植物营养与肥料学报 2013,19(4):858 -867
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0411

# 灌溉水盐度和施氮量对棉花产量和水氮利用的影响

闵 伟,侯振安*,冶 军,柳欣茹,李始龙,吴梦喆
(石河子大学农学院资源与环境科学系,新疆石河子 832003)

**摘要:** 淡水资源不足和盐渍化是干旱半干旱地区农业生产的重要限制因素,因此提高水、肥利用效率和作物产量,减少根区盐分积累和地下水污染风险是这些地区水分养分优化管理的重要目标。通过田间试验研究了滴灌条件下灌溉水盐度和施氮量对棉花产量和水、氮利用率的影响。试验设置灌溉水盐度和施氮量两个因素,灌溉水盐度(电导率,EC)设3个水平,为0.35(淡水)、4.61(微咸水)和8.04(咸水)dS/m,分别用SF、SM和SH表示;施氮(N)量设4个水平,为0、240、360和480 kg/hm$^2$,分别以N0、N1、N2和N3表示。研究结果表明,棉花干物质重、氮素吸收量和氮肥利用率受灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用的影响显著。咸水灌溉处理(SH)棉花干物质重、氮素吸收量、产量和氮肥表观利用率均显著降低,而微咸水灌溉(SM)对棉花氮素吸收量和氮肥表观利用率影响不大,但干物质重和产量有所降低。施氮肥可显著促进棉花生长,增加干物质重、氮素吸收量和产量,但随着灌溉水盐度的增加,其促进效应明显受到抑制。微咸水和咸水灌溉会导致水分渗漏增加、蒸散量降低,增施氮肥则可显著降低水分渗漏、增加蒸散量。微咸水灌溉水分利用率最高,其次是淡水灌溉,咸水灌溉最低;增施氮肥则可显著提高水分利用率。因此滴灌条件下,高盐度的咸水不宜用于灌溉。而短期的微咸水灌溉不会对棉花产量和水、氮利用率产生严重的负面影响;同时,合理的配施氮肥也有助于促进棉花生长,提高棉花产量和水分利用率。

**关键词:** 咸水滴灌;氮肥;棉花;水分利用率;氮肥利用率
**中图分类号:** S562.07 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)04-0858-10

# Effects of water salinity and nitrogen rate on yield, WUE and NUE of cotton under drip irrigation with saline water conditions

MIN Wei, HOU Zhen-an*, YE Jun, LIU Xin-ru, LI Shi-long, WU Meng-zhe
(*Department of Resources and Environmental Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China*)

**Abstract:** In arid and semi-arid regions, fresh water scarcity and salinity are the serious and chronic problem for agricultural production. The purposes of optimal water and nutrient management are to maximize water and fertilizer use efficiencies and crop production, and to minimize salt accumulation in root zone and groundwater pollution in these regions. In this study, field experiments were conducted to investigate effects of irrigation water salinity and N application rate on yield, water use efficiency (WUE) and nitrogen use efficiency (NUE) of cotton under drip irrigation conditions. The experimental design was a 3 × 4 factorial with three water salinity levels (EC 0.35, 4.61, and 8.04 dS/m; denoted as SF, SM and SH, respectively) and four N application rates (0, 240, 360, and 480 kg/ha; denoted as N0, N1, N2, and N3, respectively). Results show that the biomass, N uptake, and NUE of cotton are significantly affected by irrigation water salinity, N rate and their interactions and are decreased significantly by the saline water irrigation with the high salinity level (8.04 mS/cm). There are no significant differences for cotton N uptakes and NUEs between SM and SF treatments, while the biomass and yield of the SF treatment are higher than those of the SM treatment. The growth of cotton is promoted by the N fertilization and the

**收稿日期:** 2012-10-10 **接受日期:** 2013-04-16
**基金项目:** 国家973计划项目(2009CB825101-5);国家自然科学基金(30960210)资助。
**作者简介:** 闵伟(1986—),男,安徽太和人,博士研究生,主要从事土壤生物与养分调控研究。E-mail: minwei555@126.com
* 通信作者 E-mail: hzatyl@163.com

biomass, N uptake, and yield are increased, while those effects are decreased with irrigation water salinity level increasing. Water drainage is increased and evapotranspiration is reduced significantly with the increase of irrigation water salinity level, while water drainage is decreased and evapotranspiration is increased significantly with the increase of nitrogen rate. The treatment of SM has the highest WUE, and the treatment of SH has the lowest WUE. WUEs of three water salinity treatments are increased with nitrogen application rate increasing. Therefore, saline water with EC value more than 8 dS/m is not suitable for drip irrigation, but short period saline water irrigation with EC value less than 5 dS/m does not have a severe adverse effect on yield, NUE and WUE of cotton under drip irrigation conditions. Moreover, optional N application can promote cotton growth and increase yield and WUE of cotton.

**Key words:** drip irrigation with saline water; nitrogen fertilizer; cotton; WUE; NUE

水资源缺乏是全球性的问题,对农业生产有严重威胁。由于城市和工业用水的增加,干旱半干旱地区水资源日益紧张[1],有研究表明在干旱半干旱地区地表水和地下水普遍存在水质盐化趋势,因此在这些地区应用咸水微咸水灌溉已经成为必然[2-3]。世界上许多缺水国家和地区已大量使用咸水和微咸水进行农业灌溉[4-5]。棉花属于耐盐能力较强的一类经济作物,在新疆广泛种植,近年来新疆地区在棉花生产中大规模引进滴灌技术,取得了一定的经济效益。有研究表明应用咸水进行灌溉时,滴灌是较好的灌溉方式,可降低盐分对作物生长的影响,也可以减少灌溉水量[6-7]。与传统灌溉方式相比,膜下滴灌可以有效地控制灌水量和灌水频率,在很大程度上减少了水分的损耗,大大提高了水分利用效率。

氮肥在农业生产中是增加作物产量不可或缺的,氮肥的施用在粮食增产中的贡献率高达45%左右[8]。施用氮肥可以显著增加棉花干物质积累,协调营养生长和生殖生长,提高棉花的生物和经济产量[9-11]。合理的氮肥施用还可以减轻盐分对作物生长和产量的不利影响[12-14]。有研究表明,作物的干物质量随土壤盐度的增加而降低,但是随着施氮量的增加而增加[15]。Chen 等[16]探讨了不同土壤盐度和施氮量对棉花生长的影响,认为中低盐度条件下,增施氮肥可促进棉花生长和氮素吸收,但高盐度条件下施氮肥的作用不大。Zhang 等[17]研究了轻度和重度盐渍土壤不同氮肥施用量对棉花产量和氮肥利用率的影响,结果表明轻度盐渍土壤中等氮肥用量和重度盐渍土壤低氮肥用量棉花的产量和氮肥利用率最高。侯森等[18]研究显示,用微咸水灌溉时,充足的灌水和氮肥供应可显著提高棉花生物量和氮素吸收量;而咸水灌溉时,增加灌水量可促进棉花生长和氮素吸收,氮肥的作用较小。其原因主要是一方面高灌溉水盐度抑制了棉花生长和氮素吸收,另一方面咸水灌溉棉田蒸散量降低,而淋洗量显著增加,导致氮肥淋洗损失加剧[19]。因此,咸水和微咸水灌溉条件下,合理施用氮肥,提高作物产量和水、氮利用效率,减少氮肥淋洗是干旱区农业生产所面临的重要问题。但目前有关咸水滴灌条件下氮肥对棉花生长和水、氮利用效率等影响的相关研究还比较缺乏。本研究针对新疆干旱区微咸水灌溉的必然趋势和现实问题,研究在膜下滴灌的条件下,不同灌溉水盐度和施氮量对棉花生长及水、氮利用的影响,探讨不同灌溉水盐度和施氮量及其交互作用对棉花生长和氮素吸收的影响以及棉花氮肥高效利用途径,为干旱半干旱地区咸水资源的合理利用和提高肥料利用率提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验材料

试验在新疆石河子大学农学院试验站进行。土壤为灌耕灰漠土,土壤耕层基础理化性状为有机质含量 16.84 g/kg、全氮 1.08 g/kg、速效磷 25.86 mg/kg、速效钾 253 mg/kg、pH7.48;容重 1.33 g/cm$^3$、盐度 0.13 dS/m。供试棉花品种为新陆早 33 号。

### 1.2　试验设计

试验区于 2009 ~ 2010 年已进行了连续两年咸水灌溉试验,2011 年在前两年试验的基础上设置灌溉水盐度和施氮量两个试验因子,灌溉水盐度与前两年试验相同,设 3 个水平(以电导率表示,$EC_i$)为:0.35(淡水)、4.61(微咸水)、8.04 (咸水) dS/m,分别用 SF、SM、SH 表示。氮肥用量设置 4 个水平:0、240、360、480 kg/hm$^2$,分别用 N0、N1、N2、N3 表示,其中施 N 360 kg/hm$^2$ 为当地棉花大田生产推荐用量。共 12 个处理,每个处理重复 3 次,共 36 个试验

小区,小区面积25 $m^2$,随机区组设计,每个小区种植棉花约550株。每个试验小区中间设置微区试验,使用直径40 cm、高100 cm的铁桶在2009年试验开始前预先埋入土中,每个微区由一个滴头固定供水,在桶底部接出流管,用于收集土壤渗漏液。

灌溉水的盐度处理采用向淡水中加入等量的NaCl和$CaCl_2$配制而成,以模拟含$Cl^-$、$Na^+$、$Ca^{2+}$为主的矿化水。磷肥和钾肥作基肥在播种前一次性施入,施用量为$P_2O_5$ 105 kg/$hm^2$,$K_2O$ 60 kg/$hm^2$。试验中氮肥全部做追肥,按照棉花生长发育规律在棉花生育期间分5次随水滴施。

棉花种植采用覆膜栽培,一膜4行,行距配置为30 cm + 60 cm + 30 cm + 60 cm,株距10 cm,播种密度22.2 × $10^4$ plant/$hm^2$。灌溉方式为膜下滴灌,一膜两管,滴灌带间距90 cm。4月25号播种,采用"干播湿出"方式,即播种后滴出苗水。全生育期灌水9次,总灌溉量450 mm,其它栽培管理措施参照当地大田生产。

### 1.3 样品采集与测定

在播种前、每次灌水前及收获后分别采集0—100 cm土壤样品(每20 cm分一层),采用烘干法测定土壤含水量。每次灌溉后,收集微区的渗漏水,测定渗漏水体积,计算农田水分渗漏量。在棉花苗期、蕾期、花铃期、吐絮期采集植株地上部样品,每个小区取3株,按茎、叶、蕾铃不同器官分开,105 ℃杀青30 min后于70 ℃条件下烘干至恒重,称重,记录干物质重。烘干的植株样品经粉碎,过0.5 mm筛,备用。植株样品用$H_2SO_4$-$H_2O_2$消解,凯氏定氮仪测定植株全氮含量。棉花吐絮期测定棉花籽棉产量及产量构成因素,最后实收计产。

### 1.4 数据处理

氮肥表观利用率(%) =(施氮区氮积累量 - 空白区氮积累量)/施氮量 × 100[20-22]

棉田水分利用率(water use efficiency, WUE)计算公式为[23]: WUE = Y/ETc

$$ETc = I + P - D - \triangle W - V - R$$

式中: WUE为水分利用率(kg/$m^3$);Y为作物产量(kg/$hm^2$);ETc为农田蒸散量($m^3$/$hm^2$);I为灌水量;P为生育期有效降水量;D为农田水分渗漏量($m^3$/$hm^2$);△W表示农田土壤净贮水量($m^3$/$hm^2$),为播种前和收获后1 m土体贮水量之差;V为地下水毛细管水上升量;R为径流量。其中农田水分渗漏量和农田土壤净贮水量通过实测获得,地下水毛细管水上升量和径流量忽略不计。

试验数据采用SPSS 11.5进行灌溉水盐度和施氮量两因素的方差分析,处理间的多重比较采用Duncan法($P$ <0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 棉花干物质重

灌溉水盐度和施氮量对棉花茎干重有显著影响(表1),总体上,棉花茎干重随灌溉水盐度的增加显著降低($P$ <0.05),微咸水(SM)和咸水(SH)处理棉花茎干重较淡水(SF)分别减少了12.85%和37.42%;3个施氮处理(N1、N2、N3)茎干重显著高于不施氮处理(N0),但3个施氮处理之间差异不显著($P$ >0.05)。

棉花叶干重主要受灌溉水盐度的影响(表1),与茎干重相似,均随灌溉水盐度的增加显著降低($P$ <0.05),微咸水(SM)和咸水(SH)处理棉花叶干重较淡水(SF)处理分别减少了13.47%和40.57%。

棉花铃干重受灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用的影响显著(表1)。总体表现为铃干重随灌溉水盐度增加显著降低($P$ <0.05),SM和SH处理棉花铃干重较SF处理分别降低了12.99%和29.38%。增加施氮量可显著提高棉花铃干重($P$ <0.05),与不施氮处理(N0)相比,氮肥施用量由240 kg/$hm^2$增加到360和480 kg/$hm^2$,相应棉花铃干重则分别增加了26.66%、45.62%和64.80%。交互作用对棉花铃干重的影响表现为:淡水(SF)灌溉下,棉花铃干重随施氮量的增加而显著增加,表现为N3 > N2 > N1 > N0;而在微咸水(SM)和咸水(SH)灌溉下,两个高氮处理铃干重差异不显著,即N3、N2 > N1 > N0。

与棉花铃干重相似,灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用对棉花总干重的影响均达到显著性水平。灌溉水盐度对棉花总干重的影响表现为SF > SM > SH;施氮量的影响表现为N3 > N2 > N1 > N0。在淡水灌溉(SF)下,3个施氮处理(N1、N2、N3)总干重较不施氮(N0)增加了23.70%、32.12%、56.14%;但在微咸水(SM)和咸水(SH)灌溉下,N1、N2、N3处理棉花总干重仅较N0分别增加了15.71%、26.18%、31.30%和13.62%、27.69%、31.35%。表明在各灌溉水盐度处理下,增施氮肥均可提高棉花地上部干物质重,但随着灌溉水盐度的增加,棉花地上部干物质重显著降低,且氮肥的影响效应逐渐减弱。

表 1　不同处理对棉花植株干物质重的影响

Table 1　Effects of different treatments on dry matter weight of the cotton

| 处理 Treatment | | 干物质重 Dry matter weight of cotton (kg/hm$^2$) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 灌溉水盐度 Water salinity | 施氮量 Nitrogen rate | 茎 Stem | 叶 Leaf | 铃 Boll | 合计 Total |
| SF | N0 | 4484 cd | 4695 b | 7417 f | 16597 f |
| | N1 | 5516 ab | 4915 b | 10096 c | 20529 c |
| | N2 | 5873 a | 4948 b | 11104 b | 21926 b |
| | N3 | 6119 a | 5943 a | 13851 a | 25914 a |
| SM | N0 | 4299 cde | 4195 b | 6755 fg | 15250 g |
| | N1 | 4741 bc | 4269 b | 8633 e | 17644 e |
| | N2 | 4897 bc | 4535 b | 9807 cd | 19240 d |
| | N3 | 5227 abc | 4739 b | 10054 c | 20021 cd |
| SH | N0 | 2917 f | 3008 c | 5907 h | 11832 i |
| | N1 | 3458 ef | 3283 c | 6703 fg | 13444 h |
| | N2 | 3582 def | 3201 c | 8327 e | 15109 g |
| | N3 | 3806 def | 2684 c | 9053 de | 15542 g |
| 两因素分析($F$ 值)Two-way ANOVA($F$ value) | | | | | |
| 灌溉水盐度 Salinity(S) | | 51.84*** | 53.30*** | 116.31*** | 627.53*** |
| 施氮量 Nitrogen(N) | | 8.60*** | 1.46$^{ns}$ | 119.65*** | 225.37*** |
| 灌溉水盐度×施氮量 Interaction (S×N) | | 0.50$^{ns}$ | 1.90$^{ns}$ | 7.89*** | 18.30*** |

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level. *、**、*** 分别表示灌溉水盐度、施氮量和二者交互作用对棉花干物质重的影响达 5%、1% 和 0.1% 显著水平;ns 表示影响不显著 Indicate that dry matter weight of cotton plant is significantly influenced by water salinity level, nitrogen rate and their interaction at the 5%, 1%, and 0.1% levels, respectively; and ns means not significant.

## 2.2　棉花氮素吸收量

吐絮初期各处理棉花氮素积累情况见表 2。棉花吸收的氮素主要积累在铃中,茎中最少,叶的氮素积累量居中。

棉花茎、叶和铃的氮素吸收量受灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用的影响显著(表 2)。总体上,灌溉水盐度对棉花茎、叶氮素吸收量的影响表现为微咸水处理(SM)最高,其次是淡水(SF),咸水(SH)处理最低;施氮量的影响表现为施氮量越高棉花茎、叶的氮素吸收量越大。棉铃的氮素吸收量随灌溉水盐度的增加显著降低($P<0.05$),SM 和 SH 处理棉铃的氮素吸收量较 SF 处理分别降低了 8.47% 和 20.82%;增加施氮量可显著提高棉铃的氮吸收量,与不施氮肥(N0)相比,氮肥施用量由 240 kg/hm$^2$(N1)增加到 360 kg/hm$^2$(N2)和 480 kg/hm$^2$(N3),相应棉铃的氮素吸收量分别增加了 232.07%、195.88% 和 146.56%。

灌溉水盐度、施氮量及二者的交互作用对棉花氮素吸收总量的影响均达到极显著水平(表 2)。不同灌溉水盐度的影响表现为 SF、SM > SH;不同施氮量的影响表现为 N3 > N2 > N1 > N0。在 3 种灌溉水盐度处理(SF、SM、SH)下,随着氮肥用量的增加,棉花植株氮素吸收总量显著增加,但增加幅度逐渐降低。表明微咸水灌溉($EC_i$,4.61 mS/cm)对棉花氮素吸收影响不大,但咸水灌溉($EC_i$,8.04 mS/cm)后棉花氮素吸收量显著降低;施用氮肥可显著增加棉花的氮素吸收量,但随着灌溉水盐度的增加,氮肥的影响效应呈减弱趋势。

## 2.3　棉花产量及其构成因子

棉花的单株结铃数和单铃重主要受灌溉水盐度和施氮量的影响(表 3)。不同灌溉水盐度处理棉花单株结铃数和单铃重均表现为淡水处理(SF)最高,

显著高于微咸水(SM)和咸水(SH)处理($P<0.05$),但后二者间差异不显著($P>0.05$)。施氮量对棉花单株结铃数影响显著($P<0.05$),单株铃数随施氮量的增加而显著增加;3个施氮处理(N1、N2、N3)棉花单铃重显著高于不施氮处理(N0),但前三者之间差异不大($P>0.05$)。

**表2 不同处理对棉花植株氮素积累量的影响**

**Table 2 Nitrogen uptake of cotton plant under different treatments**

| 处理 Treatment | | 氮素吸收量 Nitrogen uptake(kg/hm$^2$) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 灌溉水盐度 Water salinity | 施氮量 Nitrogen rate | 茎 Stem | 叶 Leaf | 铃 Boll | 合计 Total |
| SF | N0 | 6.95 d | 19.46 i | 35.82 g | 62.23 ij |
| | N1 | 14.95 c | 50.25 h | 92.07 e | 157.25 g |
| | N2 | 19.31 a | 58.46 e | 120.47 b | 198.25 c |
| | N3 | 19.76 a | 65.71 c | 139.64 a | 225.11 a |
| SM | N0 | 7.18 d | 21.31 i | 36.63 g | 65.12 i |
| | N1 | 17.76 b | 52.91 g | 91.61 e | 162.28 f |
| | N2 | 19.99 a | 76.81 b | 106.93 c | 203.65 b |
| | N3 | 19.61 a | 83.92 a | 119.21 b | 222.74 a |
| SH | N0 | 5.77 e | 20.20 i | 35.30 g | 61.27 j |
| | N1 | 14.26 c | 49.43 h | 81.99 f | 145.68 h |
| | N2 | 15.47 c | 62.75 f | 91.39 e | 169.61 e |
| | N3 | 17.32 b | 68.45 d | 98.94 d | 184.70 d |
| 两因素分析($F$值)Two-way ANOVA($F$ value) | | | | | |
| 灌溉水盐度 Salinity(S) | | 55.09*** | 182.44*** | 931.73*** | 576.31*** |
| 施氮量 Nitrogen(N) | | 585.96*** | 2458.87*** | 9202.98*** | 11603.83*** |
| 灌溉水盐度×施氮量 Interaction (S×N) | | 5.71** | 36.18*** | 191.72*** | 86.09*** |

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level. *、**、***分别表示灌溉水盐度、施氮量和二者交互作用对棉花干物质重的影响达5%、1%和0.1%显著水平 Indicate that dry matter weight of cotton plant is significantly influenced by water salinity level, nitrogen rate and their interaction at the 5%, 1%, and 0.1% levels, respectively.

棉花籽棉产量受灌溉水盐度和施氮量影响显著,但不受二者交互作用的影响(表3)。棉花产量随灌溉水盐度的增加而显著降低($P<0.05$),微咸水(SM)和咸水(SH)处理棉花产量较淡水(SF)处理分别减少了8.08%和19.32%。不同施氮量处理棉花籽棉产量的大小顺序为N3、N2 > N1 > N0,3个施氮量处理(N1、N2、N3)棉花产量较不施氮(N0)分别增加了8.29%、13.73%和17.69%。结果表明,在各灌溉水盐度处理下,增施氮肥均可提高棉花产量,但是随着施氮量的增加棉花产量增幅不显著;随着灌溉水盐度的增加,棉花产量显著降低。在同一施氮量条件下,灌溉水盐度是限制棉花产量的主要因素。

### 2.4 氮肥表观利用率(NUE)

各处理棉花氮肥表观利用率(NUE)及两因素分析结果见图1。总体上,不同灌溉水盐度和施氮量处理棉花氮肥表观利用率在26%~41%之间,平均约为36%。棉花氮肥表观利用率受灌溉水盐度、施氮量及二者交互作用的影响显著($P<0.01$)。不同灌溉水盐度处理对棉花氮肥表观利用率的影响表现为微咸水(SM)灌溉处理氮肥表观利用率最高,但与淡水(SF)处理差异不显著,均显著高于咸水(SH)灌溉;在3个施氮量水平下(N1、N2、N3),SF和SM处理氮肥表观利用率平均较SH处理分别高

**表 3　不同处理对棉花产量及其构成因子的影响**

**Table 3　Yield and its components of cotton under different treatments**

| 处理 Treatment | | 产量及产量构成因子 Yield and yield components | | |
|---|---|---|---|---|
| 灌溉水盐度 Water salinity | 施氮量 Nitrogen rate | 单株结铃数(No./plant) Boll number | 单铃重(g) Boll weight | 籽棉产量(kg/hm$^2$) Yield |
| SF | N0 | 4.37 def | 5.13 cd | 4619 def |
| | N1 | 4.65 bcd | 5.76 abc | 5067 bc |
| | N2 | 5.00 b | 5.92 ab | 5322 ab |
| | N3 | 5.38 a | 6.07 a | 5544 a |
| SM | N0 | 4.21 ef | 4.91 d | 4313 fg |
| | N1 | 4.39 def | 5.26 bcd | 4750 cde |
| | N2 | 4.88 b | 5.30 bcd | 4881 cd |
| | N3 | 5.01 b | 5.36 bcd | 4947 cd |
| SH | N0 | 4.11 f | 4.82 d | 3810 h |
| | N1 | 4.51 cde | 4.97 d | 3980 gh |
| | N2 | 4.76 bc | 5.08 cd | 4287 fg |
| | N3 | 4.94 b | 5.10 cd | 4504 ef |
| 两因素分析($F$ 值)Two-way ANOVA($F$ value) | | | | |
| 灌溉水盐度 Salinity(S) | | 6.64*** | 12.49** | 71.46*** |
| 施氮量 Nitrogen(N) | | 36.14* | 4.09*** | 22.83*** |
| 灌溉水盐度×施氮量 Interaction(S×N) | | 0.55$^{ns}$ | 0.51$^{ns}$ | 0.65$^{ns}$ |

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level. *、**、*** 分别表示灌溉水盐度、施氮量和二者交互作用对棉花干物质重的影响达 5%、1% 和 0.1% 显著水平 Indicate that dry matter weight of cotton plant is significantly influenced by water salinity level, nitrogen rate and their interaction at the 5%, 1%, and 0.1% levels, respectively.

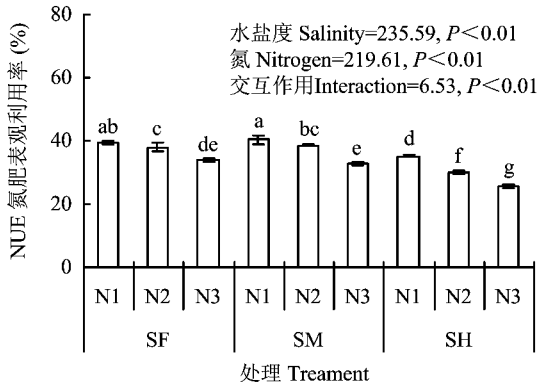


**图 1　不同灌溉水盐度和施氮量对棉花氮肥表观利用率的影响**

**Fig. 1　Nitrogen apparent use efficiency of cotton under different water salinity and nitrogen rate treatments**

[注(Note):柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at the 5% level.]

出 6.78 和 6.95 个百分点。施氮量的影响则表现为随着氮肥用量的增加氮肥表观利用率显著降低。

## 2.5　水分利用率

不同灌溉水盐度和施氮量处理对棉田水分渗漏、蒸散及水分利用率影响的两因素分析结果见表 4。水分渗漏量随灌溉水盐度增加而显著增加($P<0.05$),微咸水(SM)和咸水(SH)处理农田水分渗漏平均较淡水处理(SF)分别增加了 38.50% 和 57.37%。施氮量对水分渗漏量的影响表现为 N0 最高(平均为 39.01 m$^3$/hm$^2$),其次是 N1(30.99 m$^3$/hm$^2$)和 N2(29.76 m$^3$/hm$^2$),N3(25.55 m$^3$/hm$^2$)最低。淡水灌溉条件下(SF),水分渗漏量随氮肥用量的增加而显著降低,3 个施氮肥处理 N1、N2 和 N3 分别比不施氮肥(N0)处理的水分渗漏量降低了 14.52%、42.09% 和 51.30%。微咸水(SM)和咸水(SH)灌溉下,施氮肥可以显著降低水

分渗漏量,较不施氮肥降低了14.89%～28.41%;但不同施肥处理之间差异相对较小。总体上,棉田蒸散量表现为随着灌溉水盐度增加显著降低,随着氮肥用量增加而显著增加($P<0.05$)。微咸水(SM)和咸水(SH)处理的蒸散量平均较淡水处理(SF)分别降低了10.60%和15.95%。N1、N2和N3处理的蒸散量平均较N0处理分别增加了2.95%、5.85%和7.44%。

本研究中棉花的水分利用率为0.82～0.94 kg/m$^3$,其受灌溉水盐度、施氮量及其交互作用影响显著。微咸水灌溉(SM)水分利用率最高,其次是淡水灌溉(SF),咸水灌溉(SH)最低;SM和SF处理水分利用率平均较SH处理分别增加了7.39%和4.14%。水分利用率随着氮肥用量的增加而显著增加($P<0.05$),N1、N2和N3处理的水分利用率平均较N0处理分别增加了5.07%、7.20%和9.34%。淡水灌溉条件下(SF),3个施氮肥处理N1、N2和N3水分利用率均显著高于不施氮肥处理(N0),水分利用增加了7.63%～12.37%。微咸水(SM)灌溉下,氮肥用量由0 kg/hm$^2$(N0)增加240 kg/hm$^2$(N1)和360 kg/hm$^2$(N2),水分利用率分别增加了8.54%和10.40%,但继续增加至480 kg/hm$^2$(N3),水分利用率有所下降。咸水(SH)灌溉下,低施氮量(N1)对水分利用率影响不大,但中、高施氮量(N2、N3)可显著提高水分利用率,分别较不施氮肥处理(N0)增加了2.62%和7.86%。

**表4 灌溉水盐度和施氮量处理对棉田水分渗漏、蒸散及水分利用率的影响**

**Table 4 Effects of water salinity and nitrogen rate on water leaching, evapotranspiration and WUE in cotton fields**

| 灌溉水盐度 Water salinity | 施氮量 Nitrogen rate | 水分渗漏量(m$^3$/hm$^2$) Water leaching | 蒸散量(m$^3$/hm$^2$) Evapotranspiration | 水分利用率(kg/m$^3$) WUE |
|---|---|---|---|---|
| SF | N0 | 32.51 cd | 374.65 c | 0.82 e |
| | N1 | 27.79 e | 381.86 b | 0.88 c |
| | N2 | 18.83 f | 397.17 a | 0.89 c |
| | N3 | 15.83 g | 400.17 a | 0.92 b |
| SM | N0 | 39.34 b | 338.69 f | 0.85 d |
| | N1 | 30.23 de | 343.65 e | 0.92 b |
| | N2 | 33.48 c | 347.19 e | 0.94 a |
| | N3 | 28.49 e | 359.59 d | 0.92 b |
| SH | N0 | 45.18 a | 307.49 h | 0.83 e |
| | N1 | 34.95 bc | 325.35 g | 0.82 e |
| | N2 | 36.98 b | 336.16 f | 0.85 d |
| | N3 | 32.34 cd | 337.00 f | 0.89 c |
| 两因素分析($F$值)Two-way ANOVA($F$ value) | | | | |
| 灌溉水盐度 Salinity(S) | | 261.62*** | 5387.82*** | 471.00*** |
| 施氮量 Nitrogen(N) | | 128.72*** | 507.25*** | 399.85*** |
| 灌溉水盐度×施氮量 Interaction(S×N) | | 12.65*** | 29.06*** | 63.74*** |

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. *、**、***分别表示灌溉水盐度、施氮量和二者交互作用对棉花干物质重的影响达5%、1%和0.1%显著水平。Indicate that dry matter weight of cotton plant is significantly influenced by water salinity level, nitrogen rate and thier interaction at the 5%, 1%, and 0.1% levels, respectively.

## 3 讨论

淡水资源匮乏已经成为干旱半干旱地区农业发展的重要限制因素,咸水和微咸水资源的开发利用是缓解淡水资源不足的有效途径之一。合理利用咸水和微咸水灌溉,可有效缓解干旱年份或

旱季缺水的矛盾,减轻干旱导致的作物减量;对于某些耐盐作物而言,适宜的微咸水灌溉甚至还可以刺激作物生长,增加产量[24-25]。但是,咸水灌溉在为作物生长提供所需水分的同时也给土壤带入了过多的盐分,造成潜在盐渍化危险,如果利用不当,长期咸水灌溉会造成土壤盐分积累、渗透性降低,导致土地盐渍化和荒漠化、地下水污染等严重的生态环境问题[26-27]。咸水灌溉的两重性,决定了咸水灌溉的特殊性和复杂性。因此,咸水和微咸水灌溉对作物和土壤生态环境的影响备受关注。

有研究表明,随着土壤盐度水平的增加,植物干物质积累随之减少[28-32]。侯振安等[33]研究表明棉花籽棉产量和总干物质重随土壤盐度的增加而显著降低。王艳娜等[5]研究结果表明棉花干物质积累随灌溉水矿化度的升高而降低。本研究在前两年(2009 ~ 2010)咸水灌溉试验的基础上探讨不同灌溉水盐度和施氮量对棉花产量和水、氮利用效率的影响,结果表明随着灌溉水盐度的增加,棉花的干物质积累量和籽棉产量显著降低,增施氮肥可显著提高棉花干物质重和产量。这与上述研究结果基本一致。Jafric 等[34]认为在适宜棉花生长的范围内,盐分能促进棉花生长,增加棉花干物质积累量和产量;但盐分过量会明显抑制棉花生长,导致生物量降低[35]。但也有研究表明不同灌溉水盐度处理对棉花干物质积累无明显影响,产量随灌溉水盐度的增加有所降低,但差异不显著[36]。万书勤等[37]通过连续 3 年咸水滴灌试验认为,华北半湿润地区滴灌条件下,番茄缓苗阶段后用微咸水灌溉( <5 dS/m)对番茄的生长和产量是安全的。

氮素是作物生长所必须的大量营养元素之一,也是旱地土壤最为缺乏的营养元素。微咸水和咸水灌溉必然会影响作物对氮素的吸收和分配。一般氮素在棉花不同器官的分配规律为棉籽 > 叶片 > 茎 > 根,这与本研究结果相同。但 Chen 等[16]研究认为在高盐度条件下,棉花子粒的含氮量仅占棉花植株总含氮量的 8%,更多的氮素被积累在叶片和茎干中,高盐度导致棉花生长过程中营养失衡,氮素主要用来营养生长而不是生殖生长。本研究结果表明随着灌溉水盐度的增加,棉花的氮素吸收量呈现先稳定后减小的趋势,微咸水灌溉棉花氮素吸收有所增加,但与淡水灌溉差异不显著;咸水灌溉棉花氮素吸收量则显著降低。3 种灌溉水盐度下,增施氮肥均可以显著增加棉花氮素吸收量,但其促进效应随灌溉水盐度的增加而减弱。Van Hoorn 等[35]研究也认为,适当的盐分对植物的氮素吸收有促进作用,施用氮肥可以促进棉花生长和氮素吸收,缓解盐分对棉花生长和氮素养分吸收的负面影响。因此,在适度的盐度水平下,合理的施用氮肥有助于促进棉花生长,增加氮素吸收量;但在高盐度条件下,盐分对作物的抑制作用不会随着肥料的施用得到缓解[16]。

与其他作物相比,棉花生长期长,氮素需求量相对较大;在实际生产中倾向于增加施氮量以获得高产,从而降低了氮肥利用率,增加了生产成本;同时也加剧了氮素淋洗、挥发等对环境的污染风险[38-39]。本试验结果表明,不同处理滴灌棉花氮肥表观利用率为 26% ~ 41%,平均 36%;这与 Hou 等[40](28% ~ 49%,平均 38%)和王肖娟等[41](平均 36.53%)对滴灌棉田氮肥利用率的研究结果基本一致。本研究中微咸水灌溉氮肥表观利用率与淡水灌溉差异不显著,但咸水灌溉氮肥表观利用率显著降低。Chen 等[16]研究表明氮肥的表观利用率随着土壤盐度的增加而显著降低;但 Hou 等[40]研究发现低盐度土壤氮肥利用率最高,其次是非盐化土壤,高盐度土壤最低。

水分利用效率是衡量棉花用水效率的指标之一,要获得较好的经济效益,必须兼顾产量与水分利用率。本试验结果表明微咸水和咸水灌溉棉田水分渗漏量显著增加,蒸散量显著降低;增施氮肥可显著降低农田水分渗漏,提高蒸散量;淡水灌溉条件下增施氮肥的作用明显优于微咸水和咸水灌溉。也有研究表明水分渗漏量随灌溉水盐度的增加而显著增加[19],作物耗水量随着灌溉水矿化度的提高而降低[23,42]。国内外关于咸水灌溉或施氮量对作物水分利用率的影响开展了大量研究。万书勤等[42]研究表明,水分利用效率随着灌溉水盐分浓度的增大略微有增大的趋势。蒋静等[23]认为短期咸水灌溉条件下一定的水分亏缺能够提高 WUE,但是当土壤含盐量超过一定水平时,水分利用效率将随灌溉水矿化度的提高和灌溉时间的增加而显著降低。李玉义等[43]研究也认为增加氮肥等肥料用量,对提高棉花水分生产效率有一定作用。目前针对灌溉水盐度和施氮量二者对作物水分利用率影响的研究还较少。本研究表明微咸水灌溉的水分利用率最高,平均较淡水和咸水灌溉分别增加了 3.12% 和 7.39%;同时,增施氮肥也

可显著提高水分利用率。本研究中微咸水灌溉配合中等施氮量(N 360 kg/hm$^2$)棉田水分利用率最高。

咸水和微咸水滴灌条件下,棉花产量和水氮利用率受灌溉水盐度、施氮量等多种因素的影响,也和灌溉年限与土壤盐分积累状况密切相关。咸水灌溉会导致棉花产量和水氮利用率显著降低,不宜作为灌溉水源。但短期的微咸水灌溉不会对棉花产量和水、氮利用率产生严重的负面影响;同时,合理的施用氮肥有助于缓解盐分的危害,促进棉花生长,提高棉花产量和水分利用率。由于本研究试验区仅进行了3年咸水和微咸水滴灌田间试验,长期咸水和微咸水滴灌对干旱区棉花产量、水氮利用以及土壤生态环境的影响还有待进一步深入研究。

## 参考文献:


[1] Beltran J M. Irrigation with saline water: benefit and environmental impact[J]. Agric. Water Manag., 1999, 40: 183-194.

[2] Letey J, Feng G L. Dynamic versus steady- state approaches to evaluate irrigation management of saline waters[J]. Agric. Water Manag., 2007, 91: 1-10.

[3] Assouline S, Moller M, Cohen S *et al.* Soil - plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: bell pepper case study[J]. J. Soil Sci. Soc. Am., 2006, 70: 1556-1568.

[4] Boyko H. Saline irrigation for agriculture and forestry[M]. The Hague: Dr. W June. N. V. Publishers, 1968. 325.

[5] 王艳娜,侯振安,龚江,等. 咸水灌溉对土壤盐分分布、棉花生长和产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2007, 25(2): 158-162.
Wang Y N, Hou Z A, Gong J *et al.* The effect of drip irrigation with saline water to the distribution of salt and development and yield of cotton[J]. J. Shihezi Univ. (Nat. Sci.), 2007, 25(2): 158-162.

[6] Oster J D. Irrigation with poor quality water[J]. Agric. Water Manag., 1994, 25(3): 271-297.

[7] 王全九,徐益敏,王金栋,等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4): 73-77.
Wang Q J, Xu Y M, Wang J D *et al.* Application of saline and slight saline water for farmland irrigation[J]. Irrig. Drain., 2002, 21(4): 73-77.

[8] 林葆,林继雄,李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报, 1994, 1(1): 6-18.
Lin B, Lin J X, Li J K. The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1994, 1(1): 6-18.

[9] 成灿土,邬飞波,黄一青,等. 氮素营养对短季棉干物质生产与分配及纤维品质的影响[J]. 浙江农业学报, 1999, 11(1): 5-9.
Cheng C T, Wu F B, Huang Y Q *et al.* Effects of nitrogen on fiber quality dry matter production and distribution in short season cotton[J]. Acta Agric. Zhejiangensis, 1999, 11(1): 5-9.

[10] 张培通,徐立华,杨长琴,杨德银. 施氮量对科棉3号干物质积累及分配、产量和纤维品质的效应[J]. 棉花学报, 2008, 20(4): 295-299.
Zhang P T, Xu L H, Yang C Q, Yang D Y. Effect of cultivation approach on fiber quality of high quality cotton[J]. Cott. Sci., 2008, 20(4): 295-299.

[11] 郭金强,危常州,侯振安,李俊华. 施氮量对膜下滴灌棉花氮素吸收、积累及其产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(4): 691-694.
Guo J Q, Wei C Z, Hou Z A, Li J H. Effect of N rates on n uptake, accumulation and yield of cotton with drip irrigation under membrane[J]. Xinjiang Agric. Sci., 2008, 45(4): 691-694.

[12] Shen D, Shen Q, Liang Y. Effect of nitrogen on the growth and photosynthetic activity of salt-stressed barley[J]. Plant Nutr., 1994, 17: 787-799.

[13] Albassam B A. Effect of nitrate nutrition on growth and nitrogen assimilation of pearl millet exposed to sodium chloride stress[J]. Plant Nutr., 2001, 24: 1325-1335.

[14] Flores P, Carvajal M, Cerda A *et al.* Salinity and ammonium/nitrate interactions on tomato plant development, nutrition, and metabolites[J]. Plant Nutr., 2001, 24:1561-1573.

[15] Homaee M, Feddes R A, Dirksen C A. Macroscopic water extraction model for nonuniform transient salinity and water stress[J]. Soil Sci. Soc. America, 2002, 66: 1764-1772.

[16] Chen W, Hou Z, Wu L *et al.* Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment[J]. Plant Soil, 2010, 326: 61-73.

[17] Zhang D M, Li W J, Xin C S, Tang W *et al.* Lint yield and nitrogen use efficiency of field-grown cotton vary with soil salinity and nitrogen application rate[J]. Field Crops Res., 2012, 138: 63-70.

[18] 侯森,侯振安,冶军,等. 咸水滴灌条件下棉花生长和氮素吸收对水氮的响应[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(9): 1882-1887.
Hou S, Hou Z A, Ye J *et al.* Cotton growth and nitrogen uptake in response to rates of water and nitrogen under drip irrigation with saline water[J]. Xinjiang Agric. Sci., 2010, 47(9): 1882-1887.

[19] 朱龙辉,马丽娟,刘小玉,等. 咸水滴灌棉田土壤水、盐和硝态氮分布与淋洗[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2011, 29(6): 662-669.
Zhu L H, Ma L J, Liu X Y *et al.* Leaching and distributions of soil water, salt and nitrate in cotton field under drip irrigation with saline water[J]. J. Shihezi Univ. (Nat. Sci.), 2011, 29(6): 662-669.

[20] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production[J]. Plant Soil, 1981, 58: 177-204.

[21] Cassman K G, Peng S, Olk D C *et al.* Opportunities for increased nitrogen use efficiency form improved resource management in irrigated rice systems[J]. Field Crops Res., 1998, 56(1/2): 7-39.

[22] Fageria N K, Baligar V C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency[J]. J. Plant Nutr., 2003, 26: 1315-1333.

[23] 蒋静,冯绍元,王永胜,翟再林. 灌溉水量和水质对土壤水盐分布及春玉米耗水的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43 (11): 2270-2279.
Jiang J, Feng S Y, Wang Y S, Zhai Z L. Effect on water-salt distribution and evapotranspiration of spring maize under different water quantities and qualities[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43 (11): 2270-2279.

[24] Ashraf M. Salt tolerance of cotton: some new advances[J]. Crit. Rev. Plant Sci., 2002, 21: 1-30.

[25] Hou Z, Chen W, Xiao L *et al.* Effects of salinity and fertigation practice on cotton yield and $^{15}N$ recovery[J]. Agric. Water Manag., 2009, 96: 1483-1489.

[26] 张余良,陆文龙,张伟,李悦. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (4): 969-973.
Zhang Y L, Lu W L, Zhang W, Li Y. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2006, 25(4): 969-973.

[27] Xiao Z H, Wan H F, Zheng L F. Effect of irrigation water quality on soil chemical characteristics and crop growth[J]. Acta Pedol. Sin., 1997, 34(3): 272-285.

[28] Abd-Ella M K, Shalaby E E. Cotton response to salinity and different potassium-sodium ratio in irrigation water[J]. Agron. Crop Sci., 1993, 170: 25-31.

[29] Leidi E O, Saiz J F. Is salinity tolerance related to Na accumulation in upland cotton seedlings[J]. Plant Soil, 1997, 190: 67-75.

[30] Qadir M, Shams M. Some agronomic and physiological aspects of salt tolerance in cotton[J]. J. Agron. Crop Sci., 1997, 179: 101-106.

[31] Ashraf M, Ahmad S. Exploitation of intra-specific genetic variation for improvement of salt (NaCl) tolerance in upland cotton[J]. Hereditas, 1999, 131: 253-256.

[32] Basal H, Hemphill J K, Smith C W. Shoot and root characteristics of converted race stocks accesions of upland cotton grown under salt stress conditions[J]. Am. J. Plant Physiol., 2006, 1(1): 99-106.

[33] 侯振安,李品芳,龚江,等. 膜下滴灌条件下不同土壤盐度和施氮量对棉花生长的影响[J]. 土壤通报, 2007, 4 (38): 681-686.
Hou Z A, Li P F, Gong J *et al.* Effect of different soil salinity levels and application rates of nitrogen on the growth of cotton under drip irrigation[J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 4(38): 681-686.

[34] Jafria Z, Ahmad. Plant growth and ionic distribution in cotton under saline environment[J]. Pak. J. Bot., 1994, 26(1): 105-114.

[35] Van Hoorn J W, Katerjib N, Hamdyc A, Mastrorilli M. Effect of salinity on yield and nitrogen uptake of four grain legumes and on biological nitrogen contribution from the soil[J]. Agric. Water Manag., 2001, 51: 87-98.

[36] 阮明艳,张富仓,侯振安. 咸水膜下滴灌对棉花生长和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2007, (5): 14-16.
Ruan M Y, Zhang F C, Hou Z A. Study on influence of drip irrigation under film with saline water on growth and yield of cotton[J]. Water Sav. Irrig., 2007, (5): 14-16.

[37] 万书勤,康跃虎,王丹,刘士平. 华北半湿润地区微咸水滴灌对番茄生长和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 30-35.
Wan S Q, Kang Y H, Wang D, Liu S P. Effect of saline water on tomato growth and yield by drip irrigation in semi-humid regions of north China[J]. Trans. CSAE, 2008, 24(8): 30-35.

[38] Sawan Z M, Mohamed A A, Sakr R A. Effect of linetin concen-tration and methods of application on seed germinayion yield com-ponents, yield and fiber properties of the Egyptian cotton[J]. Environ. Exper. Bot., 2000, 44: 59-68.

[39] Blaise D, Singh J V, Bonde A N. Effects of farmyard manure and fertilizers on yield, fibre quality and nutrient balance of rainfed cotton[J]. Bioresou. Techn., 2005, 96: 345-349.

[40] Hou Z, Chen W, Xiao L *et al.* Effects of salinity and fertigation practice on cotton yield and $^{15}N$ recovery[J]. Agric. Water Manag., 2009, 96: 1483-1489.

[41] 王肖娟,危常州,张君,等. 灌溉方式和施氮量对棉田氮肥利用率及损失的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23 (10): 2751-2758.
Wang X J, Wei C Z, Zhang J *et al.* Effects of irrigation mode and N application rate on cotton field fertilizer N use efficiency and N losses[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(10): 2751-2758.

[42] 万书勤,康跃虎,王丹,刘士平. 华北半湿润地区微咸水滴灌番茄耗水量和土壤盐分变化[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 29-33.
Wan S Q, Kang Y H, Wang D, Liu S P. Effects of drip irrigation with saline water on tomato water use and soil salinity in semi-humid regions of North China[J]. Trans. CSAE, 2008, 24(10): 29-33.

[43] 李玉义,逄焕成,张海林,等. 新疆石河子垦区棉田水分生产效率变化动态及其潜力[J]. 资源科学, 2008, 30 (1): 72-77.
Li Y Y, Pang H C, Zhang H L *et al.* Dynamics and potential of water use efficiency of cotton production in Shihezi Cultivated Area of Xinjiang[J]. Resou. Sci., 2008, 30(1): 72-77.