 0~4,4~13 天, V_m 分别下降 4.94%和 62.56%。在各盐分

处理中 S1N2、S2N2 和 S3N2 的 Δt 较大,N2 和 N3 较 N1, V_m 增大 27.49%,−29.34%,6.69%和 40.30%,−8.59%,45.04%,表明盐分增大了快速生长持续期

和显著减小生物量最大累积速率,适量施氮量的增加促进持续期增大和最大累积速率的增大,氮素增大 V_m 效果受盐分增大作用先减小后增大。

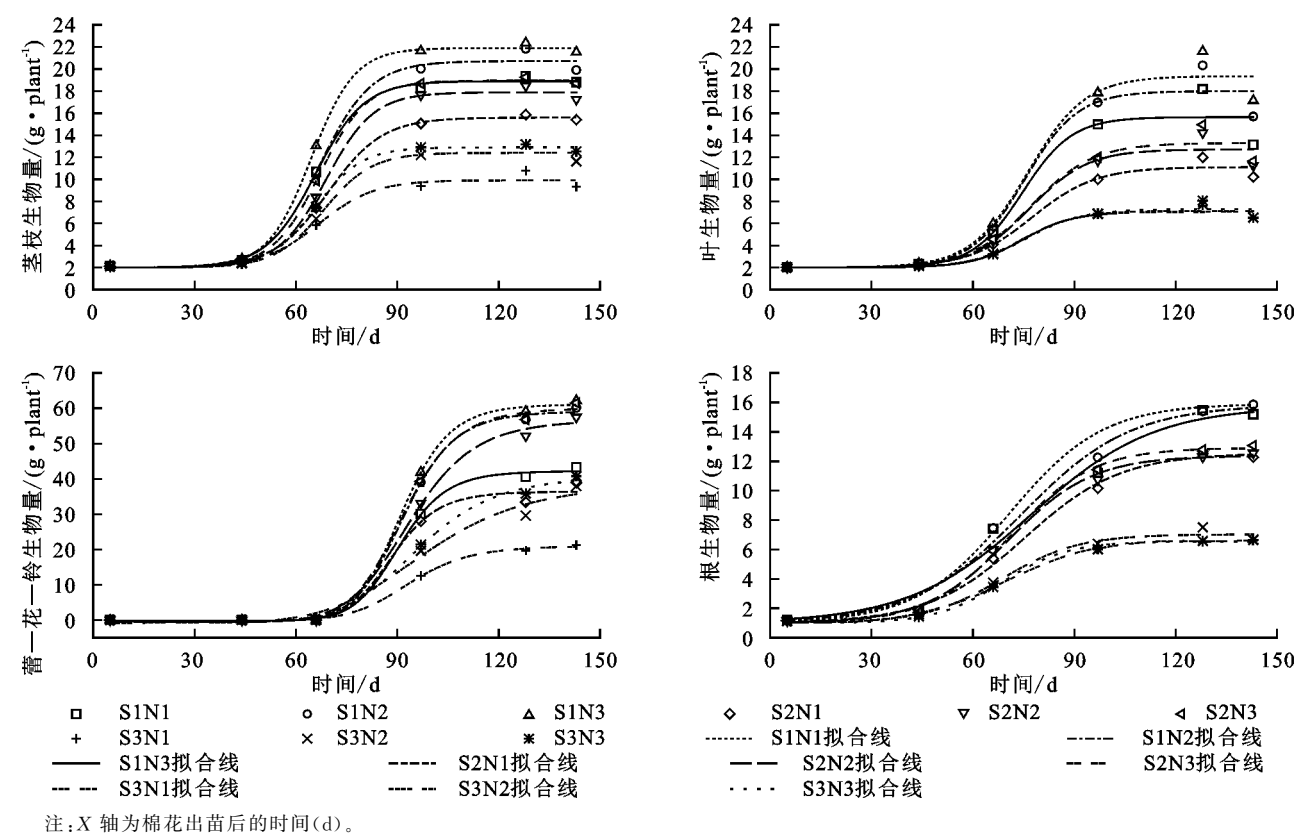


图 1 各处理棉花各器官的生物量动态

由表 4 可知,根的生物量快速生长周期为出苗后 53~101 天。S2 和 S3 较 S1, Δt 减小 4~11,3~22 天。S3 较 S1, V_m 下降 2.71%和 44.73%。在 S1 和 S2 中,N3 较 N1, t_0 分别减小 4~6 天, Δt 减小 12,5 天, V_m 增大 33.16%和 22.06%。在 S3 中 N3 较 N1, t_0 增大 1 天, Δt 增大 7 天, V_m 减小 22.38%。表明中低盐分无显著差异,高盐分显著减小快速生长持续期和减小生物量最大累积速率。施氮量促进快速生育的提前,在 S1 和 S2 处理中减小持续期和增大最大累积速率,在 S3 处理中增大持续期和减小最大累积速率,且氮肥增大效果均随盐分的增大而减小。

2.3 不同处理根、茎、叶片和铃的氮素积累量

棉花茎、叶、蕾花铃和根的氮素积累量受土壤盐分($P<0.01$)和施氮量($P<0.05$)以及两者交互作用($P<0.05$)影响显著。从实测数据(图 2)可知,棉花收获时,茎积氮量表现为 S2>S1>S3,分别增大 13.99%和减小 10.92%。在 S1 和 S2 中,茎积氮量表现为 N2>N3>N1,叶积氮量表现为 S2>S3>S1,分别较 S1 增大 80.75%和 25.66%。在 S1 中各施氮量无明显差异,在 S2 和 S3 中叶积氮量表现为 N3>N2>N1。S2 和 S3 分别较 S1 减小 12.28%和 31.16%。棉铃积氮量表现为 N3>

N2>N1,分别较 N1 增大 17.74%和 17.76%。S2 和 S3 较 S1 分别减小 37.04%和减小 73.51%。根积氮量表现为 N3>N2>N1。表明适宜盐分和施氮量有利于棉花各器官氮素吸收积累,除茎最佳施氮量是 N2,其余器官随施氮量增大而增大。

用 Logistic 生长函数模型对各处理各器官积氮量累积进行拟合分析(表 5)表明,茎的积氮量快速生长周期为出苗后 21~82 天。其中 S2 和 S3 较 S1, t_0 增大 6~14,15~28 天, Δt 增大 −2~11,3~11 天。S3 较 S1, V_m 下降 4.67%~50.44%,N3 较 N1, t_0 减小 3~16 天。N2 较 N1, Δt 减小 13,2,8 天。N3 较 N1, Δt 减小 10,−3,8 天, V_m 增大 25%~140.41%和 3.16%~115.03%,表明盐分促进快速生育的滞后,增大快速生长持续期和显著减小积氮量最大累积速率。适宜施氮量促进快速生育的提前、减小持续期和增大最大累积速率,氮肥增大效果均随盐分的增大而减小。

由表 5 可知,叶片积氮量快速生长周期为出苗后 40~82 天,其中 S2 和 S3 较 S1, Δt 增大 10~18,13~23 天, V_m 增大 147.33%~213.85%和 66.23%~118.32%。增施氮肥 Δt 分别在 S1 处理中呈减小趋势,在 S2 处理中无显著变化,在 S3 中呈增大趋势。

各盐分处理中,N2 较 N1 V_m 增大 29.43%,24.82%和 1.69%。N3 较 N1, V_m 增大 41.77%,11.72%和 86.19%。说明盐分增大,快速生长持续期随其增大

和生物量最大累积速率先增大后减小。在低盐和高盐处理中氮肥增大最大累积速率,低盐持续期减小,高盐持续期增大。

表 4 不同处理下棉花各器官生物量累积动态方程及特征值

棉花器官	处理	方程	t_0/d	t_1/d	t_2/d	$\Delta t/\text{d}$	$V_m/(\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{d}^{-2})$	R^2
茎	S1N1	$y=21.22/(1+e^{9.069-0.138t})$	66	56	75	19	0.732	0.995
	S1N2	$y=23.38/(1+e^{8.793-0.131t})$	67	57	77	20	0.766	0.995
	S1N3	$y=24.85/(1+e^{10.01-0.155t})$	65	56	73	17	0.963	0.999
	S2N1	$y=16.99/(1+e^{8.613-0.124t})$	69	58	79	21	0.527	0.999
	S2N2	$y=19.85/(1+e^{9.706-0.141t})$	69	59	78	19	0.699	0.997
	S2N3	$y=21.19/(1+e^{9.585-0.143t})$	67	58	76	18	0.758	0.999
	S3N1	$y=9.89/(1+e^{8.071-0.121t})$	69	57	79	22	0.299	0.983
	S3N2	$y=13.01/(1+e^{9.467-0.139t})$	68	58	77	19	0.452	0.990
	S3N3	$y=13.63/(1+e^{9.675-0.147t})$	66	57	75	18	0.501	0.998
叶片	S1N1	$y=17.04/(1+e^{10.156-0.136t})$	75	65	84	19	0.579	0.948
	S1N2	$y=19.98/(1+e^{9.568-0.127t})$	75	64	85	21	0.634	0.967
	S1N3	$y=21.68/(1+e^{9.005-0.118t})$	76	65	87	22	0.640	0.973
	S2N1	$y=11.37/(1+e^{8.215-0.106t})$	78	65	90	25	0.301	0.983
	S2N2	$y=13.39/(1+e^{11.979-0.116t})$	77	65	88	23	0.388	0.969
	S2N3	$y=14.09/(1+e^{8.505-0.110t})$	77	65	89	24	0.387	0.965
	S3N1	$y=6.309/(1+e^{9.934-0.133t})$	75	65	85	20	0.210	0.981
	S3N2	$y=6.408/(1+e^{9.559-0.128t})$	75	64	85	21	0.205	0.978
	S3N3	$y=6.608/(1+e^{9.257-0.122t})$	76	65	86	21	0.202	0.966
蕾—花—铃	S1N1	$y=41.96/(1+e^{17.945-0.198t})$	91	84	97	13	2.077	0.998
	S1N2	$y=58.53/(1+e^{16.638-0.181t})$	92	84	99	15	2.648	0.999
	S1N3	$y=60.71/(1+e^{17.543-0.192t})$	91	84	98	14	2.914	0.999
	S2N1	$y=36.18/(1+e^{17.799-0.201t})$	89	82	95	13	2.771	0.991
	S2N2	$y=55.15/(1+e^{13.234-0.142t})$	94	84	103	19	1.958	0.997
	S2N3	$y=59.25/(1+e^{15.698-0.171t})$	92	84	99	15	2.533	0.997
	S3N1	$y=20.57/(1+e^{14.131-0.151t})$	94	85	102	17	0.777	0.998
	S3N2	$y=35.02/(1+e^{9.327-0.095t})$	98	84	112	28	0.829	0.997
	S3N3	$y=38.87/(1+e^{11.161-0.116t})$	96	84	107	23	1.127	0.994
根	S1N1	$y=14.73/(1+e^{4.237-0.055t})$	77	53	101	48	0.202	0.979
	S1N2	$y=14.83/(1+e^{4.632-0.062t})$	74	53	95	42	0.231	0.988
	S1N3	$y=14.91/(1+e^{5.112-0.072t})$	71	53	89	36	0.269	0.991
	S2N1	$y=11.55/(1+e^{5.306-0.071t})$	75	56	93	37	0.204	0.994
	S2N2	$y=11.37/(1+e^{5.712-0.081t})$	71	54	87	33	0.230	0.995
	S2N3	$y=11.90/(1+e^{5.951-0.084t})$	71	55	87	32	0.249	0.998
	S3N1	$y=5.55/(1+e^{7.071-0.103t})$	69	56	82	26	0.143	0.999
	S3N2	$y=6.02/(1+e^{6.108-0.089t})$	69	54	84	30	0.134	0.988
	S3N3	$y=5.63/(1+e^{5.508-0.079t})$	70	53	86	33	0.111	0.999

注: t 为棉花出苗后的时间(d); t_1 和 t_2 分别为 Logistic 生长函数模型的 2 个拐点; t_0 为最大积累速率出现时间(d); $\Delta t=t_2-t_1$ 为快速增长持续期; y 为棉花生物量积累量。下同。

由表 5 可知,蕾—花—铃积氮量快速生长周期为出苗后 85~115 天。其中 S2 和 S3 较 S1, Δt 均增大 0~6 天。S2 和 S3 较 S1, V_m 平均下降 2.99%和 17.72%, Δt 分别以 S1N2,S2N3 和 S3N3 较小,各盐分处理中,N2 较 N1, V_m 增大 50.48%,0.41%和 80.91%。

N3 较 N1, V_m 增大 19.41%,2.44%和 97.70%。说明盐分增大了快速生长持续期和显著减小生物量最大累积速率,适量施氮量的增加促进持续期增大和最大累积速率的增大。

由表 5 可知,根的积氮量快速生长周期为出苗后

39~124 天。其中 S2 和 S3 较 S1, Δt 平均增大 10, 1 天。 V_m 平均下降 49.34% 和 73.14%, N2 和 N3 较 N1, t_0 分别平均减小 5, 11.3 天, Δt 减小 1, 6.67 天, V_m 增大 2.83% 和 19.60%。表明盐分增大了快速生长持续

期和相应显著减小生物量最大累积速率, 施氮量促进快速生育的提前, 在 S1 和 S2 处理中减小持续期和增大最大累积速率, 在 S3 处理中增大持续期和减小最大累积速率, 氮肥增大效果均随盐分的增大而减小。

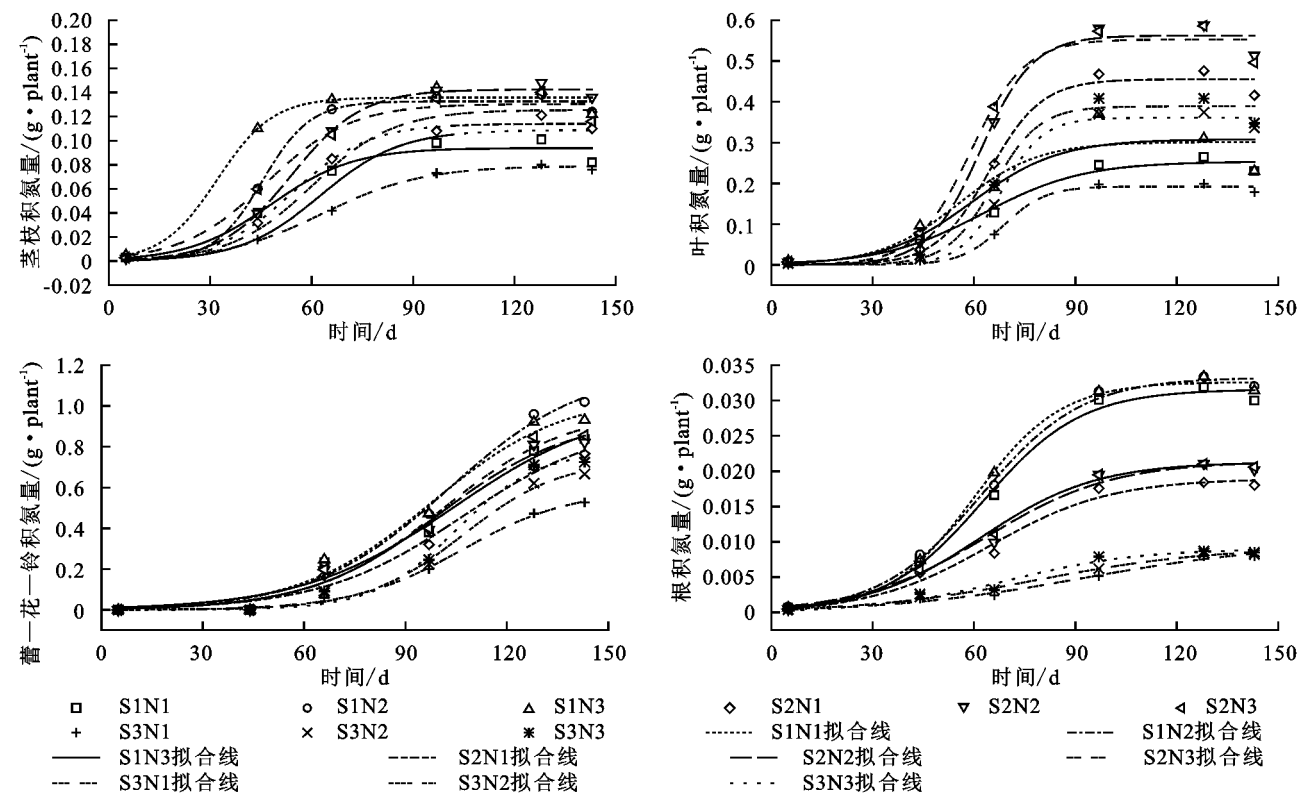


图 2 各处理棉花各器官的积氮量动态

2.4 不同处理下棉花花后氮素分布及转运

方差分析得出,棉花各器官氮素分配受盐分($P<0.01$)和施氮量($P<0.05$)影响显著。由表 6 可知,总体来看,S2 较 S1 增大棉花氮素营养器官(根茎叶)的氮素分配比例,减小生殖器官(花铃)的氮素分配比例。S3 较 S2 反而生殖器官氮比例有所增大。施氮量 S1 和 S2 生殖器官氮素分配比例无显著差异。在 S3 中 N1 显著大于 N2 和 N3。叶在 S2 中氮分配比例最高,而铃在 S2 中分配比例最低,但随施氮量增大而增大。根氮分配比例是随盐分和施肥量增大而减小。

由表 6 可以看出,收获时 10.16%~31.16% 的叶片氮、5.26%~17.14% 的茎部氮、0~5.99% 的根部氮输送至棉花铃。不同器官氮素转移率还与盐分和氮肥施用水平有关,盐分越高,氮素运转率越低。施氮量促进氮素运转率。

2.5 不同处理下棉花生物量、积氮量、产量及氮素利用效率

棉花生物量、积氮量、产量和氮肥利用率进行两因素(土壤盐分和施氮量)方差分析。土壤盐分、施氮量与交互作用对棉花积氮量,氮肥利用率影响达到显著水平($P<0.05$),生物量和产量达到极显著水平($P<0.01$)。从影响效应来看,土壤盐分影响最大,其次是

施氮量,交互作用的影响相对较小。总体来看,棉花生物量和氮肥利用率随着氮素施用量显著增加($P<0.05$)。棉花产量和氮肥利用率随着土壤盐度的增加均显著减小($P<0.05$)。棉花积氮量随盐分增大先增大后减小,随施氮量增大先增大后减小。

由表 7 可知,总生物量随着盐分含量增加显著降低,总生物量 S1、S2 和 S3 处理平均值分别为 107.00, 100.44, 61.16 g。高盐与低盐处理相比下降幅度为 42.85%。总干物质积累量随着施氮量增加显著增加。在 S1、S2 和 S3 条件下,高氮与低氮处理相比增大幅度为 33.61%, 43.17% 和 65.06%。棉花积氮量与 S1 相比, S2 在 N1, N2 和 N3 处理中分别增大 11.01%, 7.16% 和 13.30%, S3 分别降低 33.22%, 20.94% 和 8.98%。在 S1 和 S2 中表现为 $N2>N3>N1$, S1 中较 N1 增大 11.31% 和 11.27%, S2 中较 N1 增大 14.67% 和 13.63%。在 S3 中表现为 $N3>N2>N1$, 分别较 N1 增大 51.17% 和 40.64%。产量在 S1、S2 条件下表现为 $N2>N3>N1$, 在 S3 处表现为 $N3>N2>N1$ 。在 N2 处理中随土壤含盐量的增加减小效果增大,在 N3 处理中随土壤含盐量的增加减小效果减小。氮肥利用率在 S1 处施氮量处理间差异最大,且随盐分增大而减小。在 S1 条件下表现为

N1>N2>N3,在 S2 条件下表现为 N2>N1>N3,在 S3 条件下表现为 N2>N3>N1。

表 5 不同处理棉花茎氮量累积动态方程及特征值

棉花器官	处理	方程	t_0/d	t_1/d	t_2/d	$\Delta t/\text{d}$	$V_m/(\text{g} \cdot \text{plant}^{-1} \cdot \text{d}^{-2})$	R^2
茎	S1N1	$y=0.0939/(1+\text{e}^{3.937-0.082t})$	48	32	64	32	0.00193	0.995
	S1N2	$y=0.1327/(1+\text{e}^{6.340-0.140t})$	45	35	54	19	0.00464	0.995
	S1N3	$y=0.1358/(1+\text{e}^{3.91-0.122t})$	32	21	43	22	0.00415	0.999
	S2N1	$y=0.1141/(1+\text{e}^{4.821-0.089t})$	54	39	69	30	0.00253	0.999
	S2N2	$y=0.1426/(1+\text{e}^{5.168-0.096t})$	54	40	68	28	0.00341	0.997
	S2N3	$y=0.1306/(1+\text{e}^{3.730-0.080t})$	46	29	62	33	0.00261	0.999
	S3N1	$y=0.0790/(1+\text{e}^{4.276-0.068t})$	63	43	82	39	0.00184	0.983
	S3N2	$y=0.1088/(1+\text{e}^{5.295-0.085t})$	62	46	77	31	0.00230	0.990
	S3N3	$y=0.1256/(1+\text{e}^{5.007-0.083t})$	60	44	75	31	0.00261	0.998
叶片	S1N1	$y=0.2534/(1+\text{e}^{4.230-0.067t})$	63	43	82	39	0.00462	0.948
	S1N2	$y=0.3080/(1+\text{e}^{4.614-0.078t})$	59	42	76	34	0.00598	0.967
	S1N3	$y=0.3014/(1+\text{e}^{3.658-0.085t})$	56	40	71	31	0.00655	0.973
	S2N1	$y=0.4552/(1+\text{e}^{8.216-0.128t})$	64	53	74	21	0.01450	0.983
	S2N2	$y=0.5622/(1+\text{e}^{7.980-0.129t})$	62	52	72	20	0.01810	0.969
	S2N3	$y=0.5228/(1+\text{e}^{7.291-0.124t})$	59	48	69	21	0.01620	0.965
	S3N1	$y=0.1921/(1+\text{e}^{10.990-0.160t})$	69	61	77	16	0.00768	0.981
	S3N2	$y=0.3609/(1+\text{e}^{11.160-0.164t})$	68	60	76	16	0.00781	0.978
	S3N3	$y=0.3890/(1+\text{e}^{9.636-0.147t})$	66	57	75	18	0.01430	0.966
蕾—花—铃	S1N1	$y=0.8495/(1+\text{e}^{9.620-0.097t})$	99	85	112	27	0.02060	0.998
	S1N2	$y=1.0370/(1+\text{e}^{11.720-0.119t})$	98	87	109	22	0.03100	0.999
	S1N3	$y=0.9489/(1+\text{e}^{10.070-0.104t})$	96	83	108	25	0.02460	0.999
	S2N1	$y=0.7748/(1+\text{e}^{12.630-0.127t})$	99	88	109	21	0.02450	0.991
	S2N2	$y=0.8346/(1+\text{e}^{11.470-0.117t})$	98	87	109	22	0.02440	0.997
	S2N3	$y=0.8713/(1+\text{e}^{11.340-0.115t})$	98	86	109	23	0.02510	0.997
	S3N1	$y=0.5337/(1+\text{e}^{10.060-0.098t})$	102	88	115	27	0.01310	0.998
	S3N2	$y=0.6721/(1+\text{e}^{14.360-0.141t})$	101	91	110	19	0.02370	0.997
	S3N3	$y=0.7320/(1+\text{e}^{14.460-0.142t})$	101	91	110	19	0.02590	0.994
根	S1N1	$y=0.0316/(1+\text{e}^{4.237-0.069t})$	63	44	82	38	0.00054	0.979
	S1N2	$y=0.0333/(1+\text{e}^{4.632-0.067t})$	62	42	81	39	0.00056	0.988
	S1N3	$y=0.0327/(1+\text{e}^{5.112-0.078t})$	60	43	77	34	0.00064	0.991
	S2N1	$y=0.0189/(1+\text{e}^{5.306-0.056t})$	65	41	88	47	0.00028	0.994
	S2N2	$y=0.0214/(1+\text{e}^{5.712-0.053t})$	64	39	88	49	0.00029	0.995
	S2N3	$y=0.0214/(1+\text{e}^{5.951-0.059t})$	62	39	84	45	0.00032	0.998
	S3N1	$y=0.0091/(1+\text{e}^{7.071-0.063t})$	103	82	124	42	0.00014	0.999
	S3N2	$y=0.0089/(1+\text{e}^{6.108-0.063t})$	90	69	111	42	0.00014	0.988
	S3N3	$y=0.0087/(1+\text{e}^{5.508-0.087t})$	75	60	90	30	0.00019	0.999

表 6 不同处理棉花不同器官氮素分布率及转运率 单位: %

处理	T3 分配率				T4 分配率				转运率		
	S	L	R	BLB	S	L	R	BLB	S	L	R
S1N1	7.86e	22.62e	2.73a	65.99a	6.95e	19.49d	2.54a	71.02ab	9.89cd	12.88d	5.96a
S1N2	8.93d	22.91e	2.16c	66.00a	8.83c	16.12e	2.28b	72.76a	10.29c	36.16a	4.19b
S1N3	10.00ab	22.00e	2.37b	65.63a	9.29b	17.51de	2.39ab	70.81b	13.48b	25.81b	5.99a
S2N1	9.34c	36.74b	1.42d	52.49c	8.40d	31.76b	1.37c	58.47e	9.09d	12.61d	2.39d
S2N2	9.90b	39.33a	1.41d	49.36c	9.11bc	34.45a	1.35c	55.09f	8.11e	12.59d	4.27b
S2N3	9.33c	39.04a	1.40d	50.23c	7.79e	33.32a	1.38c	57.5ef	17.14a	15.36c	1.90e
S3N1	10.27ab	25.51d	1.03e	63.19a	9.64ab	22.59	1.02d	66.75c	5.00f	10.37f	0
S3N2	10.12ab	33.20bc	0.76f	55.92b	9.65ab	30.32bc	0.74e	60.1d	5.26f	10.16f	3.96c
S3N3	10.44a	33.28bc	0.72f	55.55b	9.85a	29.04c	0.71e	60.41d	7.81e	14.71e	4.17b

注: S 为茎; L 为叶; R 为根; BLB 为生殖器官(蕾花铃); T3 为棉花花铃期; T4 为棉花吐絮期; 同列数据后不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 7 各处理棉花的生物量、积氮量、产量和氮肥利用率

处理	S1N1	S1N2	S1N3	S2N1	S2N2	S2N3	S3N1	S3N2	S3N3
生物量/g	90.36abc	112.47ab	120.73a	80.14bc	106.44ab	114.74ab	43.85e	67.25de	72.38d
棉花积氮量/mg	1180.00c	1401.80ab	1313.40ab	1310.00bc	1502.20a	1488.60ab	788.00d	1108.24cd	1195.50c
产量/(kg·hm ⁻²)	5108ab	6683ab	6454ab	3058.6c	5708bc	4715b	1203e	2975d	3754bc
氮肥利用率/(kg·kg ⁻¹)	48.65a	31.82bc	20.49cd	24.37cd	27.18c	14.97d	11.46f	14.17g	11.92e

注:同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 盐氮效应对棉花生育进程和生物量积累的影响

前人^[13]盐胁迫模拟试验发现,盐分影响棉花种子的吸水膨胀,造成萌发出苗慢、出苗率低。同时长期盐胁迫可导致棉花长势下降,出叶速率减慢,现蕾、开花、结铃推迟,花铃期缩短,产量降低。本文通过田间小区试验,棉花各表征出时间和各器官生物量的 Logistic 生长函数模型的快速生长时期差异,证实盐分滞后棉花发育,花铃期缩短,与前人在模拟试验条件下的研究结果基本一致。氮素促进棉花的生长发育,对棉花的现蕾、初花和结铃有提前作用。本研究结果与刘翠等^[14]研究结果基本一致。

有研究^[3]表明,棉花生物量的积累符合 Logistic 生长模型。Logistic 生长模型对作物吸氮量、干物质累积量的模拟效果较好, R^2 均大于 0.94。用 Logistic 生长模型函数特征参数 V_m (快速累积速率)和 Δt (快速发育持续时间),比较结果可以更直接地反映不同盐氮处理下作物的生物量增长特征,有利于从机理方面解决问题^[15]。哈丽哈什·依巴提等^[16]研究通过 Logistic 生长模型及 Δt 和 V_m 等特征研究得到氮肥用量不超过 180 kg/hm²时,随施氮量增大快速累积期生殖器官生物质累积强度增加,并得到最佳施氮量。 Δt 随土壤盐分增大而增大, V_m 则显著减少,表明棉花的发育进程和最大速率受盐分抑制明显减缓和减小。吴晓东等^[17]研究表明,棉花的耐盐能力是有限的,当土壤含盐量超过 4 g/kg 时,棉株体的生长发育会受到明显抑制。本研究土壤盐分增大,棉花整株、茎叶等营养器官和花铃等生殖器官最终生物量呈降低趋势,印证了上述观点。氮肥起到促进和缓解盐分抑制的作用,对棉花生物量有显著促进作用。增施适量氮肥可以有效增加棉花生物量,但过量施用对生物产量作用不显著,甚至起抑制作用,而且容易造成贪青晚熟,僵铃脱落增加,霜前花比例下降^[18]。本研究中,施氮量对棉花整株和茎叶等营养器官最终生物量的增长起到促进作用,棉铃等生殖器官在低中盐分土壤中,N2 生物量最大,表明过量施用对棉铃生物量作用不显著,甚至起到抑制作用;在高盐土中,N3 生物量达到最大,表明随着盐分增大,最佳施氮量也会相应增大。用 V_m 和 Δt 反映生物量增长特征发现,

盐氮协同对棉花各器官生物量生长特征影响各不相同。在茎生长方面,盐分胁迫越大,施氮量缓解盐害和促进效果越大;叶片生长方面,盐分抑制氮肥对叶片速率和发育时间增长促进作用;根方面,盐分抑制根的增长速率和减少发育时间;而花铃生殖器官,一方面过量施氮量铃发育时间增大,相应最大速率减小;另一方面最佳施氮量随盐分增大而增大,与各器官生物量变化一致。原因可能因为各部位对氮的需求量不同导致^[16]。

3.2 盐氮效应对棉花氮素积累、分配与转运的影响

本研究中,适宜盐分对棉花地上器官氮吸收量和 V_m 有促进作用,但盐分过高则有抑制作用。Mahmood 等^[19]研究发现,在 NaCl ($EC=10$ dS/m)胁迫下,氮素更容易被植物吸收。原因可能是盐分胁迫下 Na^+ 、 K^+ 等离子更容易被吸收,促进植物细胞原生质流动和植物的光合作用,有利于氮素向生长中心运转。因此,根的积氮速率受盐分影响较小。盐胁迫下,通过外施氮肥可有效缓解盐害对棉株生长的抑制,并且在适当的施氮量范围内,棉株对氮素的吸收与施氮量呈正比,但过高施氮量无显著促进作用,甚至产生氮胁迫,抑制氮素吸收^[3]。本研究发现,适宜施氮量可有效增加棉花地上部堆积氮量和吸收速率,但过量施用增长效果不显著。适当施氮量随盐分增大而增大,可能是盐分胁迫较大抑制作物的水养分吸收,施氮量需要更高占比补足作物氮需求量^[20]。对施氮量促进根的积氮量及速率,并随盐分的增大而氮肥增幅减小,表明高氮量明显促进根氮量快速积累,但积氮总量无显著影响。

Grechi 等^[21]和 Wang 等^[22]研究认为,作物提高适应和竞争能力以向主次生长部位合理分配氮素。本研究中,花开以后生殖器官的氮素累积加快,有利于产量的合成,为最终获得高产奠定基础。盐分 S3 显著抑制棉花生殖器官氮素积累,氮素在盐分 S1 和 S2 土壤中无显著差异,在 S3 土壤中增大了营养器官的氮比例。氮素运输和再分配也是决定产量和其利用效率高低的几个关键环节^[15]。虽然不同学者对氮素利用效率的评价标准存在差异,但增加氮素的吸收,促进氮素向棉铃中的运输是提高产量和氮素利用效率的重要途径^[23]。

3.3 盐氮处理对棉花产量和氮肥利用效率的影响

氮素累积利用率反映作物生长季节中由肥料所吸收的氮素占施入氮素的百分比,通常仅反映最终结果^[24]。多项研究^[24-25]表明,盐分对棉花产量和氮肥利用效率有显著抑制作用,施氮量对产量有促进作用。本文研究两者相互效应对棉花产量和氮素利用效率的影响,表现出在中低盐分土壤中施氮量产量最高,高盐分土壤中高施氮量产量最高,与该处理下棉铃生物量和积氮量相一致。在中低盐分处理中,氮素利用效率随施氮量增加而减小,可能是吸氮量与施氮量无线性关系,李仙岳等^[26]研究指出,当施氮量 $>276\text{ kg/hm}^2$ 后,土壤贮氮与作物吸氮能力达到上限,继续增加施氮量,无明显促进作用。在高盐处理中氮素高是由于较大盐分胁迫下氮吸收受到抑制,植株进一步对氮浓度需要增大,增施氮肥可使吸收比例上升^[27]。

4 结论

(1)通过田间小区试验棉花高盐与低盐处理相比,蕾期推迟 5~8 天,吐絮期提前,花铃期推迟 4~6 天。施氮量的增加促进棉花发育,在 S2 和 S3 蕾期提前 2~3 天,开花期提前 1~2 天,表征棉花各发育期出现时间和各器官生物量的 Logistic 生长函数模型快速生长时期的差异,证实盐分滞后棉花发育,使棉花花铃期缩短;氮素促进棉花的生长发育,对棉花的现蕾、初花和结铃均有促进作用。

(2)营养器官(根、茎、叶)的生物量 S1N3 最大,棉铃生物量 S1N2 最大,S3 条件下棉铃生物量表现为 $N3>N2>N1$ 。各营养器官积氮量 S2 达到最大,在 S1 和 S2 中茎积氮量表现为 $N2>N3>N1$;在 S2 和 S3 中叶积氮量表现为 $N3>N2>N1$,棉铃积氮量表现为 $S1>S2>S3$, $N3>N2>N1$,根积氮量表现为 $N3>N2>N1$ 。N1S3 处理各营养器官生物量积氮量 Δt 最小, V_m 最大。盐分显著抑制棉花各器官生物量、氮素积累量及 V_m ($P<0.5$)。施氮量与土壤盐分存在显著的互作效应,氮肥在盐分 S1 和 S2 中 N2 和在 S3 中 N3 最利于生殖器官生物量积累。

(3)收获时 10.16%~31.16%的叶片氮、5.26%~17.14%的茎部氮、0~5.99%的根部氮输送至棉花铃。不同器官氮素转移率与盐分和氮肥施用水平有关,盐分越高,氮素运转率越低。施氮量促进氮素运转率。

(4)氮肥在盐分 S1、S2 中 N2 和在 S3 中 N3 最利于生殖器官生物量积累,各器官氮素累积和营养器官氮分布使作物的氮素分布更均衡,产量最优。氮肥在盐分 S1、S2 中 N1 氮利用效率最优,S3 中 N2 最有利于促进氮利用效率。因此,在盐分 $<6\text{ g/kg}$ 土壤施用氮肥 105 kg/hm^2 或 210 kg/hm^2 ,利于棉花生产和效益提高;盐

分在 $8\sim9\text{ g/kg}$ 土壤应施用氮肥 315 kg/hm^2 。

参考文献:

[1] 杜海岩,柳新伟,崔德杰,等.氮素营养对盐碱地棉花生长及生理特性的影响[J].华北农学报,2015,30(6):195-200.

[2] 王士红,杨中旭,史加亮,等.增密减氮对棉花干物质和氮素积累分配及产量的影响[J].作物学报,2020,46(3):395-407.

[3] 邹芳刚,郭文琦,王友华,等.施氮量对长江流域滨海盐土棉花氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1150-1158.

[4] 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.

[5] 史文娟,杨军强,马媛.旱区盐碱地盐生植物改良研究动态与分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(5):229-234.

[6] 张燕,张富仓,吴立峰.水肥耦合对棉花产量和氮累积利用的影响[J].节水灌溉,2016(12):20-26.

[7] 李正鹏,宋明丹,冯浩.水氮耦合下冬小麦 LAI 与株高的动态特征及其与产量的关系[J].农业工程学报,2017,33(4):195-202.

[8] 宋兴虎,Wagan T A,Souliyanonh B,等.氮肥用量及其后效对棉花产量和生物质累积动态的影响[J].棉花学报,2018,30(2):145-154.

[9] 李明思,刘洪光,郑旭荣.长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J].农业工程学报,2012,28(22):82-87.

[10] 吴立峰,朱绿丹,段洪浪,等.棉花产量和生长指标对水肥响应关系[J].南昌工程学院学报,2017,36(3):52-57.

[11] 李俊华,马富裕,郑重,等.膜下滴施尿素对棉花氮素吸收、分配、利用效率的影响[J].土壤肥料,2005(4):40-43.

[12] 王肖娟,危常州,张君,等.灌溉方式和施氮量对棉花生长及氮素利用效率的影响[J].棉花学报,2012,24(6):554-561.

[13] 刘祎,崔淑芳,张海娜,等.棉花对盐胁迫的响应机制及缓解措施的研究进展[J].农学学报,2015,5(11):10-16.

[14] 刘翠,张巨松,郑慧,等.氮肥基追比对杂交棉生长发育和产量形成的影响[J].西北农业学报,2014,23(12):102-109.

[15] 石洪亮,张巨松,严青青,等.施氮量对南疆机采棉生长特性及产量的影响[J].西北农业学报,2017,26(3):397-404.

[16] 哈丽哈什·依巴提,张炎,李青军,等.不同施氮量对棉花产量、养分吸收分配及利用的影响[J].新疆农业科学,2017,54(8):1422-1428.

[17] 吴晓东,王巍,金路路,等.盐胁迫对棉花光合作用和生理指标的影响[J].中国棉花,2013,40(6):24-26.

[18] 林涛,张昊,汤秋香,等.施氮量对南疆机采棉产量形成及氮肥利用率影响[J].新疆农业大学学报,2019,42(2):77-83.

[19] Mahmood T, Kaiser W M. Growth and solute composition of the salt-tolerant kallar grass [*Leptochloa* (L.) Kunth] as affected by nitrogen source[J]. Plant and Soil, 2003, 252: 359-366.

[16] 陈香碧,胡亚军,秦红灵,等.稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J].应用生态学报,2020,31(3):1033-1042.

[17] 毕智超,张浩轩,房歌,等.不同配比有机无机肥料对菜地 N₂O 排放的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):154-161.

[18] 龚雪蛟,秦琳,刘飞,等.有机类肥料对土壤养分含量的影响[J].应用生态学报,2020,31(4):1403-1416.

[19] 武雪萍,朱凯,刘国顺,等.有机无机肥配施对烟叶化学成分和品质的影响[J].土壤肥料,2005(1):10-13.

[20] 沈方科,闫金朋,顾明华,等.施用不同比例有机氮对烤烟产质量的影响[J].西南农业学报,2018,31(7):1498-1503.

[21] 孙赫阳,万忠梅,刘德燕,等.有机肥与无机肥配施对潮土 N₂O 排放的影响[J].环境科学,2020,41(3):1474-1481.

[22] 李彬波,曾科,李瑞,等.作物生长对土壤 N₂O 排放影响的研究进展[J].土壤通报,2015,46(4):1003-1010.

[23] 王利利,董民,张璐,等.不同碳氮比有机肥对有机农业土壤微生物生物量的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(9):1073-1077.

[24] 徐小亚.增温和干旱对土壤 N₂O 排放和相关微生物的影响[D].杭州:浙江大学,2017.

[25] 陈静,王迎春,李虎,等.基于 DNDC 模型的冬小麦-夏玉米农田滴灌施肥优化措施研究[J].植物营养与肥料学报,2019,25(2):200-212.

[26] 孙文浩,杨世伟,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤 CO₂, N₂O 通量特征[J].水土保持研究,2017,24(1):68-74.

[27] Svensson B H, Rosswall T. In situ methane production from acid peat in plant communities with different moisture regimes in a subarctic mire[J].Oikos,1984,43(3):341-350.

[28] 周胜,张鲜鲜,王从,等.水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J].农业环境科学学报,2020,39(4):852-862.

[29] 彭遥,周蓓蓓,陈晓鹏,等.间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):54-60.

(上接第 323 页)

[20] 黄金瓴,靳孟贵,栗现文.咸淡水轮灌对棉花产量和土壤溶质迁移的影响[J].农业工程学报,2015,31(17):99-107.

[21] Grechi I, Vivin P, Hilbert G, et al. Effect of light and nitrogen supply on internal C : N balance and control of root-to-shoot biomass allocation in grapevine[J].Environmental and Experimental Botany,2007,59(2):139-149.

[22] Wang G G, Bauerle W L, Mudder B T. Effects of light acclimation on the photosynthesis, growth, and biomass allocation in American chestnut (*Castanea dentata*) seedlings [J]. Forest Ecology and Management, 2006,226(1/3):173-180.

[23] 孙永健,孙园园,蒋明金,等.施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响[J].中国农业科学,2016,49(24):4745-4756.

[24] 郑剑超,闫曼曼,张巨松,等.氮肥前移对果棉间作棉花干物质积累和氮肥利用效率的影响[J].中国土壤与肥料,2016(2):78-84.

[25] 姜瑛,戚秀秀,李祥剑,等.不同小麦品种的氮素利用特性研究[J].麦类作物学报,2019,39(6):702-708.

[26] 李仙岳,冷旭,张景俊,等.北方干旱区降解膜覆盖农田玉米生长和氮素利用模拟及优化[J].农业工程学报,2020,36(5):113-121.

[27] 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.

(上接第 329 页)

[19] 聂泽旭,齐实,马曦瑶,等.华蓥市山区典型林分水源涵养功能评价[J].水土保持学报,2020,34(2):276-282.

[20] 李奕,宋墩福,王宗丽,等.赣南地区稀土矿采矿迹地枯落物层和土壤层贮水功能研究[J].水土保持学报,2020,34(2):153-158.

[21] 胡晓聪,黄乾亮,金亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.

[22] Qi F, Zhang G H, Liu X, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region[J].Soil and Tillage Research,2018,184:45-51.

[23] 郑森.华北土石山区不同林分类型枯落物及土壤水文生态效应[J].中国水土保持科学,2020,18(2):84-91.

[24] 高迪,郭建斌,王彦辉,等.宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林枯落物水文效应[J].林业科学研究,2019,32(4):26-32.

[25] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].生态学杂志,2019,38(9):2662-2670.