

# 盐分淋洗下盐碱地棉田生育时期 水氮耦合方案研究

任志文, 曹红霞, 胡清阳, 祁辰, 李志军

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为改善盐碱棉田土壤水盐环境、提高籽棉产量和水氮利用效率,于2023年开展不同灌水量和施氮量的棉花生育时期淋洗试验。设置3个灌水水平( $W1:1.0 ET_c$ ,  $W2:1.25 ET_c$ ,  $W3:1.5 ET_c$ )和4个施氮量( $N1:0 kg \cdot hm^{-2}$ ,  $N2:100 kg \cdot hm^{-2}$ ,  $N3:200 kg \cdot hm^{-2}$ ,  $N4:300 kg \cdot hm^{-2}$ )进行完全组合试验。结果表明:提高灌水淋洗量虽然可降低膜内土壤含盐量,但会增加膜间土壤含盐量;高水高肥( $W3N4$ 处理)使得棉花冗余生长、贪青晚熟,增加了叶片和棉铃间的营养竞争,降低了籽棉产量。适当的淋洗施肥( $W2N4$ 处理)能够降低棉花根区含盐量,通过增加蕾期与花期的叶面积指数和有效铃数,提高了干物质的积累和籽棉产量。此外,建立了灌水量和施氮量与籽棉产量和氮素农学利用率的二元二次回归模型;通过单因素分析发现,籽棉产量随灌水量的增加先增加后降低,随施氮量的增加而增加;氮素农学利用率随灌水量和施氮量的增加先增加后降低。通过两因素交互分析发现,随灌水量和施氮量的增加,籽棉产量和氮素农学利用率均呈先增加后减小趋势。灌水量和施氮量存在耦合效应,且灌水的影响效应大于施氮。基于回归模型对籽棉产量和氮素农学利用率进行方案优化,推荐灌溉水平为 $1.14 \sim 1.30 ET_c$ 、施氮量为 $171 \sim 228 kg \cdot hm^{-2}$ 的灌水施肥控盐方案。

**关键词:**棉花;盐分淋洗;水氮耦合;灌水量;氮素农学利用率

**中图分类号:**S562 **文献标志码:**A

## Water-nitrogen coupling dynamics under salt leaching during growth stages in saline-alkali cotton fields

REN Zhiwen, CAO Hongxia, HU Qingyang, QI Chen, LI Zhijun

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education,  
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To improve the soil water and salt conditions in saline-alkali cotton fields, as well as to increase seed cotton yield and enhance water and nitrogen utilization efficiency, a cotton leaching experiment with varying irrigation and nitrogen application rates was conducted in 2023. A complete factorial design was used, consisting of three irrigation levels ( $W1:1.0 ET_c$ ,  $W2:1.25 ET_c$ ,  $W3:1.5 ET_c$ ) and four nitrogen application rates ( $N1:0 kg \cdot hm^{-2}$ ,  $N2:100 kg \cdot hm^{-2}$ ,  $N3:200 kg \cdot hm^{-2}$ ,  $N4:300 kg \cdot hm^{-2}$ ). The findings indicated that an increase in irrigation flushing rate lowered soil salt content within the rows while raising it between them. The combination of high water and high nitrogen ( $W3N4$  treatment) led to excessive vegetative growth and delayed maturity of cotton plants, intensifying nutrient competition between leaves and bolls which ultimately reduced seed cotton yield. Conversely, optimal flushing fertilization ( $W2N4$  treatment) effectively decreased soil salt concentration in the root zone while enhancing leaf area index and effective boll number during both boll initiation and blooming phases, which resulted in increased dry matter accumulation as well as seed cotton yield. Furthermore, a bivariate quadratic regression model was developed to analyze the relationship between irrigation volume, nitrogen application rate, seed cotton yield, and nitrogen agronomic utilization efficiency. Single-factor analysis revealed that seed cotton yield initially increased before declining with rising irrigation volume but consistently increased alongside higher nitrogen

收稿日期:2024-08-23

修回日期:2024-09-26

基金项目:国家自然科学基金(52179047);国家重点研发计划项目(2022YFD1900401)

作者简介:任志文(1997-),男,宁夏固原人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:18372331628@163.com

通信作者:曹红霞(1971-),女,新疆五家渠人,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:nschx225@nwfau.edu.cn

application rates. Similarly, the nitrogen agronomic utilization efficiency exhibited an initial increase followed by a decrease as both irrigation volume and nitrogen application rate escalated. Two-factor interaction analysis demonstrated that both seed cotton yield and nitrogen agronomic utilization efficiency first rose then fell with increases in these variables' levels; notably, the effect of irrigation volume on these outcomes surpassed that of nitrogen application rate. Based on the insights from this regression model, an optimal strategy for managing salt levels while maximizing seed cotton yield through appropriate irrigation practices is proposed. The model was used to optimize irrigation, fertilization, and salt control strategies for seed cotton yield and nitrogen agronomic efficiency. The recommended irrigation level ranges from 1.14 to 1.30  $ET_c$ , with a nitrogen application rate of 171 to 228  $kg \cdot hm^{-2}$ .

**Keywords:** cotton; salt leaching; water-nitrogen coupling; irrigation amount; nitrogen agronomic efficiency

新疆地区光热资源丰富、昼夜温差大,有利于高品质棉花生长,是我国主要的棉花种植区<sup>[1]</sup>。2023年新疆棉花种植面积250万 $hm^2$ ,总产量511.2万t,占全国棉花总产量的91%。新疆水资源短缺,在棉花生育时期(4—9月)降雨稀少,不合理的灌溉和施肥致使耕地土壤盐碱化问题突出。据统计,新疆盐碱土耕地面积已达 $1.2 \times 10^7 hm^2$ ,约占全疆总耕地面积的32%,严重制约了棉花产业的发展<sup>[2]</sup>。灌溉的目的是为了创造良好的土壤环境,满足作物正常生长和高产需要。对于土壤盐碱化区域,灌溉不仅要满足作物正常的耗水需求,还要满足根区土壤冲洗压盐的需要<sup>[3]</sup>。

膜下滴灌将覆膜种植和滴灌技术相结合,通过精确地向作物根部土壤输送水分,减轻了土壤水分蒸发,提高作物水分利用效率,在新疆得到大面积的推广应用。有研究指出,在滴灌条件下,土壤盐分会随水而动,倾向于在湿润锋的前缘积累。由于蒸腾作用和作物根系对水分的吸收,很容易导致盐分向上迁移。膜下滴灌的灌水频率高而灌水量低,不能保证有效盐分浸出,可能会导致棉花生长季结束时盐分积累<sup>[4-5]</sup>。为解决膜下滴灌积盐问题,通常在膜下滴灌结束后的非生育时期淋洗(冬灌或春灌)。在排水畅通的条件下,大水灌溉可在短期内快速降低盐碱农田的含盐量<sup>[6]</sup>。当前研究认为:冬春灌水量是影响土壤盐分淋洗效果的重要因素之一。赵波等<sup>[7]</sup>和陈小芹等<sup>[8]</sup>研究表明,滴灌条件下灌水定额 $3\ 000 m^3 \cdot hm^{-2}$ 的冬灌在试验条件下比较适宜北疆地区洗盐压碱。李勇等<sup>[9]</sup>研究表明,灌水定额 $2\ 400 m^3 \cdot hm^{-2}$ 是南疆地区冬灌结合少量春灌( $300 m^3 \cdot hm^{-2}$ )条件下的最优冬灌定额。无论是冬灌还是春灌都需要大量的水,大水灌溉加剧了水资源的短缺,且容易抬高地下水位、出现返盐现象、加剧土壤次生盐碱化<sup>[10-11]</sup>。牟洪臣等<sup>[12]</sup>研究表明,相对漫灌淋洗方式而言,滴灌淋洗的方式土壤水分入渗更加均匀且规律明显,可明显改变播前土

壤盐分的自然分布状态,有效淋洗并降低上层土壤盐分含量。有学者提出采用生育时期滴灌洗盐代替非生育时期漫灌洗盐,以提高盐分淋洗效果,降低次生盐渍风险<sup>[13]</sup>。Liu等<sup>[14]</sup>研究表明,生育时期内适当的淋洗可有效降低土壤盐分,并推荐在苗期和蕾期额外淋洗 $2\ 250 m^3 \cdot hm^{-2}$ 最佳,而Liu等<sup>[15]</sup>的研究中灌溉淋洗水量达到了 $4\ 500 m^3 \cdot hm^{-2}$ 。Wang等<sup>[16]</sup>研究表明,在盐碱复垦棉田的灌溉淋洗水量达到了 $5\ 000 m^3 \cdot hm^{-2}$ 。然而过高的灌水量会造成 $NO_3^- - N$ 的深层渗透。为了追求高产,往往投入大量的化肥,特别是氮肥。但盲目地提高氮肥的施用量,往往成效甚微。不仅降低了氮肥的利用效率,还会增加面源污染的风险。目前对于生育时期淋洗盐分的研究,多侧重于灌溉淋洗水量和淋洗时机。本文将从节水抑盐和提高氮肥的利用效率出发,进一步研究生育时期淋洗和施氮策略。以新疆膜下滴灌盐碱棉田为研究对象,以作物需水量( $ET_c$ )参照,设置不同的淋洗量和施氮量水平,采取生育时期内先淋洗盐分,后随水施肥的灌溉施肥模式。探究该模式对于棉花生长和水氮利用的影响,阐明盐碱棉田土壤盐分运移分布规律,进而提出合理的节水抑盐的灌溉施肥方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在新疆石河子市146团新疆天业节水有限公司高标准示范农田( $85^{\circ}56'58''E$ ,  $44^{\circ}33'03''N$ )进行。试验区位于准噶尔盆地南缘,玛纳斯河西岸,属典型温带大陆性气候。区域内光热资源丰富,降水稀少,蒸发强烈。年日照时长2 500 h,年降水量180~270 mm,年蒸发量1 000~1 500 mm。土壤田间持水率为32%。地下水埋深3 m。1 m土层平均含盐量 $14 g \cdot kg^{-1}$ ,灌溉水源来自于玛纳斯河支流,其水质为淡水。2023年棉花生育时期内降水量71.2 mm,日降水量、日最高温度和最低温度见图1。

1.2 试验设计

试验棉花品种为早中熟陆地棉‘新陆早’。2023 年 4 月 20 日播种,10 月 2 日收获。设置 3 个灌水水平(W1:1.0  $ET_c$ 、W2:1.25  $ET_c$ 、W3:1.5  $ET_c$ )和 4 个施肥量(N1:0  $kg \cdot hm^{-2}$ 、N2:100  $kg \cdot hm^{-2}$ 、N3:200  $kg \cdot hm^{-2}$ 、N4:300  $kg \cdot hm^{-2}$ )进行完全组合试验。灌水量根据单作物系数法计算所得,即  $ET_c = K_c \times ET_0$ ,其中  $K_c$  为棉花的作物系数,根据 FAO 推荐和 Xiao 等<sup>[17]</sup>的研究,确定棉花苗期、蕾期、花期、铃期的作物系数取值分别为 0.75、1.15、1.15、0.75。 $ET_0$ 为参考作物蒸发蒸腾量,由试验区小型气象站获取数据计算所得。 $P_2O_5$ 和  $K_2O$  施用总量分别为 100  $kg \cdot hm^{-2}$ 和 50  $kg \cdot hm^{-2}$ ,磷肥和钾肥每次施用时与氮肥一致,且各处理施用量一致。每次灌水量的 80%用于淋洗盐分,淋洗结束后随水施肥。在棉花的花期末进行打顶。试验区棉花采用当地的“一膜三管六行”宽窄行种植模式,膜宽 200 cm,膜间裸地间距 30 cm,棉花宽行行距 70 cm,窄行行距 10 cm,棉花株距 10 cm。试验小区面积 48.3  $m^2$ (6.9  $m \times 4.7 m$ ),为防止不同处理间相互影响,在每个小区间设置 2 m 的隔离带。灌水、施肥情况如表 1 所示。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤盐分 在棉花生育时期末对 0~100 cm 土层土壤进行取样。利用土钻分别在棉花宽行和膜间裸地处采样,将土壤装入铝盒封装,进行称量、烘干、研磨过筛,土水比按 1:5 混合振荡静置,经滤纸的过滤液,采用雷磁电导率仪(DDS-11A,上海雷磁仪器有限公司,中国)测定土壤电导率。根据电导率和土壤含盐量的拟合关系式<sup>[18]</sup>,计算土壤含盐量:

$$SC = 0.0059 \times EC \tag{1}$$

式中, $SC$  为土壤含盐量( $g \cdot kg^{-1}$ ); $EC$  为电导率( $\mu S \cdot cm^{-1}$ )。

1.3.2 株高、叶面积指数 在苗期、蕾期、花期和铃期选取长势均一的 3 株棉花,用卷尺测其自然高度。利用打孔称质量法测定苗期、蕾期、花期和铃期棉花的叶面积,并换算成叶面积指数:

$$LAI = S/A \tag{2}$$

式中, $LAI$  为叶面积指数; $S$  为小区内棉花植株叶面积之和( $m^2$ ); $A$  为小区面积( $m^2$ )。

1.3.3 干物质和产量 在棉花苗期、蕾期、花期、铃期,选取 3 株棉花植株。将植株按根、茎、叶、花、蕾和铃分离,在 105℃烘箱中杀青 1~2 h 后,用 75℃将样品烘至恒重,并用电子天平称量已烘干样品质量。

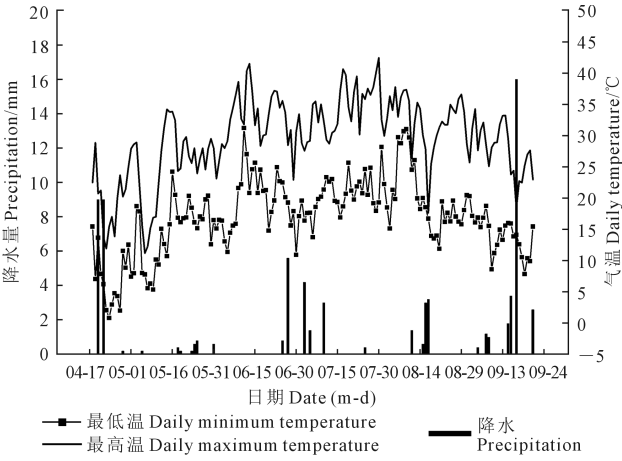


图 1 2023 年棉花全生育期降水量与气温  
Fig.1 Daily precipitation and temperature during the whole growth period of cotton in 2023

表 1 2023 年棉花全生育期内灌水施肥情况  
Table 1 Irrigation and fertilization treatment during the whole growth period of cotton in 2023

| 日期<br>Date (m-d) | 灌水量 Irrigation/mm |        |        | 施氮量 Nitrogen/( $kg \cdot hm^{-2}$ ) |     |     |     |
|------------------|-------------------|--------|--------|-------------------------------------|-----|-----|-----|
|                  | W1                | W2     | W3     | N1                                  | N2  | N3  | N4  |
| 06-11            | 37.50             | 46.88  | 56.25  | 0                                   | 0   | 0   | 0   |
| 06-22            | 30.59             | 38.23  | 45.88  | 0                                   | 10  | 20  | 30  |
| 07-02            | 28.57             | 35.71  | 42.86  | 0                                   | 10  | 20  | 30  |
| 07-11            | 25.67             | 32.09  | 38.51  | 0                                   | 10  | 20  | 30  |
| 07-18            | 49.45             | 61.81  | 74.18  | 0                                   | 20  | 40  | 60  |
| 07-26            | 44.28             | 55.35  | 66.42  | 0                                   | 20  | 40  | 60  |
| 08-03            | 49.25             | 61.56  | 73.88  | 0                                   | 20  | 40  | 60  |
| 08-10            | 26.87             | 33.59  | 40.31  | 0                                   | 10  | 20  | 30  |
| 08-19            | 16.24             | 20.30  | 24.36  | 0                                   | 0   | 0   | 0   |
| 小计 Total         | 308.42            | 385.52 | 462.65 | 0                                   | 100 | 200 | 300 |

吐絮期末,统计每个小区总铃数,并随机选 100 朵棉絮,计算单铃质量,估算籽棉产量。

以播种后天数为自变量,采用 Logistic 方程对棉花地上部干物质动态累积变化建立模型。

$$D = \frac{D_{\max}}{1 + ae^{-kt}} \tag{3}$$

式中, $D$  为  $t$  时间对应的干物质的积累量( $kg \cdot hm^{-2}$ ); $D_{\max}$ 为最大干物质累积量( $kg \cdot hm^{-2}$ ); $t$  为播种后天数(d); $a$  和  $k$  为待定参数。

对 Logistic 方程分别求一阶、二阶、三阶导数,得<sup>[19]</sup>:

$$T1 = (\ln a - 1.317)/k \tag{4}$$

$$T2 = (\ln a + 1.317)/k \tag{5}$$

$$T3 = (\ln a - 2.197)/k \tag{6}$$

$$T4 = (\ln a + 2.197)/k \tag{7}$$

$$\Delta T = T4 - T3 \tag{8}$$

$$V_{\max} = kD_{\max}/4 \tag{9}$$

式中, $T1$  为干物质质量快速累积开始时间(d); $T2$  为

干物质质量快速累积结束时间(d); $T_3$  为干物质有效累积开始时间(d); $T_4$  为干物质有效累积结束时间(d); $\Delta T$  为干物质有效累积持续时间(d); $V_{\max}$  为干物质最大累积速率。

1.3.4 水氮利用效率 灌溉水利用效率( $IWUE$ )、氮肥偏生产力( $NPFP$ )、氮素农学利用率( $NAUE$ )计算公式如下:

$IWUE=Y/I$  (10)

$NPFP=Y/N$  (11)

$NAUE=(Y_f-Y_0)/N$  (12)

式中, $IWUE$  为灌溉水利用效率( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $Y$  为籽棉产量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ); $I$  为生育时期内总灌溉水量( $\text{mm}$ ); $NPFP$  为氮肥偏生产力( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $NAUE$  为氮素农学利用率( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $N$  为氮肥的总投入量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ); $Y_f$  为施氮条件下的籽棉产量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ); $Y_0$  为未施氮条件下的籽棉产量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 26 对试验数据进行整理与分析,利用 ANOVA 和 LSD 对数据进行方差分析和多重检验。采用 Origin2021 Pro 软件作图。通过离差标准化,对灌水量和施氮量线性变换,使结果落到[0,1]区间,用无量纲的灌水量和施肥量的代码与因变量进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同淋洗量和灌溉施肥水平对土壤含盐量的影响

如图 2 所示,棉田生育时期末的土壤含盐量相比播种前明显下降。播种前 1 m 土层平均含盐量为  $13.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。W1、W2、W3 生育时期末的膜内 1 m 土层平均含盐量分别为  $10.13$ 、 $9.54$ 、 $8.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与播前土壤含盐量相比分别下降了  $9.30\%$ 、 $16.04\%$ 、 $24.84\%$ ;而膜间 1 m 土层平均含盐量分别为  $12.89$ 、

$13.15$ 、 $13.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与播前土壤含盐量相比,分别下降了  $7.58\%$ 、 $5.48\%$ 、 $2.83\%$ 。膜内与膜间土壤相比,膜间土壤含盐量大于膜内土壤。此外,膜内土壤含盐量随着灌水的增加逐渐减小,而膜间土壤含盐量随着灌水的增加而逐渐增加。

棉花生育时期末,膜内 0~40 cm 土层的盐分减少最明显。盐分主要分布在 40 cm 以下土层。对于膜间土壤而言,盐分主要集中在 0~10 cm 的土壤表层。同一灌水处理下,膜内土壤含盐量随着土层深度先减小后增大,而膜间土壤含盐量分布较为均匀。

2.2 不同淋洗量和灌溉施肥水平对棉花株高和叶面积指数的影响

如表 2 所示,除铃期外,灌水量和施氮量及水氮耦合作用对棉花株高均影响显著( $P<0.05$ )。在棉花生长前期,株高随时间推移表现出先快速增长后趋于稳定的规律,且在铃期达到最高。受封顶的影响,铃期棉花株高受氮素和水氮耦合作用影响不显著。

在苗期、蕾期和花期,棉花株高随着灌水量的增加而增加。与 W1 相比,W2 和 W3 的棉花株高分别增加了  $0.85\%$ ~ $11.48\%$  和  $0.55\%$ ~ $20.78\%$ 。在 W1 和 W2 处理中,棉花株高随着施氮量的增加而增加。随着灌水的增加,氮肥的促进作用先增大后减小。在 W1 处理中,随施氮量的增加,棉花株高增加了  $2.08\%$ ~ $11.50\%$ ,但在 W2 中,随施氮量的增加,棉花株高增加了  $2.98\%$ ~ $23.04\%$ 。而在 W3 中,棉花株高随着施氮的变化无明显差异。在铃期,W3N4 在打顶后株高仍显著增加。

如图 3 所示,除苗期外,灌水量和施氮量对棉花叶面积指数影响极显著( $P<0.001$ )且水氮耦合作用对棉花叶面积指数的影响极显著( $P<0.01$ )。叶面积指数随生育时期的推移均呈先增大后减小的趋势。除 W2N3 处理外,其余处理在花期达到峰值。

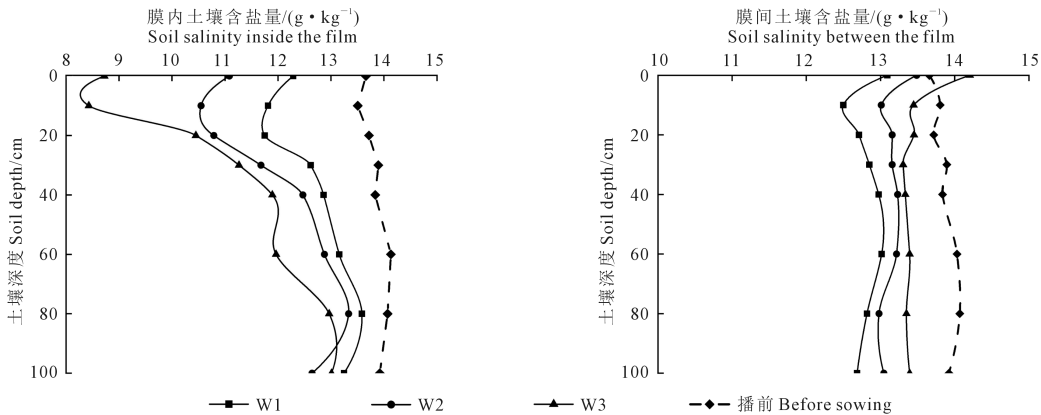


图 2 播前和生育时期末的膜内与膜间土壤含盐量  
Fig.2 Soil salinity inside and between the film at the end of cotton growth stage

表 2 不同处理下棉花各生育时期株高/cm  
Table 2 Plant height of cotton at different growth stages under different treatments

| 处理<br>Treatment | 苗期<br>Seeding | 蕾期<br>Budding | 花期<br>Blooming | 铃期<br>Bolling |
|-----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| W1N1            | 40.83f        | 51.33e        | 79.67f         | 99.33b        |
| W1N2            | 42.17e        | 55.17cde      | 81.33ef        | 105.67ab      |
| W1N3            | 42.37de       | 56.33bcd      | 85.00cd        | 102.00b       |
| W1N4            | 43.50c        | 60.67ab       | 88.83de        | 104.33ab      |
| W2N1            | 41.63ef       | 52.83de       | 87.33bcd       | 101.00b       |
| W2N2            | 41.87e        | 58.40bc       | 90.67bcd       | 99.00b        |
| W2N3            | 43.17cd       | 58.50bcd      | 92.00abc       | 96.67b        |
| W2N4            | 43.87c        | 65.00a        | 94.00ab        | 101.67ab      |
| W3N1            | 42.27de       | 62.00bcd      | 91.00a         | 103.00ab      |
| W3N2            | 46.00a        | 59.33b        | 93.33abc       | 99.67b        |
| W3N3            | 45.60ab       | 59.67ab       | 94.33ab        | 103.67ab      |
| W3N4            | 45.03b        | 58.00bc       | 95.17bcd       | 112.00a       |
| W               | 107.95***     | 6.56**        | 41.71***       | 3.56*         |
| N               | 56.53***      | 15.89***      | 3.80*          | 2.87NS        |
| W×N             | 10.34***      | 3.25*         | 3.58*          | 1.27NS        |

注:不同小写字母表示在同列数据处理间差异显著,显著性水平  $P<0.05$ 。方差分析中,W 表示灌溉水平,N 表示施氮量,\*、\*、\*、\*\*\* 分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平显著,NS 表示结果不显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between data treatments in the same column, with a significance level of  $P<0.05$ . In the analysis of variance, W 表示灌溉水平, N 表示施氮量, \*, \*\*, and \*\*\* represent significant differences at the level of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively. NS indicates insignificant difference. The same below.

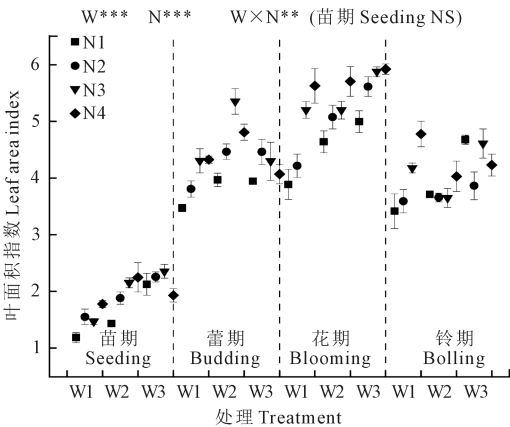


图 3 不同处理下棉花各生育时期的叶面积指数  
Fig.3 Leaf area index of cotton at different growth stages under different treatments

W2 灌溉水平下,叶面积指数整体高于 W1,且随着施氮量的增加,棉花叶面积指数显著增加。在苗期,叶面积指数随着灌水量的增加而增加,随着氮肥的变化不显著。在蕾期,W2 灌溉水平下,叶面积指数整体高于 W1,且随着施氮量的增加,棉花叶面积指数显著增加。其中,W2N3 和 W2N4 处于较高水平。在花期,棉花的叶面积指数随着灌水的增加而增加,与 W1 相比,W2 和 W3 的花期叶面积指

数分别平均增加了 10.25% 和 19.94%。在 W1 和 W2 中,叶面积指数随着施氮量的增加而增加。W3 灌溉水平下,叶面积指数处于较高水平,但随着施氮量的增加,叶面积指数变化不显著。在铃期,W1 和 W3 中的 N3 和 N4 仍处于较高水平。

2.3 不同淋洗量和灌溉施肥水平对地上部干物质积累的影响

用 Logistic 方程对棉花干物质累积的动态变化进行拟合。如表 3 所示,W1 和 W2 处理下,最大干物质积累量随着施氮量的增加而增加,其中 W2N3 和 W2N4 处理的干物质积累量最大,分别达到 23 883.6 kg·hm<sup>-2</sup>和 24 287.8 kg·hm<sup>-2</sup>。而 W3 处理下,随着施氮量的增加,最大干物质积累量先增大后减小。在 N3 和 N4 施氮水平下,随着灌水量的增加,最大干物质积累量呈先增大后减小趋势。此施氮水平下,W2 的最大干物质积累量较 W1 提高 2.14%~2.71%、较 W3 提高 5.09%~11.73%。

干物质快速积累开始时间出现在棉花的花期。W2 处理将干物质快速积累结束时间延后了 5 d 左右,干物质质量相比 W1 也有所提升。W3 处理将快速积累开始时间提前了 3~6 d,其中 W3N3 和 W3N4 处理将快速积累期缩短了 9 d,有效积累时间缩短了 16 d 左右。高水高氮使得生殖生长期提前,干物质积累速率快,但并未增加干物质的有效积累时间。如图 3 所示,W3N3 和 W3N4 处理的叶面积指数处于较高水平,但最终的干物质积累量少。说明叶片和棉铃间的营养竞争导致棉铃后期干物质积累缓慢。

2.4 不同淋洗量和灌溉施肥水平对籽棉产量和水氮利用效率的影响

灌水量和施氮量及两者交互作用对籽棉产量及其构成因素影响均极显著( $P<0.001$ )。如表 4 所示,同一灌溉水平下,增加施氮量可以增加棉花单株铃数,提高单铃重、增加干物质和籽棉产量。同一施氮水平下,随着灌水量的增加,单株棉铃数、干物质和籽棉产量先增大后减小。W2N4 处理的单株棉铃数、干物质和籽棉产量均为最优,而单铃重随着灌水的增加而增加(W3N4 处理除外)。

不同灌水量和施氮量及两者交互作用对棉花的水氮利用效率均具有极显著影响( $P<0.01$ )。灌溉水利用效率随着灌水的增加而减小,随着施氮量的增加而增加。W1 处理的灌溉水利用效率较 W2 提高 7.73%~19.17%、较 W3 提高 28.29%~60.42%。W1N4 处理灌溉水利用效率最高(2.31 kg·m<sup>-3</sup>)。氮肥偏生产力和氮素农学利用率均随灌水的增加先增大

后减小、随施氮量的增加而减小。W3N2 处理氮肥偏生产力最高(71.9 kg · kg<sup>-1</sup>)。W2N2 处理氮素农学利用率最高(9.10 kg · kg<sup>-1</sup>)。当水氮利用效率为最优时,其产量均不是最优。表明适量的灌水和施氮可以有效发挥肥效,促进棉铃生长发育,提高作物干物质积累量和产量,同时提高了灌溉水利用效率和氮肥偏生产力;而过量的水分不利于增产,而且降低了水氮利用效率,造成不必要的浪费。

2.5 水氮耦合对氮素农学利用率和产量的影响

由于籽棉产量和氮素利用效率无法同时达到最优水平,为优化生育时期淋洗水氮耦合方案,利

用灌水量( $x_1$ )和施氮量( $x_2$ )与籽棉产量和氮素农学利用率分别进行二元二次回归模拟(表 5), $R^2$ 分别为 0.887 和 0.869,表明预测产量和氮素农学利用率与实测值有较好的拟合度。为便于比较灌水量和施氮量对于产量和氮素农学利用率的影响,所建立方程中两因素编码都为无量纲线性编码,且偏回归系数已标准化。模型中回归系数绝对值的大小可直接反映各因素对产量和氮素农学利用率的影响程度<sup>[20]</sup>。结果表明,在灌水量和施氮量对于产量和氮素农学利用的影响中,均为灌水量影响大于施氮量。

表 3 不同处理下棉花地上部干物质累积量 Logistic 模型参数  
Table 3 Plant height and leaf area index of cotton at different growth stages under different treatments

| 处理<br>Treatment | 回归方程<br>Regression equation            | $D$<br>/(kg · hm <sup>-2</sup> ) | $T_1$<br>/d | $T_2$<br>/d | $\Delta T$ /d | $V_{\max}$<br>/(kg · hm <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> ) | $R^2$ |
|-----------------|----------------------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|---------------|-----------------------------------------------------------|-------|
| W1N1            | $y = 203.33 / (1 + 271.53e^{-0.058x})$ | 20332.5                          | 74          | 119         | 76            | 294.8                                                     | 0.981 |
| W1N2            | $y = 229.30 / (1 + 219.41e^{-0.054x})$ | 22930.2                          | 75          | 124         | 81            | 309.6                                                     | 0.984 |
| W1N3            | $y = 232.54 / (1 + 338.38e^{-0.062x})$ | 23254.2                          | 73          | 115         | 71            | 360.4                                                     | 0.992 |
| W1N4            | $y = 238.84 / (1 + 261.93e^{-0.059x})$ | 23778.7                          | 72          | 117         | 74            | 352.3                                                     | 0.991 |
| W2N1            | $y = 220.28 / (1 + 183.14e^{-0.053x})$ | 22028.3                          | 73          | 123         | 83            | 291.9                                                     | 0.986 |
| W2N2            | $y = 227.05 / (1 + 228.52e^{-0.056x})$ | 22704.9                          | 73          | 121         | 78            | 317.9                                                     | 0.986 |
| W2N3            | $y = 237.79 / (1 + 301.20e^{-0.059x})$ | 23883.6                          | 74          | 119         | 74            | 350.7                                                     | 0.992 |
| W2N4            | $y = 242.88 / (1 + 287.72e^{-0.059x})$ | 24287.8                          | 75          | 120         | 76            | 352.2                                                     | 0.992 |
| W3N1            | $y = 221.57 / (1 + 365.72e^{-0.062x})$ | 20280.6                          | 69          | 114         | 74            | 299.1                                                     | 0.994 |
| W3N2            | $y = 248.22 / (1 + 237.10e^{-0.056x})$ | 22469.2                          | 70          | 114         | 73            | 337.0                                                     | 0.992 |
| W3N3            | $y = 240.78 / (1 + 250.99e^{-0.057x})$ | 22727.6                          | 68          | 104         | 60            | 414.8                                                     | 0.994 |
| W3N4            | $y = 230.22 / (1 + 248.53e^{-0.060x})$ | 21737.4                          | 68          | 104         | 59            | 407.6                                                     | 0.986 |

注: $D$ 为拟合最大干物质累积量; $R^2$ 为相关系数; $T_1$ 为干物质量快速增累积开始时间; $T_2$ 为干物质量快速增累积结束时间; $\Delta T$ 为干物质有效累积时间; $V_{\max}$ 为干物质最大积累速率。

Note:  $D$  is the maximum dry matter accumulation;  $R^2$  is the coefficient of association;  $T_1$  is the beginning time of rapid accumulation of dry matter mass;  $T_2$  is the end time of rapid accumulation of dry matter mass;  $\Delta T$  is the effective accumulation time of dry matter;  $V_{\max}$  is the maximum accumulation rate of dry matter.

表 4 灌水量和施氮量对棉花产量及水氮利用效率的影响  
Table 4 Effects of irrigation and nitrogen application on cotton yield and water and nitrogen use efficiency

| 处理<br>Treatment | 单株棉铃数<br>Boll number<br>per plant | 单铃重<br>Individual boll<br>weight/g | 籽棉产量<br>Seed cotton yield<br>/(kg · hm <sup>-2</sup> ) | 干物质<br>Dry matter<br>/(kg · hm <sup>-2</sup> ) | 灌溉水利用效率<br>$WUE$<br>/(kg · m <sup>-3</sup> ) | 氮肥偏生产力<br>$NPFP$<br>/(kg · kg <sup>-1</sup> ) | 氮素农学利用率<br>$NAUE$<br>/(kg · kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| W1N1            | 6.0e                              | 3.93f                              | 5575.09g                                               | 18382.42e                                      | 1.81d                                        |                                               |                                                |
| W1N2            | 5.8e                              | 4.37de                             | 6015.72f                                               | 20204.33d                                      | 1.95c                                        | 60.2b                                         | 4.41cd                                         |
| W1N3            | 6.7c                              | 4.46b                              | 7092.60cd                                              | 21414.71c                                      | 2.30a                                        | 35.5d                                         | 7.59ab                                         |
| W1N4            | 6.7c                              | 4.45bcd                            | 7118.38c                                               | 21698.66bc                                     | 2.31a                                        | 23.7f                                         | 5.14bcd                                        |
| W2N1            | 5.9e                              | 4.38cde                            | 6179.46f                                               | 18171.46e                                      | 1.58e                                        |                                               |                                                |
| W2N2            | 6.7c                              | 4.48b                              | 7089.14cd                                              | 20934.84cd                                     | 1.81d                                        | 70.9a                                         | 9.10a                                          |
| W2N3            | 7.0b                              | 4.51b                              | 7529.98b                                               | 22571.15b                                      | 1.93c                                        | 37.6c                                         | 6.75abc                                        |
| W2N4            | 7.5a                              | 4.53b                              | 8114.36a                                               | 25310.74a                                      | 2.08b                                        | 27.0e                                         | 6.45abc                                        |
| W3N1            | 6.3d                              | 4.47b                              | 6697.93e                                               | 18765.52e                                      | 1.41f                                        |                                               |                                                |
| W3N2            | 6.5cd                             | 4.63a                              | 7192.37c                                               | 20760.35cd                                     | 1.52e                                        | 71.9a                                         | 4.94bcd                                        |
| W3N3            | 6.6cd                             | 4.69a                              | 7315.26bc                                              | 20714.33cd                                     | 1.54e                                        | 36.6cd                                        | 3.09de                                         |
| W3N4            | 6.6c                              | 4.32e                              | 6812.28de                                              | 18611.66e                                      | 1.44f                                        | 22.7f                                         | 0.38e                                          |
| W               | 37.7 * * *                        | 94.04 * * *                        | 98.69 * * *                                            | 40.89 * * *                                    | 806.50 * * *                                 | 104.5 * * *                                   | 27.02 * * *                                    |
| N               | 74.8 * * *                        | 82.97 * * *                        | 146.26 * * *                                           | 82.85 * * *                                    | 161.32 * * *                                 | 6607.2 * * *                                  | 6.64 * *                                       |
| W×N             | 16.3 * * *                        | 40.23 * * *                        | 31.31 * * *                                            | 19.12 * * *                                    | 37.04 * * *                                  | 56.1 * * *                                    | 5.02 * *                                       |

为进一步讨论单个因素的单独作用对籽棉产量和氮素农学利用率的效应,对回归方程进行降维处理,将两个因素中的一个设为零水平,可得灌水量与施氮量的单因素效应函数<sup>[21-22]</sup>。如图 4 所示,在一定范围内,两因素对籽棉产量和氮素农学利用率都存在正效应。但二者规律略有不同。对于籽棉产量而言,施氮增产效应大于灌水增产效应。在 1.0~1.5  $ET_c$  灌水量下,随着灌水量的增加,籽棉产量先增加后减少。当  $x_1=0.84$  时,即灌水量在 1.42  $ET_c$  处产量取得最大值 6 686.74  $kg \cdot hm^{-2}$ ;而在 0~300  $kg \cdot hm^{-2}$  施氮下,籽棉产量随施氮量的增加而增加。当  $x_2=1.0$  时,即施氮量为 300  $kg \cdot hm^{-2}$  处产量取得最大值 7 319.52  $kg \cdot hm^{-2}$ 。

对于棉花氮素农学利用率而言,当  $x<0.67$  时,灌水促进效应大于施氮促进效应;当  $x>0.67$  时,施氮促进效应大于灌水促进效应。随着灌水和施氮的增加,棉花氮素农学利用率先增大后减小,符合报酬递减的规律。当  $x_1=0.61$  时,即灌水量在 1.31  $ET_c$  处氮素农学利用率取得最大值 6.35  $kg \cdot kg^{-1}$ ;当  $x_2=0.74$  时,即施氮量在 222  $kg \cdot hm^{-2}$  处氮素农学利用率取得最大值 6.33  $kg \cdot kg^{-1}$ 。

由灌水量和施氮量交互效应三维关系曲面可知(图 5),当灌水量一定时,籽棉产量和氮素农学利用率随施氮量的增加呈先上升后下降的趋势;同样,当施氮量一定时,籽棉产量和氮素农学利用率随灌水量的增加呈先上升后下降的趋势。模拟结果

表 5 灌水量和施氮量对产量和氮素农学利用率的回归模拟  
Table 5 Regression equations of irrigation and nitrogen fertilizer application rate with yield and nitrogen agronomic use efficiency of cotton

| 因变量 Dependent variable | 回归方程 Regression equation                                                   | $R^2$ |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------|
| 产量 Seed cotton yield   | $y=5291.77+3343.255x_1+3331.591x_2-1572.2x_1x_2-2003.11x_1^2-1303.84x_2^2$ | 0.887 |
| 氮素农学利用率 NAUE           | $y=2.105+14.112x_1+11.437x_2-7.952x_1x_2-11.72x_1^2-7.748x_2^2$            | 0.869 |

注: $x_1$  和  $x_2$  分别为灌水量和施氮量。  
Note:  $x_1$  and  $x_2$  represent irrigation and nitrogen application rate, respectively.

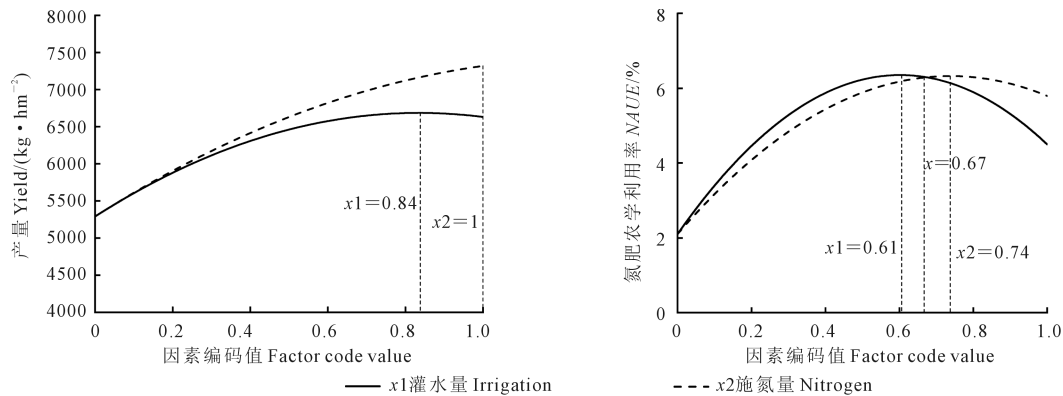


图 4 单因素效应对产量和氮肥农学利用率影响  
Fig.4 Effect of single factor on yield and agronomic use efficiency of nitrogen fertilizer

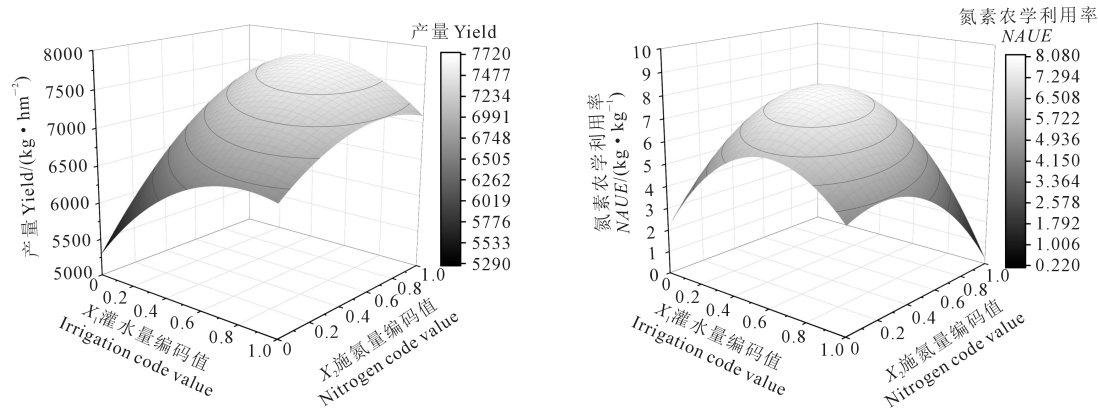


图 5 灌水量和施氮量交互效应三维关系曲面  
Fig.5 Three-dimensional relation surface of interaction effect between irrigation amount and nitrogen application amount

表明,最大籽棉产量为  $7\,710\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,对应灌水量为  $1.22\text{ ET}_c$ ,施氮量为  $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;最大氮素农学利用率为  $8.08\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对应灌水量为  $1.23\text{ ET}_c$ ,施氮量为  $156\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。当氮素农学利用率达到最大时,氮肥的投入量较低,产量无法达到较优水平,而 W2N3 有较高的产量和水氮利用效率,说明产量和氮素利用效率可以同时处于较高的水平。因此,以 W3N3 的产量为参照,即模拟产量最大值的 97%,为进一步提高氮素农学利用率,设置模拟氮素农学利用率最大值的 95%为优化条件(图 6),得到灌溉水平为  $1.14\sim 1.30\text{ ET}_c$  和施氮量为  $171\sim 228\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的方案。

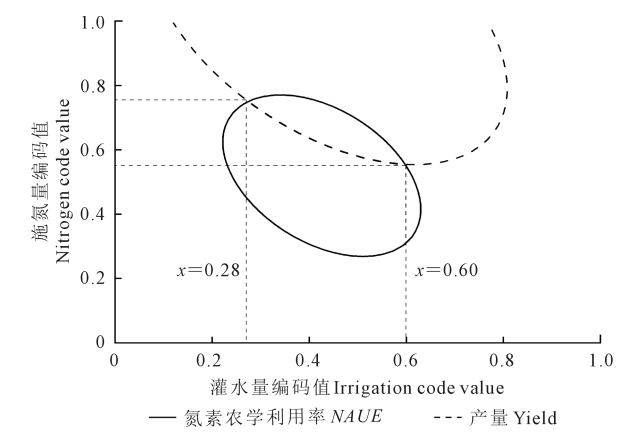


图 6 灌水量和施氮量对产量和氮肥农学利用效率的综合评价

Fig.6 Comprehensive evaluation of yield and agricultural use efficiency of nitrogen fertilizer by irrigation and nitrogen

### 3 讨 论

#### 3.1 生育时期淋洗下的水氮运筹可实现棉花高产,提高水氮利用效率

通过分析单因素的对籽棉产量和氮素农学利用率的效应,表明对于籽棉产量而言,随着灌水量的增加,籽棉产量先增加后减少。籽棉产量随施氮量的增加而增加。对于棉花氮素农学利用率而言,随着灌水和施氮的增加,氮素农学利用率先增大后减小。分析认为,当施氮量一定时,在灌溉量较低的情况下,氮通常在表层土壤中积累,不利于棉花根系的生长;随着灌水量的增加,土壤氮由于浸出效应而迁移到深层土壤,有利于棉花根部的吸收利用,然而过量的水分会导致养分淋失,造成资源浪费。此外,水的横向运动可能会导致氮素向塑料膜之间的裸露土地扩散,削弱棉花对氮肥的吸收<sup>[23-25]</sup>。这与尔晨等<sup>[26]</sup>研究结论一致,灌溉量主要影响根系主要分布区硝态氮的积累,而水氮耦合效应主要影响硝态氮向深层土壤淋溶。孙文涛等<sup>[27]</sup>在滴灌施肥条件下玉米的水肥耦合试验中也发现,适宜的水

氮均有增产作用,但在水氮施入不均时,单一因素的过量施入反而会起到抑制作用。淋洗量适当时,棉花根区的盐分降低,水氮之间耦合效应相互促进,有利于棉花生长。当淋洗量过大,过多的水分会影响土壤中的氮素水平,降低棉花氮素的利用效率。因此在满足棉花根区控盐的条件下,要充分考虑氮肥的流失和棉花对于水氮的利用效率。

新疆地区高温干燥和强烈蒸发导致土壤中的上升水流占据绝对优势。一些地区地下水的矿化度高且水位较低。盐分随上升水流被带至地表,导致盐分逐渐积累,特别是冬季的冻融作用和春季蒸发强烈,棉花田的盐分积累主要出现在非生育时期和出苗前期<sup>[28]</sup>。本研究表明,生育时期淋洗可以改善盐渍土中作物的生长状况,降低生育时期末的土壤含盐量,有效改善膜下滴灌积盐问题。而且生育时期淋洗作用贯穿于棉花生长的各阶段,在滴灌管附近提供了一个渗透势较低的区域,从而降低整个生育时期的渗透胁迫。这与 Chauhdary 等<sup>[29]</sup>研究结论一致,即根区的淋出盐分可以通过滴灌下的高频灌溉来完成,而不增加总的淋洗水量。此外,膜内土壤中的盐分随着灌水逐渐淋洗至更深土层,且灌水量越多土壤含盐量越少,即淋洗效果越好;膜间土壤缺少植株与塑料薄膜的覆盖,土壤表层蒸发强烈,土壤含盐量高,盐分会随着水分的运动而向湿润锋边缘移动。随着灌水量的增加,更多膜内的盐分被淋洗到膜间土壤中。这与王全九等<sup>[30]</sup>研究结果一致,说明生育时期滴灌淋洗会为棉花根区提供一个良好的土壤环境。随着生育时期淋洗的进行,这种良好环境会贯穿棉花生长的始终。所推荐灌溉水量为  $1.14\sim 1.30\text{ ET}_c$ ,施氮量为  $171\sim 228\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与张紫淇等<sup>[24]</sup>推荐在低、中盐土壤灌溉量为  $3\,600\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、施氮量为  $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的研究结果一致。姬清元等<sup>[18]</sup>研究也表明,在苗期、出芽期、开花期和结铃期使用  $3\,000\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$  的总淋水量时,土壤脱盐效果较好,能最大限度地提高棉花产量。相比冬灌和春灌,生育时期淋洗提高了灌溉水的利用效率,并节约了水资源,有效避免了洗盐效果差和返盐所致的次生盐碱化等问题。

#### 3.2 生育时期淋洗下水氮耦合对棉花植株生长和产量的影响

水和氮是农业生产的主要制约因素,特别是在盐碱化土壤中。水分胁迫会限制棉花根部发育,影响水分和养分的吸收,减缓植株生长,减少棉花产量,影响棉花品质。生育时期淋洗势必会提高灌水量,在淋洗盐分的同时也补充了土壤水分,避免了

缺水对于棉花生长的限制。氮素是棉花生长中最重要的养分,氮素可以增加冠层面积、增强光合作用、提升棉花产量和纤维质量,增强棉花对盐分和干旱等非生物胁迫的抗性。过量施氮不仅会使棉花过度发育,贪青晚熟,而且会造成资源浪费。本研究中 W3N4 处理过量的水氮供应导致棉花疯长,封顶后株高仍继续增加;花铃期过长,会导致蕾铃脱落严重,有效铃数少;吐絮期延后,容易出现坏铃,导致棉铃吐絮不完全影响籽棉产量。这与 Liu 等<sup>[31]</sup> 研究结果一致,即从种植到开花期间的过度灌溉会导致无端的营养生长,延迟成熟和过度刺激植物生长,加剧叶片与棉铃之间的营养竞争,最终降低棉花产量。适当的淋洗(W2N3 和 W2N4 处理)不但使得棉花根区土壤含盐量处于较低的水平,而且促进了氮肥利用效率,使得棉花株型合理,增加了棉花单株铃数、单铃重和籽棉产量。

盐碱棉田生育时期淋洗主要降低盐分的毒害,促进棉花对水氮吸收利用。通过影响棉花的营养生长和生殖生长,影响干物质的积累和籽棉产量。叶面积指数是衡量叶片生长和棉花长势的重要指标。棉花叶片的良好生长是光合作用的基础。95% 的作物干物质积累来自于光合作用产生的有机质,光合作用是干物质和作物产量形成的基础<sup>[32-33]</sup>,而作物的光合作用和干物质积累特性与土壤水分和养分有效性密切相关<sup>[34]</sup>。本研究表明,地上部干物质积累随着灌水量和施氮量的增加先增加后减小。适量的淋洗降低了棉花根区土壤含盐量,后随水施肥补充了根区的营养物质。良好的水氮环境促进了棉花蕾期、花期的叶片生长,增加了干物质的有效积累时长,增加生殖器官干物质的积累,提高籽棉产量。过量的灌水淋洗使得土壤中的水分过高。植株高大且叶片繁茂,加剧了叶片和棉铃的竞争。在生殖生长阶段,株间透气透光性差,影响了棉花的有效结铃数。在铃期,叶片生长占用了大量的资源,导致棉铃干物质累积速率缓慢,从而影响了籽棉产量<sup>[35]</sup>。因此要控制生育时期淋洗水量,在降低土壤含盐量的同时,不影响棉花正常的生长发育。注意运筹水肥、配合良好的化学调控手段、调节棉花株型、减少花期铃蕾的脱落、保证棉花生长后期干物质的积累,这是生育时期淋的关键,也是实现棉花高产稳产的途径之一<sup>[36]</sup>。

4 结 论

膜内土壤盐分随着灌水量的增加逐渐减小,盐分多聚集在 40 cm 土层以下;而膜间土壤盐分随着

灌水量的增加逐渐增大,且表层含盐量最多。

适量的生育时期淋洗(1.25 ET<sub>c</sub>)降低了棉花根区土壤的含盐量,后随水施肥补充了根区的营养物质。良好的水氮环境促进了棉花蕾期和花期营养器官的生长,增加了棉花有效结铃数和干物质的有效积累时长,促进了干物质的积累,进而提高了籽棉产量。

在盐碱棉田中,灌水量和施氮量与籽棉产量和氮素农学利用率之间符合二元二次回归模型。通过单因素分析发现,籽棉产量随着灌水量增大先增加后减少,随施氮量的增大而增加;而氮素农学利用率随着灌水量和施氮量的增大均呈先增加后减少的趋势。综合盐分淋洗效果和棉花的水氮耦合效应,推荐灌溉水量为 1.14~1.30 ET<sub>c</sub>、施氮量为 171~228 kg·hm<sup>-2</sup>。

参 考 文 献:

[1] DING B, CAO H, ZHANG J. Biofertilizer application improved cotton growth, nitrogen use efficiency, and yield in saline water drip-irrigated cotton fields in Xinjiang, China[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 117553: 205.

[2] LIU Y, HU Y, WEI C. Synergistic regulation of irrigation and drainage based on crop salt tolerance and leaching threshold[J]. Agricultural Water Management, 2024; 292: 108679.

[3] 康绍忠. 中国农业节水十年:成就、挑战及对策[J]. 中国水利, 2024, (10): 1-9.

KANG S Z. Ten years of agricultural water-saving in China: achievements, challenges and measures[J]. China Water Resources, 2024, (10): 1-9.

[4] 张蚌蚌, 王数, 石建初, 等. 新疆盐碱地膜下滴灌棉田可持续利用系统分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(11): 36-48.

ZHANG B B, WANG S, SHI J C, et al. Systematic analysis on saline-alkali land sustainable utilization of drip-irrigated cotton field under mulch in Xinjiang[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(11): 36-48.

[5] 吕殿青, 王全九, 王文焰, 等. 膜下滴灌水盐运移影响因素研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 794-801.

LV D Q, WANG Q J, WANG W Y, et al. Factors affecting soil water movement and solute transport for film drip irrigation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 794-801.

[6] 赵玉, 赵嘉滨, 范雯婧, 等. 基于作物水分亏缺指数和盐分淋洗系数的新疆棉田节水控盐优化方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 96-108.

ZHAO Y, ZHAO J B, FAN W J, et al. Optimizing the water-saving and salt-regulating method for cotton field in Xinjiang of China based on plant water deficit index and salt leaching coefficient[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(12): 96-108.

[7] 赵波, 王振华, 李文昊. 滴灌方式及定额对北疆冬灌棉田土壤水盐分布及次年棉花生长的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 139-148.

ZHAO B, WANG Z H, LI W H. Effects of winter drip irrigation mode

and quota on water and salt distribution in cotton field soil and cotton growth next year in northern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6): 139-148.

[8] 陈小芹, 王振华, 何新林, 等. 北疆棉田不同冬灌方式对土壤水分、盐分和温度分布的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 132-137.

CHEN X Q, WANG Z H, HE X L, et al. Effects of winter irrigation method on soil moisture, salt and temperature distribution in cotton fields of North Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 132-137.

[9] 李勇, 李林, 王峰, 等. 冬灌结合少量春灌条件下南疆棉田休闲期适宜冬灌定额研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 10-17.

LI Y, LI L, WANG F, et al. Suitable irrigation scheduling in winter-spring fallow period for leaching salt out of root zone of cotton in southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 10-17.

[10] YANG P N, ZIA-KHAN S, WEI G. Winter irrigation effects in cotton fields in arid inland irrigated areas in the North of the Tarimbasin, China[J]. Water, 2016, 8(2): 47.

[11] 王晓艳, 白云岗, 柴仲平, 等. 滴灌冬灌调控下干播湿出对棉田水盐分布及棉花出苗率的影响[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(4): 823-834.

WANG X Y, BAI Y G, CHAI Z P, et al. Study on the effect of dry seeding and wet emergence on the distribution of water and salt in cotton field and the emergence rate of cotton under the control of drip irrigation in winter[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(4): 823-834.

[12] 牟洪臣, 王振华, 陈小芹, 等. 北疆棉田不同冬灌方式下的土壤水、盐分布的特点及适宜灌水定额[J]. 华北农学报, 2017, 32(S1): 319-324.

MU H C, WANG Z H, CHEN X Q, et al. The characteristics of soil water and salinity distribution under different winter irrigation methods in the northern Xinjiang cotton fields are suitable for irrigation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(S1): 319-324.

[13] CHE Z, WANG J, LI J. Modeling strategies to balance salt leaching and nitrogen loss for drip irrigation with saline water in arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2022, 107943: 274.

[14] LIU X, YAN F, WU L. Leaching amount and timing modified the ionic composition of saline-alkaline soil and increased seed cotton yield under mulched drip irrigation[J]. Field Crops Research, 2023, 299: 108988.

[15] LIU K, LIAO H, HAO H. Water and nitrogen supply at spatially distinct locations improves cotton water productivity and nitrogen use efficiency and yield under drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2024, 296: 108808.

[16] WANG R S, KANG Y H, WAN S Q, et al. Influence of different amounts of irrigation water on salt leaching and cotton growth under drip irrigation in an arid and saline area[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110: 109-117.

[17] XIAO C, LI M, FAN J. Salt leaching with brackish water during growing season improves cotton growth and productivity, water use efficiency and soil sustainability in southern Xinjiang[J]. Water, 2021, 13(18): 2602.

[18] 姬清元, 张富仓, 肖超, 等. 土壤水分调控对棉花生长和土壤水盐分布的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 40-50, 74.

Ji Q Y, ZHANG F C, XIAO C, et al. Effects of soil water regulation on cotton growth and soil water-salt distribution[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(1): 40-50, 74.

[19] 谷晓博, 宋慧, 白东萍, 等. 优化缓释氮肥与尿素配比比例提高冬小麦产量和氮肥利用效率[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 56-65.

GU X B, SONG H, BAI D P, et al. Combined the application of slow-release N fertilizer and urea to improve the yield and N use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(11): 56-65.

[20] 李仙岳, 辛慈鑫, 史海滨, 等. 干旱盐渍化地区控释肥水氮耦合效应与制度优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 397-406.

LI X Y, XIN M X, SHI H B, et al. Coupling effect and system optimization of controlled-release fertilizer and water in arid salinized areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 397-406.

[21] 李仙岳, 丁宗江, 闫建文, 等. 沙区降解膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 261-270.

LI X Y, DING Z J, YAN J W, et al. Interaction effect and model of water and nitrogen under degradable film mulching in drip irrigated sandy farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 261-270.

[22] 何进宇, 田军仓. 膜下滴灌旱作水稻水肥耦合模型及组合方案优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 77-82.

HE J Y, TIAN J C. Model of coupling water with fertilizer and optimum combination scheme of rice cultivated in aerobic soil with drip irrigation under plastic film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(13): 77-82.

[23] KODUR S, SHRESTHA U B, MARASENI T N, et al. Environmental and economic impacts and trade-offs from simultaneous management of soil constraints, nitrogen and water[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 222: 960-970.

[24] 张紫淇, 杨丽莉, 何新林, 等. 滴灌水盐氮调控对棉田水肥盐运移及棉花产量的影响[J]. 干旱区研究, 2024, 41(5): 876-893.

ZHANG Z Q, YANG L L, HE X L, et al. Effects of the regulation of water-salt-nitrogen on water-salt nutrient transport and yield in drip-irrigated cotton fields[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(5): 876-893.

[25] WANG T, WANG Z, ZHANG J. An optimum combination of irrigation amount, irrigation water salinity and nitrogen application rate can improve cotton(for fiber)nitrogen uptake and final yield[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 187: 115386.

[26] 尔晨, 林涛, 夏文, 等. 灌溉定额和施氮量对机采棉田水分运移及硝态氮残留的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 497-510.

ER C, LIN T, XIA W, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water distribution and nitrate nitrogen residue of machine-harvested cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(2): 497-510.

[27] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 等. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 563-568.

SUN W T, SUN Z X, WANG C X, et al. Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(3): 563-568.

[28] 胡宏昌, 田富强, 张治, 等. 干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生

育时期淋洗和多年动态[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1037-1046.

HU H C, TIAN F Q, ZHANG Z, et al. Soil salt leaching in non-growth period and salinity dynamics under mulched drip irrigation in arid area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (9): 1037-1046.

[29] CHAUHDARY J N, BAKSH A, RAGAB R. Modeling corn growth and root zone salinity dynamics to improve irrigation and fertigation management under semi-arid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2020, 230: 105952.

[30] 王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2000, (4): 54-57.

WANG Q J, WANG W Y, LV D Q, et al. Water and salt transport features for salt-effected soil through drip irrigation under film [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, (4): 54-57.

[31] LIU Y X, SNIDER J L, BHATTARAI A. Economic penalties associated with irrigation during high rainfall years in the southeastern United States[J]. Agricultural Water Management, 2022, 272: 107825.

[32] DAI J L, LI W J, TANG W, et al. Manipulation of dry matter accumulation and partitioning with plant density in relation to yield stability of cotton under intensive management[J]. Field Crops Research, 2015, 180: 207-215.

[33] 韩美琪, 王振华, 朱艳, 等. 加气对西北旱区膜下滴灌棉花光合及水分利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(1): 64-70.

HAN M Q, WANG Z H, ZHU Y, et al. Effects of aeration on photosynthesis and water use efficiency of cotton under mulched drip irrigation in arid area of Northwest China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(1): 64-70.

[34] 张疏影, 张金珠, 王振华, 等. 不同水氮配施对北疆膜下滴灌棉花生长发育的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(6): 641-648.

ZHANG S Y, ZHANG J Z, WANG Z H, et al. Optimization of water and nitrogen application system for cotton yield under mulched drip irrigation in Northern Xinjiang[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(6): 641-648.

[35] KHAN A, WANG L S, ALI S, et al. Optimal planting density and sowing date can improve cotton yield by maintaining reproductive organ biomass and enhancing potassium uptake[J]. Field Crops Research, 2017, 214: 164-174.

[36] 高山, 张瑜, 王冀川. 膜下滴灌对南疆杂交棉兆丰 1 号群体光合作用和产量的影响[J]. 塔里木大学学报, 2011, 23(4): 46-53.

GAO S, ZHANG Y, WANG J C. Effects of drip irrigation under mulch on canopy apparent photosynthesis and yield structure of hybrid cotton ZhaoFeng 1 in South Xinjiang[J]. Journal of Tarim University, 2011, 23(4): 46-53.

(上接第 51 页)

[11] LEE S B, KIM H, KIM R J, et al. Overexpression of *Arabidopsis* MYB96 confers drought resistance in *Camelina sativa* via cuticular wax accumulation[J]. Plant Cell Reports, 2014, 33(9): 1535-1546.

[12] WANG R K, CAO Z H, HAO Y J. Overexpression of a R2R3 MYB gene *MdSIMYB1* increases tolerance to multiple stresses in transgenic tobacco and apples[J]. Physiologia Plantarum, 2014, 150(1): 76-87.

[13] COMINELLI E, GALBIATI M, VAVASSEUR A, et al. Aguard-cell-specific MYB transcription factor regulates stomatal movements and plant drought tolerance [J]. Current Biology, 2005, 15 (13): 1196-1200.

[14] LIANG Y K, DUBOS C, DODD I C, et al. AtMYB61, an R2R3-MYB transcription factor controlling stomatal aperture in *Arabidopsis thaliana*[J]. Current Biology, 2005, 15(13): 1201-1206.

[15] BHAVE N S, VELEY K M, NADEAU J A, et al. Too many mouths promotes cell fate progression in stomatal development of *Arabidopsis* stems[J]. Planta, 2009, 229(2): 357-367.

[16] XIE Z D, LI D M, WANG L J, et al. Role of the stomatal development regulators FLP/MYB88 in abiotic stress responses [J]. Plant Journal, 2010, 64(5): 731-739.

[17] LIU Q X, WANG F Y, LI P, et al. Overexpression of *Lolium multiflorum* LmMYB1 enhances drought tolerance in transgenic *Arabidopsis* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24 (20): 15280.

[18] GAO S F, XU J S, SONG W, et al. Overexpression of *BnMYB12-1* improves plant drought tolerance via the ABA-dependent pathway[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 207: 108293.

[19] LIU X, YANG X X, ZHANG B. Transcriptome analysis and functional identification of *GmMYB46* in soybean seedlings under salt stress [J]. PeerJ, 2021, 9: e12492.

[20] 倪知游, 梁东, 高帆, 等. 植物响应干旱的转录组学研究进展[J]. 分子植物育种, 2018, 16(8): 2460-2465.

NI Z Y, LIANG D, GAO F, et al. Advances in transcriptome research on plant response to drought[J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(8): 2460-2465.

[21] PARVAIZ A, SATYAWATI S. Salt stress and phyto-biochemical responses of plants [J]. Plant Soil and Environment, 2008, 54(3): 89-99.

[22] ZHANG Y, ZHU J, KHAN M, et al. Transcription factors ABF4 and ABR1 synergistically regulate amylase-mediated starch catabolism in drought tolerance[J]. Plant Physiology, 2023, 191(1): 591-609.

[23] TSUKAGOSHI H, BUSCH W, BENFEY P N. Transcriptional regulation of ROS controls transition from proliferation to differentiation in the root[J]. Cell, 2010, 143(4): 606-616.

[24] CHIAPPERO J, CAPELLARI L D, PALERMO T B, et al. Antioxidant status of medicinal and aromatic plants under the influence of growth promoting rhizobacteria and osmotic stress [J]. Industrial Crops and Products, 2021, 167: 113541.

[25] ZULFIQAR F, ASHRAF M. Antioxidants as modulators of arsenic-induced oxidative stress tolerance in plants:an overview[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 427: 127891.