

利用¹⁵N揭示滴灌区盐旱胁迫对土壤氮素分布与棉花生长的影响

冯 玥, 衡 通, 何新林, 杨 广, 许 璇, 余天源, 李玉环, 徐 阳

(石河子大学水利建筑工程学院新疆生产建设兵团现代节水灌溉重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要: 为了探究盐旱胁迫对土壤中氮素分布和棉花生长的影响, 通过测坑试验研究滴灌区不同盐分、干旱条件下土壤全氮、硝氮、氨氮的分布和棉花生长情况。试验设置3种盐分梯度的土壤(电导率, EC): 3, 6, 9 dS/m, 分别用 T1、T2、T3 表示; 3个灌水量: 2 700, 3 600, 4 500 m³/hm², 分别用 W1、W2、W3 表示(4 500 m³/hm²为当地推荐灌水量)。结果表明: 当土壤盐分梯度>3 dS/m时土壤全氮累积量显著高于低盐土壤($P<0.05$), 且土壤盐分对棉花花期生长影响较大。土壤的氨氮挥发量和土壤盐分梯度成正比。土壤硝态氮的淋失与灌水量呈正比, 与正常灌水量的硝态氮淋失相比, 水分胁迫对棉花产量的影响更为严重($P<0.01$)。随土层深度的增加, 土壤碱解氮以每20 cm土层8%的速度减少。各处理土壤¹⁵N残留率为11%~40%, 随土壤盐度增加而增加, 随灌水量增加而减少, 与土壤全氮含量呈正比, 与棉花产量呈反比。综上所述, T1W3处理更有利于棉花对氮肥的利用和产量的提高, 推荐滴灌区棉花土壤盐度<3 dS/m, 灌水量4 500 m³/hm², 可在花期适当提高施肥量以稳定产量。

关键词: ¹⁵N; 盐碱地; 干旱; 氮素; 西北地区

中图分类号: S274; S562

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0327-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.044

Using ¹⁵N to Reveal the Effects of Salt and Drought Stress on Soil Nitrogen Distribution and Cotton Growth in Drip Irrigation Areas

FENG Yue, HENG Tong, HE Xinlin, YANG Guang, XU Xuan, YU Tianyua, LI Yuhuan, XU Yang

(Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation, Xinjiang Production and Construction Group, School of Water Conservancy and Construction Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003)

Abstract: In order to explore the effects of salt and drought stress on the distribution of nitrogen in the soil and cotton growth, the distribution of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in the soil and the growth of cotton under drought conditions under different salinity conditions in drip irrigation areas were studied through test pit tests. The experiment set up three water salinity levels with conductivity (EC) of 3 (T1), 6 (T2), 9 (T3) dS/m respectively, and three irrigation volumes of 2 700 (W1), 3 600 (W2), 4 500 (W3) m³/hm² respectively (4 500 m³/hm² was the local recommended irrigation amount). The results showed that when the soil salinity was greater than 3 dS/m, the total soil nitrogen accumulation was significantly higher than the lower salinity ($P<0.05$), and soil salinity had a greater impact on the growth of cotton during flowering. In addition, the volatilization of ammonia nitrogen in the soil was directly proportional to the soil salinity gradient. The leaching loss of soil nitrate nitrogen was proportional to the amount of irrigation water. Compared with the nitrate nitrogen leaching loss of normal irrigation amount, the impact of water stress on cotton yield was more serious ($P<0.01$). As the depth of the soil layer increased, the soil alkaline nitrogen decreased at a rate of 8% per 20 cm soil layer. The ¹⁵N residue rate in the soil of each treatment was 11%~40%, which increased with the increase of soil salinity, and decreased with the increase of irrigation amount, which was proportional to the total nitrogen content of the soil and was inversely proportional to the cotton yield. To sum up, T1W3 was more conducive to the utilization of nitrogen fertilizer in cotton and the improvement of yield. It is recommended that the soil salinity of cotton in the drip irrigation area should be less than 3 dS/m, and the irrigation volume be 4 500 m³/hm². The amount of fertilization

收稿日期: 2021-05-08

资助项目: 联合基金项目(U1803244); 国家自然科学基金项目(51969027); 兵团科技攻关计划项目(2018AB027); 兵团重大科技项目(2017AA002)

第一作者: 冯玥(1996—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事干旱区水资源高效利用研究。E-mail: 361841257@qq.com

通信作者: 何新林(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水高效利用研究。E-mail: hexinlin2002@163.com

could be appropriately increased during the flowering period to stabilize the yield.

Keywords: ^{15}N ; saline-alkali land; drought; nitrogen; Northwest China

新疆是中国最大的棉花种植区,在总产、单产、质量等方面位居全国第一^[1]。但其地处内陆干旱区,降水量稀少,蒸发比较强烈,盐碱地分布广泛,水资源匮乏。干旱和土壤盐碱化是限制新疆地区农业可持续发展的 2 个主要因素^[2]。盐分胁迫程度与作物生长之间存在负相关,较高的盐分形成渗透压导致植物细胞破裂^[3]。水分胁迫对作物生长和代谢的影响是多方面的。各生育期缺水会导致棉花的株高降低,茎粗减小,花铃数量减少,花铃期变短,脱落率增加^[4-5]。因此在实际生产中,避免棉花干旱同时节约灌溉水量具有重要意义。

氮素作为棉花生长发育过程中所需要的大量元素,可组成叶绿素等重要物质,在棉花代谢物中也占有重要比例^[6]。当植物氮素含量不足时容易导致植株矮小,从而严重导致农作物产量下降^[7]。滴灌棉花根区的氮素受水分与土壤盐碱度及其耦合效应的影响^[8]。土壤盐分对作物生长具有的抑制作用^[9],从而导致作物对氮素的吸收降低,增加了氮素的潜在淋洗损失,可能造成地下水污染等问题^[10]。不合理的灌水量会导致相当一部分氮素通过氨挥发、硝化—反硝化等途径损失掉^[11]。

近年来,国内外学者对水盐肥耦合效应及氮素去向进行了大量且比较完整的研究,研究主要集中于水肥或者盐肥耦合直接对土壤氮素的影响^[3]。利用 ^{15}N 示踪技术进行盐旱条件下氮素运移情况的研究相对较少^[12]。 ^{15}N 示踪技术能够区分作物吸收利用的肥料氮和土壤氮,被应用于多种作物,具有测定植物氮素利用率,追踪氮素的转化效果,反映作物利用肥料的实际情况等优点^[8]。本文应用 ^{15}N 同位素示踪方法,研究盐旱条件下滴灌区氮素在土壤中的去向,探讨不同盐分梯度、灌溉量对棉花根区土壤中氮素分布情况和产量的影响,以期为该地区土壤盐度和合理灌溉提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 1—4 月在新疆自治区玛纳斯河流域石河子大学节水灌溉试验站($44^{\circ}18'\text{N}$, $86^{\circ}02'\text{E}$)进行。气候条件属于中温带干旱区气候,年平均气温 $6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 200 mm ,年平均蒸发量 $1\,718\text{ mm}$ 。供试土壤为沙壤土,土壤容重平均值为 1.4 g/cm^3 。供试棉花为“新陆早 48 号”。试验区土壤物理性质见表 1。

表 1 试验田土壤物理性质

土层深度/cm	不同土壤粒径所占比例/%			土壤质地	体积质量/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和 含水率/%
	黏粒 ($<0.002\text{ mm}$)	粉粒 ($0.002\sim0.02\text{ mm}$)	沙粒 ($0.02\sim2\text{ mm}$)			
0—20	6.38	48.15	45.47	砂质壤土	1.42	36.45
20—40	5.44	34.85	59.71	粉砂质壤土	1.53	35.46
40—60	5.29	41.84	52.87	粉砂质壤土	1.36	34.88

1.2 试验设计

试验采取正交设计,设置土壤含盐量、灌水量 2 个因素。土壤含盐量在土水比 1:5 的情况下测得,分别为 3(T1),6(T2),9(T3) dS/m ^[13],灌水量分别为 2 700(W1),3 600(W2),4 500(W3) m^3/hm^2 ^[14]。对照组 CK,土壤盐分梯度为 3 dS/m ,灌水量为 4 500 m^3/hm^2 ,每个处理重复 3 次。各处理设置见表 2。

试验田为 $2\text{ m}\times2\text{ m}$ 的测坑试验,采取“一膜二管四行^[15]”的种植方式。土壤田间持水率为 19.13% (质量含水率),灌水方式为滴灌,潜水泵加压,滴头流量为 $2.2\sim1.8\text{ L/h}$ 。棉花采用新疆惠远种业股份有限公司的“新陆早 48 号”,氮肥施入量为 300 kg/hm^2 ,每个测坑选取两颗有代表性的棉花,用环套好,在其根区手动施加等量 ^{15}N 标记氮肥(上海化工研究院生产的尿素,其丰度为 5.16 atom%),其余肥料均为常规尿素。灌水施肥方式见表 3。

表 2 试验因素与水平

处理	土壤盐度/($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	灌水量/($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)
CK	3	4500
T1W1	3	2700
T2W1	6	2700
T3W1	9	2700
T1W2	3	3600
T2W2	6	3600
T3W2	9	3600
T1W3	3	4500
T2W3	6	4500
T3W3	9	4500

1.3 测定项目与方法

依照棉花的生育期进行取土,分别在苗期、蕾期、花铃期、吐絮期各取 1 次,进行土壤全氮、铵态氮、硝态氮的测量。土壤水盐含量在每次灌水 2 天后利用德国 IMKO 公司 TRIME TDR 系列土壤水分仪 TRIME—PI—CO—IPH TDR 剖面土壤水盐测量仪测量,观测深度为

60 cm,分 6 层,分别为 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60 cm。棉花生长指标采用上海 SINTEK 公司的 STYS-1 手持式叶绿素含量测定仪测定。棉花

产量在成熟期摘取各测坑所有皮棉直接称重。土壤各生育期稳定同位素含量采用德国赛默飞公司的 MAT-271 稳定同位素比质谱仪测定。

表 3 灌水施肥设计

生育期	灌溉时间/ (月—日)	T1W1、T2W1、T3W1/ (m ³ ·hm ⁻²)	T1W2、T2W2、T3W2/ (m ³ ·hm ⁻²)	CK、T1W3、T2W3、T3W3/ (m ³ ·hm ⁻²)	施肥量/ (kg·hm ⁻²)
苗期	05—27	100	150	200	20
	06—03	100	150	200	20
	06—11	300	400	500	40
蕾期	06—18	300	400	500	40
	06—25	300	400	500	40
	07—03	300	400	500	40
	07—10	300	400	500	25
花期	07—17	300	400	500	25
	07—24	300	400	500	25
	08—04	200	250	300	25
絮期	08—19	200	250	300	0

1.4 统计分析

本试验采用 Excel 2010 和 SPSS 22 软件进行数据分析。采用 Origin 2021 制图。

氮肥在土壤中的残留率(NFRS%)依据公式进行计算^[8]:

$$NFRS(\%) = \frac{a - c}{b - c} \times (\frac{N_p}{N_f}) \times 100\%$$

式中:a 为施肥处理土壤的¹⁵N 丰度(%);b 为同位素标记肥料中的¹⁵N 丰度(%);c 为不施肥处理土壤的¹⁵N 丰度(%);N_p 为土壤的总氮量(g/盆);N_f 为氮肥施用总量(g/盆)。

2 结果与分析

2.1 盐旱胁迫对棉田水盐变化的影响

图 1 为 10 个处理的棉田土层各生育期盐分分布特征,其中水平方向为种植时长,垂直方向为 10—60 cm 土层。整体来看,不同处理土壤盐分分布存在较大差异。随着土壤盐分梯度的增加,土壤含盐量明显增加,以灌水梯度 W3 为例,T1W3、T2W3、T3W3 处理的盐分含量分别较 CK 增加 17%,43%和 59%。正常灌溉比水分胁迫土壤盐分含量有所降低,T1W3、T2W3、T3W3 处理的盐分含量比 T1W2、T2W2、T3W2 处理分别减少 4%,3%,6%,比 T1W1、T2W1、T3W1 处理分别减少 8%,10%,15%。水平方向上受土壤蒸发、降雨入渗和地膜覆盖的影响,随着棉花生育过程的推进,土壤盐分呈先上升后下降的趋势,在蕾期和花期达到最大值。以 T2W3 处理 10—30 cm 土层为例:与苗期相比,蕾期和花期的土壤含盐量分别增加 2.2,1.7 倍,吐絮期土壤含盐量比花期降低 34%。垂直方向上受蒸发反盐、根系吸水聚盐和降雨淋盐的影响,土壤盐分呈现逐渐降低

的趋势。以 T2W3 处理为例:与 10—30 cm 土层相比,30—50,50—60 cm 土层分别降低 10%和 19%。

图 2 为 8 个处理棉田土层各生育期水分分布特征。不同处理之间土壤水分分布存在较大差异。正常灌水处理土壤含水量明显高于水分胁迫,T1W3、T2W3、T3W3 处理的水分含量比 T1W2、T2W2、T3W2 处理分别增加 8%,12%和 8%,比 T1W1、T2W1、T3W1 处理分别增加 20%,25%,26%,充足的水分为棉花生长创造较好的土壤环境。土壤水分含量随着土壤盐分梯度增大,以灌水梯度 W3 为例,与 CK 相比,T1W3、T2W3、T3W3 处理的土壤含水量分别增加 3%,8%和 8%。水平方向上,各处理土壤含水量呈现先增加再减少的趋势,大概在 60~100 天达到高峰,全生育期平均土壤含水量范围为 16.3%~20.6%,其中最小值为 T1W1 处理,最大值出现在 T3W3 处理。垂直方向上,土壤水分含量集中在 20—40 cm 处,以 T1W2 处理为例,20—40 cm 土层土壤水分比 10—20,40—60 cm 土层分别高 16%和 4%。不同处理之间,棉田垂直土壤水分分布特征相似。

2.2 盐旱胁迫对棉田土壤氮素分布的影响

由表 4 可知,高盐土壤全氮明显大于低盐土壤,水分胁迫下土壤全氮明显高于正常灌溉(*p*<0.05)。土壤全氮含量随生育期的推进呈先增加后减少,在蕾期全氮累积量达到最大值,且最大值出现在 T3W1 处理的蕾期 0—20 cm 土层,其值为 1.5 g/kg,最小值出现在 CK 处理的苗期 40—60 cm 土层,其值为 0.4 g/kg。全氮在 0—60 cm 土层的累积量随土层深度增加逐渐减少,各土层全氮减少量为 8%~30%,其中花期土壤全氮随土层深度减小最快。平均来看,与 0—20 cm 土层相比,20—40,40—60 cm 土层土壤全氮分别减小 12%,20%。

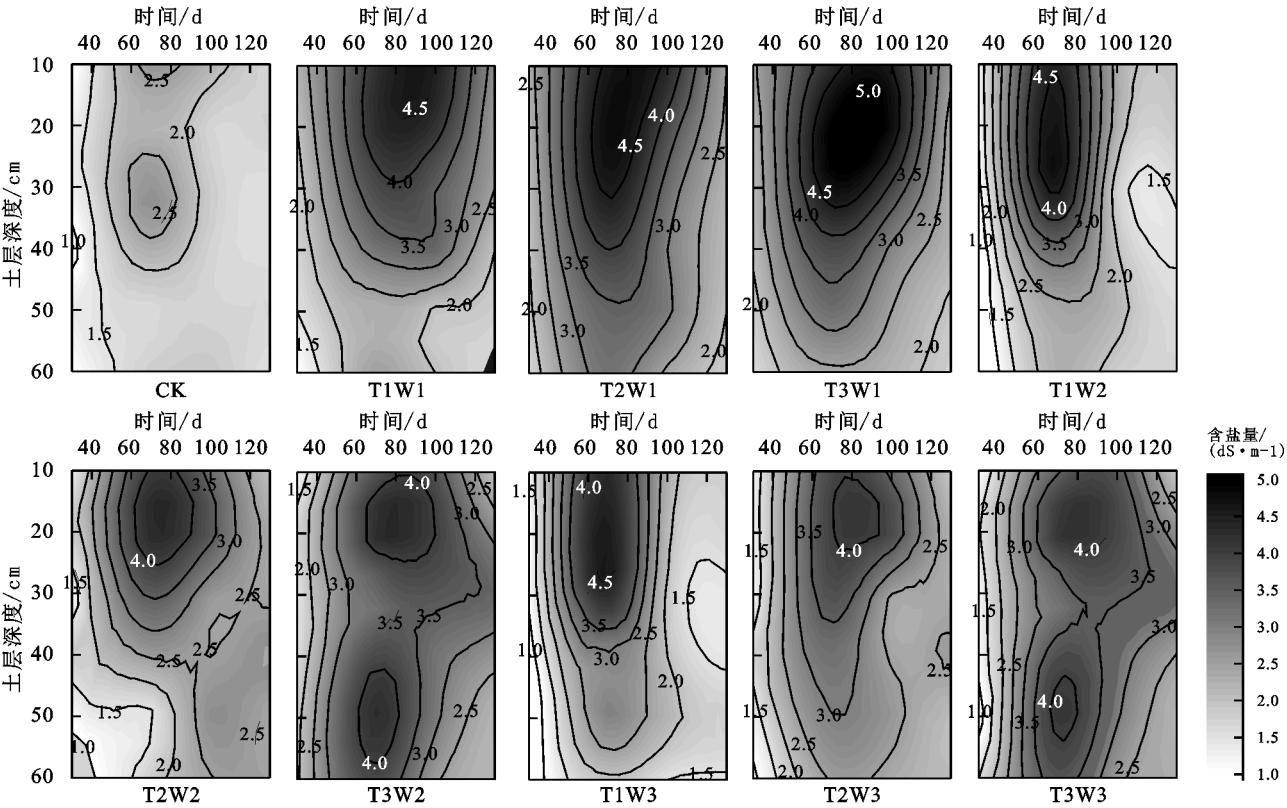


图 1 棉田土层各生育期盐分分布特征

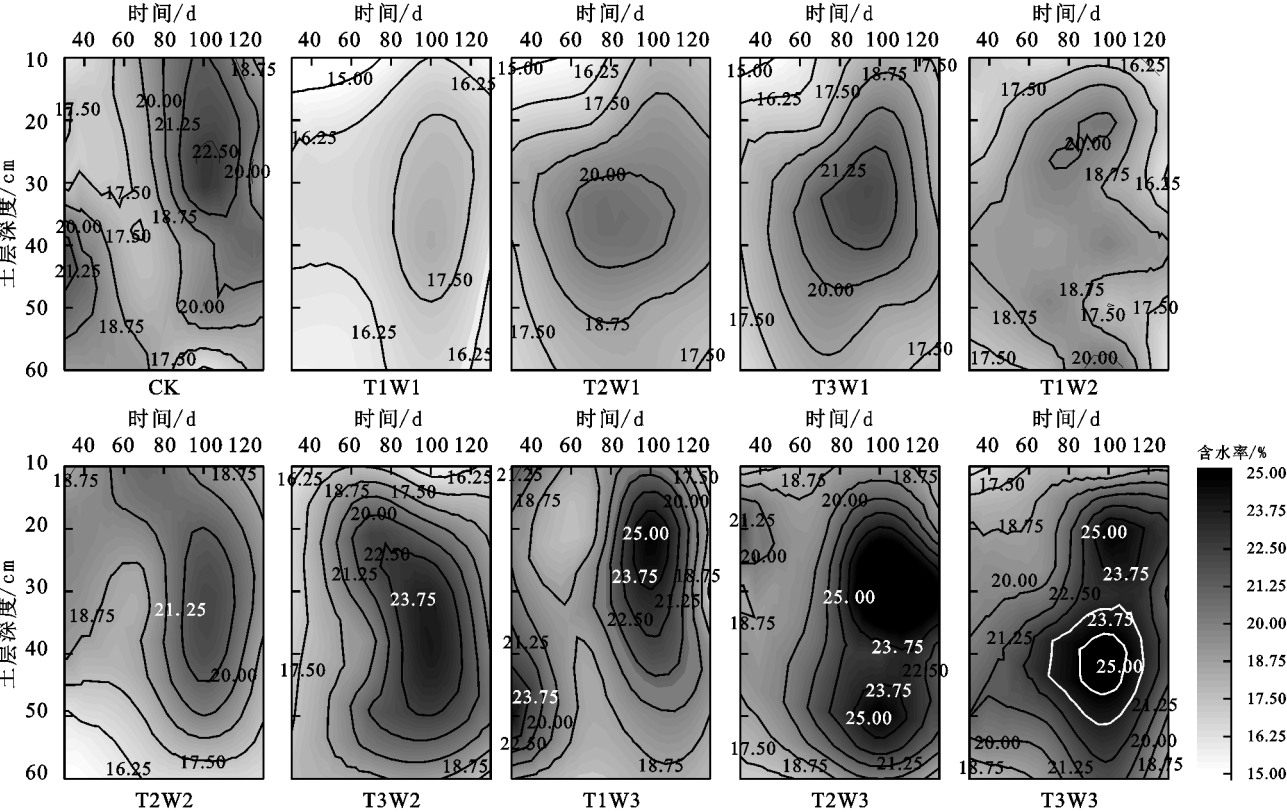


图 2 棉田土层各生育期水分分布特征

从表 5 可以看出,高盐土壤铵态氮明显小于低盐土壤,正常灌水土壤铵态氮含量显著高于水分胁迫($p<0.05$)。各处理铵态氮含量随生育期先增大后减小,最大值出现在 T1W3 处理的花期 0—20 cm 土层,其值为 6.9 mg/kg,最小值出现在 T3W1 处理苗期的 40—60 cm 土

层,其值为 1.2 mg/kg。土壤铵态氮累积量在 0—60 cm 土层快速下降,各土层全氮平均减小 8%。土壤铵态氮含量在 CK 和 T1W3 处理间无明显差异。

由表 6 可知,高盐土壤硝态氮明显小于低盐土壤,正常灌水土壤硝态氮含量显著高于水分胁迫($p<0.05$)。

空间上土壤硝态氮含量随土层增加而降低。时间上,各生育期硝态氮呈先累积再消耗的状态,最大值出现在 CK 处理蕾期的 0—20 cm 土层,其值为 22.4 mg/kg;

最小值出现在 T3W1 处理苗期的 40—60 cm 土层,其值为 8.5 mg/kg。土壤硝态氮含量变化范围较大,与其不易被吸附、移动性大有关。

表 4 各生育期土壤全氮分布 单位:g/kg

处理	苗期			蕾期			花期			絮期		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	0.48±0.35c	0.54±0.33c	0.40±0.43c	0.90±0.08c	0.85±0.06c	0.68±0.07c	0.69±0.28c	0.59±0.68c	0.50±0.45b	0.54±0.78b	0.48±0.88c	0.43±0.78c
T1W1	0.90±0.04a	0.80±0.06a	0.70±0.12a	1.38±0.11a	1.24±0.23a	1.12±0.22ab	1.00±0.21a	0.96±0.33a	0.89±0.23a	0.94±0.35ab	0.89±0.08a	0.83±0.04a
T2W1	0.95±0.21a	0.87±0.05a	0.73±0.15a	1.44±0.12a	1.36±0.06a	1.24±0.98a	1.10±0.76a	1.04±0.65a	0.94±0.77a	1.02±0.51a	0.93±0.32a	0.87±0.22a
T3W1	1.00±0.45a	0.94±0.55a	0.82±0.18a	1.50±0.21a	1.45±0.12a	1.35±0.37a	1.20±0.86a	1.14±0.58a	1.07±0.93a	1.05±0.44a	0.96±0.73a	0.85±0.92a
T1W2	0.84±0.09b	0.64±0.03b	0.54±0.47b	1.06±0.03b	0.91±0.02b	0.87±0.15b	0.84±0.26b	0.99±0.17a	0.69±0.19ab	0.73±0.11b	0.64±0.22b	0.52±0.45c
T2W2	0.89±0.55b	0.75±0.04ab	0.66±0.06a	1.36±0.07a	1.35±0.04a	1.23±0.14a	1.10±0.19a	0.94±0.18a	0.73±0.12a	1.00±0.11a	0.88±0.18a	0.75±0.17b
T3W2	0.88±0.11b	0.73±0.15ab	0.64±0.47a	1.46±0.06a	1.22±0.06ab	1.33±0.47a	1.00±0.84a	0.86±0.72ab	0.66±0.18ab	0.95±0.26ab	0.78±0.18b	0.79±0.04a
T1W3	0.51±0.12c	0.44±0.21c	0.42±0.02c	1.13±0.03b	0.69±0.05c	0.62±0.29c	0.75±0.53bc	0.64±0.29b	0.59±0.11b	0.66±0.22b	0.54±0.06c	0.38±0.09c
T2W3	0.78±0.05b	0.87±0.34a	0.56±0.12ab	1.35±0.09a	1.30±0.35b	1.30±0.75a	0.88±0.27b	0.68±0.19b	0.56±0.17b	0.99±0.32a	0.89±0.04a	0.72±0.12b
T3W3	0.83±0.06b	0.66±0.67b	0.47±0.17b	1.23±0.08ab	1.23±0.27a	1.20±0.27a	1.04±0.86ab	0.88±0.93ab	0.74±0.31a	0.92±0.12ab	0.88±0.07a	0.74±0.11a
盐分(T)	0.016	0	0.030	0.008	0.006	0.019	0	0.034	0.022	0.014	0	0.005
灌水量(W)	0.005	0	0	0.012	0	0.002	0	0	0.008	0.009	0	0.001
T×W	0.001	0.003	0	0	0.004	0	0.002	0.001	0	0	0.002	0

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示各处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 5 各生育期土壤铵态氮分布 单位:mg/kg

处理	苗期			蕾期			花期			絮期		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	3.4±0.52ab	3.2±0.82a	3.0±0.84b	5.1±1.16ab	4.7±1.04b	4.5±1.44a	6.6±1.54a	6.1±0.96a	5.7±1.66a	4.5±2.11a	4.0±1.19a	3.5±0.72b
T1W1	3.5±1.32a	3.2±1.56a	3.0±0.84b	5.5±0.93a	4.9±0.63b	4.2±1.46b	6.0±1.55a	5.7±0.45ab	4.9±1.45b	3.7±1.57b	3.3±0.56b	3.0±0.11b
T2W1	2.2±0.34c	1.9±1.34c	1.7±0.45d	4.0±0.55b	3.8±0.74c	3.4±0.41b	5.5±0.53b	5.1±0.61b	4.7±0.76b	3.5±0.33b	3.1±1.04c	2.8±1.41c
T3W1	2.0±0.43c	1.7±1.45c	1.2±1.62d	3.8±1.98c	3.2±2.66c	2.7±2.56c	5.0±1.75c	4.6±1.63c	3.7±1.42c	2.7±1.99c	2.8±1.06c	2.4±1.55c
T1W2	3.7±0.42a	3.6±0.63a	3.5±0.84a	5.4±0.55a	5.1±1.73a	4.9±1.28a	6.7±1.95a	6.2±1.11a	4.9±1.73b	4.2±1.55a	3.7±1.24a	3.4±1.0b
T2W2	2.6±1.12c	2.4±1.45b	2.0±1.17d	4.3±1.02b	4.1±1.06b	3.7±1.55b	5.9±1.08b	5.7±0.94ab	5.4±0.55b	3.9±0.57b	3.7±1.48a	3.5±0.64b
T3W2	2.4±0.77c	2.0±0.62b	1.5±0.93d	3.2±0.63b	3.1±0.33c	2.8±0.96b	5.1±1.36b	4.8±1.22b	4.6±1.06b	3.4±1.45c	3.6±2.47a	3.7±0.52a
T1W3	3.8±1.22a	3.4±1.05a	3.3±1.45b	5.1±1.28ab	4.7±1.69b	4.3±1.05ab	6.9±1.33a	6.4±1.45a	5.3±1.94a	4.1±1.29ab	3.8±2.52a	3.5±0.68b
T2W3	3.6±3.05a	3.5±0.45a	3.2±1.66c	4.8±0.03b	4.5±0.06b	4.3±0.13ab	5.7±1.78b	5.6±2.04ab	4.6±2.44b	4.0±3.72ab	3.8±2.51a	3.6±0.20b
T3W3	3.3±1.66ab	3.0±1.96b	2.7±1.06c	4.6±1.37b	4.4±1.05b	3.9±1.78b	5.5±1.27b	5.3±1.05ab	4.9±0.36b	3.8±0.49b	3.5±1.03a	3.1±0.39b
盐分(T)	0.010	0.003	0.014	0.005	0.011	0.005	0.014	0.017	0.011	0.002	0.043	0
灌水量(W)	0.005	0	0	0	0.001	0	0	0.007	0	0.013	0	0.017
T×W	0.001	0.007	0	0.001	0	0	0.004	0	0	0	0.003	0

2.3 盐旱胁迫对土壤¹⁵N 残留率(NFRS)的影响

图 3 为¹⁵N 残留率(NFRS)在土壤中的分布情况。以 0—20 cm 土层为例,各生育期¹⁵N 残留率先增加再减小,与苗期相比,蕾期、花期和絮期土壤全氮含量分别增加 2.5,2.0,1.5 倍。不同处理土壤¹⁵N 残留率在蕾期呈现较大的差值,花期次之,苗期和絮期差值较小。其值在蕾期达到最大,T2W1、T3W1 处理¹⁵N 残留率显著高于其他处理。20—40,40—60 cm 土层¹⁵N 残留率与 0—20 cm 分布特征相似,且随着土层的加深逐渐减小,20—40,40—60 cm 土层的¹⁵N 残留率比 0—20 cm 分别减少 6%和 30%。

2.4 盐旱胁迫下棉田¹⁵N 残留率(NFRS)与氮素的分布关系

图 4 为全氮、铵态氮和硝态氮与¹⁵N 残留率(NFRS)

之间的关系。图 4a 为各处理在盐旱胁迫下全氮和¹⁵N 残留率的关系,各处理¹⁵N 残留率随全氮累积而增加($p<0.01$)。表 7 为全氮、铵态氮和硝态氮与¹⁵N 残留率的拟合方程,¹⁵N 残留率增长速率为 T3W1>T2W1>T2W2>CK>T3W2>T3W3>T1W3>T1W2>T1W1>T1W3。可以看出,¹⁵N 残留率对全氮含量的变化受土壤的高盐分和低水分影响较大。

图 4b 为铵态氮和¹⁵N 残留率的关系,¹⁵N 残留率随铵态氮的增加呈现上升趋势($p<0.01$),其中 T3W1 和 T2W1 处理的¹⁵N 残留率显著高于其他处理。各处理的¹⁵N 残留率拟合线斜率为 T3W1>T3W3>T1W2>T2W1>T1W1>CK>T3W2>T2W2>T2W3>T1W3,说明¹⁵N 残留率对铵态氮的变化受土壤盐度影响较大。

表 6 各生育期土壤硝态氮分布

单位:mg/kg

处理	苗期			蕾期			花期			絮期		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	14.8±3.03b	14.6±3.98b	13.5±5.19ab	22.4±2.09a	21.3±5.03a	20.4±4.05a	19.0±2.11a	16.9±6.1ab	16.4±4.16ab	16.7±4.03a	15.4±4.05b	14.9±2.07ab
T1W1	14.6±2.45b	14.2±3.67bc	13.5±3.74ab	16.0±3.66b	14.3±4.04c	13.8±2.04d	15.0±0.44b	14.6±1.04c	13.9±1.55b	14.0±1.05b	13.7±1.55c	12.5±0.93c
T2W1	13.1±4.75b	12.6±6.45c	12.3±2.96b	14.2±1.76c	13.2±1.94c	12.4±3.21c	13.8±5.11c	13.3±3.77c	12.1±2.41b	12.8±3.22c	11.2±0.18c	10.6±1.33c
T3W1	10.0±2.11c	9.5±1.57c	8.5±1.68c	13.0±1.99c	12.4±2.63c	11.4±3.22c	12.0±2.57c	11.3±3.86c	11.1±3.21b	11.2±2.11c	10.3±1.18c	9.6±1.49c
T1W2	16.7±3.68a	16.3±2.83ab	15.7±1.84a	18.4±1.72b	17.4±1.95b	16.3±1.65bc	18.5±2.86a	15.3±2.97b	14.2±3.16b	17.8±3.42a	16.8±2.87a	16.4±2.52a
T2W2	15.8±3.44b	15.4±0.44ab	14.7±0.42a	16.3±0.72b	16.9±0.29c	14.8±1.99cd	15.0±4.99b	14.7±3.74b	13.7±4.83b	16.3±5.84a	15.7±2.06b	16.9±5.06a
T3W2	12.7±4.05c	11.5±7.03c	10.4±4.85b	15.8±1.05b	14.6±1.88d	13.8±2.01d	13.0±3.04b	15.4±1.66b	14.8±1.55b	14.4±6.21b	13.5±0.63c	13.2±1.56b
T1W3	17.9±2.76a	18.4±3.24a	16.3±3.85a	21.7±1.06a	19.1±2.05ab	18.3±2.06b	20.0±4.94a	18.9±1.05a	19.5±1.75a	16.3±1.99a	15.4±4.22c	14.4±1.73b
T2W3	15.8±3.11b	11.3±2.05c	13.7±1.06b	20.6±0.53ab	17.2±2.64b	16.1±4.21c	16.0±7.84b	15.7±0.63b	14.9±0.05b	15.9±0.48a	17.8±0.83a	14.6±3.12b
T3W3	14.9±4.05b	13.7±1.64bc	12.8±3.06b	18.5±0.11b	17.8±4.32b	18.1±4.54b	15.0±4.97b	14.7±0.52b	13.6±0.49b	13.2±0.92b	11.5±0.89c	15.3±0.85ab
盐分(T)	0.016	0.008	0	0	0.026	0	0	0	0	0.002	0.003	0
灌水量(W)	0	0.004	0.003	0	0.006	0.006	0.011	0	0	0.017	0	0
T×W	0	0	0.001	0.004	0.003	0	0	0.008	0	0	0.004	0

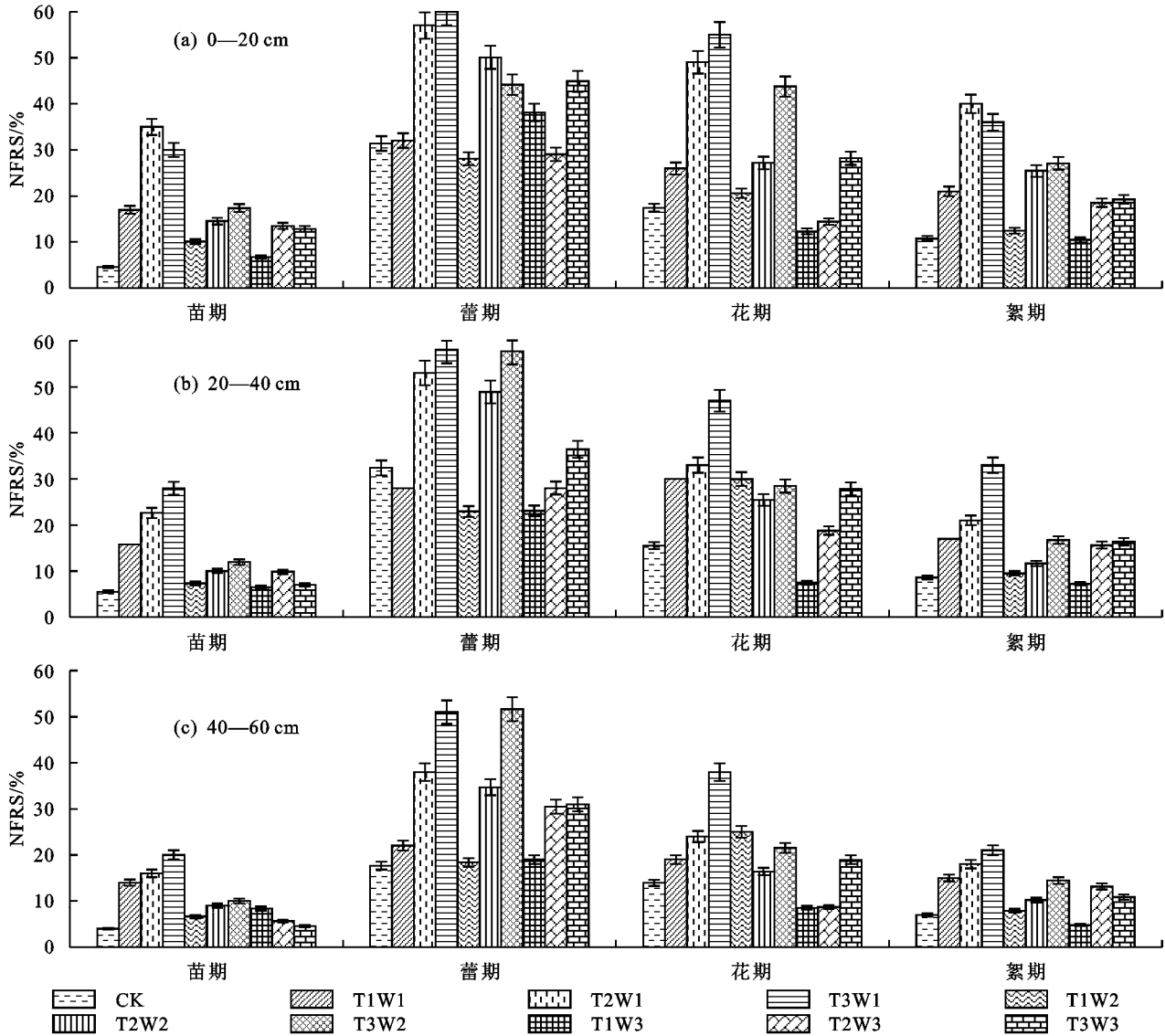


图 3 各层土壤¹⁵N 残留率(NFRS)

图 4c 表明土壤中¹⁵N 残留率随硝态氮含量的增加而上升,其中 T3W1 处理的土壤¹⁵N 残留率随硝态氮累积增长最快,¹⁵N 残留率最大($p<0.01$)。其余各处理¹⁵N 残留率的变化速率为 T3W1>T2W1>T3W2>T1W1>T3W3>T2W2>CK>T1W3>T2W3>T1W2。可以看出,¹⁵N 残留率对硝态氮的变化受水

分的影响较大。

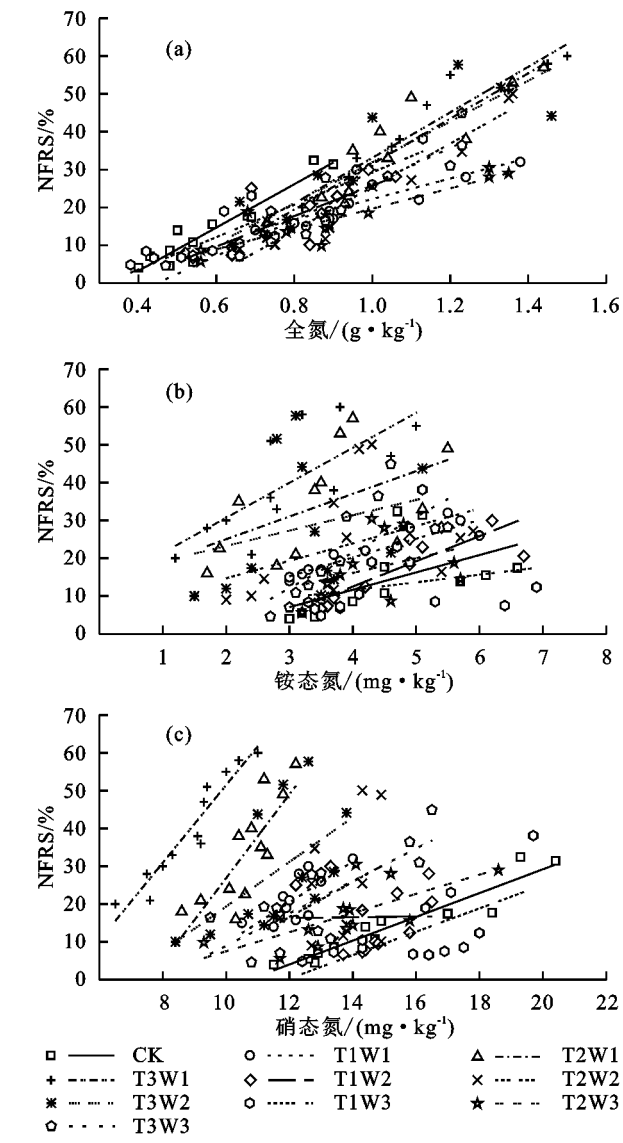


图4 土壤全氮、铵态氮和硝态氮与¹⁵N 残留率(NFRS)之间的关系

2.5 盐旱胁迫对棉花生长的影响

表8为絮期盐旱胁迫对各处理棉花生长指标与产量的影响。其中T1W3和CK处理的叶绿素、水分含量、叶面积显著高于其他处理,棉花光合作用主要依靠叶片进行,高盐度和水分胁迫不利于棉花叶片叶绿素累积。各处理氮素累积量差异性显著,其中CK、T1W2和T1W3处理显著高于其他处理($p<0.01$)。不同处理株高变化范围比较大,最大值为T1W3处理的134 cm,最小值为T3W1处理的88 cm。盐旱胁迫对棉花产量的影响较大,其中CK、T1W2和T1W3处理棉花产量显著高于其他处理,产量范围为5 400~8 000 kg/hm²。所有指标T1W3和T1W1处理的差异性显著($p<0.01$),说明水分胁迫对棉花生长有较大影响。T1W3和CK处理各指标均无显著差异。

3 讨论

盐碱地土壤中盐分含量过高,抑制棉花对氮素的

吸收和利用,从而影响棉花产量^[16]。杨莉琳等^[17]研究认为,随土壤盐度增加,棉花氮素吸收量和产量显著降低;但马钊等^[18]认为,适当的盐分对植物的氮素吸收有促进作用。本文结果表明,适宜盐度的土壤对全氮累积量没有太大影响,但当土壤盐度高于一定值时对棉花氮素吸收量和产量产生较大影响。本研究表明,花期土壤全氮对盐分变化更为敏感,这与张丽萍^[19]和李军湘^[20]研究结果一致,花铃期是形成产量最关键的时期,此阶段棉花营养生长达到高峰后转为生殖生长,吸收的营养占整个生育期的59.7%~67.0%。综上所述,当土壤盐分梯度低于3 dS/m时对土壤氮素累积影响不大,花铃期是棉花生长的关键时期,可适当增加肥料。本文土壤氮素残留率在成熟期为11%~40%。高盐土壤的¹⁵N残留率显著高于低盐土壤,可能因为土壤盐分抑制作物的生长和氮素吸收^[21]。随灌水量的增加,土壤¹⁵N残留率有所减少。因为土壤水分运动是土壤溶质运移的主要制约因素,活跃的土壤水分始终是土壤氮素淋溶运移的媒介和驱动力。由于水分对氮素具有淋洗作用,水量与土壤中氮素的淋洗程度呈正比^[22]。土壤全氮累积量与¹⁵N残留率呈正比关系,说明当土壤盐度较高,灌水量大时不利于棉花对肥料的利用。

铵态氮和硝态氮是土壤碱解氮的重要组成部分。随着土层深度的增加,棉花根系铵态氮和硝态氮每20 cm土层平均以8%递减。首先,土壤中铵态氮和硝态氮对灌水量比较敏感,灌水量的增加对铵态氮生成有利^[23],从而促进硝态氮的转化;其次,棉花生育期耕作层土壤铵态氮含量显著高于深层^[24];最后,土壤中的尿素需要相应的尿素酶水解成铵态离子才能被作物吸收,但是肥效产生的慢,需要一定的时间^[25]。本研究表明,土壤碱解氮剖面分布与盐分剖面分布呈正相关。新疆是典型的盐渍化地区,土壤含盐量是盐渍化土壤的主要特性。有研究^[26]表明,土壤含盐量对氨挥发速率有显著的促进作用,在土壤含盐量为1.7~37.9 g/kg的范围内,土壤氨挥发随着土壤的盐含量增加而加剧。因为随着土壤盐分增加,盐度对微生物的抑制作用加强^[27],土壤中的硝化细菌逐渐受到抑制,土壤铵态氮累积量增加,加剧土壤的氨挥发累积量。本文正常灌水土壤硝氮含量显著高于水分胁迫($p<0.05$)。隋利等^[28]研究发现,硝态氮如果不被作物及时吸收,遇到灌水和降雨,将通过重力流和扩散作用逐渐向深层移动,造成氮素的淋洗损失;李仙岳等^[29]连续多年研究了半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失表明,硝态氮的淋洗量随降水量的增加而显著增加。上述结果说明,适当的灌水量可减少氮素的淋溶损失,提高氮肥利用

率。土壤¹⁵N 残留率与铵态氮和硝态氮的累积相关性显著,其中盐分梯度>3 dS/m 的处理土壤¹⁵N 残留率的上升速度普遍较高。这说明土壤盐度过高不利于氮素对铵态氮和硝态氮的累积,与李鑫鑫等^[30]的研究结果土壤氮素利用率随土壤盐度的增加而降低相一致。

表 7 土壤全氮、铵态氮和硝态氮与¹⁵N 残留率(NFRS)的拟合方程

处理	全氮			铵态氮			硝态氮		
	方程	R ²	P	方程	R ²	P	方程	R ²	P
CK	Y=57X-19	0.89	<0.01	Y=5X-6	0.24	<0.01	Y=3X-40	0.89	<0.01
T1W1	Y=27X-15	0.70	<0.01	Y=5X+0.4	0.76	<0.01	Y=5X-55	0.51	<0.01
T2W1	Y=60X-28	0.80	<0.01	Y=6X+13	0.20	<0.01	Y=11X-106	0.62	<0.01
T3W1	Y=60X-27	0.90	<0.01	Y=9X+12	0.51	<0.01	Y=10X-71	0.90	<0.01
T1W2	Y=40X-14	0.62	<0.01	Y=7X-14	0.71	<0.01	Y=0.1X-15	0.01	<0.01
T2W2	Y=57X-32	0.90	<0.01	Y=4X+5	0.07	<0.01	Y=4X-48	0.09	<0.01
T3W2	Y=53X-22	0.73	<0.01	Y=4X+15	0.02	<0.01	Y=6X-51	0.24	<0.01
T1W3	Y=42X-13	0.75	<0.01	Y=2X+3	0.06	<0.01	Y=3X-42	0.38	<0.01
T2W3	Y=26X-7	0.82	<0.01	Y=4X+0.5	0.06	<0.01	Y=2X-22	0.43	<0.01
T3W3	Y=47X-21	0.83	<0.01	Y=9X-16	0.45	<0.01	Y=4X-42	0.55	<0.01

表 8 各处理棉花生长指标与产量

处理	叶绿素 (SPAD)	温度/℃	氮素/ (g·kg ⁻¹)	水分/ (g·cm ⁻²)	株高/cm	叶面积/ cm ²	产量/ (kg·hm ⁻²)
CK	63.4±8.46a	26.3±5.62a	22.3±7.22a	3.4±1.42a	133±8.93a	136.0±10.96a	7400±39.64ab
T1W1	45.7±4.66c	26.8±5.75a	19.5±8.43b	2.3±2.53b	117±33.97b	116.0±14.22b	6030±66.96c
T2W1	42.3±6.85c	26.4±4.75a	18.9±4.83b	1.9±0.29c	109±23.97b	105.0±24.91b	5800±59.05c
T3W1	40.5±4.96c	26.8±8.53a	18.4±3.92b	1.8±0.83c	88±47.94c	77.0±33.97c	5400±48.93c
T1W2	51.3±7.33c	26.6±6.83a	21.7±1.94a	2.5±0.21b	132±43.62a	132.9±67.93ab	7600±96.36a
T2W2	52.0±5.74c	26.0±2.53a	19.9±7.03b	2.4±0.11b	115±37.94b	113.9±21.94b	7300±75.28ab
T3W2	56.5±6.42b	26.6±5.94a	19.7±2.05b	2.2±0.92b	95±13.83c	80.3±67.98c	6100±93.57c
T1W3	60.2±6.62a	26.4±10.93a	21.5±4.22a	3.8±0.87a	134±43.96a	144.0±56.93a	8000±68.74a
T2W3	58.7±9.53ab	26.5±3.98a	21.1±6.21b	3.2±0.86ab	120±76.06b	128.0±74.71b	7000±63.63b
T3W3	53.2±10.54b	26.4±1.04a	20.8±8.33b	3.0±1.06b	105±33.95bc	104.0±14.82bc	6300±86.35c
盐分(T)	0	0.044	0.001	0	0	0	0
p 灌水量(W)	0	0.032	0.007	0	0	0	0
T×W	0.001	0.030	0	0	0.002	0	0

绿色植物光合作用是受水分胁迫最显著的生理过程之一^[31],本研究发现,棉花正常灌水量的叶绿素含量显著高于水分胁迫,水分胁迫能够伤害作物叶绿体结构影响光合作用,使膜受损伤、酶活性丧失、细胞内渗透调节等发生改变^[14]。棉花的株高、叶面积、茎粗、产量等均随灌水量而下降,水分胁迫加速棉花生育过程,导致在吐絮期不同处理的棉花各项指标有所差异^[32]。本研究发现,当土壤盐分>3 dS/m 时,土壤盐分梯度对棉花产量有显著影响($p<0.05$)。魏光辉等^[33]通过研究发现,不同生育期土壤干旱均会导致棉花产量的下降;冯棣等^[34]研究发现,在盐胁迫下,棉花可以通过水分调节缓解盐害,但随盐分胁迫程度的增加,棉花的生长指标和叶绿素含量等受到不同程度的抑制。当土壤盐分梯度>6 dS/m 时,棉花产量降低 20%,水分胁迫造成棉花产量较正常值下降 5%左右,相比起缺水百分之 20%,土壤盐分增加 50%更不利棉花产量的提高。不同处理¹⁵N 残留率

与棉花产量呈反比,说明减小肥料残留率,增加氮肥使用率有利于提高棉花产量。

4 结 论

滴灌区盐旱胁迫,土壤水盐主要分布在 20—40 cm 土层,花蕾期土壤水盐较高。土壤氮素主要分布在 0—20 cm 土层,每 20 cm 土层铵态氮和硝态氮平均以 8%递减。当盐分>3 dS/m 时,不利于棉花对土壤全氮的吸收,棉花花期对盐分更为敏感,需氮量大,在花期适当增加肥料有助于棉花生长。土壤的高盐分抑制微生物的生长,增加铵态氮挥发,不利于土壤铵态氮累积。淋洗和降雨对土壤硝态氮含量影响较大,可以在测坑四周铺设保水设施减少硝态氮淋失。比起正常灌水量形成的碱解氮流失对棉花产量的影响,水分胁迫对棉花产量的影响更大。灌水量 4 500 m³/hm²,更利于棉花生长。棉花成熟期土壤¹⁵N 残留率为 11%~40%,土壤¹⁵N 残留率与氮素分布呈正比,与棉花产量呈反比。综上所述,正常水低

盐处理(T1W3)有利于减小肥料残留率,增加肥料使用率,以达到提高棉花产量和节约肥料的效果。

参考文献:

[1] 丁宏伟,王振华,李文昊,等.极端干旱区降解膜对棉田耗水、籽棉产量及水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(1):41-48.

[2] 宁松瑞,左强,石建初,等.新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J].农业工程学报,2013,29(22):90-99.

[3] 刘冲,王茂文,邢锦城,等.苏北沿海滩涂盐肥耦合对甘薯生长及土壤氮素营养的影响[J].西南农业学报,2017,30(9):2024-2030.

[4] 罗俊杰,石有太,陈玉梁,等.甘肃不同色彩陆地棉抗旱指标筛选及评价研究[J].核农学报,2012,26(6):952-959.

[5] 陈玉梁,石有太,罗俊杰,等.干旱胁迫对彩色棉花农艺、品质性状和水分利用效率的影响[J].作物学报,2013,39(11):2074-2082.

[6] 陈建英,罗超越,邱慧珍,等.不同施氮量对半干旱区还田玉米秸秆腐解及养分释放特征的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(1):101-106.

[7] 何伟,韩飞,关瑞,等.滨海盐碱地不同施肥模式对棉花氮磷养分积累和产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):295-300.

[8] 张文,周广威,闵伟,等.应用¹⁵N 示踪法研究咸水滴灌棉田氮肥去向[J].土壤学报,2015,52(2):372-380.

[9] Cécoci G, Senn M E, Bustos D, et al. Genetic variability for responses to short- and long-term salt stress in vegetative sunflower plants[J/OL].Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2012,175(6).doi:10.1002/jpln.201200303.

[10] Katerji N, Mastrorilli M, Lahmer F Z, et al. Emergence rate as a potential indicator of crop salt-tolerance[J].European Journal of Agronomy,2012,38:1-9.

[11] 文佩,陈小兵,张乐乐,等.盐旱交叉胁迫对各施氮水平下小麦苗期的影响[J].土壤,2019,51(2):324-329.

[12] 张大鹏.不同滴灌施肥方案对苹果生长及¹⁵N 吸收、分配和利用的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2012.

[13] 姚宝林,李光永,叶含春,等.干旱绿洲区膜下滴灌棉田土壤盐分时空变化特征研究[J].农业机械学报,2016,47(1):151-161.

[14] 杨传杰,罗毅,孙林,等.水分胁迫对覆膜滴灌棉花根系活力和叶片生理的影响[J].干旱区研究,2012,29(5):802-810.

[15] Yang G, Li F D, Tian L J, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation[J].Soil and Tillage Research,2020,199:e104592.

[16] 代建龙,董合忠,段留生.棉花盐害的控制技术及其机

理[J].棉花学报,2010,22(5):486-494.

[17] 杨莉琳,于海英,侯建伟,等.基于冬灌咸水的滨海重盐碱地植棉的施肥策略[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2020,46(6):748-758.

[18] 马钊,郑桂亮,何峰,等.施用有机无机复混肥对盐碱地紫花苜蓿生产性能、营养品质和土壤养分含量的影响[J].草地学报,2019,27(2):466-472.

[19] 张丽萍.棉花各生育期土壤养分与其产量的关系[J].新疆农垦科技,2013,36(3):52-53.

[20] 李军湘.不同土壤盐分对膜下滴灌棉花生长发育影响的研究[J].新疆农业科技,2012,207(6):34-35.

[21] 贾朋,王力朋,何茜,等.应用¹⁵N 示踪探究楸树无性系对氮素的吸收和分配[J].核农学报,2016,30(4):776-782.

[22] Pedrero F, Mounzer O, Alarcón J J, et al. The viability of irrigating mandarin trees with saline reclaimed water in a semi-arid mediterranean region: Apreliminary assessment[J].Irrigation Science,2013,31(4):765-768.

[23] 贾正茂,崔远来,刘方平,等.不同水肥耦合下棉花土壤氮素转化规律[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(2):164-169.

[24] 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.

[25] 高志建,尹飞虎,刘瑜,等.滴灌棉花光合特性、生物量及产量对铵态氮、酰胺态氮的响应研究[J].新疆农业科学,2015,52(1):1-6.

[26] 梁飞,田长彦.土壤盐渍化对尿素与磷酸脲氮挥发的影响[J].生态学报,2011,31(14):3999-4006.

[27] 李红强,姚荣江,杨劲松,等.盐渍化对农田氮素转化过程的影响机制和增效调控途径[J].应用生态学报,2020,31(11):3915-3924.

[28] 隋利,易家宁,王康才,等.不同氮素形态及其配比对盐胁迫下紫苏生理特性的影响[J].生态学杂志,2018,37(11):3277-3283.

[29] 李仙岳,冷旭,张景俊,等.干旱区降解地膜覆盖农田硝态氮迁移与利用特征研究[J].农业机械学报,2020,51(7):294-303.

[30] 李鑫鑫,刘洪光,林恩.基于¹⁵N 示踪技术的干旱区滴灌葡萄氮素利用分析[J].核农学报,2020,34(11):2551-2560.

[31] 汪精海,齐广平,康霞霞,等.干旱半干旱地区紫花苜蓿营养品质对水分胁迫的响应[J].草业科学,2017,34(1):112-118.

[32] 张珠明,叶尧良,陆勇伟,等.浙北棉区棉花不同播期露地直播栽培试验[J].棉花科学,2014,36(1):22-25.

[33] 魏光辉,马亮.干旱区不同地下水埋深与棉花膜下滴灌灌溉制度的响应研究[J].灌溉排水学报,2015,34(12):9-13.

[34] 冯棣,张俊鹏,孙池涛,等.不同生育阶段盐分胁迫对棉花生长和水分生理指标的影响[J].生态学杂志,2014,33(5):1195-1199.