

# 土壤水氮调控对盐碱地棉花生长发育及水氮利用效率的影响

王培华, 史文娟\*, 张艳超

(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, 西安 710048)

**摘要:** 【目的】探明土壤水氮盐耦合对膜下滴灌棉花生理生态指标及产量、水氮利用效率的影响, 明确不同程度盐渍化土壤中适宜的水氮措施。【方法】基于膜下滴灌棉花盆栽试验, 采用“3414”试验方案, 分别设置灌水量(W0: 1 575 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W1: 2 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W2: 2 625 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>和W3: 3 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、施纯氮量(N0: 0、N1: 150、N2: 300和N3: 450 kg/hm<sup>2</sup>)、土壤盐分(S0: 非盐化土、S1: 轻度盐化土、S2: 中度盐化土和S3: 重度盐化土)三因素试验, 研究水氮调控对不同程度盐渍化土壤膜下滴灌棉花生长发育及水氮利用效率的影响。【结果】水氮盐耦合效应对棉花株高、茎粗、叶面积指数、净光合速率、蒸腾速率及气孔导度均有显著影响( $P < 0.05$ )。在土壤施氮量、含盐量或灌水量、含盐量相同时, 适当增加土壤灌水或施氮量, 可显著促进棉花株高、茎粗、叶面积指数的增加及产量的提高; 在土壤灌水量、施氮量相同时, 土壤含盐量对棉花生长存在阈值。水氮盐单因素及施氮量与土壤含盐量的交互作用均对棉花生长指标及产量、水分利用效率、氮肥偏生产力有极显著影响( $P < 0.01$ )。各处理中, N1S1W2处理的产量、水分利用效率和氮肥偏生产力最大, 分别比较低的N2S2W0处理高172.01%、60.71%、444.08%; N2S2W3处理的产量较N1S2W1处理高71.46%, 即土壤盐渍化相对较重时, 增加灌水量及适度的增加施氮量可促进棉花产量的提高。通径分析发现, 灌水量对棉花产量的正向促进作用最大; 土壤含盐量则产生负向的抑制作用。【结论】土壤处于轻度盐渍化时, 灌溉定额2 625 kg/hm<sup>2</sup>、施纯氮量150 kg/hm<sup>2</sup>最适宜棉花的生长; 土壤盐渍化较重时, 灌溉定额3 125 kg/hm<sup>2</sup>、施纯氮量300 kg/hm<sup>2</sup>可以有效改善土壤盐渍化对棉花生长的负面影响, 最大程度提高棉花产量。

**关键词:** 棉花; 盐碱地; 膜下滴灌; 生长指标; 产量

中图分类号: S279

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022001

OSID:



王培华, 史文娟, 张艳超. 土壤水氮调控对盐碱地棉花生长发育及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 33-42.

WANG Peihua, SHI Wenjuan, ZHANG Yanchao. Improving Soil Water and Nitrogen Management to Facilitate Growth and Water-nitrogen Use Efficiency of Cotton in Saline-alkali Soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 33-42.

## 0 引言

【研究意义】盐渍土是制约农业发展的重要因素, 而膜下滴灌技术作为一种新型的节水技术, 不但可以有效地节水增产, 对盐碱地适应性也较强<sup>[1]</sup>, 因此在盐碱区得到了广泛的应用。但膜下滴灌只是将盐分沉积在作物根系层以下<sup>[2]</sup>, 长此以往也会影响到作物的生长发育, 因此需要更多的综合措施用于降低膜下滴灌农田根层土壤盐分, 以促进作物的生长及农业的可持续发展。

【研究进展】水和肥对盐渍化农田生产力具有重要影响。土壤的水肥(氮)状况均会影响土壤盐分, 进而影响作物生长<sup>[3]</sup>。关于水氮盐单因素对作物的影

响研究较多, 如适当的增加灌水量、施氮量或土壤盐分量可以促进作物的生长和产量的提高, 但过量则会降低其水氮利用效率<sup>[4-6]</sup>。灌水量较高时, 不但可淋洗土壤盐分, 还可以减少作物根系层氮素残留, 更好地被作物吸收利用<sup>[7]</sup>, 从而促进作物生长, 提高作物品质。关于水、氮、盐双因素耦合对作物生长的影响研究也有较多报道。灌水量、施氮量或灌水量、土壤盐分或施氮量、土壤盐分均需保持适宜的范围才会对作物产量和品质有促进作用, 过量则会有抑制作用<sup>[7-9]</sup>。不同土壤水盐造就的水盐胁迫环境会降低作物酶活性, 导致产量下降<sup>[10-12]</sup>; 不同土壤氮盐造就的胁迫环境对作物的生长存在阈值, 但总体呈“盐高产低”的规律<sup>[13]</sup>。可以看出, 土壤水氮、水盐、氮盐之间具有相互制衡的作用, 从而对作物的生长产生较大影响。总体而言, 通过土壤灌水及施氮量的有效管理, 对盐渍土的改良有积极作用, 可以更好地满足作物生长的需求<sup>[14]</sup>, 提高其水氮利用效率<sup>[15]</sup>。

收稿日期: 2022-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077011)

作者简介: 王培华(1997-), 女, 陕西宝鸡人。硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 1781703093@qq.com

通信作者: 史文娟(1972-), 女, 陕西武功人。教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: shiwj@xaut.edu.cn

【切入点】目前,有关水氮盐三因素的耦合作用对膜下滴灌棉花生长的研究较少报道,水氮盐之间的相互作用机制需进一步深入研究。【拟解决的关键问题】为此,通过盆栽试验对盐碱地棉花在不同灌水量、施氮量、土壤含盐量条件下的生长发育、产量及水氮利用效率进行研究,为膜下滴灌盐碱地的有效利用和水氮管理提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

试验用 4 种土壤均取自陕西卤泊滩盐碱地,样品为表层 0~20 cm 的混合土样。土壤质地为壤土,土壤有机质量为 0.70%。供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 盆栽试验土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in pot experiment

试验土样	含盐量/ (g kg <sup>-1</sup> )	饱和导水率 Ks/(mm d <sup>-1</sup> )	硝态氮/ (mg kg <sup>-1</sup> )	铵态氮/ (mg kg <sup>-1</sup> )	pH 值
非盐化土	1.42	356	2.49	40.23	7.60
轻度盐化土	3.40	259	3.50	62.82	8.12
中度盐化土	6.24	356	2.15	56.84	8.66
重度盐化土	9.38	233	0.11	54.80	9.54

### 1.2 试验设计

本文采取正交试验设计,设置 3 因素 4 水平,其中的“3”是指水、氮和盐 3 个因子,分别用 W、N、S 表示,每个因素设置 4 个水平,分别为:灌溉定额 (W0: 1 575 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W1: 2 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W2: 2 625

m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、W3: 3 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),施纯氮量(N0: 0 kg/hm<sup>2</sup>、N1: 150 kg/hm<sup>2</sup>、N2: 300 kg/hm<sup>2</sup>、N3: 450 kg/hm<sup>2</sup>),土壤盐分(S0: 非盐化土、S1: 轻度盐化土、S2: 中度盐化土、S3: 重度盐化土),共 14 组处理,每个处理重复 3 次。具体试验方案设计见表 2。

表 2 盆栽试验方案设计

Table 2 Design of potted experiment scheme

试验编号	处理	土样盐分	施氮量/ (kg hm <sup>-2</sup> )	灌水量/ (m <sup>3</sup> hm <sup>-2</sup> )
1	N0S0W0	非盐化土	0	1 575
2	N0S2W2	中度盐化土	0	2 625
3	N1S2W2	中度盐化土	150	2 625
4	N2S0W2	非盐化土	300	2 625
5	N2S1W2	轻度盐化土	300	2 625
6	N2S2W2	中度盐化土	300	2 625
7	N2S3W2	重度盐化土	300	2 625
8	N2S2W0	中度盐化土	300	1 575
9	N2S2W1	中度盐化土	300	2 100
10	N2S2W3	中度盐化土	300	3 150
11	N3S2W2	中度盐化土	450	2 625
12	N1S1W2	轻度盐化土	150	2 625
13	N1S2W1	中度盐化土	150	2 100
14	N2S1W1	轻度盐化土	300	2 100

试验中灌溉水源为自来水,灌溉方式为膜下滴灌。20%氮肥(N46%)作为底肥,其余 80%用作追肥,全生育期追施氮肥 16 次,追肥随水施入。施磷量和施钾量分别为 105、45 kg/hm<sup>2</sup>。具体灌溉制度和施肥方案见表 3。

表 3 棉花生育期内膜下滴灌灌溉、施肥方案

Table 3 The irrigation and fertilization scheme of drip irrigation under mulch for cotton during growth period

序号	日期	灌水量/(m <sup>3</sup> hm <sup>-2</sup> )				施氮量/(kg hm <sup>-2</sup> )				施磷量/(kg hm <sup>-2</sup> )	施钾量/(kg hm <sup>-2</sup> )
		W0	W1	W2	W3	N0	N1	N2	N3		
1	0526	45	60	75	90	0	0	0	0	0	0
2	0603	67.5	90	112.5	135	0	5	10	15	3	1.125
3	0610	67.5	90	112.5	135	0	6.25	12.5	18.75	6	2.25
4	0617	67.5	90	112.5	135	0	6.25	12.5	18.75	6	2.25
5	0625	90	120	150	180	0	10	20	30	6	2.25
6	0630	90	120	150	180	0	10	20	30	6	2.25
7	0705	90	120	150	180	0	10	20	30	6	2.25
8	0710	90	120	150	180	0	10	20	30	6	2.25
9	0715	112.5	150	187.5	225	0	12.5	25	37.5	9	4.5
10	0720	112.5	150	187.5	225	0	12.5	25	37.5	9	4.5
11	0725	112.5	150	187.5	225	0	12.5	25	37.5	9	4.5
12	0730	112.5	150	187.5	225	0	12.5	25	37.5	9	4.5
13	0804	112.5	150	187.5	225	0	10	20	30	9	4.5
14	0809	90	120	150	180	0	10	20	30	6	2.25
15	0814	90	120	150	180	0	10	20	30	6	2.25
16	0819	90	120	150	180	0	6.25	12.5	18.75	6	2.25
17	0826	67.5	90	112.5	135	0	6.25	12.5	18.75	3	1.125
18	0902	67.5	90	112.5	135	0	0	0	0	0	0
总计		1 575	2 100	2 625	3 150	0	150	300	450	105	45

试验于西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室进行。采用土箱盆栽试验,土箱尺寸为 0.75 m×0.55 m×0.45 m。上方设有防雨棚,从而保证

灌溉是唯一水源。土壤干体积质量为 1.43 g/cm<sup>3</sup>,初始含水率为 21.09%,田间持水率为 31.3%。棉花品种为国审 7886,于 2020 年 4 月 18 日播种,9 月 25 日

收获。采用棉花穴种覆膜种植方式，每个土箱种植 2 行 8 穴，行间距为 35 cm，穴距为 15 cm，每穴播种 3 粒棉籽。苗期进行定苗处理，每穴保留 1 颗植株。试验采用 1 膜 1 管 1 行的种植方式。滴灌带的滴头流量为 3 L/h，滴灌系统工作压力为 100 kPa，滴头间距为 30 cm。同时，为保证土箱内土壤的通气透水性，在土箱底部中央打孔（孔直径约为 10 mm），并装垫尼龙网，以免底部土壤颗粒外漏。棉花种植、滴灌带布设如图 1 所示。

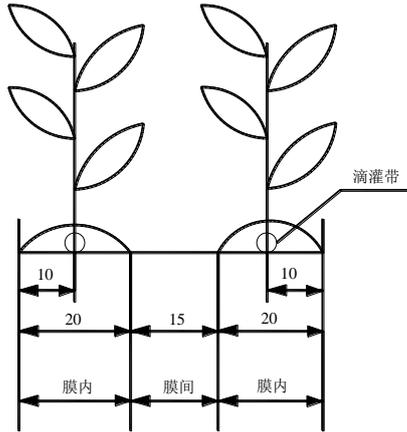


图 1 棉花种植、滴灌带布设（单位：cm）

Fig.1 Cotton planting and drip irrigation belt layout

### 1.3 测试项目与方法

#### 1) 棉花生态指标监测及产量测定

分别在棉花苗期、蕾期、花期、铃期、吐絮期，随机选取长势均一的 3 株棉花，测定其株高、茎粗、叶面积、果枝数、蕾数、花数及铃数等生态指标。其中，棉花株高用卷尺测定，为子叶节点至生长点间的距离；茎粗用游标卡尺测定；用直尺测定叶片主脉长度和最大宽度，叶面积为主脉长和最大叶宽乘积 0.84 倍<sup>[16]</sup>；果枝数等指标则是直接读取。通过统计每个盆栽的采摘铃数和总质量，计算单铃籽棉产量，根据单位面积棉铃数计算得到产量。

相对生长速率 ( $RGR$ )、叶面积指数 ( $LAI$ ) 的计算式为：

$$LAI=(0.84 \cdot L \cdot W \cdot n)/A, \quad (1)$$

$$RGR=(\ln W_1 - \ln W_2)/(T_1 - T_2), \quad (2)$$

式中： $T_1$ 、 $T_2$  分别为相邻 2 次棉花株高或茎粗的测定时间； $W_1$ 、 $W_2$  分别为  $T_1$ 、 $T_2$  时棉花的株高或茎粗 (cm)； $L$  为叶片长度 (cm)； $W$  为叶片宽度 (cm)； $n$  为叶片数 (个)； $A$  为单株棉花占地面积 ( $\text{cm}^2$ )。

#### 2) 棉花生理指标的测定

利用 LCpro+ 型全自动便携式光合仪分别在棉花蕾期、花铃前期、花铃中期、花铃后期、吐絮期，选择灌后第 3 天晴朗无云的天气测定植株倒数第 3 片主茎叶的净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、气体导

度 ( $G_s$ )，每个处理测定 2 片叶子，各重复 3 次，测定时间为早 08:00—10:00。

#### 3) 土壤含水率、棉花耗水量及水氮利用效率的计算

分别在播种前、苗期、蕾期、花铃期、吐絮期取样。在同一剖面的膜内、膜间取样，取样深度分别为 0、10、20、30、40 cm 处。

土壤含水率通过传统烘干称质量法进行计算：

$$\theta=(m_{\text{湿}}-m_{\text{干}})/(m_{\text{干}}-m_{\text{盒}})。 \quad (3)$$

作物耗水量计算式为：

$$ET=P+I+G-R-SI \pm \Delta W, \quad (4)$$

式中： $P$  为降水量 (mm)； $I$  为灌水量 (mm)； $G$  为地下水补给量 (mm)； $R$  为地表径流量 (mm)； $SI$  为深层渗漏量 (mm)； $\Delta W$  为土层内土壤储水量的变化值 (mm)。由于本试验区上方设有雨棚，无降水和地下水补给，且几乎不产生深层渗漏和地表径流。因此，可将上式简化为：

$$ET=I \pm \Delta W。 \quad (5)$$

水分利用效率计算式为：

$$WUE=Y/ET。 \quad (6)$$

氮肥偏生产力计算式为：

$$PFP=Y_F/F, \quad (7)$$

式中： $Y$  为经济产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )； $Y_F$  为施氮后获得的产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )； $ET$  为耗水量 (mm)； $F$  为氮肥施入量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

#### 4) 数据处理

使用 Excel 2010 软件处理试验数据并绘图；使用 SPSS 19.0 数据处理软件对试验数据进行显著性检验（显著性水平为  $\alpha=0.05$ ）、统计分析、交互性分析以及通径分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 棉花生育期株高、茎粗和叶面积指数 ( $LAI$ ) 的变化特性

株高、茎粗和  $LAI$  是衡量棉花是否良好生长的重要指标。由于棉花在蕾期和花期的生长速度较快，因此，对不同处理条件下棉花蕾期、花期的株高、茎粗及  $LAI$  进行统计分析，如表 4 所示。

由表 4 可知，不同处理下，棉花蕾期和花期的株高、茎粗、 $LAI$  均随灌水量或施氮量或土壤含盐量的增加呈先增加后减少的趋势。在灌水量、施氮量、土壤含盐量处于较低水平时，棉花株高、茎粗、 $LAI$  均没有明显差异；在灌水量、施氮量、土壤含盐量较高时，棉花株高、茎粗、 $LAI$  明显降低 ( $P<0.05$ )。在棉花蕾期，灌水量、施氮量相同时，不同盐分胁迫处理下，N2S1W2 处理的株高、茎粗达到最大，分别较

N2S3W2 处理高 131.38%、39.06%。N2S2W2 处理的株高、LAI 均高于 N1S2W1 处理。花期 N1S1W2 处理的株高、茎粗、LAI 均较大，N2S3W2 处理的各指标均较小，二者分别相差 125.82%、41.81%、119.21%。

由此可见，水氮盐耦合效应对棉花生长的影响相对较大；在土壤处于中度盐渍化胁迫条件下，增加灌水量和施氮量更有利于棉花生长。

表 4 蕾期、花期棉花株高、茎粗及 LAI

Table 4 Cotton plant height, stem diameter and LAI in bud and flowering stage

处理	株高/cm		茎粗/mm		LAI	
	蕾期 (70 d)	花期 (87 d)	蕾期 (70 d)	花期 (87 d)	蕾期 (70 d)	花期 (87 d)
N0S0W0	51.00±4.58 ab	55.67±4.36 ab	6.43±0.04 a	6.81±0.12 a	5.40±0.26 a	6.40±0.19 abc
N0S2W2	29.33±2.55 de	46.00±3.87 bc	3.95±0.35 c	5.41±0.31 a	2.00±0.14 c	4.30±0.22 abc
N1S2W2	31.00±1.65 cde	51.33±4.34 abc	4.85±0.39 abc	6.47±0.08 a	2.60±0.13 bc	5.79±0.26 abc
N2S0W2	43.67±3.06 ab	48.67±3.73 abc	5.15±0.44 abc	5.67±0.49 a	3.07±0.20 bc	5.45±0.25 abc
N2S1W2	46.67±2.68 bc	51.67±3.08 bc	5.91±0.18 ab	6.59±0.48 a	4.68±0.34 ab	6.12±0.21 abc
N2S2W2	28.83±1.25 de	47.00±2.08 bc	4.34±0.02 bc	5.57±0.53 a	1.67±0.19 c	4.15±0.22 abc
N2S3W2	20.17±2.01 bcd	29.67±3.05 bc	4.25±0.39 bc	4.76±0.05 a	1.37±0.20 bc	3.02±0.12 c
N2S2W0	30.67±4.04 cde	45.33±3.21 bc	4.31±0.43 bc	5.07±0.31 a	1.75±0.16 c	3.73±0.19 abc
N2S2W1	31.17±2.36 cde	50.83±5.20 abc	4.29±0.51 bc	6.01±0.14 a	2.44±0.15 bc	3.46±0.18 bc
N2S2W3	26.65±2.84 e	43.00±4.09 c	3.91±0.32 c	5.87±0.43 a	1.36±0.08 c	3.46±0.11 c
N3S2W2	19.67±1.00 e	36.67±3.51 c	3.85±0.17 c	5.12±0.25 a	1.09±0.17 c	3.19±0.16 bc
N1S1W2	59.33±5.51 a	67.00±5.24 a	6.49±0.25 a	6.75±0.55 a	5.94±0.24 a	6.62±0.22 ab
N1S2W1	27.33±2.52 de	47.00±2.65 bc	5.15±0.23 c	5.22±0.48 a	1.42±0.21 c	4.53±0.19 abc
N2S1W1	49.33±2.47 ab	60.00±4.36 ab	5.89±0.37 ab	6.87±0.24 a	4.77±0.35 bc	7.20±0.28 a

注 表格中同一列内平均数后的不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

由表 5 可知，灌水量、施氮量、土壤含盐量单因素及施氮量与土壤含盐量耦合均对棉花株高、茎粗、LAI 有极显著影响 ( $P<0.01$ )。灌水量和土壤含盐量的交互作用对棉花株高有极显著影响 ( $P<0.01$ )，对棉花茎粗、LAI 的交互作用不显著。灌水量和施氮量的交互作用及 3 种不同变量交互下，对棉花株高、茎粗、LAI 均无显著影响。

表 5 不同处理棉花株高、茎粗、LAI 组间交互显著性分析

Table 5 Significance analysis of interaction among cotton plant height, stem diameter, LAI under different treatments

处理	株高	茎粗	LAI
W	**	**	**
N	**	**	**
S	**	**	**
W×N	ns	ns	ns
W×S	**	ns	ns
N×S	**	**	**
W×N×S	ns	ns	ns

注 “\*”表示相关性达到显著水平 ( $P<0.05$ )，“\*\*”表示相关性达到极其显著水平 ( $P<0.01$ )，“ns”表示不显著。

## 2.2 棉花生育期蒸腾速率 ( $T_r$ )、净光合速率 ( $P_n$ ) 和气孔导度 ( $G_s$ ) 的变化特性

试验期间共取样 5 次，分别在棉花蕾期 (7 月 14 日)、花铃前期 (7 月 29 日)、花铃中期 (8 月 5 日)、花铃后期 (8 月 15 日)、吐絮期 (9 月 14 日) 取样。各处理棉花生育期蒸腾速率的变化特性如图 2 所示。

由图 2 可知，各处理间棉花叶片蒸腾速率有显著性差异 ( $P<0.05$ )，其变化趋势与棉花株高的变化趋势基本一致。中度盐渍化程度时，花铃前期各处理棉花的蒸腾速率显著降低，花铃中后期反而有上升的趋势。由图 2 (a) 可知，N2S2W1 处理下蕾期棉花的蒸腾速率达到最大，N2S2W3 处理的蒸腾速率最小，二者相差 96.78%。在棉花蕾期和花铃期，N2S3W2 处理的蒸腾速率显著低于 N2S2W1 处理，而在吐絮期的变化趋势刚好与其相反。由此可见，土壤的盐渍化程度不同时，适宜棉花生长的土壤水氮状况也不同，土壤含盐量较高时会降低棉花的蒸腾作用。

各处理棉花生育期净光合速率的变化特性如图 3 所示。由图 3 可知，各处理间棉花净光合速率有显著性差异 ( $P<0.05$ )。花铃期棉花净光合速率对灌水量、施氮量、土壤含盐量的敏感程度最高。由图 3 (a)、图 3 (b) 可知，在花铃前期时，不同灌水量、施氮量条件下，分别为 N2S2W1、N1S2W2 处理的净光合速率较大，而在花铃后期二者净光合速率的变化趋势刚好与花铃前期相反。由图 3 (c) 可知，在花铃前期，不同土壤含盐量下，N2S2W2、N2S3W2 处理的净光合速率较小，而在吐絮期二者的变化趋势刚好与花铃前期相反，这与蒸腾速率的变化一致。由此可见，土壤含盐量较高时，会影响棉花前期的光合作用，适当增加灌水量、施氮量有利于缓解盐分对棉花的生长抑制作用。

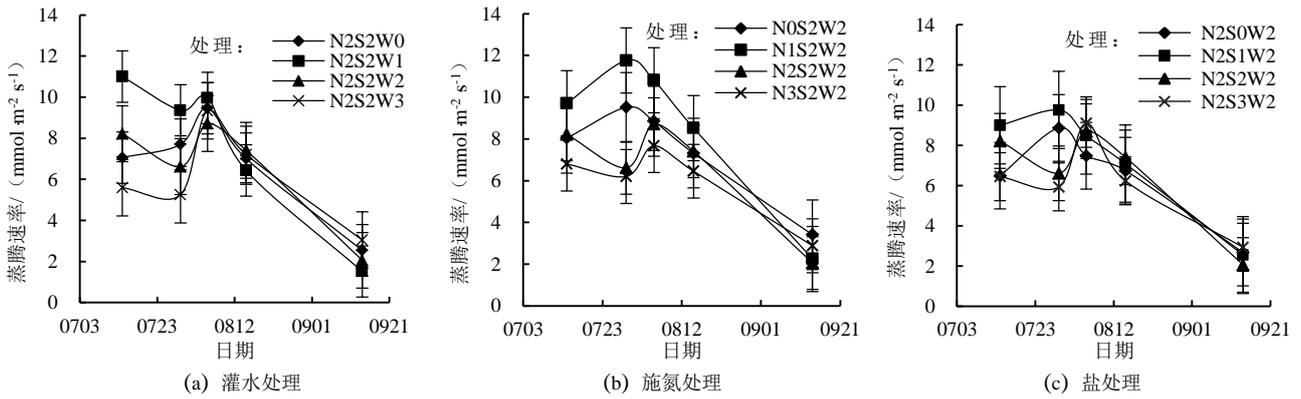


图2 各处理棉花生育期蒸腾速率的变化特性

Fig.2 Change characteristics of transpiration rate of cotton under different treatments during growth period

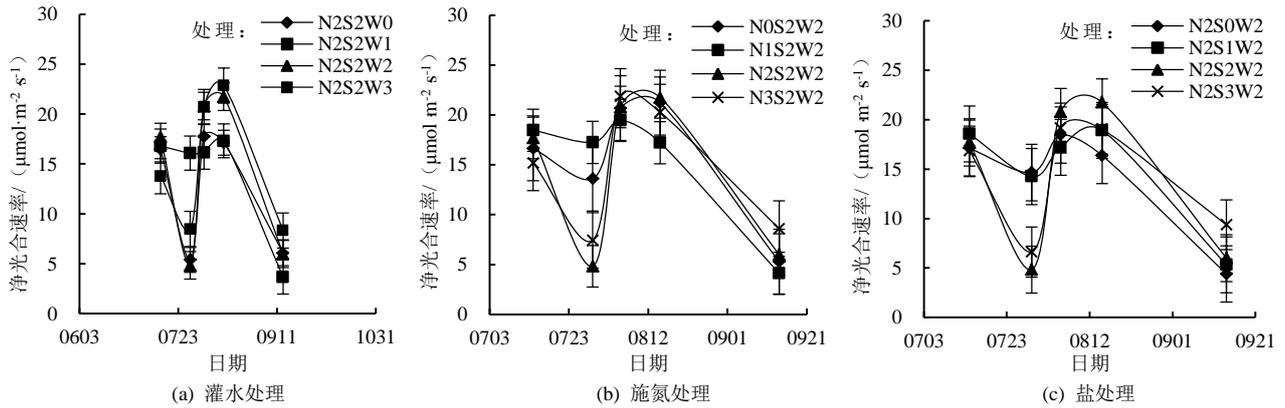


图3 各处理棉花生育期净光合速率的变化特性

Fig.3 Change characteristics of net photosynthetic rate of cotton under different treatments during growth period

各处理棉花生育期气孔导度的变化特性如图 4 所示。由图 4 可知，各处理间棉花叶片气孔导度有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。花铃期棉花气孔导度对灌水量、施氮量、土壤含盐量的敏感程度最高，这与净光合速率的变化趋势基本一致。由图 4 (a) 可知，不同灌水量下，N2S2W1 处理下花铃前期棉花的气孔导度较 N2S2W0、N2S2W2、N2S2W3 处理分别高 12.50%、

50.00%、58.82%。由图 4 (c) 可知，在花铃前期，土壤处于轻度盐渍化时棉花的气孔导度最大。从整个生育阶段来看，N1S2W2、N2S0W2 处理的平均气孔导度较高，均为  $0.27 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，较最低的 N2S2W3 处理高 38.1%。由此可见，过高的灌水量、施氮量、土壤含盐量对棉花气孔导度有抑制作用，使其气孔关闭，影响蒸腾作用的进行，不利于棉花的生长。

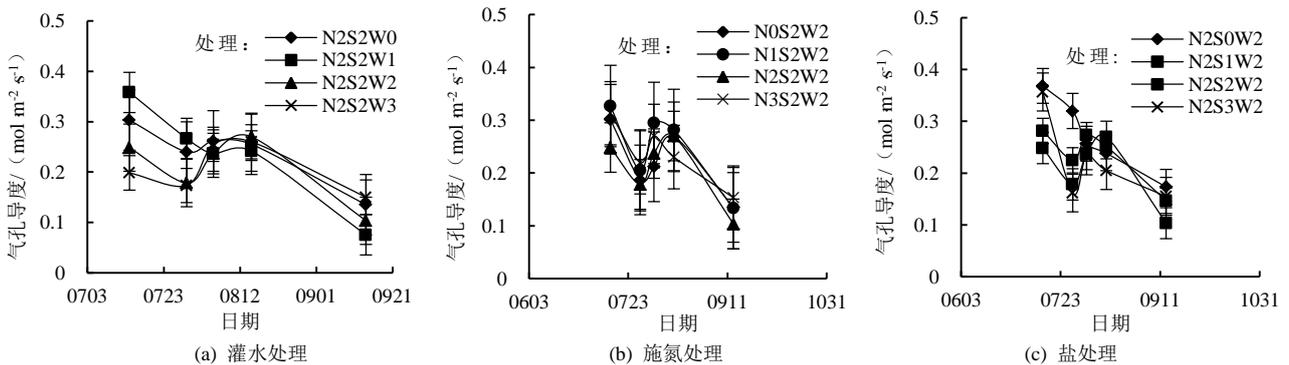


图4 各处理棉花生育期气孔导度的变化特性

Fig.4 Change characteristics of stomatal conductance of cotton under different treatments during growth period

不同生育阶段棉花蒸腾速率、气孔导度、净光合速率描述性统计分析见表 6—表 8。由表 6、表 8 可知，随生育阶段的推进，棉花蒸腾速率、气孔导度的平均值均逐渐降低。除分枝期外，净光合速率在各生育阶段的平均值标准误差均最大，且棉花蒸腾速率、气孔导度的标准差均小于净光合速率，说明在棉花生育期，净光合速率的变化范围相对较大，测量结果的

精度相对较差。不同生育阶段棉花蒸腾速率、气孔导度、净光合速率的变异系数基本均小于 0.4。在分枝期、鼓粒期，变异系数大小顺序为： $P_n < G_s < T_r$ ，花荚前期和成熟期刚好相反，净光合速率的变异系数分别为 0.420、0.396，为中等变异，离散性相对较强，其余变异程度均较低，分布较均匀，变异性较弱。

表 6 棉花蒸腾速率

Table 6 The statistical analysis of cotton  $T_r$ 

生育期	统计量	最小值/ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	最大值/ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	平均值/ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	平均值 标准误差	方差/ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	标准差 $S$	变异系数 $C_v$
分枝期		2.59	13.93	9.04	0.303 16	7.72	2.778	0.307
花荚前期		13.95	4.84	7.98	0.207 43	3.61	1.901	0.238
花荚后期	84	10.37	2.45	7.12	0.224 76	4.24	2.060	0.289
鼓粒期		8.11	2.61	6.13	0.163 92	2.26	1.502	0.245
成熟期		3.52	1.32	2.39	0.055 90	0.26	0.513	0.215

表 7 棉花净光合速率

Table 7 The statistical analysis of cotton  $P_n$ 

生育期	统计量	最小值/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	最大值/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	平均值/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	平均值 标准误差	方差/ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	标准差 $S$	变异系数 $C_v$
分枝期		11.17	19.88	16.99	0.202 03	3.43	1.852	0.109
花荚前期		22.68	4.37	12.61	0.578 14	28.08	5.299	0.420
花荚后期	84	23.12	8.47	18.51	0.293 72	7.25	2.692	0.145
鼓粒期		24.16	8.32	17.67	0.407 58	13.95	3.736	0.211
成熟期		12.38	2.13	5.55	0.239 86	4.83	2.198	0.396

表 8 棉花气孔导度

Table 8 The statistical analysis of cotton  $G_s$ 

生育期	统计量	最小值/ ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	最大值/ ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	平均值/ ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	平均值 标准误差	方差/ ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	标准差 $S$	变异系数 $C_v$
分枝期		0.16	0.39	0.289	0.005 24	0.002	0.045	0.155
花荚前期		0.67	0.13	0.285	0.012 12	0.012	0.110	0.384
花荚后期	84	0.32	0.14	0.254	0.004 15	0.001	0.032	0.125
鼓粒期		0.47	0.11	0.252	0.006 19	0.003	0.055	0.217
成熟期		0.21	0.06	0.134	0.003 80	0.001	0.032	0.235

表 9 不同处理棉花蒸腾速率、气孔导度、  
净光合速率组间交互显著性分析Table 9 Significance analysis of interaction among  
cotton  $T_r$ ,  $G_s$ ,  $P_n$  under different treatments

处理	蒸腾速率	气孔导度	净光合速率
W	**	**	**
N	**	**	**
S	**	**	**
W×N	ns	ns	ns
W×S	**	ns	ns
N×S	ns	**	**
W×N×S	ns	ns	ns

注 “\*”表示相关性达到显著水平 ( $P<0.05$ )，“\*\*”表示相关性达到极其显著水平 ( $P<0.01$ )，“ns”表示不显著。

水氮耦合对棉花蒸腾速率、气孔导度、净光合速率的影响，见表 9。灌水量、施氮量、土壤含盐量单因素均对棉花蒸腾速率、气孔导度、净光合速率有极显著影响 ( $P<0.01$ )。灌水量和土壤含盐量的交互作用对棉花蒸腾速率有极显著影响 ( $P<0.01$ )，对棉花气孔导度、净光合速率的交互作用不显著。施氮量和土壤含盐量的交互作用对棉花气孔导度、净光合速率有极显著影响 ( $P<0.01$ )，对棉花蒸腾速率的交互作用不显著。灌水量和施氮量的交互作用及 3 种不同变量交互作用，对棉花蒸腾速率、气孔导度、净光合速率均无显著影响。

### 2.3 不同处理对棉花产量、水分利用效率及氮肥偏生产力的影响

由表 10 可知，灌水量、施氮量、土壤含盐量对棉花产量有不同程度的影响，且各处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。棉花的单株平均铃数、单铃质量、产量均随灌水量的增加而增加；但随施氮量、土壤含盐量的增加，棉花产量呈先增加后减少的趋势。棉花耗水量与产量的变化趋势基本相同。土壤灌水量及施氮量相同时，N2S1W2 处理下的棉花产量较 N2S0W2、N2S2W2、N2S3W2 处理分别提高 19.06%、73.94%、96.08%，且各处理之间的差异均很显著 ( $P<0.05$ )。同时，N2S1W2 处理的产量较 N0S2W2 处理高 57.40%，水分利用效率较 N0S2W2 处理高 55.85%。N2S2W3 处理的产量较 N1S2W1 处理高 71.46%，但二者之间的氮肥偏生产力相差不大。N1S1W2 处理的产量、氮肥偏生产力最大，N2S2W0 处理的产量、氮肥偏生产力最低，2 个处理分别相差 172.01%、444.08%。N0S0W0 处理的水分利用效率最高，为  $30.58 \text{ kg/m}^3$ ，较产量最高的 N1S1W2 处理高 19.22%，但其产量较 N1S1W2 处理低 29.16%。由此可见，土壤处于中度盐渍化时，较高的灌水、施氮量会促进棉花产量增加；N1S1W2 处理下的棉花能做到水分利用效率、氮肥偏生产力较高的同时达到最高的产量，其水分利用效率为  $25.65 \text{ kg/m}^3$ ，

氮肥偏生产力为 44.56 kg/kg, 产量为 6 683.55 kg/hm<sup>2</sup>。

表 10 棉花耗水量、产量、水分利用效率及氮肥偏生产力

Table 10 Cotton ET, yield and WUE、PFP

处理	单株平均铃数/(个株 <sup>-1</sup> )	单铃质量/g	耗水量/mm	产量/(kg hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/(kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )	氮肥偏生产力/(kg kg <sup>-1</sup> )
N0S0W0	5.14	4.71	154.85 i	4 734.75 e	30.58	-
N0S2W2	5.00	4.00	261.05 c	3 908.40 f	14.97	-
N1S2W2	5.29	4.57	257.71 ef	4 713.75 e	18.29	31.43
N2S0W2	5.86	4.52	257.33 f	5 167.05 c	20.11	17.22
N2S1W2	7.00	4.50	263.66 b	6 151.8 b	23.33	20.51
N2S2W2	4.71	3.84	259.24 de	3 536.70 g	13.64	11.79
N2S3W2	4.00	4.60	263.47 b	3 137.40 i	11.91	10.46
N2S2W0	3.00	4.19	153.97 i	2 457.15 k	15.96	8.19
N2S2W1	4.43	3.28	208.18 gh	2 833.65 j	13.61	9.45
N2S2W3	6.29	3.94	312.89 a	4 840.95 d	15.47	16.14
N3S2W2	4.71	3.52	265 b	3 245.25 h	12.25	7.21
N1S1W2	5.57	6.14	260.57 cd	6 683.55 a	25.65	44.56
N1S2W1	3.33	4.34	209.09 g	2 823.45 j	13.50	18.82
N2S1W1	3.86	4.79	207.15 h	3 607.20 g	17.41	12.02

注 表格中同一行和列内平均数后的相同字母表示处理间差异未达到显著性水平 ( $P<0.05$ )。

水氮耦合对棉花产量、耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力的影响, 见表 11。灌水量、施氮量、土壤含盐量单因素及施氮量与土壤含盐量耦合均对棉花产量、水分利用效率、氮肥偏生产力有极显著影响 ( $P<0.01$ )。灌水量和土壤含盐量交互作用, 对棉花产量、水分利用效率有显著影响 ( $P<0.01$ ), 对棉花耗水量、氮肥偏生产力没有显著影响。灌水量和施氮量的交互作用及 3 种不同变量交互作用, 对棉花产量、耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力均无显著影响。

表 11 不同处理棉花产量、耗水量、水分利用效率及氮肥偏生产力组间交互显著性分析

Table 11 Significance analysis of interaction among cotton yield、water consumption、WUE、PFP under different treatments

处理	产量	耗水量	WUE	PFP
W	**	**	**	**
N	**	ns	**	**
S	**	ns	**	**
W×N	ns	ns	ns	ns
W×S	**	ns	**	ns
N×S	**	ns	**	**
W×N×S	ns	ns	ns	ns

注 “\*\*”表示相关性达到显著水平 ( $P<0.05$ ), “\*\*\*”表示相关性达到极其显著水平 ( $P<0.01$ ), “ns”表示不显著。

## 2.4 通径分析

土壤灌水量、施氮量、含盐量对棉花产量的影响并不是独立作用, 而是相互制约、相互促进的复杂关系。本文通过通径分析来研究土壤水氮盐耦合对棉花

产量的直接重要性和间接重要性。将灌水量、施氮量、土壤含盐量与棉花单株产量进行回归分析, 可得到回归方程为:

$$y=1.075+0.06x_1-0.006x_2-1.846x_3, \quad (8)$$

$$(R=0.858, R^2=0.737, P<0.05)$$

式中:  $y$  为棉花产量;  $x_1$  为灌水量;  $x_2$  为施氮量;  $x_3$  为土壤含盐量。

对上述回归方程进行  $F$  检验, 表明其回归结果显著, 可进一步通过通径分析来揭示影响棉花产量的直接和间接作用因素。不同处理下灌水量、施氮量、土壤含盐量对棉花产量的通径分析结果见表 12。

由表 12 可知, 直接通径系数表明各变量对棉花产量的直接影响的大小排序为: 灌水量>土壤含盐量>施氮量。将直接通径系数和间接通径系数对比可知, 灌水量对棉花产量的影响主要是直接影响, 还间接地对施氮量、土壤含盐量产生负向的影响, 但最终对棉花产量产生正向的促进作用。其次, 施氮量对棉花产量的负面影响主要是直接作用, 同时会间接地对土壤含盐量产生负向影响, 进而对棉花产量产生负向的抑制作用。土壤含盐量也是直接影响棉花的产量, 虽然间接地对灌水量产生微小的正向促进作用, 但最终还是对产量产生较大的负向抑制作用。因此, 灌水量对棉花产量的增加具有重要作用, 但土壤含盐量会对棉花产量的增加产生强烈的负面效应。

表 12 棉花产量与土壤水、氮、盐的相关及通径分析

Table 12 Correlation and path analysis of cotton yield with soil water, nitrogen and salt

变量	直接通径系数	间接通径系数			合计	相关系数
		灌水量	施氮量	土壤盐分		
灌水量	0.7	-	-0.076	-0.185	-0.261	0.439**
施氮量	-0.295	0.181	-	-0.141	0.040	-0.256*
土壤含盐量	-0.664	0.195	-0.063	-	0.132	-0.532**

注 “\*\*”表示相关性达到显著水平 ( $P<0.05$ ), “\*\*\*”表示相关性达到极其显著水平 ( $P<0.01$ )。

### 3 讨论

土壤水氮是影响作物产量的重要因子,在不同程度盐渍化土壤中,适宜作物最佳生长状况的灌水、施氮量有所不同。本试验表明,在轻度盐渍化土壤中,合理的水氮耦合可以有效增加产量,提高水氮利用效率,这与高黎明<sup>[17]</sup>、李发永等<sup>[18]</sup>研究结果一致。但如果施用量过多不但会造成水氮的浪费,对产量也有抑制作用<sup>[19-20]</sup>。这是因为在土壤盐渍化程度较轻时,水分亏缺使得作物可有效利用的水分较少,导致棉花无法对氮素进行有效的吸收利用,从而减弱氮素对作物的增产效果<sup>[21]</sup>,同时水分亏缺会破坏作物叶绿体结构,减弱光合作用,使膜受损伤、酶活性丧失、渗透调节发生改变,从而影响棉花生长和干物质的积累,引起棉花早衰,造成产量下降<sup>[2]</sup>,而较高的灌水可以显著提升光合产物累积量,为棉花生长创造适宜的土壤水盐环境<sup>[22]</sup>;施加适度氮肥可有效促进棉花的生殖生长和营养生长,施加量过多则会抑制其生长,其原因可能是可有效利用的水分较少,导致棉花无法将氮肥吸收利用;且轻度盐分胁迫可促进棉花生长<sup>[23]</sup>。可见,轻度盐分胁迫条件下,适当地减少施氮量,并适当增加灌水量,既不会产生过度的盐分淋洗,又能保持住土壤中对作物生长有益的盐离子,还能节约施肥量,使得在轻度盐渍化土壤中,施入的灌水量、施氮量对作物呈一种正向的协同作用,从而达到提高棉花产量和水氮利用效率的目的。

与轻度盐渍化土壤相比,中度盐渍化土壤中,需要更多的灌水量、施氮量,才可以保持较高的作物产量和水氮利用效率。这是因为此时土壤的盐分已基本超过作物的耐受能力,需要更多的灌水量来淋洗多余盐分,使其降至作物的耐盐阈值以下;而施氮量的增加也在一定程度上促进了作物的生长。此外,本试验发现,在中度盐碱土中施加较高的灌水量、施氮量下,棉花生长前期的蒸腾速率、净光合速率等生理指标显著降低,直接影响棉花的生长状况。这是因为施加较多氮素的情况下,使得氮素大多数累积在土壤中,进一步加剧了土壤的盐渍化程度<sup>[24-25]</sup>,即使增加灌水量,也不会缓解较多的盐分对棉花生长前期的抑制作用<sup>[26]</sup>,这也进一步证实了在中度盐渍化土壤中,增加灌水量的同时,需保持适度的施氮量才能够保障作物前期的正常生长。对于中度盐渍化土壤中,较高的施氮量使得棉花生长前期蒸腾速率、净光合速率下降、中后期反而呈上升的趋势且最终还可以达到较高的产量这一现象,是因为在生长前期,棉花的耐盐性及吸收氮素的能力较弱,可能通过离子毒害、渗透胁迫等途径抑制棉花幼苗叶片正常的光合作用<sup>[27-28]</sup>,而生

长后期棉花会通过自我的有机和无机渗透调节,并诱导抗盐基因表达,使得棉花对土壤含盐量的敏感性下降,降低 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 的毒害作用<sup>[29]</sup>,增强了棉花的耐盐性,同时会进行一定程度的补偿式生长<sup>[19]</sup>,且较高的施氮量会缓解灌水量增加对土壤氮素的淋失作用<sup>[28]</sup>,较高的灌水量也有利于对土壤中过多盐分的淋洗<sup>[19]</sup>,从而使其生长最大程度接近正常水平,不因盐分过高而减产。

在重度盐渍化土壤中,施氮量较多时,同样会出现土壤盐渍化加重的问题。土壤盐渍化程度过高会影响氮素在土壤中的迁移和转化,使氮素无法被作物快速吸收<sup>[30]</sup>。此时,即使增加更多的灌水量,也不会降低氮素及盐分在土壤中的积聚<sup>[31]</sup>,从而使得棉花的盐离子毒害作用加剧、其适应性机制受到抑制、棉花根系的吸水受阻、营养生长缓慢、生育阶段推迟,最终导致棉花蒸腾速率、净光合速率下降,棉花产量和水氮利用明显降低。可见,灌水量、施氮量、土壤含盐量和作物自身的逆境适应机制是一种复杂的相互反馈机制。

### 4 结论

1) 各处理间棉花蒸腾速率、净光合速率、气孔导度均有显著性差异( $P < 0.05$ )。棉花气孔导度与净光合速率的变化趋势基本一致,且在不同生长发育时期中,棉花在花铃期的生长对灌水量、施氮量、土壤含盐量的敏感程度最高。

2) 灌水量、施氮量、土壤含盐量处理对棉花产量有不同程度的影响,但棉花产量均随灌水量的增多而增加,而过高或过低的施氮量和土壤含盐量都会抑制生长,导致产量下降。灌水量较小时,施氮量和土壤含盐量的增加会抑制棉花生长。灌水量、施氮量、土壤含盐量单因素及施氮量与土壤含盐量的交互均对棉花株高、茎粗、LAI、蒸腾速率、气孔导度、净光合速率及产量、耗水量、水氮利用效率有极显著影响( $P < 0.01$ )。灌水量对产量有正向的促进作用,土壤含盐量对产量的负向抑制作用最大。

3) 轻度盐渍化土壤中,灌水量  $2\ 625\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、施氮量  $150\ \text{kg}/\text{hm}^2$  时棉花可以在水分利用效率、氮肥偏生产力较高的同时达到最优产量,是本试验轻度盐渍化土壤中最理想的水氮组合方式;中度盐渍化土壤中,灌水量  $3\ 125\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、施氮量  $300\ \text{kg}/\text{hm}^2$  时可以有效改善土壤盐渍化对棉花生长的负面影响,最大程度提高棉花产量。

#### 参考文献:

- [1] 杨玉辉,周新国,李东伟,等.暗管排水对南疆高水位膜下滴灌棉田

- 盐分淋洗效果的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(11): 137-144.
- YANG Yuhui, ZHOU Xinguo, LI Dongwei, et al. The efficacy of subsurface drain in desalinizing cotton field with shallow groundwater and mulched drip-irrigation in southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(11): 137-144.
- [2] 张迎春, 张富仓, 范军亮, 等. 滴灌技术参数对南疆棉花生长和土壤水盐的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 107-117.
- ZHANG Yingchun, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Effects of drip irrigation technical parameters on cotton growth, soil moisture and salinity in Southern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 107-117.
- [3] 罗帅. 河套灌区垄膜沟灌模式不同灌水量对春玉米田水盐氮转移特征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- LUO Shuai. The influence of irrigation amounts on transport characteristics of soil water-salt-nitrogen in spring maize fields under ridge mulched with plastic film-furrow irrigation in hetao irrigation district[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2021.
- [4] VANHOORN J W, KATERJI N, HAMDY A, et al. Effect of salinity on yield and nitrogen uptake of four grain legumes and on biological nitrogen contribution from the soil[J]. Agricultural Water Management, 2001, 51(2): 87-98.
- [5] 严晓燕. 微咸水滴灌对南疆特色果树根区土壤有机碳、氮组分影响的研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2011.
- YAN Xiaoyan. Study of the impact on organic carbon, nitrogen constituent in the fruit trees root zone soil using characteristic brackish water drip irrigation in Nanjiang[D]. Alar: Tarim University, 2011.
- [6] 何进宇. 膜下滴灌水稻水-肥-盐-产量规律及优化灌溉制度研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- HE Jinyu. Study on water-fertilizer-salt-yield regularity and optimal irrigation schedule of rice by drip irrigation under plastic film[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017.
- [7] 高峰. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯土壤水氮运移及产量品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- GAO Feng. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen migration and yield quality of soil water in potato soil under the membrane[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [8] 忠智博, 翟国亮, 邓忠, 等. 水氮施量对膜下滴灌棉花生长及水氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 67-76.
- ZHONG Zhibo, ZHAI Guoliang, DENG Zhong, et al. The impact of N application and drip irrigation amount on cotton growth and water and N distributions in soil mulched with film[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 67-76.
- [9] 李瑞生. 滨海盐碱地土壤水盐对棉花功能叶生理特性及产量品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- LI Duansheng. Effects of different moisture and salinity in soil on physiological characteristics in cotton and yield and fiber quality in coastal saline and alkali land[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [10] 苏涛. 滨海盐碱地土壤水盐对棉铃对位叶物质形成与转运的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- SU Tao. Effects of characteristics of soil water and soil on material formation and translocation of subtending leaf of cotton boll in coastal saline soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [11] 张永玲, 王兴鹏, 陈开明, 等. 冬春灌条件下棉田水盐对产量的影响研究[J]. 塔里木大学学报, 2013, 25(4): 18-23.
- ZHANG Yongling, WANG Xingpeng, CHEN Kaiming, et al. The effects of soil moisture and salt content on the cotton yields in the field with Winter and spring irrigation[J]. Journal of Tarim University, 2013, 25(4): 18-23.
- [12] 刘雪艳, 丁邦新, 白云岗, 等. 微咸水膜下滴灌对棉花植株盐分、养分吸收及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 128-135.
- LIU Xueyan, DING Bangxin, BAI Yungang, et al. Effects of drip irrigation with brackish water under film mulch on salinity, nutrients and quality of cotton plants[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 128-135.
- [13] 张继峯. 施氮量对盐碱土滴灌加工番茄生长的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
- ZHANG Jizhao. Effect of nitrogen application rate on processing tomato growth by saline-alkali soil drip irrigation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.
- [14] 王军, 李久生, 关红杰, 等. 北疆膜下滴灌棉花产量及水分生产率对灌水量响应的模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 62-68.
- WANG Jun, LI Jiusheng, GUAN Hongjie, et al. Modeling response of cotton yield and water productivity to irrigation amount under mulched drip irrigation in North Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 62-68.
- [15] 张鹏, 蒋静, 马娟娟, 等. 不同水氮处理对盐渍土水氮盐变化和燕麦产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 1-5, 12.
- ZHANG Peng, JIANG Jing, MA Juanjuan, et al. Effects of different irrigations and nitrogen applications on distribution of water, nitrogen and salt in saline soil as well as the yield of oat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 1-5, 12.
- [16] 赵嘉涛, 马玉诏, 范艳丽, 等. 生物可降解地膜对棉花产量及水分利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(1): 96-101.
- ZHAO Jiatao, MA Yuzhao, FAN Yanli, et al. Effects of biodegradable mulch on cotton yield and water use efficiency[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(1): 96-101.
- [17] 高黎明. 南疆棉区不同施肥方式下水氮效应研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020.
- GAO Liming. Study on water and nitrogen effects of different fertilization methods in the cotton region of Southern Xinjiang[D]. Alar: Tarim University, 2020.
- [18] 李发永, 劳东青, 孙三民, 等. 滴灌对兼做枣棉光合特性与水分利用的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 119-129.
- LI Fayong, LAO Dongqing, SUN Sanmin, et al. Effects of drip irrigation on photosynthetic characteristics and water use efficiency of jujube-cotton intercropping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 119-129.
- [19] 闫建文, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区盐渍化土壤玉米水氮耦合效应[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 103-110.
- YAN Jianwen, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Effect of water and nitrogen coupling on maize in salinity soil of the Hetao irrigation area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 103-110.
- [20] 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.
- WANG Zhenhua, ZHU Yankai, ZHANG Jinzhu, et al. Effects of water and nitrogen fertilization on physiological characteristics and yield of cotton under drip irrigation in mildly salinized soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 296-308.
- [21] 谢志良, 田长彦. 膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 160-165.
- XIE Zhiliang, TIAN Changyan. Coupling effects of water and nitrogen on dry matter accumulation, nitrogen uptake and water-nitrogen use efficiency of cotton under mulched drip irrigation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 160-165.
- [22] 崔永生, 王峰, 孙景生, 等. 南疆机采棉田灌溉制度对土壤水盐变化和棉花产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3 634-3 642.
- CUI Yongsheng, WANG Feng, SUN Jingsheng, et al. Effects of irrigation regimes on the variation of soil water and salt and yield of mechanically harvested cotton in Southern Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3 634-3 642.

- [23] SIKDER R K, WANG X R, ZHANG H H, et al. Influence of nitrogen on the growth and yield of cotton under salinity stress[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2022, 45(8): 1 181-1 197.
- [24] 符鲜, 杨树青, 刘德平, 等. 不同盐渍化土壤中微生物对氮肥的响应关系研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 661-667.  
FU Xian, YANG Shuqing, LIU Deping, et al. Response of microorganisms to nitrogen fertilizer in different salinized soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and fertilizer*, 2018, 24(3): 661-667.
- [25] 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): 1-9.
- [26] 鲁耀泽, 夏玉红, 乌兰其格, 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 Lanqige, 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.
- [27] 王汐妍, 裘波音, 刘玉姣, 等. 盐胁迫对不同耐盐性棉花幼苗生长与生理及无机离子器官分布的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 43(3): 273-280.  
WANG Xiyao, QIU Boyin, LIU Yujiao, et al. Characteristics of seedling growth, physiology and inorganic ion distribution of different salt-tolerant cottons under salt stress[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2017, 43(3): 273-280.
- [28] 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.
- [29] 文利军, 史文娟, 何子建, 等. 不同措施对土壤脱盐及棉花生理特征的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(8): 851-858.  
WEN Lijun, SHI Wenjuan, HE Zijian, et al. Effects of different measures on soil desalination and cotton physiological characteristics[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(8): 851-858.
- [30] 马韬, 曾文治, 伍靖伟, 等. 不同施氮量下盐渍农田向日葵冠层生长与辐射利用规律[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 292-303.  
MA Tao, ZENG Wenzhi, WU Jingwei, et al. Sunflower canopy development, radiation absorption and use efficiency at different nitrogen application rates in saline fields[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 292-303.
- [31] 徐昭, 史海滨, 李仙岳, 等. 不同程度盐渍化农田下玉米产量对水氮调控的响应[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 334-343.  
XU Zhao, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Response of maize yield to irrigation and nitrogen rate in different salinization farmlands[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 334-343.

## Improving Soil Water and Nitrogen Management to Facilitate Growth and Water-nitrogen Use Efficiency of Cotton in Saline-alkali Soils

WANG Peihua, SHI Wenjuan<sup>\*</sup>, ZHANG Yanchao

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** 【Objective】 Soil salinity is an abiotic stress faced by agricultural production in many countries. Improving agronomic practices to alleviate the detrimental effect of soil salinity is essential to sustaining crop production in salt-affected areas. This paper aims to study the combined effect of soil water, nitrogen and salt content on physiological and ecological indexes as well as yield of cotton under mulched drip irrigation in saline-alkali soils.

【Method】 The study was based on pot experiment. It consisted of four irrigation amounts: 1 575 (W0), 2 100 (W1), 2 625 (W2) and 3 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (W3); four nitrogen fertilizations: 0 (N0), 150 (N1), 300 (N2) and 450 kg/hm<sup>2</sup> (N3), and four salt stress treatments: non-salinity (S0), light salinity (S1), moderate salinity (S2) and heavy salinity (S3). All pots were irrigated by mulched irrigation and for each pot, we measured the growth, water-nitrogen utilization efficiency of the cotton. 【Result】 Change in irrigation amount, nitrogen application and soil salinity had a significant impact on plant height, stem diameter, LAI, P<sub>n</sub>, T<sub>r</sub> and G<sub>s</sub> (P<0.05). When soil nitrogen application, soil salinity and irrigation amount were the same, increase in soil water or nitrogen content boosted plant height, stem diameter, LAI and cotton yield significantly. When soil irrigation amount and nitrogen application were the same, there was a threshold soil salt content beyond which the effect of soil salinity on cotton growth ushered in. Interaction analysis showed that soil water, nitrogen and salt content had a combined significant effect on growth index, yield, WUE and PFP of the cotton (P<0.01). Among all treatments, N1+S1+W2 gave the highest yield, WUE and PFP, while N2+S2+W0 was the worst, with its yield, WUE and PFP reducing by 172.01%, 60.71% and 444.08%, respectively, compared to CK (without salinity). The yield of N2+S2+W3 was 71.46% higher than that of N1+S2+W1. That is, when soil salinization was high, increasing irrigation amount and nitrogen application could offset the detrimental impact of soil salinity and increased cotton yield. Path analysis showed that irrigation amount and soil salt content had the most positive and negative effect on cotton yield, respectively. 【Conclusion】 For the slightly salinized soil, irrigating 2 625 kg/hm<sup>2</sup> of water coupled with 150 kg/hm<sup>2</sup> of nitrogen fertilization was effective to alleviate the effect of soil salinity, while for the severely salinized soils, irrigating 3 125 kg/hm<sup>2</sup> of water combined with 300 kg/hm<sup>2</sup> of nitrogen fertilization worked better to ameliorate the effect of soil salinization and maximize cotton yield.

**Key words:** cotton; saline-alkali land; mulch drip irrigation; growth target; yield

责任编辑: 白芳芳