

盐胁迫膜下滴灌棉花生长及产量对氮磷钾 追施配比的响应分析

宁松瑞¹, 颜安², 柳维扬³

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 新疆农业大学
资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 塔里木大学 农学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要: 为探讨氮、磷、钾追施配比对盐胁迫膜下滴灌棉花生长、地上生物量累积与分配特征及产量的影响并优化追肥配比, 在南疆棉田设7个追施配比(N:P₂O₅:K₂O)处理: CK(0:0:0)、A(1:1:1)、B(1:0.25:1.25)、C(1:0.4:0.27)、D(1:0.23:0.20)、E(1:0.34:0.23)和F(1:0.17:0), 测定棉花地上部干物质积累及分配、产量和收获指数。结果表明: 与CK的棉花生长期群体生长率均值相比, C、E、A、B、D、F处理分别增加了19.56%、18.17%、15.65%、13.50%、10.55%和8.68%; 与CK的棉花生长期平均相对生长率均值相比, B、C、A、E、D处理分别增加了6.46%、4.51%、3.36%、2.53%、2.47%, 而F处理下降了0.67%; 与CK的棉花不同生育期地上部生物量增长率均值相比, B、C、A、D、E处理分别增加了29.69%、19.20%、17.94%、12.38%、11.67%, 而F处理下降了2.28%。不同处理对棉花茎重的影响最大, 对铃重的影响最小; 对棉花生殖分配的影响最大, 对蕾重比的影响最小。通径分析表明单铃重和总铃数对棉花产量具有重要作用; 主成分分析表明A处理得分最高, E处理次之, CK处理最低。研究成果可为盐胁迫棉田合理追肥提供参考依据。

关键词: 水肥一体化; 养分配比; 膜下滴灌; 产量; 通径分析; 主成分分析; 棉花

中图分类号: S275.6; TV93

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)05-0208-08

Response of salt-stressed cotton growth and yield under film mulched drip irrigation to topdressing ratio of nitrogen, phosphorus and potassium

NING Songrui¹, YAN An², LIU Weiyang³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Resources and Environment Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 3. College of Agriculture, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: The effect of topdressing ratio of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth rate, yield, biomass cumulative and distribution trait of salt-stressed cotton under film mulched drip irrigation was discussed and the topdressing ratio was optimized by the field experiment in south Xinjiang Autonomous Region. Seven treatments with different topdressing ratios of nitrogen, phosphorus and potassium (N:P₂O₅:K₂O) were set in the field experiment, namely, CK(0:0:0), A(1:1:1), B(1:0.25:1.25), C(1:0.4:0.27), D(1:0.23:0.20), E(1:0.34:0.23) and F(1:0.17:0). The accumulation and distribution of dry matter, yield and harvest index of cotton were measured accordingly. The results showed that compared with the average colony growth rate of CK, treatments of C, E, A, B, D and F increased by 19.56%, 18.17%, 15.65%, 13.50%, 10.55% and 8.68%, respectively. Compared with the mean relative growth rate of CK, treatments of B, C, A, E and D increased by 6.46%, 4.51%, 3.36%, 2.53% and 2.47%, respectively; whereas treatment F decreased by 0.67%. Compared with the average growth rate of cotton aboveground biomass of CK, treatments of B, C, A, D and E increased

收稿日期: 2022-04-05; 修回日期: 2022-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007008, 32160527); 兵团重大科技项目(2021AA003-2); 新疆自治区重点研发计划(2022B02003); 新疆自治区重大科技专项(2020A01003-3); 兵团强南科技创新人才骨干项目(2022CB001-07)

作者简介: 宁松瑞(1985-), 男, 陕西武功人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业水肥盐高效调控研究。

通讯作者: 颜安(1983-), 男, 四川资阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业资源与环境研究。

by 29.69% , 19.20% , 17.94% , 12.38% and 11.67% , respectively; while treatment F decreased by 2.28% . Different topdressing ratios had the greatest effect on cotton stem weight and reproductive organ weight, but had the least effect on boll weight and bud weight ratio. In addition, path analysis showed that the single boll weight and total boll number played an important role in increasing cotton yield. Principal component analysis showed that the nutrient distribution ratio of treatment A ranked the highest, followed by treatment E, and treatment CK was the lowest. The research can provide a technical support for the reasonable topdressing of cotton under salt stress.

Key words: water and fertilizer coupling; nutrient ratio; film mulched drip irrigation; yield; path analysis; principal component analysis; cotton

1 研究背景

新疆维吾尔自治区是中国最大的产棉区,2020年的棉花播种面积为 $250.61 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占全国棉花播种面积的82.8%;棉花产量($512.9 \times 10^4 \text{ t}$)占全国棉花产量的89.5%。棉花产业是新疆的优势支柱产业之一,约50%的农户从事棉花产业,其收入超过农民纯收入的38%^[1]。新疆地区的降雨稀少、蒸发强烈、水资源短缺,盐渍耕地占全区耕地面积的37%,南疆盐渍耕地约占当地耕地面积的一半^[2]。

近年来,膜下滴灌棉花种植技术因具有显著的节水、抑盐和增温等效果,其推广面积约占棉花种植面积的70%,极大地促进了新疆盐渍化地区的棉花生产^[3-4]。

优化水肥管理是保障盐胁迫棉花优质高产的重要措施^[5-7]。随着新疆棉花的灌溉方式由传统的漫灌转变为膜下滴灌,膜下滴灌棉田的施肥方式也由传统的“氮、磷、钾肥播前基施为主配合生育期氮肥追施”逐渐向“氮、磷、钾肥生育期追施”转变^[3-4],膜下滴灌棉田水肥盐一体化调控水平和程度也不断提高^[8]。生育期随水追施氮、磷、钾的配比(或数量)是盐胁迫棉花能否增产的重要因素^[4,8]。大量研究发现适宜的氮、磷、钾配比利于棉花对水分和养分的吸收,促进其生长和干物质累积等,达到增产提质的目标;氮、磷、钾配比不合理则影响棉花的生长及干物质的累积分配与产量^[9-12]。当前,膜下滴灌棉田的氮、磷、钾追施配比大多根据经验制定^[12],氮、磷、钾追施配比不合理造成部分营养元素过剩或不足,限制了水肥耦合效应对盐胁迫棉花生长及产量的促进作用^[13-14]。本文以盐胁迫膜下滴灌棉田合理追施氮、磷、钾养分为切入点,研究不同养分追施配比处理对棉花地上部生物量的生长速度和地上部生物量累积性状与分配性状的可塑性的影响,探究影响盐胁迫棉花产量的主要因素,评价盐胁迫膜下滴灌棉田的养分追施配比,为指导盐胁迫棉田合

理施肥提供参考依据。

2 试验场地与研究方法

2.1 试验概况

试验地位于新疆阿瓦提县新疆农业科学院试验基地。气候属温带大陆性干旱气候,年均日照时数2 750~3 029 h,无霜期183~227 d,年均气温10.4℃,多年平均降水量46.7 mm,蒸降比超过50。

试验地块0~40 cm土层为粉砂壤土,容重 1.45 g/cm^3 ;播前平均含水率 0.23 g/cm^3 ,凋萎系数 0.10 g/cm^3 ,田间持水率 0.32 g/cm^3 ,有机质含量 7.41 g/kg ,全氮量 0.47 g/kg ,速效磷 35 mg/kg ,速效钾 155 mg/kg ,土壤pH及盐分含量分别为8.2和1.02%,灌溉水矿化度 0.83 g/L 。犁地前一次性施入磷酸二铵(N 21.2%、 P_2O_5 53.8%) 225 kg/hm^2 ,尿素(N 46.6%) 300 kg/hm^2 ,有机肥 375 kg/hm^2 。

2.2 试验设计

试验地于2018年4月20日播种,供试棉花品种为具有优质、高产和抗病特性的“新陆中88”,采用“一膜二管六行”的膜下滴灌机采棉种植模式,株行配置模式为 $((10+66+10)+66) \times 11 \text{ cm}$,地膜宽2.05 m,滴灌带间距76 cm,滴头间距25 cm,滴头流量 2.1 L/h 。

结合当地高产棉田灌溉经验,试验地于6月20日开始灌溉、8月22日停水,灌溉定额268 mm,灌溉周期7 d,共灌溉10次。氮、磷、钾是棉花生长必需的大量营养元素,试验地追肥量参考当地膜下滴灌棉花生育期需肥特性及高产棉田生育期的追肥现状并结合相关研究资料^[9,12]设置7个氮、磷、钾(N: P_2O_5 : K_2O)追施配比处理:CK(0:0:0),A(1:1:1),B(1:0.25:1.25),C(1:0.4:0.27),D(1:0.23:0.20),E(1:0.34:0.23)和F(1:0.17:0);追肥量为 375 kg/hm^2 ,追肥随水施入,追肥比例见表1。各处理宽6.90 m(3膜18行)、长6.50 m、重复进行3次,采用

单因素随机区组合设计。田间管理措施与当地高产 棉田保持一致。

表 1 试验地追肥制度

日期/(月-日)	06-20	06-27	07-04	07-11	07-18	07-25	08-01	08-08	08-15	08-22	合计
追肥比例/%	0	8	8	12	12	16	16	16	12	0	100

2.3 测定指标与方法

2.3.1 棉花生长及产量监测指标 棉花地上生物量的测定方法:在各处理苗期、蕾期、花期、铃期和絮期选取 6 株长势均匀的植株,按营养器官(茎、叶)和生殖器官(蕾、铃)分解后于 105 ℃ 杀青 30 min,于 80 ℃ 恒温烘至恒重,分别测定其生物量。

在棉花吐絮期调查收获株数、总铃数、单铃重、衣分和收获指数及产量等指标。

2.3.2 相关指标及其计算公式 叶(茎、蕾、铃)重比即叶(茎、蕾、铃)干重与地上生物量之比;营养分配即营养器官干重与地上生物量之比,生殖分配即生殖器官干重与地上生物量之比。

群体生长率(colony growth rate, *CGR*)反映了单位时间、单位土地面积上所增加的干物重,其计算式如下:

$$CGR = (W_2 - W_1)/(t_2 - t_1) \tag{1}$$

式中:*CGR* 为群体生长率,kg/(hm²·d); *t*₂ 和 *t*₁ 为测定时期; *W*₂ 和 *W*₁ 分别为 *t*₂ 和 *t*₁ 时期的干重,kg/hm²。

平均相对生长率(mean relative growth rate, *MRGR*) 反映了单位时间、单位重量植株的干物质增

加量,其计算式如下:

$$MRGR = (\ln W_2 - \ln W_1)/(t_2 - t_1) \tag{2}$$

地上部生物量增长率(aboveground biomass growth rate, *ABGR*) 反映了不同生育期地上部生物量(*W*) 相对于苗期的地上部生物量(*W*_苗) 的增长速度,其计算式如下:

$$ABGR = (W - W_{苗})/W_{苗} \tag{3}$$

可塑性指数(plastic index, *PI*) 解释了表型可塑性的大小,取值(0 ~ 1) 越大表示表型可塑性越强^[15-16],其计算式如下:

$$PI = (\text{某变量的最大值} - \text{某变量的最小值})/\text{某变量的最大值} \times 100\% \tag{4}$$

2.4 数据处理

数据分析及制图采用 Excel 2016, 通径分析和主成分分析采用 SPSS 21.0 软件分析。

3 结果与分析

3.1 棉花生长率对氮磷钾追施配比的响应

不同氮磷钾追施配比处理的棉花生长率不同,各处理对棉花生长率的影响如表 2 所示。

表 2 氮磷钾追施对比对棉花生长率的影响

处理	群体生长率 <i>CGR</i> /(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)					平均相对生长率 <i>MRGR</i> /(g·g ⁻¹ ·d ⁻¹)				
	苗期~ 蕾期	蕾期~ 花期	花期~ 铃期	铃期~ 絮期	生长期 均值	苗期~ 蕾期	蕾期~ 花期	花期~ 铃期	铃期~ 絮期	生长期 均值
CK	122.37	254.00	240.77	-23.86	121.93	0.0908	0.0411	0.0229	-0.0019	0.0420
A	131.25	353.98	281.37	-47.65	141.01	0.0928	0.0498	0.0222	-0.0032	0.0434
B	119.59	333.50	267.52	-23.33	138.39	0.0943	0.0511	0.0226	-0.0016	0.0447
C	124.19	355.31	281.90	-24.56	145.78	0.0917	0.0518	0.0226	-0.0015	0.0439
D	133.17	298.48	267.15	-33.39	134.79	0.0933	0.0436	0.0227	-0.0024	0.0430
E	123.60	368.11	290.24	-41.48	144.08	0.0895	0.0532	0.0228	-0.0027	0.0431
F	121.30	325.31	252.51	-30.79	132.52	0.0876	0.0493	0.0216	-0.0022	0.0417
均值	125.07	326.95	268.78	-32.15		0.0914	0.0486	0.0225	-0.0022	

根据表 2 可知,各处理棉花生长期群体生长率(*CGR*) 均值由大至小依次为 C、E、A、B、D、F 和 CK 处理。与 CK 处理的棉花生长期 *CGR* 的均值

(121.93 kg/(hm²·d)) 相比,C、E、A、B、D、F 处理分别增加了 19.56%、18.17%、15.65%、13.50%、10.55% 和 8.68%。棉花不同生长阶段地上部生物

量的 CGR 最大值和最小值在苗期 ~ 蕾期分别为 133.17 (D) 和 119.59 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ (B), 在蕾期 ~ 花期分别为 368.11 (E) 和 254.00 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ (CK), 在花期 ~ 铃期分别为 290.24 (E) 和 240.77 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ (CK), 棉花铃期 ~ 絮期地上部生物量的群体下降率最大值、最小值分别为 47.65 (A)、23.86 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ (CK)。棉花苗期 ~ 蕾期、蕾期 ~ 花期和花期 ~ 铃期地上部生物量的 CGR 均值分别为 125.07、326.95 和 268.78 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 而棉花在铃期 ~ 絮期生长停滞并逐步死亡、地上部生物量下降、群体下降率为 32.15 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。

平均相对生长率 ($MRGR$) 受遗传特性和环境因素控制。由表 2 可知, 各处理的棉花生长期 $MRGR$ 的均值排序依次为 $B > C > A > E > D > CK > F$ 。与 CK 处理的棉花生长期 $MRGR$ 的均值 ($0.0420 \text{ g}/(\text{g} \cdot \text{d})$) 相比, B、C、A、E、D 处理分别增加了 6.46%、4.51%、3.36%、2.53%、2.47%, 而 F 处理下降了 0.67%。棉花不同生育阶段的 $MRGR$ 最大值与最小值在苗期 ~ 蕾期分别为 0.0943 (B)、0.0876 $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ (F), 在蕾期 ~ 花期分别为 0.0532 (E)、0.0411 $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ (CK), 在花期 ~ 铃期分别为 0.0229 (CK)、0.0216 $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ (F), 而棉花铃期 ~ 絮期地上部干重的平均相对下降率的最大值与最小值分别为 0.0032 (A)、0.0015 $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ (C)。棉花苗期 ~ 蕾期、蕾期 ~ 花期和花期 ~ 铃期的 $MRGR$ 分别为 0.0914、0.0486 和 0.0225 $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$, 但棉花铃期 ~ 絮期的地上部生物量平均相对下降率为 0.0022 $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 。

图 1 为棉花各生育期的地上部生物量与苗期相比的增长率。

由图 1 可知, 与棉花苗期的地上部生物量相比, 各处理不同生育期地上部生物量增长率由大到小依次为铃期、絮期、花期、蕾期; 对于各生育期不同处理的地上部生物量增长率的最大值和最小值, 在蕾期分别为 26.15 倍 (B)、20.46 倍 (F), 在花期分别为 57.41 倍 (B)、43.44 倍 (CK), 在铃期分别为 90.85 倍 (B)、68.30 倍 (F), 在絮期分别为 86.47 倍 (B)、63.85 倍 (F)。此外, 各处理棉花不同生育期地上部生物量增长率的均值由大到小依次为 B、C、A、D、E、CK 和 F; 与 CK 处理的棉花不同生育期地上部生物量增长率均值相比, B、C、A、D、E 处理分别增加了 29.69%、19.20%、17.94%、12.38%、11.67%, 而 F 处理下降了 2.28%。

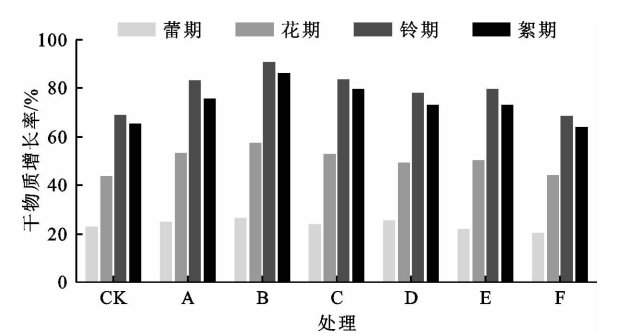


图 1 棉花各生育期的地上部生物量增长率(与苗期相比)

3.2 棉花生物量累积与分配对氮磷钾追施配比的可塑性响应

氮磷钾追施配比差异为棉花生长发育营造了不同的土壤养分微环境, 使得棉花的地上部生物量累积性状与分配性状存在一定的可塑性。不同处理棉花生物量累积性状与分配性状的可塑性指数分析结果见表 3。

表 3 不同处理棉花生物量累积性状与分配性状的可塑性指数

处理	棉花地上部生物量累积性状的可塑性指数 PI								棉花地上部生物量分配性状的可塑性指数 PI							
	茎重	叶重	蕾重	铃重	营养器官重	生殖器官重	地上部干重	均值	茎重比	叶重比	蕾重比	铃重比	营养分配	生殖分配	均值	
CK	0.99a	0.95a	0.70ab	0.73a	0.97a	0.98a	0.99a	0.90	0.63a	0.77bc	0.45b	0.58ab	0.64a	0.94a	0.67	
A	0.99a	0.96a	0.74b	0.70a	0.97a	0.98a	0.99a	0.90	0.65ab	0.74a	0.444c	0.55a	0.63a	0.94a	0.66	
B	0.99a	0.96a	0.68a	0.74a	0.98a	0.98a	0.99a	0.90	0.66a	0.78bc	0.32a	0.61c	0.64a	0.93a	0.66	
C	0.99a	0.96a	0.80c	0.74a	0.97a	0.98a	0.99a	0.92	0.70c	0.78c	0.56d	0.60c	0.64a	0.95a	0.70	
D	0.99a	0.95a	0.68a	0.70a	0.97a	0.98a	0.99a	0.89	0.63a	0.77bc	0.39b	0.55a	0.64a	0.94a	0.65	
E	0.99a	0.95a	0.76b	0.71a	0.97a	0.98a	0.99a	0.91	0.66ab	0.78bc	0.47c	0.54a	0.65a	0.95a	0.67	
F	0.99a	0.95a	0.71ab	0.70a	0.97a	0.98a	0.99a	0.90	0.64a	0.78bc	0.39b	0.56b	0.63a	0.93a	0.65	
均值	0.99	0.95	0.72	0.72	0.97	0.98	0.99	0.90	0.66	0.77	0.43	0.57	0.64	0.94	0.67	

注: 表格中同一列数据后的相同字母表示差异未达到显著性水平 ($p < 0.05$)。

根据表 3 可知,各处理棉花生物量累积性状的可塑性指数(PI)均值总体表现为:C(0.92)、E(0.91)、A(0.90)、B(0.90)、F(0.90)处理的PI均不低于CK(0.90),其他处理的PI均低于CK,PI排在最后的处理是D(0.89)。生物量累积性状PI均值从大到小依次表现为:茎重(0.99)、叶重(0.95)、蕾重(0.72)、铃重(0.72);此外,地上部生物量的PI均值(0.99)高于生殖器官重(0.98)和营养器官重(0.97)。说明不同处理对棉花茎重的影响最大,对铃重的影响最小。

表 3 显示,棉花生物量分配性状的PI均值总体表现为C(0.70)、E(0.67)处理的PI均不低于CK(0.67)处理,其他处理的PI均低于CK处理,排在后3位的处理依次是B(0.66)、F(0.65)、D(0.65)处理。棉花地上部生物量分配性状的PI均值从大到小依次为:叶重比(0.77)、茎重比(0.66)、铃重比(0.57)、蕾重比(0.43);此外,生殖分配的PI均值(0.94)高于营养分配(0.64)。说明不同处理对棉花生殖分配的影响最大,对叶重比及营养分配的影响次之,对蕾重比的影响最小。

3.3 基于通径分析法的膜下滴灌棉花产量影响因素分析

通径分析法通过计算通径系数,可区分自变量对因变量的间接作用及直接作用。为量化不同处理下盐胁迫膜下滴灌棉田籽棉产量与其主要影响因素之间的真实作用关系,对棉花产量影响因素进行通径分析。籽棉产量(Y)的影响因素主要有收获株数(X_1)、总铃数(X_2)、单铃重(X_3)和衣分(X_4)和收获指数(X_5)^[5]。采用SPSS 21.0 软件通过逐步回归分析,计算籽棉产量与影响因素的相关系数、直接通径系数(某一自变量对因变量的直接作用)和间接通径系数(该自变量通过其他因素对因变量的间接作用),量化不同因素对籽棉产量的影响程度^[5]。

经正态性检验,籽棉产量(Y)服从正态分布;再通过逐步回归分析法,可建立最优的回归方程,回

归方程的输出结果见表 4。

表 4 说明随着自变量被逐步引入,回归方程的相关系数(R)和决定系数(R^2)均增大,表明引入的自变量对产量的影响作用在增加。模型 2 的 $R^2 = 1$,可作为最优的回归方程,相应的剩余因子 $e = \sqrt{1 - R^2} = 0$,说明影响籽棉产量的自变量为单铃重(X_3)和总铃数(X_2)。

表 4 籽棉产量回归方程输出结果

模型	R	R^2	调整 R^2	标准估计的误差
1	0.952 ^a	0.907	0.888	103.7323
2	1.000 ^b	1.000	1.000	3.0478

注: a 为预测变量, X_3 ; b 为预测变量, X_3 和 X_2 。

表 5 展示了回归方程系数输出结果,列出各自变量的回归系数、方程截距和标准回归系数(即通径系数)等。由表 5 可得,线性回归方程为 $Y = -5593.886 + 1042.208X_3 + 53.716X_2$; X_3 、 X_2 对Y的直接作用分别为 $P_{3Y} = 0.609$ 和 $P_{2Y} = 0.459$, X_3 和 X_2 均与Y存在极显著性差异($p < 0.01$),说明该回归方程具有统计学意义。

相关系数及检验输出结果见表 6。根据通径分析理论,由表 6 可知,各自变量之间的相关系数分别为 $R_{32} = R_{23} = 0.747$, X_3 和 X_2 与Y之间的简单相关系数分别为 $R_{3Y} = 0.952$ 、 $R_{2Y} = 0.914$ 。 X_3 通过 X_2 对Y的间接通径系数为 $R_{32} \times P_{3Y} = 0.747 \times 0.609 = 0.455$, X_2 通过 X_3 对Y的间接通径系数为0.343。

简单相关系数的分解结果见表 7。由表 7 可知,单铃重(X_3)对籽棉产量(Y)的直接作用最大(直接作用系数为0.609),总铃数(X_2)对籽棉产量(Y)的直接作用最小(直接作用系数为0.459)。单铃重通过总铃数对产量起到一定正间接作用(间接作用系数为0.455);类似的,总铃数通过单铃重对产量也起到一定正间接作用(间接作用系数为0.343)。因此,不同处理的单铃重(X_3)和总铃数(X_2)对籽棉产量(Y)的增加具有重要作用^[5]。

表 5 回归方程系数输出结果

模型	自变量	非标准化系数		标准系数 β	t	Sig.
		样本回归系数	标准误差			
1	常量	-3015.162	1233.085		-2.445	0.058
	X_3	1629.438	233.610	0.952	6.975	0.001
	常量	-5593.886	49.613		-112.750	0.000
2	X_3	1042.208	10.329	0.609	100.901	0.000
	X_2	53.716	0.706	0.459	76.079	0.000

注: t 为采用 T 检验法对回归方程进行检验以表明其有无统计学意义的值; Sig. 为 T 检验的差异有无显著性, Sig. ≤ 0.05 说明具有显著性。

表 6 回归方程自变量相关系数及检验输出结果

项目	变量	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
Pearson 相关	Y	1.000	0.147	0.914	0.952	0.464	0.294
	X ₁	0.147	1.000	0.104	0.171	0.238	-0.176
	X ₂	0.914	0.104	1.000	0.747	0.497	0.478
	X ₃	0.952	0.171	0.747	1.000	0.393	0.128
	X ₄	0.464	0.238	0.497	0.393	1.000	0.778
	X ₅	0.294	-0.176	0.478	0.128	0.778	1.000
Sig. (单侧)	Y		0.377	0.002	0	0.147	0.261
	X ₁	0.377		0.412	0.357	0.304	0.353
	X ₂	0.002	0.412		0.027	0.128	0.139
	X ₃	0	0.357	0.027		0.191	0.392
	X ₄	0.147	0.304	0.128	0.191		0.020
	X ₅	0.261	0.353	0.139	0.392	0.020	

表 7 简单相关系数的分解结果

自变量	与 Y 的 简单相 关系数	通径系 数(直接作 用系数)	间接通径系数(间接作用系数)		
			X ₂	X ₃	合计
X ₂	0.914	0.459		0.343	0.343
X ₃	0.952	0.609	0.455		0.455

3.4 基于主成分分析法的膜下滴灌棉田氮磷钾追施配比评价

为评估不同处理对盐胁迫膜下滴灌棉花生长及籽棉产量的影响,对各影响因素(X₁、X₂、X₃、X₄、X₅)进行主成分分析,主成分分析结果见表 8。

表 8 主成分分析的特征根与方差贡献率

项目	特征值	方差贡 献率/%	累积方差 贡献率/%
主成分 1	2.546	50.93	50.93
主成分 2	1.218	24.35	75.28

由表 8 可知,通过特征值 > 1 可提取 2 个主成分,其特征值分别为 2.546 和 1.218,主成分 1、主成分 2 的方差贡献率分别为 50.93% 和 24.35%,累积方差贡献率为 75.28%,可代表 75.28% 的原始数据信息。

主成分分析的载荷值与特征向量计算结果见表 9。由表 9 可知,总铃数(X₂)、单铃重(X₃)和衣分(X₄)和收获指数(X₅)在主成分 1 上有较高的载荷量(载荷值 > 0.7),说明这几项指标综合了大部分

的变异信息;主成分 2 载荷值最大(载荷值 > 0.7)的指标是收获株数(X₁)。

表 9 主成分分析的载荷值与特征向量

变量	主成分 1		主成分 2	
	载荷值	特征向量	载荷值	特征向量
X ₁	0.184	0.116	0.747	0.677
X ₂	0.858	0.538	0.167	0.151
X ₃	0.713	0.447	0.463	0.420
X ₄	0.854	0.535	-0.183	-0.166
X ₅	0.733	0.459	-0.620	-0.562

为反映各影响因素与主成分之间的定量关系,参考主成分计算公式,可获得 2 个主成分与 5 个影响因素之间的线性表达式为:

$$Y_1 = 0.116X_1 + 0.538X_2 + 0.447X_3 + 0.535X_4 + 0.459X_5$$
(5)

$$Y_2 = 0.677X_1 + 0.151X_2 + 0.420X_3 - 0.166X_4 - 0.562X_5$$
(6)

将数据进行标准化后代入方程式(5)和(6),可得不同处理分别在 2 个主成分上的得分;然后,根据公式(7)计算不同处理的综合得分。

$$F = \sum_{i=1}^n b_i Y_i = 0.5093Y_1 + 0.2435Y_2$$
(7)

式中:F 为主成分得分;b 为方差贡献率,%;n 为主成分个数。

通过计算得出不同处理的综合得分由高到低依次为 A、E、F、C、D、B 和 CK,说明 A 处理有利于增加盐胁迫棉花的产量,E 处理次之,CK 处理得分最低。

4 讨 论

作为植物生长发育过程必需的大量矿质营养,氮、磷、钾元素不仅是生物大分子(如蛋白质、核酸等)的构成成分,也参与了植物的光合作用及细胞的离子平衡过程,对促进盐胁迫植物的生长发育至关重要。前人研究表明^[17-20],盐胁迫棉花高产、优质是以较高的生物量累积为前提的,棉花苗期生长缓慢、干物质积累较慢,蕾期生长加速、干物质积累迅速增加,花期及铃期的地上干物质累积量达到峰值后逐渐下降,进入絮期后基本稳定。本研究进一步发现盐胁迫棉花的群体生长率的均值也呈现类似的趋势,蕾期~花期>花期~铃期>苗期~蕾期>铃期~絮期;从不同处理的平均相对生长率均值看,苗期~蕾期>蕾期~花期>花期~铃期>铃期~絮期;这与前人的研究结果相近。此外,林涛等^[21]发现适量增施氮肥有效增加了棉花的干物质累积量,但过量施氮对棉花干物质累积量的促进作用不明显,甚至呈抑制作用。本研究发现,盐胁迫棉田施氮比例最高的 F 处理(1:0.17:0),其生长期平均相对生长率的均值和地上部生物量增长率的均值均是各处理中最低的;而适量增施氮肥的处理(B、C 等处理)生长期平均相对生长率的均值和地上部生物量增长率的均值大多偏高。

氮、磷、钾追施配比不同对盐胁迫膜下滴灌棉花的表型(如生物量累积)和生长发育过程存在明显的影响。选取适宜的氮磷钾追施配比是保障盐胁迫膜下滴灌棉花高产优质的重要因素。本研究表明,C 处理的棉花生物量累积可塑性指数的均值、生物量分配的可塑性指数均较大,而 D、E 处理的棉花生物量累积可塑性指数的均值、生物量分配的可塑性指数均偏小;说明氮和钾的配比接近时,适当提高磷肥施用比例,可有效提高盐胁迫下棉花地上部生物量累积与分配的可塑性。部分研究也指出合理增施磷肥具有提高作物耐盐性的作用,能够显著增加棉花地上部生物量的积累^[4,22]。此外,本研究 C、D、E 处理的 P_2O_5 施量分别为 90、57 和 81 kg/hm²;戴婷婷等^[23]通过研究进一步指出 P_2O_5 施量为 75~150 kg/hm² 时,对棉花干物质积累、各器官(除根外)干物质积累和产量具有显著的促进作用。本研究的结论总体与前述文献研究结果相近。

部分学者研究了新疆膜下滴灌棉田氮、磷、钾施量对棉花生长及产量的影响,棉花全生育期对 N、 P_2O_5 和 K_2O 的最佳吸收比例为 1:0.27:1.58^[24],膜

下滴灌棉田 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用配比为 1:0.31:0.32 时可获得高产^[9]。本研究采用主成分分析法评估了不同养分配比对盐胁迫膜下滴灌棉田籽棉产量的影响,结果表明 A 处理(1:1:1)的综合得分最高,E 处理(1:0.34:0.23)的综合得分次之,这与前人的研究结果类似。

5 结 论

(1)不同氮磷钾追施配比处理的棉花生长期群体生长率由大到小依次为:蕾期~花期、花期~铃期、苗期~蕾期、铃期~絮期,棉花平均相对生长率由大到小依次为:苗期~蕾期、蕾期~花期、花期~铃期、铃期~絮期,棉花各生育期地上部生物量与苗期相比的增长率由大到小依次为:铃期、絮期、花期、蕾期。

(2)不同氮磷钾追施配比处理中,C 处理的棉花生物量累积性状以及分配性状的可塑性指数均值均最大。不同氮磷钾追施配比处理对棉花生物量累积性状以及分配性状的可塑性指数均值从大到小依次为茎重、叶重、蕾重、铃重以及叶重比、茎重比、铃重比、蕾重比;棉花生殖分配的可塑性指数均值高于营养分配的可塑性指数均值。

(3)通径分析法表明不同氮磷钾追施配比处理的棉花单铃重、总铃数对籽棉产量具有重要作用,单铃重对籽棉产量的影响贡献最大,总铃数对籽棉产量的直接作用最小。主成分分析法表明 A 处理的氮磷钾追施配比综合得分最高、有利于盐胁迫棉花增产,E 处理次之,CK 处理得分最低。

参考文献:

- [1] NING Songrui, ZHOU Beibei, SHI Jianchu, et al. Soil water/salt balance and water productivity of typical irrigation schedules for cotton under film mulched drip irrigation in northern Xinjiang [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106651.
- [2] 王全九,邓铭江,宁松瑞,等.农田水盐调控现实与面临的问题[J].*水科学进展*,2021,32(1):139-147.
- [3] 乔学瑾,石建初,谭丽丽,等.新疆安集海灌区膜下滴灌棉田根系层土壤盐分多尺度空间分布特征[J].*土壤学报*,2021,58(5):1202-1213.
- [4] 李青军,张炎,哈丽哈什·依巴提,等.棉花高产和磷高效的磷肥基施追施配合技术研究[J].*植物营养与肥料学报*,2018,24(1):146-153.
- [5] 袁念念,黄介生,谢华.通径法分析控制排水条件下影响棉花产量的因素[J].*长江科学院院报*,2014,31(2):

- 35-39.
- [6] 王振华,朱延凯,张金珠,等. 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花生理特性与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2018,49(6):296-308.
- [7] 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.
- [8] 马富裕,刘扬,崔静,等. 水肥一体化研究进展[J]. 新疆农业科学,2019,56(1):183-192.
- [9] 龚江,王桂花,谢海霞,等. 膜下滴灌氮、磷、钾耦合对杂交棉产量的影响[J]. 新疆农业科学,2010,47(9):1878-1881.
- [10] 邓忠,翟国亮,吕谋超,等. 施肥策略对新疆棉花产量、品质与水氮利用的影响[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(10):897-902.
- [11] 张丽霞,杨永辉,尹钧,等. 水肥一体化对小麦干物质和氮素积累、转运及产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021,52(2):275-282+319.
- [12] 颜安,宁松瑞,万江春,等. 养分配比对盐胁迫膜下滴灌棉花生长与产量和水肥效率的影响[J]. 新疆农业大学学报,2021,44(1):1-7.
- [13] 苑严伟,李树君,方宪法,等. 氮磷钾配比施肥决策支持系统[J]. 农业机械学报,2013,44(8):240-244+223.
- [14] 于晓琦,黄月娇,王晓明. 水氮调控对轻度盐化土膜下滴灌棉花根干质量的影响[J]. 灌溉排水学报,2022,41(5):97-103.
- [15] VALLADARES F, WRIGHT S J, LASSO E, et al. Plastic phenotypic response to light of 16 congeneric shrubs from a Panamanian rainforest[J]. Ecology, 2000, 81(7):1925-1936.
- [16] BOHNKE M, BRUELHEIDE H. How do evergreen and deciduous species respond to shade? —Tolerance and plasticity of subtropical tree and shrub species of South-East China[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 87:179-190.
- [17] 郑春莲,冯棣,李科江,等. 咸水沟灌对土壤水盐变化与棉花生长及产量的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(13):92-101.
- [18] 江晓慧,高阳,王广帅,等. 基于 FvCB 模型分析盐分胁迫对棉花叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2020,31(5):1653-1659.
- [19] 彭遥,周蓓蓓,张继红,等. 磁化水膜下滴灌对棉田水盐分布特征及棉花生长特性的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(5):334-342+357.
- [20] 余天源,何新林,衡通. 盐氮效应对棉花氮素分配、转运和利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(2):315-323+337.
- [21] 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.
- [22] 姜焕焕,李嘉钦,陈刚,等. 解磷微生物及其在盐碱土中的应用研究进展[J]. 土壤,2021,53(6):1125-1131.
- [23] 戴婷婷,盛建东,陈波浪. 磷肥不同用量对棉花干物质及氮磷钾吸收分配的影响[J]. 棉花学报,2010,22(5):466-470.
- [24] 李鹏程,董合林,刘爱忠,等. 南疆高产棉花干物质积累及氮磷钾养分吸收规律研究[C]//中国农学会棉花分会. 中国棉花学会2010年年会论文汇编. 安阳:中国棉花杂志社,2010.

